

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет робототехніки та приладобудування

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
Юрій КИРИЧУК
«___» _____ 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою

«Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»
спеціальності 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Автономна система моніторингу та оптимізації енергоспоживання в
смарт-грід з ШІ агентами»

Виконав: студент IV курсу, групи ПК-21

Гуславський Денис Володимирович _____

Керівник:

проф., д-р техн. наук Протасов А. Г. _____

Рецензент:

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність – 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в
приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Анатолій ПРОТАСОВ
«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту
Гуславському Денису Володимировичу

1. Тема проєкту: «Автономна система моніторингу та оптимізації енергоспоживання в смарт-грід з ШІ агентами», керівник проєкту Протасов Анатолій Георгійович, проф., д-р техн. наук, затверджені наказом по університету від «___» _____ 2026 р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту: «___» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту: розробити автономну систему моніторингу та оптимізації енергоспоживання локальної смарт-грід мікромережі з двома інтелектуальними вузлами обліку. Номінальні параметри мережі: однофазна, напруга 230 В, частота 50 Гц, максимальний струм вузла 100 А, повна потужність ділянки до 23 кВ·А. Похибки вимірювання: напруги та струму $\pm 0,5 \%$, активної потужності $\pm 1,0 \%$ (клас точності 1,0). Спільний накопичувач енергії: ємність 5 кВт·год, потужність заряду/розряду 2 кВт; фотоелектричне джерело 3 кВт. Протоколи обміну: MQTT (між вузлами та моделлю), Modbus RTU (зв'язок із датчиком). Період опитування та керування 1 с, горизонт прогнозу навантаження 1 год.

4. Зміст пояснювальної записки: вступ; огляд і аналіз існуючих систем обліку та балансування енергоспоживання у смарт-грід мережах; теоретичні засади розробки системи; інженерна розробка системи (технічне завдання, структурна, функціональна та принципова схеми, інженерні розрахунки, алгоритми роботи); комп'ютерне

моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink; висновки; перелік посилань; додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо): структурна схема системи (СхС); функціональна схема інтелектуального вузла (СхФ); принципова електрична схема вузла (СхЕ); схема алгоритму роботи вузла (СхА); плакат результатів моделювання (СхІ) — усього 5 аркушів формату А1.

6. Консультанти розділів проєкту:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата

7. Дата видачі завдання: «__» _____ 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів	Примітка
1	Аналіз літератури та існуючих рішень, постановка задачі	лютий 2026	виконано
2	Розробка структурної та функціональної схем системи	лютий–березень 2026	виконано
3	Розробка принципової схеми, вибір елементної бази	березень 2026	виконано
4	Інженерні розрахунки вузлів системи	березень–квітень 2026	виконано
5	Розробка алгоритмів роботи та координації вузлів	квітень 2026	виконано
6	Побудова імітаційної моделі в MATLAB/Simulink	квітень–травень 2026	виконано
7	Моделювання за сценаріями та аналіз результатів	травень 2026	виконано
8	Реалізація допоміжного ІІІ-агента та ІІІ-стенду з фізичним вузлом	травень–червень 2026	виконано
9	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	червень 2026	виконано
10	Попередній захист та захист перед екзаменаційною комісією	червень 2026	—

Студент _____
Керівник проєкту _____

Денис ГУСЛАВСЬКИЙ
Анатолій ПРОТАСОВ

АНОТАЦІЯ

Об'єктом розроблення є процеси моніторингу, обліку та балансування енергоспоживання у локальній смарт-грід мікромережі з розподіленими інтелектуальними вузлами.

Метою роботи є розроблення автономної системи моніторингу та оптимізації енергоспоживання смарт-грід мікромережі, у якій класичну автоматику доповнено допоміжним інтелектуальним агентом прогнозування навантаження.

У роботі проаналізовано сучасний стан систем моніторингу та керування мікромережами, обґрунтовано двовузлову архітектуру системи з інтелектуальними вузлами обліку, спільним накопичувачем енергії та фотоелектричним джерелом, виконано інженерні розрахунки вузлів, розроблено керуючу логіку у вигляді скінченного автомата з пріоритетним розвантаженням, а також спроектовано допоміжний агент прогнозування на основі методу подвійного експоненційного згладжування.

Застосовано методи імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink зі Stateflow, скінченно-автоматного керування, експоненційного згладжування, а також апаратно-програмного моделювання (Hardware-in-the-Loop) із застосуванням протоколів MQTT та Modbus.

Результати моделювання за п'ятьма сценаріями підтверджують працездатність системи в усіх режимах роботи — від штатного до аварійного; часові показники узгоджуються з інженерними розрахунками автономії накопичувача.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування запропонованих рішень для локальних громадських мікромереж і систем вуличного освітлення з резервуванням живлення критичних споживачів під час відключень.

ABSTRACT

The object of the work is the monitoring, metering and balancing of energy consumption in a local smart-grid microgrid with distributed intelligent nodes.

The aim of the work is to develop an autonomous system for monitoring and optimization of energy consumption in a smart-grid microgrid, in which classical automation is complemented by an auxiliary AI agent for load forecasting.

The work analyses the current state of microgrid monitoring and control systems, substantiates a two-node architecture with intelligent metering nodes, a shared energy storage and a photovoltaic source, performs engineering calculations of the nodes, develops the control logic as a finite-state machine with priority load shedding, and designs an auxiliary forecasting agent based on double exponential smoothing.

Methods of simulation modelling in MATLAB/Simulink with Stateflow, finite-state control, exponential smoothing, and Hardware-in-the-Loop modelling using the MQTT and Modbus protocols are applied.

Simulation results across five scenarios confirm the operability of the system in all operating modes, from normal to emergency; the timing characteristics agree with the engineering calculations of the storage autonomy.

The practical value of the work lies in the applicability of the proposed solutions to local community microgrids and street-lighting systems with backup power for critical loads during outages.

Перелік умовних позначень, скорочень і термінів

ШІ — штучний інтелект;

СЕС — сонячна електростанція (фотоелектричне джерело);

АКБ — акумуляторна батарея (накопичувач енергії);

SOC — стан заряду накопичувача (State of Charge);

PV — фотоелектричний (Photovoltaic);

НІЛ — апаратно-програмне моделювання (Hardware-in-the-Loop);

MQTT — протокол телеметрії (Message Queuing Telemetry Transport);

UDP — протокол передавання дейтаграм (User Datagram Protocol);

Modbus RTU — промисловий протокол послідовного зв'язку;

ТЗ — технічне завдання;

ПІ-регулятор — пропорційно-інтегральний регулятор;

Зміст

Анотація	4
Abstract	5
Перелік умовних позначень, скорочень і термінів	6
Зміст	7
Вступ.....	13
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ОБЛІКУ ТА БАЛАНСУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В СМАРТ-ГРІД МЕРЕЖАХ.....	15
1.1 Концепція смарт-грід та локальних мікромереж.....	15
1.2 Огляд існуючих систем обліку електроенергії	16
1.2.1 Електромеханічні та електронні лічильники	16
1.2.2 Системи AMR та AMI.....	17
1.2.3 Smart Metering та інтелектуальні вимірювальні модулі.....	17
1.3 Огляд систем балансування енергоспоживання в мікромережах	18
1.3.1 Централізовані системи керування мікромережею	18
1.3.2 Розподілені та мультиагентні системи керування	18
1.3.3 Гібридні архітектури.....	19
1.4 Аналіз сучасних смарт-датчиків електричних параметрів	20
1.5 Місце алгоритмів штучного інтелекту в розподілених системах керування мікромережами	21
1.6 Аналіз проблем галузі та невирішених задач.....	22
1.7 Актуальність теми дипломного проєкту	23
1.8 Постановка завдань на розробку	24
Висновки до розділу 1	25

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ РОЗРОБКИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ТА БАЛАНСУВАННЯ	27
2.1 Основи вимірювання електричних параметрів у мережах змінного струму	27
2.1.1 Активна, реактивна та повна потужність	27
2.1.2 Коефіцієнт потужності та якість напруги.....	28
2.1.3 Метрологічні характеристики вимірювального тракту	29
2.2 Теоретичні основи автоматичного керування.....	29
2.2.1 ПД-регулятор: математична модель	29
2.2.2 Дискретна реалізація ПД-регулятора	30
2.2.3 Релейне керування з гістерезисом.....	30
2.3 Баланс потужностей у локальній мікромережі	30
2.4 Теоретичні засади побудови мікропроцесорних систем реального часу	31
2.4.1 Дискретизація сигналів і теорема Котельникова.....	31
2.4.2 Архітектура мікроконтролерної системи вузла	32
2.4.3 Системи реального часу	32
2.5 Цифрові протоколи обміну даними	33
2.5.1 Протокол Modbus RTU	33
2.5.2 Протокол MQTT	33
2.5.3 Технологія Wi-Fi 802.11 у локальній мережі	34
2.6 Методи короткострокового прогнозування навантаження	34
2.6.1 Експоненційне згладжування Брауна	34
2.6.2 Метод Хольта з лінійним трендом	35
2.6.3 Метрики оцінки якості прогнозу	35
2.7 Принципи побудови розподілених інтелектуальних систем.....	36

Висновки до розділу 2	37
-----------------------------	----

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ТА БАЛАНСУВАННЯ.....	39
--	----

3.1 Технічне завдання на розробку системи.....	39
--	----

3.1.1 Призначення та область застосування	39
---	----

3.1.2 Склад системи	39
---------------------------	----

3.1.3 Технічні характеристики	40
-------------------------------------	----

3.1.4 Функціональні вимоги	41
----------------------------------	----

3.1.5 Умови експлуатації та вимоги до надійності	41
--	----

3.2 Розробка структурної схеми системи.....	42
---	----

3.3 Розробка функціональної схеми інтелектуального вузла	43
--	----

3.3.1 Склад функціональних блоків	44
---	----

3.3.2 Сигнали та потоки даних.....	44
------------------------------------	----

3.4 Розробка принципової електричної схеми вузла	46
--	----

3.4.1 Обґрунтування вибору компонентної бази	46
--	----

3.4.2 Опис принципової електричної схеми	48
--	----

3.4.3 Розподіл ліній GPIO мікроконтролера.....	50
--	----

3.5 Розрахунок метрологічних характеристик вимірювального тракту.....	50
---	----

3.5.1 Складові похибки вимірювального тракту.....	50
---	----

3.5.2 Розрахунок похибки квантування	51
--	----

3.5.3 Розрахунок додаткової температурної похибки	51
---	----

3.5.4 Розрахунок сумарної похибки	52
---	----

3.6 Розрахунок параметрів регулятора балансування потужності	52
--	----

3.6.1 Розрахунок параметрів релейного регулятора.....	53
---	----

3.6.2 Розрахунок параметрів ПІ-регулятора міжвузлового балансу.....	54
---	----

	10
3.6.3 Оцінка стійкості замкненого контуру	54
3.7 Розрахунок енергетичного балансу ділянки	55
3.7.1 Розрахунок навантаження ділянки	55
3.7.2 Категоризація навантажень за пріоритетами	55
3.7.3 Перевірка балансу в обмеженому режимі	56
3.8 Розрахунок параметрів каналу зв'язку між вузлами.....	56
3.8.1 Розрахунок необхідної пропускної здатності	57
3.8.2 Розрахунок параметрів виявлення втрати зв'язку.....	57
3.8.3 Розрахунок затримки обміну	58
3.9 Розрахунок теплового режиму вузла	58
3.9.1 Розрахунок потужності тепловиділення.....	58
3.9.2 Розрахунок перевищення температури.....	59
3.9.3 Перевірка допустимих температурних режимів.....	59
3.10 Загальний алгоритм роботи інтелектуального вузла	60
3.10.1 Алгоритм ініціалізації вузла	60
3.10.2 Алгоритм основного циклу керування	61
3.10.3 Алгоритм релейного регулятора з гістерезисом.....	62
3.11 Алгоритм короткострокового прогнозування навантаження.....	63
3.11.1 Підготовка вхідних даних	63
3.11.2 Алгоритм оновлення моделі Хольта	63
3.11.3 Оцінка обчислювальних витрат.....	64
3.12 Алгоритм координації між вузлами та автономного режиму	64
3.12.1 Структура повідомлення обміну	64
3.12.2 Скінченний автомат станів вузла	65
3.12.3 Алгоритм координації перетоку	66

	11
3.12.4 Поведінка в автономному режимі	67
Висновки до розділу 3	67
РОЗДІЛ 4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ.....	69
4.1 Опис стенду комп'ютерного моделювання.....	69
4.1.1 Програмне середовище та інструменти	69
4.1.2 Структура імітаційної моделі	70
4.1.3 Організація взаємодії фізичного вузла з моделлю	71
4.2 Реалізація моделей компонентів системи.....	72
4.2.1 Модель фотоелектричної генерації	72
4.2.2 Модель спільного накопичувача	73
4.2.3 Моделі споживання вузлів А і В	74
4.2.4 Реалізація керуючої логіки у Stateflow	75
4.3 Інтерактивна панель керування (Dashboard).....	76
4.4 Сценарії моделювання та результати.....	77
4.4.1 Сценарій 1 — нормальна робота із зарядом від PV	77
4.4.2 Сценарій 2 — обмеження генерації при повному заряді.....	78
4.4.3 Сценарій 3 — блекаут і острівна робота	79
4.4.4 Сценарій 4 — аварія з повним розрядом і поетапним розвантаженням	80
4.4.5 Сценарій 5 — демонстрація HIL з фізичним вузлом А	81
4.5 Допоміжний інтелектуальний агент прогнозування споживання	82
4.6 Аналіз результатів моделювання.....	83
Висновки до розділу 4	84
Висновки	86
Перелік посилань.....	88

Додатки..... 90

Додаток А — Скрипт ініціалізації параметрів моделі (mg_params.m)

.....**Ошибка! Закладка не определена.**

Додаток Б — Програмний міст MQTT/UDP (mqtt_bridge.py).....**Ошибка!**

Закладка не определена.

Додаток В — Функції MATLAB Function імітаційної моделі**Ошибка!**

Закладка не определена.

Додаток Г — Формат повідомлень обміну (MQTT/UDP)**Ошибка! Закладка не определена.**

Вступ

Сталість та надійність електропостачання й досі залишаються одними з головних проблем сучасної енергетики. Зростання частки розосередженої генерації, активне впровадження відновлюваних джерел енергії та вимоги до безперебійної роботи відповідальних споживачів змушують переходити від традиційних централізованих мереж до концепції смарт-грід — інтелектуальних енергосистем з двостороннім обміном даними, локальним обліком і автоматичним управлінням потоками потужності [1, 2].

Особливо гостро це питання постає в умовах нестабільного зовнішнього живлення. У таких випадках локальна мікромережа має бути здатна продовжувати роботу навіть при відключенні основної мережі. Для цього система повинна в реальному часі вимірювати споживання за допомогою смарт-датчиків, самостійно балансувати навантаження, керувати накопичувачем енергії та якомога довше забезпечувати живлення критичних споживачів [3]. Додаткові можливості з'являються при використанні інтелектуальних агентів, які можуть прогнозувати споживання та переводити систему з реактивного режиму в проактивний [4].

Метою роботи є розроблення автономної системи моніторингу та оптимізації енергоспоживання в смарт-грід мікромережі, де традиційне надійне керування доповнюється інтелектуальним агентом прогнозування навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан систем моніторингу та керування мікромережами та сформулювати вимоги до системи;
- обґрунтувати архітектуру двовузлової мікромережі зі спільним накопичувачем енергії та фотоелектричним джерелом, а також виконати інженерні розрахунки основних вузлів;
- розробити логіку керування у вигляді скінченного автомата з пріоритетним розвантаженням споживачів;
- спроєктувати допоміжний інтелектуальний агент прогнозування навантаження та визначити його взаємодію з основним керуючим автоматом;

- створити імітаційну модель системи та дослідити її поведінку в різних сценаріях;
- реалізувати апаратно-програмну взаємодію фізичного вузла з імітаційною моделлю (HIL).

Методи дослідження включають імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink та Stateflow, скінченно-автоматне керування, метод подвійного експоненційного згладжування (метод Хольта), апаратно-програмне моделювання Hardware-in-the-Loop, а також використання протоколів MQTT і Modbus.

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості використання розроблених рішень для локальних громадських мікромереж та систем вуличного освітлення з резервуванням живлення критичних навантажень.

Робота складається зі вступу, основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. У розділах послідовно розглянуто аналіз предметної області, обґрунтування та розрахунок системи, розробку алгоритмів керування та інтелектуального агента, а також комп'ютерне моделювання й аналіз результатів.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ОБЛІКУ ТА БАЛАНСУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В СМАРТ-ГРІД МЕРЕЖАХ

1.1 Концепція смарт-грід та локальних мікромереж

Розвиток електроенергетики у ХХІ столітті характеризується переходом від традиційної централізованої моделі генерації, передачі та розподілу електроенергії до концепції інтелектуальної мережі — Smart Grid. Класична електрична мережа орієнтована на односторонній потік енергії від великих електростанцій через магістральні та розподільчі мережі до споживача. Облік у такій мережі є переважно фінансовим інструментом, а керування навантаженням на рівні споживача практично відсутнє. Зростання частки відновлюваних джерел енергії, поява розподіленої генерації, накопичувачів та активних споживачів роблять подібну модель функціонально недостатньою.

Згідно з визначенням Європейської технологічної платформи Smart Grids, інтелектуальна електрична мережа — це електрична мережа, що використовує інтегровані інформаційно-комунікаційні технології для двостороннього обміну енергією та даними між усіма її учасниками з метою забезпечення надійного, безпечного, економічно ефективного та екологічно сприятливого електропостачання. Ключовими ознаками смарт-грід є: двосторонній потік електроенергії та інформації; інтеграція розподілених джерел енергії; автоматизоване керування навантаженням; самовідновлення після аварій; інтелектуальний облік на рівні споживача.

Локальна мікромережа (microgrid) є одним з базових структурних елементів смарт-грід. Це обмежена за територією електрична мережа, що об'єднує власні джерела генерації, накопичувачі та групу споживачів і здатна функціонувати як у режимі підключення до основної мережі (grid-tied), так і автономно (islanded). Мікромережі типово обслуговують групи будівель, мікрорайони, кампуси, промислові майданчики або сільські громади. Стандарти IEEE 1547 та IEC 61850 регламентують вимоги до інтерконекту розподіленої генерації та інформаційного обміну між компонентами мережі.

Для України питання впровадження смарт-грід та локальних мікромереж набуло особливої актуальності у зв'язку з масштабними руйнуваннями енергетичної інфраструктури внаслідок повномасштабної військової агресії. Централізована модель енергопостачання виявилася критично вразливою, а перехід до розподілених архітектур із локальними центрами генерації та керування став питанням енергетичної безпеки громад. У цих умовах інженерні рішення, що дозволяють побудувати функціональну локальну мікромережу з мінімальними апаратними витратами та з можливістю автономної роботи, є особливо запитуваними.

1.2 Огляд існуючих систем обліку електроенергії

Системи обліку електроенергії пройшли значний шлях еволюції — від суто механічних індукційних лічильників до сучасних інтелектуальних вимірювальних модулів з цифровою обробкою сигналів і двостороннім зв'язком. Доцільно виділити чотири основні покоління засобів обліку, що історично змінювали одне одного та подекуди співіснують і нині.

1.2.1 Електромеханічні та електронні лічильники

Електромеханічні (індукційні) лічильники, що тривалий час становили основу побутового обліку, виконують лише вимірювання активної енергії за принципом обертання алюмінієвого диска під дією магнітних потоків струмових і напружних котушок. Вони не мають жодних засобів цифрового обміну, потребують ручного зняття показів і не дозволяють реалізувати багатотарифний облік або диспетчеризацію. Класи точності таких приладів — переважно 2,0 та 2,5, що недостатньо для задач керування.

Електронні лічильники, що прийшли їм на зміну, реалізують вимірювання на основі мікроконтролерів та спеціалізованих метрологічних мікросхем. Вони підтримують багатотарифний облік, мають інтерфейси RS-485, M-Bus або оптичний порт, дозволяють фіксувати профіль навантаження. Однак значна частина таких лічильників і досі є фіскальним приладом без можливості активного впливу на режим роботи мережі.

1.2.2 Системи AMR та AMI

Системи AMR (Automatic Meter Reading) реалізують односторонній автоматизований збір даних з лічильників — як правило, через GSM/GPRS-канал, RF або PLC (передачу даних електричними мережами). Дані передаються в центр збору та обробки, де формуються звіти та білінг. Такі системи в Україні відомі під назвою АСКОВЕ — автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії, і використовуються переважно для оптового обліку та обліку у промислових споживачів.

Системи AMI (Advanced Metering Infrastructure) є наступним кроком — вони забезпечують двосторонній обмін між інтелектуальним лічильником та центром керування. Це дозволяє не лише збирати дані, але й віддалено керувати лічильником: змінювати тарифи, обмежувати потужність, відключати споживачів, отримувати оперативну інформацію про якість напруги, провали, гармоніки. Серед закордонних виробників ринку AMI варто згадати рішення Landis+Gyr (Gridstream), Itron (OpenWay), Siemens (AMIS), Iskraemeco (Symbiotic). Український ринок представлений системами таких виробників як ТОВ «Енергооблік», ПАТ «Електропромтехніка», «Енергоконтроль».

1.2.3 Smart Metering та інтелектуальні вимірювальні модулі

Сучасне покоління систем обліку — Smart Metering — характеризується інтеграцією функцій вимірювання, обробки, зв'язку та керування в єдиному пристрої. Інтелектуальний лічильник не лише фіксує спожиту енергію, але й вимірює низку параметрів якості (THD — коефіцієнт гармонічних спотворень, провали та перенапруги, асиметрію фаз), формує детальний профіль навантаження з інтервалом до однієї хвилини, виконує локальну попередню обробку та детекцію аномалій. Деякі моделі підтримують функції disaggregation — розпізнавання типу побутових приладів за сигнатурою споживання (NILM — Non-Intrusive Load Monitoring).

Окремим класом є інтелектуальні вимірювальні модулі, що використовуються не для комерційного обліку, а як вбудовані вузли інженерних та автоматизованих систем. До них належать модулі на базі метрологічних мікросхем Analog Devices ADE7880, ADE9000, Microchip MCP39F511, Cirrus Logic CS5490, а також готові плати

на кшталт PZEM-004T (Peacefair), SDM230 (Eastron), SCT-013 на основі трансформаторів струму. Ці модулі мають значно нижчу вартість порівняно з комерційними лічильниками, забезпечують прийнятну точність (зазвичай клас 1,0 за активною енергією) і легко інтегруються з мікроконтролерними платформами через інтерфейси UART, SPI або Modbus RTU. Саме така категорія засобів становить апаратну основу для побудови розподілених систем обліку та керування на рівні мікромереж.

1.3 Огляд систем балансування енергоспоживання в мікромережах

Балансування в електричній мережі — це підтримання рівноваги між генерацією та споживанням у режимі реального часу. У великій енергосистемі цю задачу вирішують централізовані оператори за рахунок маневрених потужностей, резервів та регулюючих електростанцій. У локальній мікромережі задача балансування переноситься на місцевий рівень, де її повинна вирішувати система керування мікромережі (Microgrid Energy Management System — MEMS). За архітектурою такі системи поділяються на три основні класи.

1.3.1 Централізовані системи керування мікромережею

У централізованій архітектурі є єдиний центральний контролер, який збирає вимірювання з усіх вузлів мережі, аналізує поточний стан та видає керуючі команди на всі виконавчі елементи — джерела, навантаження, ключі секціонування. Перевагами централізованого підходу є можливість глобальної оптимізації (центральний алгоритм бачить усю мережу одночасно), простота координації та узгодженість керуючих рішень. Недоліки очевидні: централізований контролер є єдиною точкою відмови; потрібен надійний і високошвидкісний канал зв'язку до кожного вузла; ускладнюється масштабування; будь-яка зміна топології мережі вимагає переналаштування центрального контролера.

1.3.2 Розподілені та мультиагентні системи керування

Розподілена (децентралізована) архітектура передбачає, що кожен вузол мережі має власну логіку керування і приймає рішення на основі локальних вимірювань та обмеженого обсягу інформації від сусідніх вузлів. Граничним випадком

розподіленого підходу є мультиагентна система (Multi-Agent System — MAS), де кожен вузол реалізований як автономний інтелектуальний агент, здатний до самостійних дій, обміну повідомленнями та узгодження рішень із сусідами за певними протоколами. Серед відомих принципів розподіленого керування мікромережами — статичне регулювання за нахилом характеристик (droop control), що походить з традиційної енергетики, та сучасні консенсусні алгоритми, які забезпечують узгодження параметрів роботи без єдиного центру керування.

Перевагами розподіленої архітектури є висока відмовостійкість (втрата одного вузла не призводить до колапсу всієї системи), природна масштабованість (додавання нового вузла не вимагає перенастроювання решти), стійкість до часткових збоїв зв'язку. Недоліком є те, що рішення можуть бути локально оптимальними, але глобально субоптимальними, а узгодження потребує проектування коректних протоколів обміну.

1.3.3 Гібридні архітектури

На практиці більшість сучасних розробок використовують гібридний (ієрархічний) підхід: на нижньому рівні працює швидка локальна автоматика кожного вузла (мілісекунди), на середньому — координація між сусідніми вузлами через узгодження прогнозів та уставок (секунди), на верхньому — необов'язковий стратегічний рівень з оптимізацією на основі історичних даних та прогнозів (хвилини, години). Така ієрархія дозволяє поєднати переваги розподіленої та централізованої архітектур: швидку реакцію та відмовостійкість на нижніх рівнях з можливістю глобальної оптимізації на верхньому. Саме такий підхід застосовано і в концепції, що розробляється в межах даного дипломного проєкту.

У табл. 1.1 наведено порівняння основних архітектур керування мікромережами за ключовими інженерними характеристиками.

Таблиця 1.1 — Порівняння архітектур керування мікромережами

Характеристика	Централізована	Розподілена	Гібридна
Відмовостійкість	Низька	Висока	Висока

Швидкість реакції	Залежить від каналу зв'язку	Висока (локально)	Висока
Якість глобального рішення	Оптимальне	Субоптимальне	Близьке до оптимального
Масштабованість	Обмежена	Висока	Висока
Складність проектування	Середня	Висока	Висока
Вимоги до каналів зв'язку	Високі	Помірні	Помірні
Робота при втраті зв'язку	Неможлива	Автономна	Деградація з автономією

1.4 Аналіз сучасних смарт-датчиків електричних параметрів

Серцевиною будь-якого інтелектуального вузла обліку та керування є смарт-датчик електричних параметрів. На відміну від традиційного вимірювального перетворювача, що видає лише первинний аналоговий сигнал, смарт-датчик виконує самостійну цифрову обробку та видає вже обчислені інженерні величини. Це принципово впливає на архітектуру всієї системи: за рахунок переносу обчислень ближче до точки вимірювання знижується навантаження на центральний контролер, зменшується обсяг трафіку в каналі зв'язку, з'являється можливість локальної реакції в реальному часі.

До типових функцій сучасного смарт-датчика електричних параметрів належать: вимірювання діючих значень напруги та струму, активної, реактивної та повної потужності, коефіцієнта потужності $\cos \varphi$, частоти, накопиченої активної та реактивної енергії; обчислення коефіцієнта гармонічних спотворень (THD); детектування провалів, перенапруг та переривань живлення; локальна корекція калібрувальних коефіцієнтів; самодіагностика. Передача даних здійснюється через цифрові інтерфейси — RS-485 з протоколом Modbus RTU, SPI, I²C або UART.

Для аналізу апаратної бази розглянемо найпоширеніші сучасні рішення (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 — Порівняння смарт-датчиків електричних параметрів

Модель / IC		Тип	Інтерфейс	Параметри
ADE9000 (Analog Devices)		Метрологічна IC	SPI	3-фазна, клас 0,1 %
ADE7880 (Analog Devices)		Метрологічна IC	SPI/I ² C	3-фазна, THD до 31-ї гарм.
MCP39F511 (Microchip)		Метрологічна IC	UART	1-фазна, клас 0,1 %
PZEM-004T v3.0		Готовий модуль	UART (Modbus)	1-фазна, до 100 А, клас ~1,0
SDM230-Modbus (Eastron)		Готовий модуль	RS-485 Modbus	1-фазна, клас 1,0, MID- сертиф.
SCT-013-000 + АЦП МК		СТ-датчик	Аналог + АЦП	До 100 А, клас 1-3 %

З наведеного аналізу видно, що для задач рівня дипломного проєкту найбільш доцільним вибором є готовий модуль PZEM-004T v3.0 на базі метрологічної мікросхеми SD3004. Він забезпечує прийнятну для задач керування точність (клас 1,0 за активною енергією), має готовий протокол Modbus RTU поверх UART, підтримує вимірювання повного набору параметрів (U, I, P, S, cos φ, частота, енергія), має вбудований трансформатор струму на 100 А і не потребує зовнішніх метрологічних компонентів. Це дозволяє сфокусувати інженерну роботу на проектуванні алгоритмів керування, обробки та комунікацій, а не на розробці метрологічного тракту з нуля.

1.5 Місце алгоритмів штучного інтелекту в розподілених системах керування мікромережами

Останнє десятиліття характеризується зростанням інтересу до застосування методів машинного навчання та штучного інтелекту в задачах енергетики. Водночас важливо чітко окреслити функціональну роль таких методів в архітектурі мікромережі та не змішувати їх із класичними засобами автоматичного керування.

Класи задач, у яких ІІІ-алгоритми демонструють переконливі результати в задачах розподілених енергосистем: прогнозування короткострокового навантаження на наступні години-добу (методи ARIMA, експоненційного згладжування, рекурентні нейронні мережі LSTM, прогнозний фреймворк Prophet); прогнозування генерації від відновлюваних джерел на основі метеоданих; виявлення аномалій споживання — крадіжок, аварійних режимів, неефективного обладнання (методи SVM, Random Forest, автокодери); розпізнавання типу побутових приладів за сигнатурою споживання — задачі NILM; оптимізація режимів роботи на основі історичних даних (методи навчання з підкріпленням, генетичні алгоритми).

Водночас важливо підкреслити: ІІІ в смарт-грід є допоміжним функціональним рівнем, а не основою системи керування. Базовий контур регулювання — підтримка напруги, частоти, потужності, виконання безпекових інтерлоків та відключень при аваріях — реалізується класичними методами теорії автоматичного керування (ПІД-регулятори, релейне керування, порогова логіка з гістерезисом, кінцеві автомати) з гарантованими властивостями стійкості, швидкодії та коректності. Алгоритми машинного навчання, як правило, не можуть надати таких гарантій і тому не повинні застосовуватися в критичних контурах безпеки.

Адекватне інженерне рішення полягає в тому, щоб класична автоматика забезпечувала надійне функціонування системи в усіх режимах, а ІІІ-модуль працював паралельно як засіб надання прогнозованої інформації та підказок до прийняття рішень. У такій конфігурації відмова чи деградація ІІІ-модуля не призводить до втрати працездатності системи — вона лише втрачає функцію передбачення. Цей принцип також покладено в основу архітектури системи, що розробляється в межах цього дипломного проєкту.

1.6 Аналіз проблем галузі та невирішених задач

На підставі проведеного огляду існуючих систем і технічних рішень можна виокремити низку проблем, актуальних для сучасного стану галузі та для української специфіки зокрема.

По-перше, переважна більшість систем обліку, що експлуатуються сьогодні, орієнтовані на фіскальну функцію — формування рахунків за спожитою енергією.

Інтелектуальний потенціал сучасних лічильників (профіль навантаження, дані якості, оперативні вимірювання) використовується недостатньо. Дані обліку не інтегруються з системами оперативного керування навантаженням, що створює штучний розрив між інформаційним та керуючим контурами.

По-друге, інтеграція розподілених джерел енергії (сонячних панелей, вітрогенераторів, акумуляторних систем) у стару розподільну мережу здійснюється переважно за принципом пасивного приєднання, без локальної координації режимів. Як наслідок — виникають проблеми перенапруги в кінці фідерів при високій інсоляції, зворотні потоки потужності, нестабільність якості напруги.

По-третє, централізовані системи керування погано пристосовані до роботи в умовах нестабільного зв'язку або фізичного руйнування комунікаційної інфраструктури. Це особливо критично в українських реаліях, де руйнування об'єктів зв'язку та електропостачання є системною загрозою.

По-четверте, на ринку відсутні масові доступні рішення для побудови локальних інтелектуальних мікромереж на рівні домогосподарств, малих громад, окремих будівель. Промислові EMS орієнтовані на великих споживачів та коштують десятки і сотні тисяч доларів, що недосяжно для масового застосування.

По-п'яте, відсутня широка інженерна практика побудови розподілених систем обліку та керування з використанням дешевих смарт-датчиків (PZEM-004T та аналоги) і мікроконтролерних платформ (ESP32, STM32) як основи. Існуючі публікації переважно мають академічний характер і не доведені до рівня готових інженерних рішень.

1.7 Актуальність теми дипломного проєкту

Актуальність розробки автоматизованої системи обліку та балансування енергоспоживання локальної смарт-грід мікромережі з розподіленими інтелектуальними вузлами обумовлена комплексом чинників.

Енергетичний контекст. Перехід до моделі смарт-грід є генеральним напрямком розвитку електроенергетики в Європейському Союзі та визначений як пріоритет державної політики України. Розподілена генерація, накопичувачі та активні

споживачі вимагають появи нового класу засобів локального керування, здатних працювати в умовах змінної топології мережі.

Безпековий контекст. Українська енергосистема перебуває під системним впливом наслідків військової агресії: руйнування генеруючих потужностей, магістральних мереж та комунікаційної інфраструктури. У цих умовах формування мережі локальних автономних мікромереж із власною інтелектуальною інфраструктурою стає питанням енергетичної безпеки і стійкості громад.

Технологічний контекст. Сучасний рівень розвитку смарт-датчиків (PZEM-004T та аналоги), мікроконтролерних платформ із вбудованими комунікаціями (ESP32 з Wi-Fi), стандартизованих протоколів обміну (Modbus, MQTT) та середовищ моделювання (Matlab/Simulink) дозволяє реалізувати функціонально повну систему за помірний бюджет, що було неможливо ще 10–15 років тому.

Освітньо-професійний контекст. Тематика проєкту повністю відповідає змісту освітньо-професійної програми «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Проєкт передбачає інтеграцію знань з вимірювальної техніки, мікропроцесорних систем, теорії автоматичного керування, програмування мікроконтролерів та моделювання технічних систем.

Сукупність цих чинників робить розробку інженерної реалізації розподіленої системи обліку та балансування мікромережі з акцентом на смарт-датчиках реального часу актуальною та практично значущою задачею.

1.8 Постановка завдань на розробку

На підставі проведеного огляду існуючих рішень, аналізу проблем галузі та обґрунтування актуальності теми сформульовано такі завдання для виконання в межах дипломного проєкту.

1. Розробити структурну схему автоматизованої системи обліку та балансування локальної мікромережі, що містить два інтелектуальні вузли з можливістю обміну даними та координації режимів роботи.
2. Спроекувати функціональну схему інтелектуального вузла, визначити склад функціональних блоків, інтерфейсів та потоків даних між ними.

3. Розробити принципову електричну схему вузла на базі мікроконтролерної платформи ESP32 та смарт-датчика PZEM-004T із підключенням релейного модуля керування навантаженням.
4. Виконати інженерні розрахунки: метрологічні характеристики вимірювального тракту, параметри регулятора балансування, енергетичний баланс ділянки, параметри каналу зв'язку між вузлами, теплові режими.
5. Розробити алгоритми роботи вузла: первинної обробки вимірювань, локального керування навантаженням, прогнозування короткострокового споживання, обміну прогнозами з сусіднім вузлом, переходу в автономний режим при втраті зв'язку.
6. Побудувати імітаційну модель мікромережі в середовищі Matlab/Simulink на основі бібліотеки Simscape Electrical для перевірки роботи розроблених алгоритмів.
7. Провести комп'ютерне моделювання роботи системи в характерних режимах: нормальний режим живлення, локальний пік споживання, аварія зовнішньої мережі з переходом в автономний режим, втрата зв'язку між вузлами.
8. Розробити пакет конструкторської документації відповідно до вимог ЄСКД: структурну (СхС), функціональну (СхФ), принципову електричну (СхЕ) схеми та два ілюстративні плакати (СхА — алгоритм роботи, СхІ — результати моделювання).

Висновки до розділу 1

Проведено огляд та аналіз сучасного стану систем обліку та балансування енергоспоживання в смарт-грід мережах. Розглянуто еволюцію засобів обліку електроенергії від електромеханічних лічильників до сучасних інтелектуальних вимірювальних модулів. Проаналізовано три основні архітектури керування мікромережами — централізовану, розподілену та гібридну — та обґрунтовано переваги гібридного підходу для побудови мережі з невеликою кількістю вузлів.

Виконано порівняльний аналіз сучасних смарт-датчиків електричних параметрів, на підставі якого для подальшої розробки обрано модуль PZEM-004T v3.0

як такий, що забезпечує оптимальне співвідношення метрологічних характеристик, інтерфейсних можливостей та вартості.

Окремо проаналізовано функціональну роль алгоритмів штучного інтелекту в розподілених системах керування мікромережами. Обґрунтовано, що ШІ доцільно застосовувати як допоміжний рівень — для задач прогнозування навантаження та обміну прогнозами між вузлами, тоді як базовий контур керування повинен бути реалізований класичними засобами автоматики з гарантованими властивостями стійкості та коректності.

Виявлено основні проблеми галузі, що залишаються невирішеними: розрив між інформаційним та керуючим контурами в існуючих системах обліку, недостатня інтеграція розподілених джерел енергії, вразливість централізованих архітектур до втрати зв'язку та руйнувань інфраструктури, відсутність доступних масових рішень для локального інтелектуального керування.

Обґрунтовано актуальність розробки автоматизованої системи обліку та балансування локальної мікромережі з розподіленими інтелектуальними вузлами в контексті загальносвітових тенденцій розвитку смарт-грид, безпекових викликів української енергосистеми та сучасних технологічних можливостей.

Сформульовано вісім інженерних завдань на розробку, виконання яких розкрито в наступних розділах дипломного проєкту.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ РОЗРОБКИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ТА БАЛАНСУВАННЯ

У цьому розділі викладено теоретичні засади, що становлять основу інженерної розробки автоматизованої системи обліку та балансування енергоспоживання, які буде представлено в Розділі 3. Розглядаються принципи вимірювання електричних параметрів у мережах змінного струму, теорія автоматичного керування та її дискретна реалізація, рівняння балансу потужностей у мікромережі, основи побудови мікроконтролерних систем реального часу, цифрові протоколи обміну, а також методи короткострокового прогнозування навантаження.

2.1 Основи вимірювання електричних параметрів у мережах змінного струму

Інтелектуальний вузол обліку оперує первинними електричними величинами: миттєвими значеннями напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ на ділянці мережі. На основі цих величин обчислюються інженерні параметри, що використовуються для керування — діючі значення, активна, реактивна та повна потужність, коефіцієнт потужності, частота, накопичена енергія, а також показники якості напруги.

2.1.1 Активна, реактивна та повна потужність

Для однофазного синусоїдного режиму миттєві значення напруги та струму описуються виразами:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t), i(t) = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi), \quad (2.1)$$

де U_m, I_m — амплітудні значення напруги та струму; $\omega = 2\pi \cdot f$ — кутова частота; φ — кут фазового зсуву між напругою та струмом.

Діючі (середньоквадратичні, RMS) значення обчислюються через інтегрування квадрата миттєвого значення за період T :

$$U = \sqrt{(1/T) \cdot \int_0^T u^2(t) dt}, I = \sqrt{(1/T) \cdot \int_0^T i^2(t) dt}. \quad (2.2)$$

Активна потужність P (Вт) визначає реальне перетворення електричної енергії в роботу або тепло:

$$P = (1/T) \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = U \cdot I \cdot \cos(\varphi). \quad (2.3)$$

Реактивна потужність Q (вар) характеризує енергію, що циклічно обмінюється між реактивними елементами навантаження та джерелом, не виконуючи корисної роботи:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi). \quad (2.4)$$

Повна потужність S (ВА) є геометричною сумою активної та реактивної потужностей:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U \cdot I. \quad (2.5)$$

Накопичена активна енергія W (Вт·год) за період $\Delta t = t_2 - t_1$ обчислюється інтегруванням активної потужності:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt. \quad (2.6)$$

У цифровій реалізації смарт-датчик дискретизує миттєві значення $u(t)$ та $i(t)$ з частотою дискретизації f_s та обчислює всі параметри як суми за вибірками в межах періоду промислової частоти. Так, для PZEM-004T внутрішня вибірка здійснюється з частотою близько 4 кГц, що забезпечує дискретизацію 80 точок на період при частоті мережі 50 Гц.

2.1.2 Коефіцієнт потужності та якість напруги

Коефіцієнт потужності визначається як відношення активної потужності до повної:

$$\cos(\varphi) = P / S. \quad (2.7)$$

Для синусоїдного режиму він збігається з косинусом кута фазового зсуву між напругою та струмом. При наявності спотворень (вищих гармонік) використовується інтегральне визначення — Power Factor (PF), що враховує спотворення.

Коефіцієнт гармонічних спотворень THD (Total Harmonic Distortion) характеризує якість напруги чи струму та визначається як відношення середньоквадратичного значення вищих гармонік до значення основної (першої) гармоніки:

$$THD_U = \sqrt{(\sum_{n=2}^N U_n^2) / U_1} \cdot 100 \%. \quad (2.8)$$

Згідно з ДСТУ EN 50160, значення THD напруги в загальній мережі електропостачання не повинно перевищувати 8 % впродовж 95 % часу тижневих вимірювань.

2.1.3 Метрологічні характеристики вимірювального тракту

Якість вимірювального тракту визначається межами допустимої похибки. Загальна похибка $\delta_{\text{заг}}$ складається з основних компонент: похибка перетворення сенсора $\delta_{\text{с}}$, похибка АЦП $\delta_{\text{АЦП}}$, методична похибка обчислення $\delta_{\text{м}}$ та похибка квантування $\delta_{\text{кв}}$. У припущенні незалежності похибок їх результуюча оцінюється як:

$$\delta_{\text{заг}} = \sqrt{(\delta_{\text{с}}^2 + \delta_{\text{АЦП}}^2 + \delta_{\text{м}}^2 + \delta_{\text{кв}}^2)}. \quad (2.9)$$

Клас точності засобу вимірювання вказує допустиму границю основної похибки, виражену у відсотках від нормованого значення. Для смарт-датчиків електричних параметрів, що використовуються в задачах керування (на відміну від комерційного обліку), достатнім є клас 1,0 за активною енергією, що відповідає вимогам ДСТУ ІЕС 62053-21 для електронних лічильників прямого включення.

2.2 Теоретичні основи автоматичного керування

Балансування потужності в локальній мікромережі реалізується через замкнений контур керування. Об'єктом керування виступає електрична ділянка вулиці, керуючим впливом — стан комутаційного обладнання (релейних модулів), вихідною величиною — фактичне споживання чи відхилення від заданого балансу.

2.2.1 ПІД-регулятор: математична модель

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор є базовим засобом замкненого керування в інженерній практиці. Його закон керування в неперервній формі описується виразом:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot de(t)/dt, \quad (2.10)$$

де $u(t)$ — керуючий вплив; $e(t) = r(t) - y(t)$ — сигнал помилки (різниця між уставкою $r(t)$ та вимірюваною величиною $y(t)$); K_p , K_i , K_d — коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференційної складових відповідно.

Пропорційна складова забезпечує негайну реакцію на відхилення, інтегральна — усуває статичну помилку, диференціальна — реагує на швидкість зміни помилки та підвищує стійкість контуру. В інженерній практиці часто застосовують паралельну форму записування з постійними часу:

$$u(t) = K_p \cdot (e(t) + (1/T_i) \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \cdot de(t)/dt), \quad (2.11)$$

де T_i — час інтегрування, T_d — час диференціювання, які пов'язані з коефіцієнтами співвідношеннями $K_i = K_p/T_i$ та $K_d = K_p \cdot T_d$.

2.2.2 Дискретна реалізація ПД-регулятора

Оскільки мікроконтролер виконує обчислення в дискретні моменти часу з періодом квантування T_s , закон керування реалізується в дискретній формі. Найпоширеніший позиційний алгоритм має вигляд:

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot T_s \cdot \sum_{i=0}^k e(i) + (K_d / T_s) \cdot (e(k) - e(k-1)), \quad (2.12)$$

де k — номер кроку дискретизації; $e(k)$ — помилка на k -му кроці. Інкрементна (рекурсивна) форма зменшує проблему інтегрального насичення (windup):

$$\Delta u(k) = K_p \cdot (e(k) - e(k-1)) + K_i \cdot T_s \cdot e(k) + (K_d / T_s) \cdot (e(k) - 2 \cdot e(k-1) + e(k-2)). \quad (2.13)$$

При практичній реалізації ПД-регулятора в мікроконтролері обов'язково передбачаються: обмеження інтегральної складової для запобігання windup, обмеження вихідної величини відповідно до фізичних меж виконавчого пристрою, фільтрація диференційної складової низькочастотним фільтром для зменшення впливу шумів.

2.2.3 Релейне керування з гістерезисом

Для двопозиційних виконавчих пристроїв (релейних модулів, контакторів) пропорційне керування технічно неможливе, тому застосовується релейний регулятор з гістерезисом. Закон керування описується співвідношенням:

$$u(k) = \{ 1, \text{ якщо } e(k) > +\Delta; 0, \text{ якщо } e(k) < -\Delta; u(k-1), \text{ інакше } \}, \quad (2.14)$$

де Δ — половина зони гістерезису. Гістерезис запобігає високочастотним перемиканням релейного контакту при коливаннях помилки навколо нуля, що подовжує ресурс комутаційного обладнання. Ширина зони гістерезису обирається з компромісу між точністю підтримання уставки та допустимою частотою перемикань.

2.3 Баланс потужностей у локальній мікромережі

Фундаментальним фізичним обмеженням, що накладається на роботу будь-якої електричної мережі, є закон збереження енергії, який у формі балансу потужностей

формулюється так: алгебраїчна сума потужностей, що надходять у вузол мережі, дорівнює алгебраїчній сумі потужностей, що виходять із нього, з урахуванням втрат. Для i -го вузла мікромережі рівняння балансу активних потужностей має вигляд:

$$P_{ген,i}(t) + P_{вх,i}(t) = P_{сп,i}(t) + P_{вих,i}(t) + P_{втр,i}(t), \quad (2.15)$$

де $P_{ген,i}$ — потужність локальної генерації (наприклад, від сонячних панелей); $P_{вх,i}$ — потужність, що надходить від сусідніх вузлів або зовнішньої мережі; $P_{сп,i}$ — потужність споживання локального навантаження; $P_{вих,i}$ — потужність, що передається сусіднім вузлам; $P_{втр,i}$ — втрати потужності у вузлі та на лініях.

В інтегральній формі за період Δt це рівняння перетворюється на баланс енергії, який є основою для обліку:

$$W_{ген} + W_{вх} = W_{сп} + W_{вих} + W_{втр}. \quad (2.16)$$

На основі балансу потужностей формулюється задача керування: підтримання рівноваги між наявною та споживаною потужністю кожного вузла шляхом перерозподілу енергопотоків між сусідніми вузлами та керування локальним навантаженням (повне відключення низькопріоритетних споживачів при дефіциті, підключення додаткових при надлишку).

У розподіленій архітектурі, що розглядається у цьому проєкті, кожен інтелектуальний вузол вимірює локальний баланс $P_{ген,i} + P_{вх,i} - P_{сп,i}$ у реальному часі та повідомляє про його стан (надлишок/дефіцит) сусідньому вузлу через канал зв'язку. Спільне рішення про перерозподіл приймається на основі простих правил: вузол з надлишком пропонує його сусіду, вузол з дефіцитом запитує надходження. При втраті зв'язку кожен вузол переходить в автономний режим керування за останнім узгодженим прогнозом.

2.4 Теоретичні засади побудови мікропроцесорних систем реального часу

2.4.1 Дискретизація сигналів і теорема Котельникова

Перехід від неперервних сигналів до їх цифрового представлення є основоположним для побудови мікропроцесорних систем вимірювання. Теорема Котельникова-Найквіста встановлює умову коректної дискретизації:

$$f_s \geq 2 \cdot f_{max}, \quad (2.17)$$

де f_s — частота дискретизації; $f_{\max}$ — найвища частота в спектрі сигналу. Для сигналів промислової мережі з основною частотою 50 Гц та необхідністю обчислення гармонічних спотворень до 25-ї гармоніки (1250 Гц) мінімально необхідна частота дискретизації становить 2500 Гц. Практично використовують частоти 3,2–4 кГц, що забезпечує запас на завадостійкість.

2.4.2 Архітектура мікроконтролерної системи вузла

Інтелектуальний вузол реалізується на базі мікроконтролера з 32-розрядним ядром, який поєднує функції збору даних від смарт-датчика, виконання алгоритмів керування та обміну даними з сусіднім вузлом. Для задач, що розглядаються в цьому проєкті, доцільним є вибір мікроконтролера ESP32, оскільки він поєднує два процесорних ядра Xtensa LX6 з тактовою частотою 240 МГц, вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth, достатній обсяг пам'яті (520 КБ SRAM, 4 МБ Flash), а також інтерфейси UART, SPI, I²C, що дозволяє підключити смарт-датчик PZEM-004T безпосередньо без додаткових мостів.

2.4.3 Системи реального часу

Робота інтелектуального вузла потребує одночасного виконання кількох задач: періодичного опитування смарт-датчика, виконання алгоритму керування, обміну даними з сусіднім вузлом, обслуговування користувацького інтерфейсу. Для коректного розподілу процесорного часу між задачами використовуються операційні системи реального часу (ОСРЧ). Мікроконтролер ESP32 використовує ОСРЧ FreeRTOS, що реалізує витискаючу багатозадачність із пріоритетним плануванням. Кожна задача має власний пріоритет; задачі з вищим пріоритетом мають перевагу при доступі до процесорного часу. Для синхронізації задач використовуються семафори, м'ютекси та черги повідомлень.

Критичні задачі (опитування датчика, виконання регулятора) виконуються в задачах з вищим пріоритетом і періодичним викликом через апаратний таймер. Менш критичні задачі (обмін даними, журналювання) виконуються з нижчим пріоритетом.

2.5 Цифрові протоколи обміну даними

2.5.1 Протокол Modbus RTU

Modbus RTU — це послідовний протокол обміну даними, розроблений компанією Modicon у 1979 році, що зберіг широке застосування в промисловій автоматизації як стандарт *de facto*. Він реалізує клієнт-серверну (master-slave) архітектуру, де провідний пристрій ініціює запити, а підпорядковані пристрої відповідають.

Фізичним середовищем зазвичай є інтерфейс RS-485 (для промислових застосувань) або UART/TTL (для локальних з'єднань між модулями). Кадр Modbus RTU містить адресу пристрою (1 байт), код функції (1 байт), дані змінної довжини та контрольну суму CRC-16 (2 байти). Між кадрами витримується пауза не менше 3,5 інтервалів передачі символу.

У контексті цього проекту Modbus RTU використовується для зчитування даних зі смарт-датчика PZEM-004T мікроконтролером ESP32. PZEM-004T має фіксовану швидкість 9600 бод, формат кадру 8-N-2, та підтримує функцію 0x04 (Read Input Registers) для зчитування вимірюваних параметрів.

2.5.2 Протокол MQTT

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) — це легковісний протокол обміну повідомленнями за моделлю «публікація/підписка», стандартизований як ISO/IEC 20922:2016. Він спроектований для роботи в умовах обмеженої пропускної здатності каналу, нестабільного з'єднання та обмежених обчислювальних ресурсів пристроїв Інтернету речей (IoT).

Архітектура MQTT передбачає наявність центрального брокера (наприклад, Mosquitto, EMQX, HiveMQ), до якого підключаються клієнти-видавці та клієнти-підписники. Видавець публікує повідомлення під певну тему (topic), брокер пересилає це повідомлення всім підписникам цієї теми. Теми мають ієрархічну структуру з роздільником «/», що дозволяє організувати логічне групування інформації.

MQTT підтримує три рівні якості обслуговування (QoS):

QoS 0 — повідомлення доставляється не більше одного разу, без підтвердження; QoS 1 — повідомлення гарантовано доставляється принаймні один раз, з можливістю дублювання; QoS 2 — повідомлення гарантовано доставляється точно один раз.

Для задач обміну даними між інтелектуальними вузлами мікромережі рекомендований рівень QoS 1, що забезпечує надійну доставку при допустимих накладних витратах.

2.5.3 Технологія Wi-Fi 802.11 у локальній мережі

Бездротова мережа Wi-Fi стандарту IEEE 802.11 b/g/n у діапазоні 2,4 ГГц є типовим середовищем зв'язку для вузлів на основі ESP32. Для організації стабільного обміну між вузлами рекомендується використовувати інфраструктурний режим з виділеною точкою доступу, що забезпечує детерміновану адресацію та можливість підключення до існуючої локальної мережі для конфігурування та моніторингу.

2.6 Методи короткострокового прогнозування навантаження

Допоміжний функціональний рівень інтелектуального вузла включає короткострокове прогнозування локального споживання на горизонт від декількох хвилин до декількох годин. Прогноз використовується для попередження сусіднього вузла про очікувані зміни навантаження, що дозволяє завчасно перерозподілити ресурси. Враховуючи, що ІШ в системі має допоміжну роль (відповідно до концепції, обґрунтованої в Розділі 1), застосовуються легковісні алгоритми, що можуть бути реалізовані на самому мікроконтролері без необхідності виносити обчислення на зовнішній сервер.

2.6.1 Експоненційне згладжування Брауна

Найпростішим методом короткострокового прогнозування є експоненційне згладжування першого порядку (метод Брауна), що описується рекурентним співвідношенням:

$$\hat{y}(t+1) = \alpha \cdot y(t) + (1 - \alpha) \cdot \hat{y}(t), \quad (2.18)$$

де $\hat{y}(t+1)$ — прогнозоване значення; $y(t)$ — поточне вимірне значення; $\hat{y}(t)$ — попередній прогноз; $\alpha \in (0, 1)$ — параметр згладжування. Чим ближче α до 1, тим

швидше прогноз реагує на зміни поточного значення; чим ближче до 0, тим інерційнішим є прогноз. Перевагами методу є мінімальні обчислювальні витрати (одне множення та одне додавання на крок) та потреба зберігати лише одне попереднє значення.

2.6.2 Метод Хольта з лінійним трендом

Метод Брауна не враховує наявність тренду в часовому ряді, що актуально для добового профілю енергоспоживання, де тренд є природною складовою. Для таких випадків застосовується метод Хольта з лінійним трендом, який окремо оцінює рівень $L(t)$ та тренд $b(t)$:

$$L(t) = \alpha \cdot y(t) + (1 - \alpha) \cdot (L(t-1) + b(t-1)), \quad (2.19)$$

$$b(t) = \beta \cdot (L(t) - L(t-1)) + (1 - \beta) \cdot b(t-1), \quad (2.20)$$

$$\hat{y}(t+h) = L(t) + h \cdot b(t), \quad (2.21)$$

де $\alpha, \beta \in (0, 1)$ — параметри згладжування рівня та тренду відповідно; h — горизонт прогнозу в кроках. Метод залишається обчислювально простим і добре пристосованим для реалізації в мікроконтролері.

2.6.3 Метрики оцінки якості прогнозу

Для кількісного порівняння точності прогнозних моделей застосовуються стандартні метрики помилок прогнозування. Середня абсолютна помилка MAE:

$$MAE = (1/N) \cdot \sum_{i=1}^N |y(i) - \hat{y}(i)|. \quad (2.22)$$

Корінь із середньоквадратичної помилки RMSE — більш чутливий до великих відхилень:

$$RMSE = \sqrt{(1/N) \cdot \sum_{i=1}^N (y(i) - \hat{y}(i))^2}. \quad (2.23)$$

Середня абсолютна відсоткова помилка MAPE — нормована метрика, виражена у відсотках:

$$MAPE = (100\% / N) \cdot \sum_{i=1}^N |(y(i) - \hat{y}(i)) / y(i)|. \quad (2.24)$$

Для задач прогнозування навантаження прийнятним вважається значення MAPE на рівні 5–15 % для горизонту прогнозу до 1 години.

Порівняння методів прогнозування за основними характеристиками наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 — Порівняння методів короткострокового прогнозування

Метод	Параметри	Складність	Врахування тренду
Експоненційне згладжування Брауна	α	$O(1)$	Ні
Метод Хольта	α, β	$O(1)$	Так (лінійний)
Метод Хольта-Вінтерса	α, β, γ	$O(L)$	Так + сезонність
ARIMA(p,d,q)	$p+d+q$	$O(p+q)$	Через різниці
Лінійна регресія	n коеф.	$O(n)$	Через ознаки

Для реалізації в інтелектуальному вузлі обрано метод Хольта як такий, що поєднує врахування тренду з низькою обчислювальною складністю та малими вимогами до пам'яті.

2.7 Принципи побудови розподілених інтелектуальних систем

Розподілена архітектура системи передбачає, що кожен вузол функціонує як автономний інтелектуальний агент. У теорії мультиагентних систем агент визначається як автономна обчислювальна сутність, що сприймає стан середовища через датчики, приймає рішення на основі внутрішньої логіки та цілей, і впливає на середовище через виконавчі елементи. Для інтелектуального вузла мікромережі ці елементи реалізуються так: сенсорна підсистема — смарт-датчик електричних параметрів; виконавча підсистема — релейний модуль керування навантаженням; комунікаційна підсистема — канал MQTT-обміну з сусіднім вузлом; обчислювальне ядро — мікроконтролер з реалізованою логікою керування та прогнозування.

Узгодження стану між сусідніми вузлами здійснюється за принципом обміну стислими повідомленнями про поточний стан балансу та прогноз на найближчий горизонт. Повідомлення мають фіксований формат і передаються з частотою 0,1–1 Гц залежно від поточної динаміки. Це значно економніше за пропускну здатність порівняно з передачею первинних вимірювань і дозволяє організувати координацію навіть за обмеженого каналу зв'язку.

Особливою задачею є коректна поведінка вузлів при втраті зв'язку. Архітектура передбачає, що при відсутності повідомлень від сусіда протягом інтервалу таймауту (наприклад, 30 секунд) вузол переходить у режим автономного керування за останнім узгодженим прогнозом. У цьому режимі локальний контур керування продовжує функціонувати з опорою на власні вимірювання та збережений прогноз, забезпечуючи відмовостійкість системи в цілому.

Висновки до розділу 2

Розглянуто теоретичні засади, що становлять основу інженерної розробки автоматизованої системи обліку та балансування енергоспоживання локальної мікромережі.

Викладено принципи вимірювання активної, реактивної та повної потужності в мережах змінного струму, наведено формули для розрахунку діючих значень, коефіцієнта потужності та коефіцієнта гармонічних спотворень. Розглянуто структуру похибки вимірювального тракту та обґрунтовано вимоги до класу точності.

Викладено основи теорії автоматичного керування в обсязі, необхідному для проектування контуру балансування: математичну модель ПІД-регулятора в неперервній та дискретній формах, особливості реалізації в мікроконтролері (обмеження інтегральної складової, фільтрація диференційної), а також модель релейного регулятора з гістерезисом для керування комутаційними виконавчими елементами.

Сформульовано рівняння балансу активних потужностей у вузлі мікромережі, що становить основу для алгоритмів перерозподілу енергії між сусідніми вузлами. Описано принципи поведінки розподіленої системи при втраті зв'язку.

Розглянуто теоретичні аспекти побудови мікропроцесорної системи реального часу: вимоги до частоти дискретизації згідно з теоремою Котельникова, особливості архітектури ESP32, принципи планування задач в FreeRTOS.

Описано протоколи цифрового обміну, що використовуються в системі: Modbus RTU для зв'язку з PZEM-004T та MQTT для обміну між вузлами; обґрунтовано вибір рівня QoS 1 для повідомлень між вузлами.

Розглянуто методи короткострокового прогнозування навантаження — експоненційне згладжування Брауна та метод Хольта з лінійним трендом, наведено стандартні метрики оцінки якості прогнозу. Обґрунтовано вибір методу Хольта для реалізації у складі ІІІ-модуля інтелектуального вузла.

Сформульовані теоретичні засади є достатньою підставою для переходу до інженерної розробки системи у Розділі 3.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ТА БАЛАНСУВАННЯ

У цьому розділі викладено інженерну розробку автоматизованої системи обліку та балансування енергоспоживання локальної смарт-грід мікромережі з розподіленими інтелектуальними вузлами. На основі завдань, сформульованих у Розділі 1, та теоретичних засад, наведених у Розділі 2, послідовно формуються технічне завдання, структурна, функціональна та принципова електрична схеми системи, виконуються інженерні розрахунки основних вузлів та розробляються алгоритми їх функціонування.

3.1 Технічне завдання на розробку системи

На основі результатів огляду та аналізу, проведеного в Розділі 1, та відповідно до завдань на дипломне проєктування формалізовано технічне завдання на розробку автоматизованої системи обліку та балансування енергоспоживання локальної мікромережі.

3.1.1 Призначення та область застосування

Система призначена для автоматизованого обліку електроспоживання, контролю параметрів режиму та локального керування балансом потужності в межах локальної смарт-грід мікромережі, що обслуговує дві ділянки (умовно — дві вулиці) з груповим навантаженням побутових споживачів та можливістю інтеграції локальних джерел генерації. Областю застосування є приватний житловий сектор, малі громади, кампуси, агропромислові комплекси та інші об'єкти з груповим електроспоживанням до 50 кВт на ділянку.

3.1.2 Склад системи

До складу системи входять два інтелектуальні вузли обліку та керування — по одному на кожен ділянку мікромережі. Кожен вузол є самостійним функціональним пристроєм, що містить у своєму складі: вимірювальний модуль на основі смарт-датчика електричних параметрів; обчислювальне ядро на базі мікроконтролера; релейний модуль керування навантаженням; модуль бездротового зв'язку; джерело

живлення; засоби локальної індикації та сервісного інтерфейсу. Обмін даними між вузлами здійснюється через локальну Wi-Fi-мережу з використанням протоколу MQTT та брокера повідомлень.

3.1.3 Технічні характеристики

Основні технічні характеристики системи наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 — Основні технічні характеристики системи

Характеристика	Значення
Номінальна напруга вимірюваної мережі	230 В (однофазна)
Допустимий діапазон напруги	180–260 В
Номінальна частота мережі	50 Гц
Допустимий діапазон частоти	45–65 Гц
Максимальний струм одного вузла	100 А
Максимальна повна потужність ділянки	23 кВ·А
Клас точності за активною енергією	1,0
Похибка вимірювання напруги	$\pm 0,5 \%$
Похибка вимірювання струму	$\pm 0,5 \%$
Похибка вимірювання активної потужності	$\pm 1,0 \%$
Період опитування датчика	1 с
Період роботи регулятора балансу	1 с
Інтервал оновлення прогнозу	5 хв
Горизонт прогнозу	1 година
Стандарт бездротового зв'язку	IEEE 802.11 b/g/n (2,4 ГГц)
Протокол обміну між вузлами	MQTT v3.1.1, QoS 1
Протокол зв'язку з датчиком	Modbus RTU, 9600 бод
Кількість каналів керування навантаженням	не менше 2

Напруга живлення вузла	230 В AC або 5 В DC
Споживана потужність вузла	не більше 3 Вт
Діапазон робочих температур	0...+40 °C
Відносна вологість повітря	до 80 % при +25 °C

3.1.4 Функціональні вимоги

Система повинна забезпечувати реалізацію таких функцій:

- безперервне вимірювання діючих значень напруги та струму, активної, реактивної та повної потужності, коефіцієнта потужності, частоти мережі та накопиченої активної енергії на кожній ділянці;
- локальну первинну обробку вимірювань: фільтрацію, виявлення провалів та перенапруг, формування знеособлених статистичних показників за інтервалами усереднення;
- керування локальним навантаженням ділянки шляхом увімкнення-вимкнення керованих споживачів через релейні виходи у відповідності з заданими пріоритетами;
- короткострокове прогнозування навантаження ділянки на горизонт до однієї години на основі статистики попередніх вимірювань;
- обмін поточними значеннями балансу та прогнозами з сусіднім вузлом через канал MQTT;
- автономну роботу при втраті зв'язку із сусіднім вузлом, з опорою на останній отриманий прогноз;
- ведення локального журналу подій з накопиченням даних у внутрішній пам'яті мікроконтролера;
- візуальну індикацію поточного стану вузла (живлення, зв'язок, наявність аварії, режим керування) засобами світлодіодної та символічної індикації.

3.1.5 Умови експлуатації та вимоги до надійності

Система розрахована на роботу в закритих приміщеннях з умовно нормальним кліматом за ГОСТ 15150 (категорія розміщення 4.2 — опалювані приміщення з природною вентиляцією). Електромагнітна сумісність відповідає вимогам ДСТУ EN

61326-1 для обладнання, що використовується у промисловій електромагнітній обстановці. Середній час напрацювання на відмову для одного вузла — не менше 25 000 годин. Середній час відновлення працездатності — не більше 30 хвилин (з огляду на модульну побудову вузла та можливість замінити несправний компонент).

3.2 Розробка структурної схеми системи

Структурна схема є першим рівнем декомпозиції системи та визначає її основні складові і логічні зв'язки між ними без деталізації внутрішньої будови. Згідно з результатами Розділу 1, для системи прийнято гібридну розподілену архітектуру: основна функціональність керування реалізована на рівні автономних вузлів, але передбачено координацію між ними через канал зв'язку.

Структурна схема системи містить такі основні складові:

- зовнішня електрична мережа загального користування, що є основним джерелом електроенергії для мікромережі;
- вхідний автоматичний вимикач, що забезпечує захист мікромережі та її відключення від зовнішньої мережі в аварійних режимах;
- секційний вимикач, що електрично розділяє дві ділянки мікромережі та використовується для організації автономного режиму роботи ділянок;
- ділянка 1 мікромережі з груповим навантаженням побутових споживачів;
- ділянка 2 мікромережі з груповим навантаженням побутових споживачів;
- інтелектуальний вузол 1, підключений до ділянки 1;
- інтелектуальний вузол 2, підключений до ділянки 2;
- точка доступу Wi-Fi, що забезпечує бездротовий канал обміну між вузлами;
- MQTT-брокер, розгорнутий у локальній мережі (на одному з вузлів або на окремому пристрої), що забезпечує обмін повідомленнями між вузлами та зовнішніми засобами моніторингу.

Кожен інтелектуальний вузол виконує дві функціональні ролі. Перша — електрична: вузол увімкнено в розрив фази між загальним фідером та груповим навантаженням ділянки, що дозволяє вимірювати параметри режиму та керувати підключенням окремих категорій навантаження. Друга — інформаційна: вузол є

джерелом вимірних даних та точкою прийняття рішень про режим керування своєю ділянкою.

Інформаційні зв'язки між компонентами реалізуються через Wi-Fi-канал, що логічно розглядається як двостороння шина. Електричні зв'язки представлені силовими лініями ділянок, що зображуються товстими лініями на схемі.

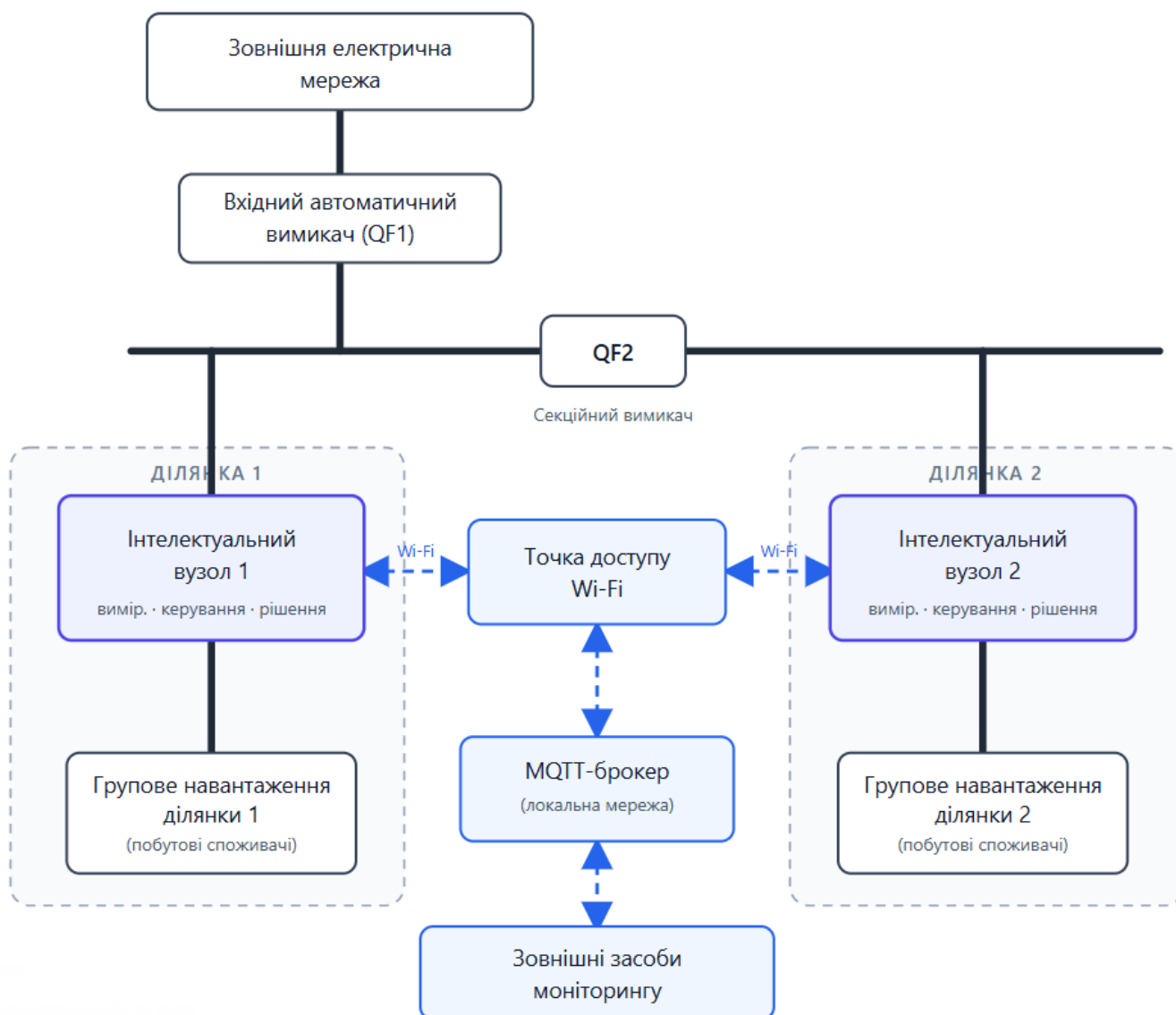


Рисунок 3.1 — Структурна схема автоматизованої системи обліку та балансування мікромережі

3.3 Розробка функціональної схеми інтелектуального вузла

Функціональна схема деталізує внутрішню будову одного інтелектуального вузла на рівні функціональних блоків та зв'язків між ними. Оскільки обидва вузли в системі побудовані за ідентичною схемою, розробляється одна узагальнена функціональна схема, що описує будь-який з них.

3.3.1 Склад функціональних блоків

Інтелектуальний вузол містить такі функціональні блоки:

Блок вимірювання (БВ) — реалізує первинне перетворення електричних величин та формує цифрові значення вимірюваних параметрів. Інженерним носієм блоку є смарт-датчик PZEM-004T, що містить трансформатор струму, дільник напруги, метрологічну мікросхему та інтерфейс UART з протоколом Modbus RTU.

Блок обчислення та керування (БОК) — реалізований на базі мікроконтролера ESP32. Виконує опитування БВ, цифрову обробку результатів вимірювання, розрахунок балансу потужностей, виконання дискретного регулятора балансування, обчислення короткострокового прогнозу навантаження та формування керуючих сигналів.

Блок комутації навантаження (БКН) — реалізований на базі релейного модуля з електромеханічними реле або твердотільними реле. Кількість каналів — не менше двох, що дозволяє керувати двома категоріями навантажень за різними пріоритетами.

Блок зв'язку (БЗ) — інтегрований у складі мікроконтролера ESP32 модуль Wi-Fi стандарту 802.11 b/g/n у діапазоні 2,4 ГГц. Забезпечує підключення до точки доступу локальної мережі та обмін MQTT-повідомленнями.

Блок живлення (БЖ) — імпульсний AC/DC перетворювач 230 В AC → 5 В DC, з гальванічною розв'язкою та фільтрацією завад. Забезпечує живлення електронних компонентів вузла.

Блок індикації (БІ) — складається з світлодіодних індикаторів та символьного OLED-дисплея, що відображає поточні значення параметрів режиму, стан зв'язку та аварійні повідомлення.

Блок сервісного інтерфейсу (БСІ) — USB-порт у складі плати мікроконтролера, що використовується для початкового налаштування, прошивки програмного забезпечення та діагностики.

3.3.2 Сигнали та потоки даних

Логіка функціонування вузла визначається такими основними потоками даних та керуючих сигналів.

Між БВ та БОК — двосторонній обмін за протоколом Modbus RTU через інтерфейс UART. БОК формує запити на читання регістрів результатів вимірювань (функція 0x04), БВ передає у відповіді поточні значення U , I , P , Q , $\cos \phi$, f , W .

Від БОК до БКН — однонаправлений керуючий сигнал у форматі цифрових рівнів TTL (3,3 В) на входи керування реле. Логічний рівень визначає увімкнений (1) або вимкнений (0) стан відповідного релейного каналу.

Між БОК та БЗ — внутрішній обмін через шину мікроконтролера (фактично — між програмними задачами FreeRTOS, оскільки БЗ є частиною того ж чіпа). БОК передає на БЗ повідомлення для публікації в MQTT-теми, БЗ повертає БОК отримані повідомлення від сусіднього вузла.

Від БЖ до всіх інших блоків — постійна напруга 5 В DC (для PZEM-004T, релейного модуля) та 3,3 В DC (для ESP32 — формується внутрішнім регулятором плати). Споживаний струм у нормальному режимі — не більше 600 мА.

Між БОК та БІ — однонаправлений потік даних на дисплей через інтерфейс I²C (для OLED) та сигнали керування світлодіодами через GPIO.

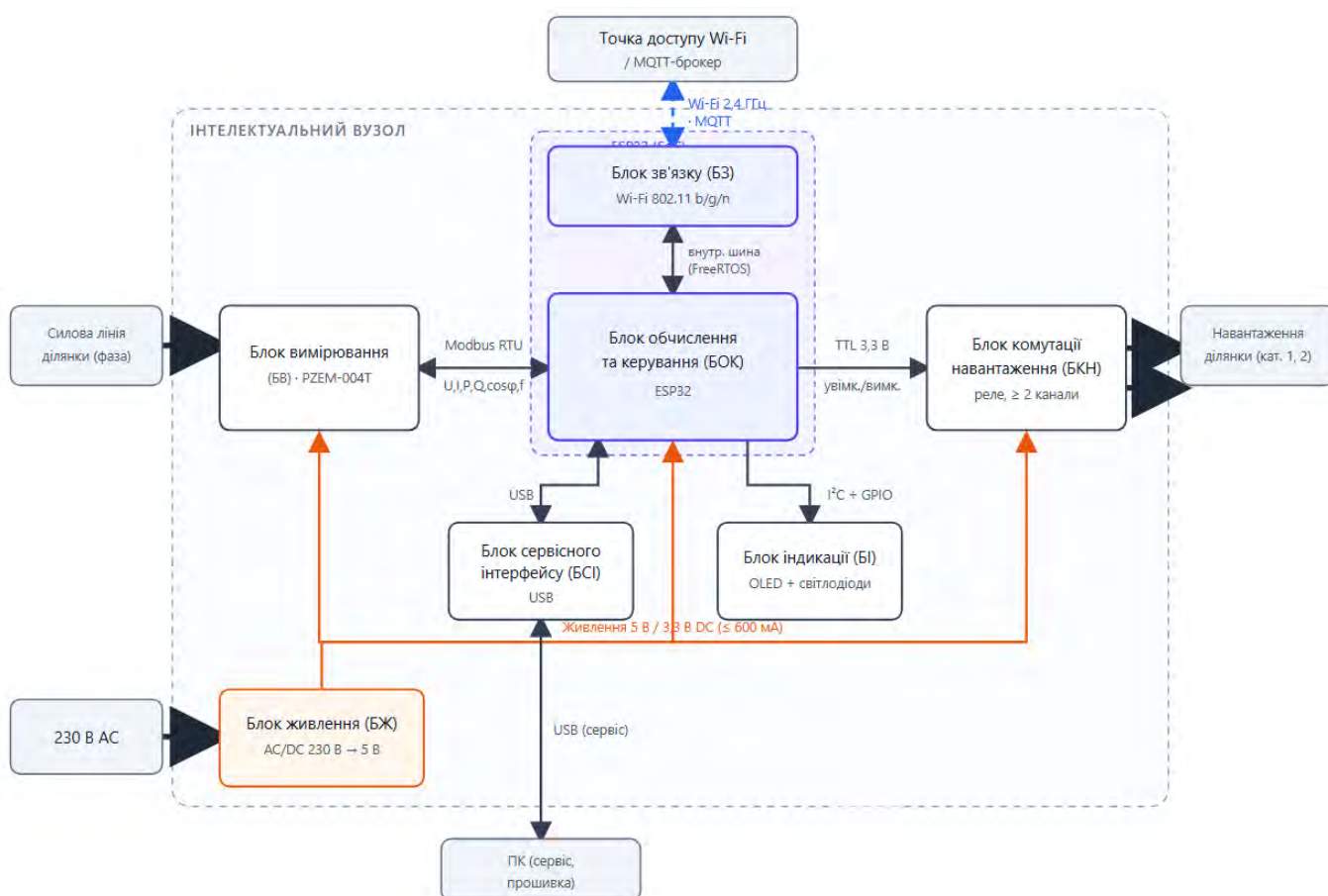


Рисунок 3.2 — Функціональна схема інтелектуального вузла

3.4 Розробка принципової електричної схеми вузла

Принципова електрична схема розкриває склад електричних елементів вузла, їх з'єднання та номінали, забезпечуючи можливість безпосередньої реалізації вузла в апаратній формі.

3.4.1 Обґрунтування вибору компонентної бази

Вибір основних компонентів вузла визначається вимогами технічного завдання, результатами порівняльного аналізу з Розділу 1 та теоретичними засадами з Розділу 2.

Мікроконтролер. Як обчислювальне ядро вузла обрано модуль ESP32-WROOM-32 у складі плати розробника ESP32 DevKit. Підстави вибору: наявність двох обчислювальних ядер з тактовою частотою 240 МГц, інтегрованих модулів Wi-Fi 2,4 ГГц та Bluetooth 4.2, обсягу пам'яті 520 КБ SRAM та 4 МБ Flash, апаратних інтерфейсів UART, SPI, I²C, до 36 ліній GPIO, апаратних таймерів та АЦП. Мікроконтролер підтримує ОСРЧ FreeRTOS, що є штатним середовищем розробки. Вартість модуля — у межах 250–350 грн на момент розробки, що відповідає бюджету проекту.

Смарт-датчик електричних параметрів. На основі результатів порівняння (табл. 1.2 Розділу 1) обрано модуль PZEM-004T v3.0 на базі метрологічної IC SD3004 з вбудованим трансформатором струму на 100 А. Підстави вибору: класи точності 0,5 % за струмом та напругою, 1,0 за активною потужністю; повний набір вимірюваних параметрів; інтерфейс UART з протоколом Modbus RTU; гальванічна розв'язка з вимірюваним колом; компактне виконання та помірна вартість (близько 400 грн).

Релейний модуль. Обрано двоканальний модуль на базі електромеханічних реле HF41F-005-ZS з контактною групою на 10 А при 230 В AC. Підстави вибору: достатня струмова навантажувальна здатність для керування побутовими навантаженнями, наявність оптичної гальванічної розв'язки керуючого кола, керування логічними рівнями 3,3 / 5 В, низька вартість. Для категорій навантажень з підвищеними вимогами до швидкодії та ресурсу комутацій передбачається

можливість заміни електромеханічних реле на твердотільні (SSR) такого ж формфактора без зміни схеми керування.

Блок живлення. Як джерело живлення обрано малопотужний AC/DC імпульсний модуль HLK-PM01 на 5 В / 0,6 А з гальванічною розв'язкою. Підстави вибору: компактне виконання, достатній струмовий запас (з урахуванням споживання ESP32 ~250 мА у режимі з активним Wi-Fi та релейного модуля ~150 мА на канал), сертифікація CE / RoHS.

Дисплей. Як засіб локальної індикації обрано символічний OLED-дисплей SSD1306 0,96" 128×64 пікселів з інтерфейсом I²C. Підстави вибору: компактність, висока контрастність, низьке енергоспоживання (~10 мА), широка програмна підтримка.

Зведений перелік компонентів вузла наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 — Перелік основних компонентів інтелектуального вузла

Поз.	Найменування	Тип / модель	Кількість
A1	Мікроконтролерний модуль	ESP32 DevKit V1	1
A2	Смарт-датчик електричних параметрів	PZEM-004T v3.0	1
A3	Релейний модуль двоканальний	На базі HF41F-005-ZS	1
A4	AC/DC імпульсний блок живлення	HLK-PM01 (5 В / 0,6 А)	1
HG1	OLED-дисплей	SSD1306, I ² C, 0,96"	1
HL1	Індикатор живлення	Світлодіод 5 мм, зелений	1
HL2	Індикатор Wi-Fi-з'єднання	Світлодіод 5 мм, синій	1
HL3	Індикатор аварії	Світлодіод 5 мм, червоний	1
R1–R3	Струмообмежувальні резистори LED	330 Ом, 0,25 Вт	3
QF1	Автоматичний вимикач вхідний	I _н = 10 А, 230 В AC	1
XS1	Клемник підключення мережі	WAGO 222 (2-конт.)	1

XS2, XS3	Клемники виходів реле	WAGO 222 (2-конт.)	2
-------------	-----------------------	--------------------	---

3.4.2 Опис принципової електричної схеми

Електроживлення вузла організовано таким чином. Фазний провідник мережі підключається до клемника XS1 через автоматичний вимикач QF1, що забезпечує захист вузла від перевантажень та коротких замикань. Безпосередньо з виходу QF1 фаза подається на вхід АС живлення модуля PZEM-004T (A2), що дозволяє йому вимірювати напругу мережі. Через окрему пару контактів цього ж клемника фаза подається також на вхід АС-частини блоку живлення A4. Нульовий провідник підключається до спільної точки нульових клем PZEM-004T та A4 безпосередньо з мережі.

Для вимірювання струму використовується інтегрований у PZEM-004T трансформатор струму, який охоплює фазний провідник, що йде до групового навантаження ділянки. Трансформатор сполучається з модулем PZEM-004T через двопроводовий екранований кабель та входи СТ+, СТ-.

Виходи стабілізованої напруги +5 В DC та GND блоку живлення A4 з'єднуються з відповідними входами живлення мікроконтролера A1 (VIN, GND), релейного модуля A3 (VCC, GND) та інтерфейсного боку PZEM-004T (VCC 5 В, GND). Внутрішній лінійний регулятор плати A1 знижує 5 В до 3,3 В для живлення ядра ESP32 та I/O.

Інформаційний обмін з PZEM-004T організовано через UART2 мікроконтролера: лінія TX (GPIO 17) підключена до виходу RX модуля PZEM-004T, лінія RX (GPIO 16) — до виходу TX. Параметри обміну: швидкість 9600 бод, формат 8-N-2, протокол Modbus RTU.

Керування релейним модулем A3 здійснюється від ліній GPIO мікроконтролера: GPIO 25 — канал 1 (керування навантаженням першого пріоритету), GPIO 26 — канал 2 (керування навантаженням другого пріоритету). Логічний рівень високий (3,3 В) відповідає увімкненому стану відповідного реле.

Оптична розв'язка на платі релейного модуля забезпечує гальванічне розділення керуючої та силової частин.

OLED-дисплей HG1 підключений до I²C-інтерфейсу мікроконтролера: SDA (GPIO 21), SCL (GPIO 22), живлення 3,3 В. Адреса дисплея на шині I²C — 0x3C.

Світлодіодні індикатори HL1, HL2, HL3 підключені до ліній GPIO 32, 33, 27 мікроконтролера через струмообмежувальні резистори R1–R3 номіналом 330 Ом. Розрахунок номіналу: при падінні напруги на світлодіоді U_LED = 2,0 В та струмі I_LED = 4 мА опір становить $R = (3,3 - 2,0) / 0,004 = 325 \text{ Ом}$, з ряду E24 обрано номінал 330 Ом.

Виходи релейних контактів модуля A3 виведено на клемники XS2 та XS3, до яких підключаються керовані навантаження ділянки. Кожен релейний канал виконує функцію розриву фазного провідника навантаження.

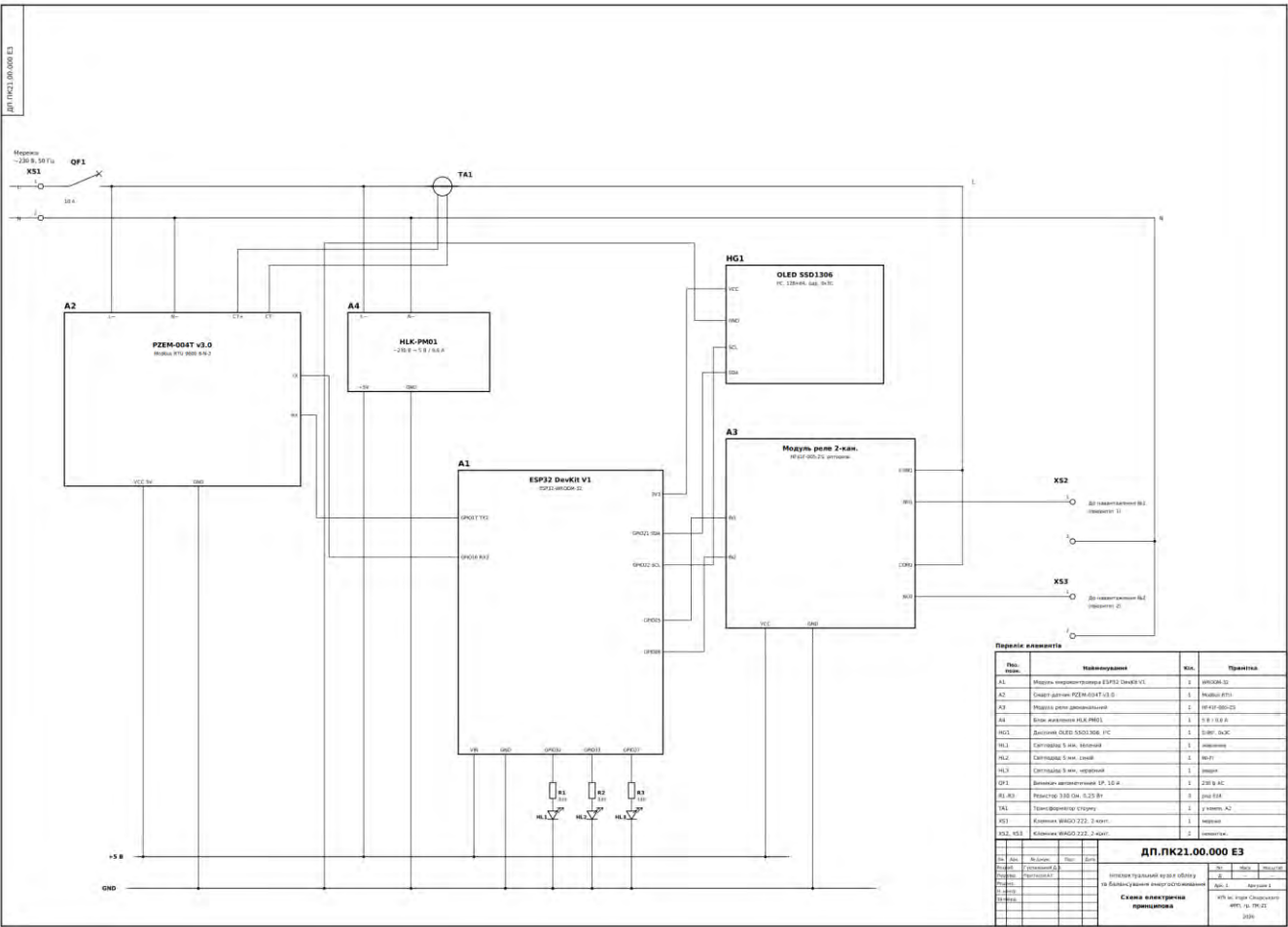


Рисунок 3.3 — Принципова електрична схема інтелектуального вузла.

3.4.3 Розподіл ліній GPIO мікроконтролера

Розподіл ліній GPIO мікроконтролера ESP32 між функціональними призначеннями наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 — Розподіл ліній GPIO мікроконтролера ESP32

GPIO	Призначення	Напрямок	Інтерфейс
16	RX від PZEM-004T	Вхід	UART2 RX
17	TX до PZEM-004T	Вихід	UART2 TX
21	SDA дисплея SSD1306	I/O	I ² C SDA
22	SCL дисплея SSD1306	Вихід	I ² C SCL
25	Керування реле K1	Вихід	GPIO digital
26	Керування реле K2	Вихід	GPIO digital
27	Індикатор аварії HL3	Вихід	GPIO digital
32	Індикатор живлення HL1	Вихід	GPIO digital
33	Індикатор Wi-Fi HL2	Вихід	GPIO digital
0	Кнопка BOOT (службова)	Вхід	GPIO digital

Сумарне споживання GPIO значно нижче допустимих 12 мА на лінію та 200 мА у сумі за всіма виходами, що відповідає рекомендаціям виробника мікроконтролера.

3.5 Розрахунок метрологічних характеристик вимірювального тракту

Метою розрахунку є визначення сумарної похибки вимірювального тракту вузла та обґрунтування відповідності досягнутого класу точності вимогам технічного завдання (клас 1,0 за активною енергією).

3.5.1 Складові похибки вимірювального тракту

Вимірювальний тракт вузла побудований на основі смарт-датчика PZEM-004T v3.0, що виконує первинне перетворення, аналого-цифрове перетворення та обчислення електричних параметрів усередині спеціалізованої метрологічної мікросхеми SD3004. Згідно з технічною документацією на модуль, основні похибки засобу вимірювання становлять: за напругою $\delta_U = \pm 0,5 \%$; за струмом $\delta_I = \pm 0,5 \%$;

за активною потужністю $\delta_P = \pm 0,5 \%$. Роздільна здатність вимірювання: за напругою 0,1 В, за струмом 0,01 А, за потужністю 0,1 Вт, за енергією 1 Вт·год.

Сумарна похибка вимірювального тракту складається з таких складових: основної похибки засобу вимірювання $\delta_{\text{осн}}$; похибки квантування $\delta_{\text{кв}}$, зумовленої скінченною роздільною здатністю; методичної похибки $\delta_{\text{м}}$ цифрового обчислення інтегральних величин; додаткової температурної похибки $\delta_{\text{т}}$, зумовленої відхиленням робочої температури від нормальної.

3.5.2 Розрахунок похибки квантування

Похибка квантування визначається роздільною здатністю та значенням вимірюваної величини. Відносна похибка квантування для активної потужності обчислюється як:

$$\delta_{\text{кв}} = (q_P / P_{\text{вим}}) \cdot 100 \%, \quad (3.1)$$

де $q_P = 0,1$ Вт — крок квантування потужності; $P_{\text{вим}}$ — виміряне значення потужності. Для номінального навантаження ділянки $P_{\text{ном}} = 2300$ Вт (струм 10 А при напрузі 230 В) похибка квантування становить:

$$\delta_{\text{кв}} = (0,1 / 2300) \cdot 100 \% = 0,0043 \%. \quad (3.2)$$

Для мінімального робочого навантаження $P_{\text{мін}} = 100$ Вт похибка квантування зростає до $\delta_{\text{кв}} = (0,1 / 100) \cdot 100 \% = 0,1 \%$, що все ще є малою величиною порівняно з основною похибкою засобу вимірювання. Аналогічно, похибка квантування за струмом при робочому струмі 1 А становить $(0,01 / 1) \cdot 100 \% = 1 \%$, тому для коректних вимірювань на малих струмах рекомендується забезпечувати робочий діапазон навантаження не нижче 5 % від максимального струму датчика.

3.5.3 Розрахунок додаткової температурної похибки

Технічні характеристики засобу вимірювання нормовані за нормальних умов (температура $+23$ °С). Робочий діапазон температур за технічним завданням становить $0 \dots +40$ °С, тобто максимальне відхилення від нормальної температури складає $\Delta\theta = 17$ °С. Приймавши типовий температурний коефіцієнт метрологічної мікросхеми $\gamma_t = 0,02 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, додаткова температурна похибка оцінюється як:

$$\delta_t = \gamma_t \cdot \Delta\theta = 0,02 \cdot 17 = 0,34 \%. \quad (3.3)$$

3.5.4 Розрахунок сумарної похибки

Оскільки складові похибки є незалежними випадковими величинами, результуюча похибка вимірювального тракту за активною потужністю визначається за правилом геометричного підсумовування (формула 2.9 розділу 2):

$$\delta_{\text{заг}} = \sqrt{(\delta_{\text{осн}}^2 + \delta_{\text{кв}}^2 + \delta_{\text{м}}^2 + \delta_{\text{т}}^2)}. \quad (3.4)$$

Прийнявши $\delta_{\text{осн}} = 0,5 \%$, $\delta_{\text{кв}} = 0,1 \%$ (для мінімального навантаження як найгірший випадок), методичну похибку $\delta_{\text{м}} = 0,2 \%$ (зумовлену цифровим обчисленням інтегралів за скінченною кількістю вибірок) та $\delta_{\text{т}} = 0,34 \%$, отримуємо:

$$\delta_{\text{заг}} = \sqrt{(0,5^2 + 0,1^2 + 0,2^2 + 0,34^2)} = \sqrt{(0,25 + 0,01 + 0,04 + 0,1156)} = \sqrt{0,4156} \approx 0,64 \%. \quad (3.5)$$

Розрахункова сумарна похибка вимірювального тракту за активною потужністю становить $\pm 0,64 \%$, що не перевищує граничного значення для класу точності 1,0. Отже, вимірювальний тракт відповідає вимогам технічного завдання за метрологічними характеристиками з запасом. Зауважимо, що для задач керування (на відміну від комерційного фіскального обліку) допускається використання засобів класу 1,0–2,0, тому досягнута точність є цілком достатньою. Зведення результатів розрахунку наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 — Складові похибки вимірювального тракту за активною потужністю

Складова похибки	Позначення	Значення, %
Основна похибка засобу вимірювання	$\delta_{\text{осн}}$	0,50
Похибка квантування (мін. навантаження)	$\delta_{\text{кв}}$	0,10
Методична похибка обчислення	$\delta_{\text{м}}$	0,20
Додаткова температурна похибка	$\delta_{\text{т}}$	0,34
Сумарна похибка (геометричне підсумовування)	$\delta_{\text{заг}}$	0,64

3.6 Розрахунок параметрів регулятора балансування потужності

Контур балансування потужності реалізує підтримання споживання ділянки в межах наявної потужності. Відповідно до архітектури системи застосовуються два рівні регулювання: основний — релейний регулятор з гістерезисом, що керує дискретним відключенням навантажень за пріоритетами; додатковий —

пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор уставки міжвузлового перетоку потужності.

3.6.1 Розрахунок параметрів релейного регулятора

Релейний регулятор з гістерезисом (модель за формулою 2.14 розділу 2) приймає рішення про відключення або підключення керованого навантаження залежно від відхилення поточного споживання від наявної потужності. Зона гістерезису 2Δ обирається з компромісу між точністю підтримання балансу та частотою комутацій релейних контактів.

Приймемо наявну потужність ділянки в обмеженому (аварійному) режимі $P_{\text{нав}} = 5000$ Вт. Половину зони гістерезису приймемо на рівні 5 % від наявної потужності:

$$\Delta = 0,05 \cdot P_{\text{нав}} = 0,05 \cdot 5000 = 250 \text{ Вт.} \quad (3.6)$$

Таким чином, відключення низькопріоритетного навантаження відбувається при перевищенні споживанням рівня $P_{\text{нав}} + \Delta = 5250$ Вт, а зворотне підключення — при зниженні споживання нижче рівня $P_{\text{нав}} - \Delta = 4750$ Вт. Оцінимо максимальну частоту комутацій релейного контакту. Мінімальний період між двома послідовними перемиканнями визначається швидкістю зміни навантаження dP/dt та шириною зони гістерезису:

$$T_{\text{ком}} = 2\Delta / (dP/dt). \quad (3.7)$$

Для побутового навантаження характерна швидкість зміни складає одиниці кіловат за хвилину. Приймавши найгіршу оцінку $dP/dt = 1000$ Вт/хв, отримуємо мінімальний період комутацій:

$$T_{\text{ком}} = (2 \cdot 250) / 1000 \cdot 60 = 30 \text{ с.} \quad (3.8)$$

Оцінимо ресурс релейного контакту. Реле HF41F-005-ZS має механічний ресурс не менше 10^7 та комутаційний ресурс при номінальному навантаженні не менше 10^5 циклів. Приймавши за добу в середньому 50 циклів комутації (з урахуванням реальної динаміки навантаження, яка значно повільніша за найгіршу оцінку), очікуваний термін служби релейного контакту становить:

$$T_{\text{сл}} = 10^5 / 50 = 2000 \text{ діб} \approx 5,5 \text{ року,} \quad (3.9)$$

що є прийнятним для пристрою такого класу. Збільшення зони гістерезису або заміна електромеханічного реле твердотільним (передбачена принциповою схемою) дозволяє додатково підвищити ресурс комутацій.

3.6.2 Розрахунок параметрів ПІ-регулятора міжвузлового балансу

Для плавного узгодження перетоку потужності між вузлами використовується ПІ-регулятор, що формує уставку запитуваної/пропонованої потужності. Об'єкт керування (ділянка мережі з урахуванням затримок виконання та зв'язку) апроксимується аперіодичною ланкою першого порядку із запізненням:

$$W_{\text{об}}(s) = K_{\text{об}} \cdot e^{(-\tau \cdot s)} / (T_{\text{об}} \cdot s + 1), \quad (3.10)$$

де $K_{\text{об}} = 1$ — коефіцієнт передачі (нормований); $T_{\text{об}} = 2$ с — стала часу об'єкта; $\tau = 0,5$ с — транспортне запізнення, зумовлене затримкою обміну MQTT та спрацюванням виконавчого елемента. Налаштування ПІ-регулятора виконаємо за методом Зіглера-Нікольса для аперіодичного об'єкта з запізненням. Параметри ПІ-регулятора визначаються співвідношеннями:

$$K_p = 0,9 \cdot T_{\text{об}} / (K_{\text{об}} \cdot \tau), \quad T_i = 3,3 \cdot \tau. \quad (3.11)$$

Підставляючи числові значення:

$$K_p = 0,9 \cdot 2 / (1 \cdot 0,5) = 3,6; \quad T_i = 3,3 \cdot 0,5 = 1,65 \text{ с}. \quad (3.12)$$

Інтегральний коефіцієнт регулятора:

$$K_i = K_p / T_i = 3,6 / 1,65 \approx 2,18 \text{ с}^{-1}. \quad (3.13)$$

Дискретна реалізація регулятора з періодом квантування $T_s = 1$ с (відповідно до періоду роботи регулятора за технічним завданням) виконується за позиційним алгоритмом (формула 2.12 розділу 2):

$$u(k) = 3,6 \cdot e(k) + 2,18 \cdot 1 \cdot \sum e(i), \quad (3.14)$$

з урахуванням обмеження інтегральної складової для запобігання насиченню (anti-windup) та обмеження вихідного сигналу межами фізично можливого перетоку потужності між вузлами.

3.6.3 Оцінка стійкості замкненого контуру

Метод налаштування Зіглера-Нікольса забезпечує запас стійкості, що відповідає коефіцієнту загасання перехідного процесу близько 0,25 (співвідношення

амплітуд сусідніх коливань 4:1). Для аперіодичного об'єкта першого порядку із запізненням такі налаштування гарантують стійкість замкненого контуру із запасом за фазою орієнтовно 40–50°, що є достатнім для практичної реалізації. Детальна перевірка стійкості та якості перехідних процесів виконується методом імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink у розділі 4.

3.7 Розрахунок енергетичного балансу ділянки

Метою розрахунку є визначення розрахункового навантаження ділянки, обґрунтування категоризації споживачів за пріоритетами та перевірка можливості забезпечення балансу в обмеженому режимі живлення.

3.7.1 Розрахунок навантаження ділянки

Приймемо, що ділянка обслуговує групу з $n = 5$ житлових будинків. Установлена потужність одного будинку (сумарна потужність усіх електроприймачів) $P_{\text{вст}} = 8$ кВт. Установлена потужність ділянки:

$$P_{\text{вст.діл}} = n \cdot P_{\text{вст}} = 5 \cdot 8 = 40 \text{ кВт.} \quad (3.15)$$

Розрахункове (фактичне максимальне) навантаження визначається з урахуванням коефіцієнта попиту $K_{\text{п}}$, що враховує неодночасність роботи електроприймачів. Для групи житлових будинків приймається $K_{\text{п}} = 0,4$ згідно з нормами проектування електропостачання житлового сектору:

$$P_{\text{розр}} = K_{\text{п}} \cdot P_{\text{вст.діл}} = 0,4 \cdot 40 = 16 \text{ кВт.} \quad (3.16)$$

Середньодобове споживання енергії ділянкою при коефіцієнті заповнення добового графіка $K_{\text{з}} = 0,5$ становить:

$$W_{\text{доб}} = K_{\text{з}} \cdot P_{\text{розр}} \cdot 24 = 0,5 \cdot 16 \cdot 24 = 192 \text{ кВт} \cdot \text{год.} \quad (3.17)$$

3.7.2 Категоризація навантажень за пріоритетами

Для реалізації керованого балансування навантаження ділянки поділяється на три категорії за пріоритетом, як наведено в таблиці 3.5. Категорія 1 (критичні навантаження) не підлягає відключенню; категорії 2 та 3 відключаються релейними виходами вузла за зниженням пріоритету при дефіциті потужності.

Таблиця 3.5 — Категоризація навантажень ділянки за пріоритетами

Категорія	Склад навантаження	Потужність, кВт	Керування
1 (критична)	Освітлення, холодильники, зв'язок, безпека	4	Не відключається
2 (середня)	Розеткова мережа, побутова техніка	6	Реле К1
3 (некритична)	Водонагрівачі, кондиціонери, зарядка ЕМ	6	Реле К2

3.7.3 Перевірка балансу в обмеженому режимі

Розглянемо найбільш напружений сценарій: аварія зовнішньої мережі, коли ділянка живиться від обмеженого джерела (локальна генерація та переток від сусіднього вузла) з наявною потужністю $P_{\text{нав}} = 5$ кВт. Розрахункове навантаження $P_{\text{розр}} = 16$ кВт. Дефіцит потужності:

$$\Delta P = P_{\text{розр}} - P_{\text{нав}} = 16 - 5 = 11 \text{ кВт. (3.18)}$$

Алгоритм балансування послідовно відключає навантаження за зростанням пріоритету. Після відключення категорії 3 (6 кВт) залишкове навантаження становить $16 - 6 = 10$ кВт, що все ще перевищує наявну потужність. Після додаткового відключення категорії 2 (6 кВт) залишкове навантаження складає $16 - 6 - 6 = 4$ кВт, що менше наявної потужності $P_{\text{нав}} = 5$ кВт. Таким чином, баланс забезпечується за рахунок відключення некритичних та середньопріоритетних навантажень із збереженням живлення критичної категорії (4 кВт), для якої залишається резерв потужності $5 - 4 = 1$ кВт. Розрахунок підтверджує, що прийнята категоризація навантажень та логіка пріоритетного відключення забезпечують збереження живлення критичних споживачів навіть у найбільш напруженому аварійному режимі.

3.8 Розрахунок параметрів каналу зв'язку між вузлами

Метою розрахунку є визначення необхідної пропускної здатності каналу обміну між вузлами, перевірка її відповідності можливостям бездротового каналу та обґрунтування параметрів виявлення втрати зв'язку.

3.8.1 Розрахунок необхідної пропускної здатності

Між вузлами передаються повідомлення про поточний стан балансу та короткостроковий прогноз навантаження. Структура повідомлення у форматі JSON містить ідентифікатор вузла, поточну потужність, баланс, масив прогнозу на 12 точок та поле статусу. Орієнтовний обсяг корисного навантаження повідомлення складає $V_{дан} = 130$ байт. З урахуванням службових заголовків протоколів MQTT, TCP, IP та кадру Wi-Fi загальний обсяг переданого кадру становить орієнтовно:

$$V_{кадр} = V_{дан} + V_{служб} \approx 130 + 170 = 300 \text{ байт. (3.19)}$$

При частоті обміну $f_{обм} = 1$ Гц необхідна пропускна здатність каналу:

$$C_{необх} = V_{кадр} \cdot 8 \cdot f_{обм} = 300 \cdot 8 \cdot 1 = 2400 \text{ біт/с} = 2,4 \text{ кбіт/с. (3.20)}$$

Реальна пропускна здатність каналу Wi-Fi стандарту IEEE 802.11n у діапазоні 2,4 ГГц складає десятки мегабіт за секунду навіть з урахуванням реальних умов прийому. Коефіцієнт використання каналу:

$$k_{вик} = C_{необх} / C_{канал} = 2400 / (20 \cdot 10^6) \approx 1,2 \cdot 10^{-4}. (3.21)$$

Отримане значення показує, що завантаження каналу складає мізерну частку його пропускної здатності, тобто канал зв'язку має багаторазовий запас і не є обмежувальним фактором системи.

3.8.2 Розрахунок параметрів виявлення втрати зв'язку

Перехід вузла в автономний режим відбувається при відсутності повідомлень від сусіднього вузла протягом часу таймауту $T_{тайм}$. Прийmemo $T_{тайм} = 30$ с, що при частоті обміну 1 Гц відповідає $N = 30$ послідовно пропущеним повідомленням. Оцінимо ймовірність хибного спрацювання автономного режиму внаслідок випадкових втрат пакетів. Приймавши ймовірність втрати окремого пакета в локальній мережі $p = 0,01$ (1 %) та незалежність втрат, ймовірність втрати N послідовних пакетів:

$$P_{хиб} = p^N = 0,01^{30} = 10^{-60}. (3.22)$$

Отримане значення є фізично нехтовно малим, тобто випадкові втрати пакетів практично не можуть спричинити хибний перехід в автономний режим. Перехід відбудеться лише при реальному порушенні зв'язку (відмова точки доступу, фізична втрата вузла), що і є бажаною поведінкою системи. Застосування рівня якості

обслуговування MQTT QoS 1 додатково гарантує доставку повідомлень принаймні один раз.

3.8.3 Розрахунок затримки обміну

Сумарна затримка доставки повідомлення складається із затримки бездротового каналу $t_{\text{wifi}} \approx 3$ мс, затримки обробки в брокері MQTT $t_{\text{бр}} \approx 5$ мс та затримки обробки на боці вузла $t_{\text{вуз}} \approx 10$ мс. Сумарна затримка:

$$t_{\text{заг}} = t_{\text{wifi}} + t_{\text{бр}} + t_{\text{вуз}} \approx 3 + 5 + 10 = 18 \text{ мс. (3.23)}$$

Сумарна затримка обміну (18 мс) є на два порядки меншою за період роботи регулятора (1 с), тому затримка зв'язку не впливає на стійкість та якість керування і врахована в моделі об'єкта (підрозділ 3.6.2) як складова транспортного запізнення.

3.9 Розрахунок теплового режиму вузла

Метою розрахунку є визначення перевищення температури всередині корпусу вузла над температурою навколишнього середовища та перевірка дотримання допустимих температурних режимів компонентів без застосування примусового охолодження.

3.9.1 Розрахунок потужності тепловиділення

Сумарне тепловиділення всередині корпусу вузла визначається сумою потужностей, що розсіюються компонентами. Складові тепловиділення наведено в таблиці 3.6 для найгіршого випадку — обидва релейні канали увімкнені, активний обмін Wi-Fi.

Таблиця 3.6 — Складові тепловиділення компонентів вузла

Компонент	Потужність розсіювання, Вт
Блок живлення HLK-PM01 (втрати перетворення)	1,00
Мікроконтролер ESP32 (з активним Wi-Fi)	0,70
Смарт-датчик PZEM-004T	0,40
Котушки двох реле ($2 \times 0,36$ Вт)	0,72
OLED-дисплей та світлодіоди	0,10

Сумарне тепловиділення $P_{\text{розс}}$ $2,92 \approx 3,0$

3.9.2 Розрахунок перевищення температури

Вузол розміщується у пластиковому корпусі габаритами $150 \times 110 \times 70$ мм.

Площа поверхні тепловіддачі корпусу:

$$A = 2 \cdot (a \cdot b + a \cdot c + b \cdot c) = 2 \cdot (0,15 \cdot 0,11 + 0,15 \cdot 0,07 + 0,11 \cdot 0,07) = 0,0694 \text{ м}^2. \quad (3.24)$$

Перевищення температури всередині корпусу над температурою навколишнього середовища при природній конвекції визначається за рівнянням теплового балансу:

$$\Delta T = P_{\text{розс}} / (\alpha \cdot A), \quad (3.25)$$

де α — коефіцієнт тепловіддачі при природній конвекції для пластикового корпусу, що приймається $\alpha = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Підставляючи числові значення:

$$\Delta T = 3,0 / (8 \cdot 0,0694) = 3,0 / 0,555 \approx 5,4 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (3.26)$$

При максимальній температурі навколишнього середовища за технічним завданням $T_{\text{нс.мах}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ максимальна температура всередині корпусу складе:

$$T_{\text{вн.мах}} = T_{\text{нс.мах}} + \Delta T = 40 + 5,4 = 45,4 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (3.27)$$

3.9.3 Перевірка допустимих температурних режимів

Порівняння розрахункової максимальної внутрішньої температури з граничними робочими температурами компонентів наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 — Перевірка температурних режимів компонентів

Компонент	Гранична робоча t , $^\circ\text{C}$	Розрахункова t , $^\circ\text{C}$	Запас, $^\circ\text{C}$
ESP32-WROOM-32	85	45,4	39,6
PZEM-004T	60	45,4	14,6
Реле HF41F	70	45,4	24,6
HLK-PM01	60	45,4	14,6
OLED SSD1306	70	45,4	24,6

Розрахункова максимальна температура всередині корпусу ($45,4 \text{ }^\circ\text{C}$) не перевищує граничних робочих температур жодного з компонентів, причому мінімальний температурний запас (для PZEM-004T та HLK-PM01) становить близько $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Отже,

тепловий режим вузла забезпечується природною конвекцією без застосування примусового охолодження. Для додаткового підвищення надійності рекомендується передбачити в корпусі вентиляційні отвори у верхній та нижній частинах для організації природної вентиляції за рахунок ефекту тяги.

3.10 Загальний алгоритм роботи інтелектуального вузла

Програмне забезпечення вузла побудоване на основі багатозадачної архітектури з використанням ОСРЧ FreeRTOS. Виконання функцій вузла розподілене між сімома задачами, що працюють паралельно з різними пріоритетами та періодичністю. Розподіл задач, їх пріоритети та періодичність наведено в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 — Перелік задач FreeRTOS інтелектуального вузла

Задача	Призначення	Пріоритет	Період
Task_Watchdog	Скидання апаратного сторожового таймера	6	100 мс
Task_Measurement	Опитування PZEM-004T, обчислення балансу	5	1 с
Task_Timeout	Контроль таймауту сусіднього вузла	5	1 с
Task_Control	Робота релейного регулятора та ПІ-контур	4	1 с
Task_Comms	Обмін MQTT-повідомленнями	4	за подією
Task_Forecast	Оновлення прогнозу за методом Хольта	3	5 хв
Task_Display	Оновлення OLED-дисплея та індикаторів	1	500 мс

3.10.1 Алгоритм ініціалізації вузла

Перед запуском основного циклу виконуються кроки ініціалізації обладнання та програмних компонентів:

Крок 1. Ініціалізація апаратних модулів мікроконтролера: налаштування ліній GPIO відповідно до табл. 3.3, ініціалізація UART2 для зв'язку з PZEM-004T (9600 бод, 8-N-2), ініціалізація I²C-шини для OLED-дисплея.

Крок 2. Вивід стартового екрану на OLED-дисплей з ідентифікацією вузла та версією програмного забезпечення; засвічення індикатора живлення HL1.

Крок 3. Підключення до точки доступу Wi-Fi за збереженими параметрами SSID/пароль. У разі невдачі — повторні спроби з експоненційно зростаючим інтервалом (1, 2, 4, 8 с) до 5 спроб; при невдачі всіх спроб вузол переходить в автономний режим без зовнішнього зв'язку.

Крок 4. Підключення до брокера MQTT за збереженою адресою та підписка на тему сусіднього вузла `microgrid/node{id_neighbor}/state`. У разі успіху — засвічення індикатора зв'язку HL2.

Крок 5. Сервісний обмін з PZEM-004T: читання адреси датчика (функція Modbus 0x03, регістр 0x0002) для перевірки наявності та коректної комунікації. У разі помилки — індикація аварії HL3 та повторні спроби.

Крок 6. Ініціалізація моделі прогнозу за методом Хольта: початкові значення рівня $L(0)$ дорівнюють першому вимірюваному значенню потужності, початковий тренд $b(0)$ дорівнює нулю.

Крок 7. Установлення початкового стану релейних виходів: усі канали увімкнені (всі категорії навантаження живляться).

Крок 8. Створення та запуск усіх задач FreeRTOS відповідно до табл. 3.8.

3.10.2 Алгоритм основного циклу керування

Основний цикл керування реалізується задачею Task_Control з періодом 1 с. На кожному циклі виконуються такі кроки:

Крок 1. Отримання останніх вимірних значень від задачі Task_Measurement через міжзадачну чергу: активна потужність $P_{\text{сп}}$, вимірні значення U , I , $\cos \varphi$, f , накопичена енергія W .

Крок 2. Отримання останнього стану сусіднього вузла з пам'яті обміну: $P_{\text{сус}}$, баланс сусіда, прогноз сусіда, час останнього оновлення.

Крок 3. Обчислення поточного балансу потужності ділянки за рівнянням (2.15) Розділу 2: $\Delta P = P_{\text{нав}} + P_{\text{перет}} - P_{\text{сп}}$, де $P_{\text{нав}}$ — поточна наявна потужність від зовнішньої мережі, $P_{\text{перет}}$ — потужність перетоку від сусіднього вузла (від'ємна — віддається сусіду).

Крок 4. Перевірка наявності зв'язку із сусіднім вузлом: якщо час від останнього отриманого повідомлення перевищує $T_{\text{тайм}} = 30$ с, вузол переходить у режим AUTONOMOUS (підрозділ 3.12).

Крок 5. Робота релейного регулятора з гістерезисом за алгоритмом, наведеним у підрозділі 3.10.3.

Крок 6. Робота ПІ-регулятора міжвузлового перетоку: обчислення нової уставки запитуваної/пропонованої потужності за дискретним рівнянням (3.14).

Крок 7. Формування повідомлення про власний стан та публікація в MQTT-тему `microgrid/node{id_self}/state` з рівнем якості обслуговування QoS 1.

Крок 8. Передача задачі `Task_Display` оновлених значень для відображення на OLED.

3.10.3 Алгоритм релейного регулятора з гістерезисом

Релейний регулятор реалізує дискретне відключення та підключення категорій навантаження за пріоритетами. Алгоритм описується такою послідовністю:

Крок 1. Перевірка умови дефіциту потужності: якщо $\Delta P < -\Delta$ (де $\Delta = 250$ Вт згідно з розрахунком 3.6.1) — переходити до кроку 2; інакше — до кроку 4.

Крок 2. Знаходження найнижчопріоритетного увімкненого навантаження серед керованих категорій. Якщо такі відсутні — індикація аварії (всі керовані категорії вже відключені, дефіцит зберігається).

Крок 3. Видача команди відключення на відповідний релейний вихід; оновлення стану відповідного реле в пам'яті.

Крок 4. Перевірка умови надлишку потужності: якщо $\Delta P > +\Delta$ і є відключені керовані категорії — переходити до кроку 5; інакше — кінець циклу.

Крок 5. Знаходження найвищопріоритетного відключеного навантаження серед керованих категорій.

Крок 6. Видача команди увімкнення на відповідний релейний вихід; оновлення стану відповідного реле в пам'яті.

3.11 Алгоритм короткострокового прогнозування навантаження

Прогноз короткострокового навантаження ділянки використовується для попередження сусіднього вузла про очікувані зміни споживання та для організації превентивного перерозподілу потужності. Алгоритм реалізує метод Хольта з лінійним трендом, теоретичні засади якого викладено в підрозділі 2.6.2.

3.11.1 Підготовка вхідних даних

Прогноз будується не на основі миттєвих значень потужності (вони містять значні шумові коливання), а на основі усереднених значень за п'ятихвилинні інтервали. Для цього в задачі Task_Measurement передбачено накопичувач $P_сума$ та лічильник $n_зразків$. Усереднене значення на k -му інтервалі обчислюється як:

$$P_сер(k) = P_сума(k) / n_зразків(k) = (\sum_{i=1}^{300} P_сн(i)) / 300. \quad (3.28)$$

Після обчислення значення накопичувачі обнуляються, а $P_сер(k)$ передається задачі Task_Forecast як новий вхідний вимір.

3.11.2 Алгоритм оновлення моделі Хольта

Параметри моделі: коефіцієнт згладжування рівня $\alpha = 0,4$; коефіцієнт згладжування тренду $\beta = 0,15$. Значення обрано за результатами емпіричної настройки на типовому добовому графіку побутового навантаження як такі, що забезпечують баланс між інерційністю та реактивністю прогнозу.

На кожному виклику задачі Task_Forecast (раз на 5 хв) виконуються кроки:

Крок 1. Отримання нового усередненого значення $P_сер(k)$ з задачі Task_Measurement.

Крок 2. Перевірка вхідного значення на викид: якщо $|P_сер(k) - L(k-1)| > 0,5 \cdot L(k-1)$, значення вважається аномальним та замінюється на $L(k-1) + b(k-1)$ (екстраполяцію останнього прогнозу). Це запобігає викривленню моделі короткостроковими сплесками.

Крок 3. Оновлення рівня згідно з рівнянням (2.19) Розділу 2:

$$L(k) = \alpha \cdot P_sep(k) + (1 - \alpha) \cdot (L(k-1) + b(k-1)) = 0,4 \cdot P_sep(k) + 0,6 \cdot (L(k-1) + b(k-1)). \quad (3.29)$$

Крок 4. Оновлення тренду згідно з рівнянням (2.20) Розділу 2:

$$b(k) = \beta \cdot (L(k) - L(k-1)) + (1 - \beta) \cdot b(k-1) = 0,15 \cdot (L(k) - L(k-1)) + 0,85 \cdot b(k-1). \quad (3.30)$$

Крок 5. Формування вектора прогнозу на горизонт $N = 12$ точок (відповідає 1 годині з кроком 5 хв):

$$\hat{P}(k + h) = L(k) + h \cdot b(k), \quad h = 1, 2, \dots, 12. \quad (3.31)$$

Крок 6. Передача оновленого вектора прогнозу задачі Task_Comms для включення в наступне MQTT-повідомлення.

3.11.3 Оцінка обчислювальних витрат

Алгоритм Хольта на кожному виклику виконує близько 10 арифметичних операцій з плаваючою точкою для оновлення рівня та тренду плюс N операцій для формування вектора прогнозу. Загальна кількість операцій на цикл — близько 25, що для ESP32 з тактовою частотою 240 МГц виконується за час менше 1 мкс. Споживання пам'яті — три змінні типу float (12 байт) плюс масив прогнозу (48 байт). Це робить алгоритм Хольта особливо придатним для реалізації в мікроконтролері та виправдовує його вибір порівняно з обчислювально складнішими методами на кшталт ARIMA чи рекурентних нейронних мереж.

3.12 Алгоритм координації між вузлами та автономного режиму

Алгоритм координації забезпечує обмін поточним станом та прогнозами між двома вузлами мікромережі, узгодження уставок міжвузлового перетоку та коректну поведінку при втраті зв'язку. Реалізація базується на скінченному автоматі станів вузла.

3.12.1 Структура повідомлення обміну

Кожен вузол публікує власний стан у форматі JSON у MQTT-тему `microgrid/node{id}/state`. Структура повідомлення наведена в табл. 3.9.

Таблиця 3.9 — Структура повідомлення про стан вузла

Поле	Тип	Призначення
------	-----	-------------

id	uint8	Ідентифікатор вузла (1 або 2)
ts	uint32	Часова мітка повідомлення, мс від запуску
P_cons	float	Поточне споживання, Вт
P_avail	float	Наявна потужність, Вт
balance	float	Поточний баланс ΔP , Вт
forecast[12]	array	Прогноз на 12 точок (5 хв кожна), Вт
state	enum	Стан вузла (NORMAL, SURPLUS, DEFICIT, AUTONOMOUS, EMERGENCY)
relays	uint8	Бітова маска поточного стану реле
fault	uint8	Прапор наявності аварійної ситуації

3.12.2 Скінченний автомат станів вузла

Логіка вузла описується скінченним автоматом з п'ятьма станами:

NORMAL — нормальний режим: двосторонній обмін з сусіднім вузлом, баланс підтримується за рахунок локального керування навантаженням та узгодженого перетоку. Перехід в інші стани — за умовами, описаними нижче.

SURPLUS — режим надлишку: власна наявна потужність перевищує власне споживання, вузол готовий передавати потужність сусіду. Перехід у **NORMAL** при вирівнюванні балансу.

DEFICIT — режим дефіциту: власне споживання перевищує наявну потужність, вузол запитує перетік від сусіднього вузла. Перехід у **NORMAL** при отриманні достатньої потужності, або в **EMERGENCY** при неможливості отримати перетік та при вичерпанні можливостей відключення категорій навантажень.

AUTONOMOUS — автономний режим: зв'язок із сусіднім вузлом відсутній (таймаут перевищено). Вузол керує лише власним навантаженням на основі останнього отриманого прогнозу від сусіда як орієнтиру. Перехід у **NORMAL** при відновленні зв'язку.

EMERGENCY — аварійний режим: серйозне порушення режиму (відсутність живлення зовнішньої мережі та сусіднього вузла, або відмова сенсора). Вузол

максимально розвантажує власну ділянку, залишаючи живлення лише критичних споживачів категорії 1.

Переходи між станами автомата визначаються наступними умовами:

NORMAL $\rightarrow$ SURPLUS: $\Delta P > +\Delta_{\text{сус}}$ протягом 3 послідовних циклів, де $\Delta_{\text{сус}} = 500$ Вт — поріг визнання надлишку (вибір значення гарантує, що надлишок є стійким, а не короткочасним сплеском).

NORMAL $\rightarrow$ DEFICIT: $\Delta P < -\Delta_{\text{сус}}$ протягом 3 послідовних циклів.

SURPLUS $\rightarrow$ NORMAL: $|\Delta P| < \Delta_{\text{сус}}$.

DEFICIT $\rightarrow$ NORMAL: $|\Delta P| < \Delta_{\text{сус}}$ після отримання достатнього перетоку.

Будь-який стан $\rightarrow$ AUTONOMOUS: відсутність повідомлень від сусіднього вузла протягом $T_{\text{тайм}} = 30$ с.

AUTONOMOUS $\rightarrow$ NORMAL: отримано хоча б одне повідомлення від сусіда із валідним часовим штампом.

Будь-який стан $\rightarrow$ EMERGENCY: одночасна втрата зовнішньої мережі ($P_{\text{нав}} = 0$) та зв'язку з сусіднім вузлом.

3.12.3 Алгоритм координації перетоку

В нормальному режимі координація перетоку реалізується таким чином:

Крок 1. Отримати останнє повідомлення сусіда: $\Delta P_{\text{сус}}$, прогноз сусіда $\hat{P}_{\text{сус}}(k+h)$.

Крок 2. Обчислити сумарний баланс двох вузлів: $\Delta P_{\text{сум}} = \Delta P_{\text{влас}} + \Delta P_{\text{сус}}$.

Крок 3. Визначити запропонований перетік від вузла з надлишком до вузла з дефіцитом:

$$P_{\text{перет}} = \min(|\Delta P_{\text{надл}}|, |\Delta P_{\text{деф}}|, P_{\text{перет.мах}}), \quad (3.32)$$

де $P_{\text{перет.мах}}$ — максимально допустимий перетік (обмежений пропускною здатністю секційного зв'язку, наприклад 5 кВт).

Крок 4. Сформувані уставку $P_{\text{сет}} = P_{\text{перет}}$ та подати її на вхід ПІ-регулятора міжвузлового балансу.

Крок 5. ПІ-регулятор формує керуючий вплив, який реалізується через зміну стану навантажень та координацію часу їх увімкнення/відключення.

3.12.4 Поведінка в автономному режимі

При переході в автономний режим вузол: припиняє очікувати уставки перетоку від сусіда, переходить на власні розрахунки балансу; використовує останній отриманий прогноз сусіда $\hat{P}_{\text{сус}}$ як орієнтир для попередження про очікувані зміни загального стану мікромережі; підвищує консервативність — застосовує більш суворі пороги відключення низькопріоритетних навантажень (Δ зменшується до 100 Вт), щоб уникнути ризикованих рішень за відсутності повної інформації; продовжує спроби відновити зв'язок з сусіднім вузлом з періодичністю 5 с; при отриманні відповіді — повертається в режим NORMAL з повним обміном.

Висновки до розділу 3

У розділі виконано повну інженерну розробку автоматизованої системи обліку та балансування енергоспоживання локальної смарт-грід мікромережі з розподіленими інтелектуальними вузлами.

Сформовано технічне завдання, що визначає двадцять три ключові технічні характеристики системи та містить вимоги до її функцій, умов експлуатації та надійності. Прийняті значення відповідають стандартам ДСТУ EN 50160, ДСТУ ІЕС 62053-21 та ГОСТ 15150 і забезпечують застосовність системи в реальних умовах житлового сектору.

Розроблено структурну схему системи, що містить два інтелектуальні вузли, секційний вимикач, точку доступу Wi-Fi та MQTT-брокер; функціональну схему вузла з декомпозицією на сім функціональних блоків з визначеними потоками даних та керуючих сигналів; принципову електричну схему вузла на базі мікроконтролера ESP32, смарт-датчика PZEM-004T v3.0, релейного модуля, OLED-дисплея, AC/DC блоку живлення HLK-PM01 з обґрунтуванням вибору кожного компонента та повним розподілом ліній GPIO.

Виконано п'ять інженерних розрахунків основних вузлів системи. Метрологічний розрахунок встановив, що сумарна похибка вимірювального тракту за активною потужністю становить $\pm 0,64 \%$, що відповідає класу 1,0 з запасом. Розрахунок регулятора балансування визначив параметри релейного контуру (зона гістерезису 250 Вт, очікуваний ресурс реле близько 5,5 року) та ПІ-регулятора

міжвузлового перетоку ($K_p = 3,6$, $K_i = 2,18 \text{ с}^{-1}$) методом Зіглера-Нікольса. Розрахунок енергетичного балансу підтвердив можливість збереження живлення критичних навантажень в аварійному режимі при наявній потужності 5 кВт. Розрахунок каналу зв'язку показав, що необхідна пропускна здатність 2,4 кбіт/с становить мізерну частку можливостей Wi-Fi, а ймовірність хибного спрацювання таймауту автономного режиму нехтовно мала. Тепловий розрахунок встановив, що максимальна температура всередині корпусу 45,4 °C не перевищує граничних значень компонентів, тому примусове охолодження не потрібне.

Розроблено алгоритмічне забезпечення вузла на базі ОСРЧ FreeRTOS з розподілом функцій між сімома задачами з визначеними пріоритетами та періодичністю. Алгоритм основного циклу керування інтегрує опитування смарт-датчика, релейне керування навантаженням за пріоритетами та ПІ-регулятор міжвузлового перетоку. Алгоритм короткострокового прогнозування реалізує метод Хольта з лінійним трендом, забезпечуючи прогнозування навантаження на горизонт 1 година при мінімальних обчислювальних витратах (близько 25 операцій з плаваючою точкою на цикл оновлення). Алгоритм координації між вузлами побудований на основі скінченного автомата з п'ятьма станами (NORMAL, SURPLUS, DEFICIT, AUTONOMOUS, EMERGENCY) із чітко визначеними умовами переходів, що гарантує коректну поведінку системи в усьому діапазоні робочих та аварійних режимів, включно з повною втратою зв'язку між вузлами.

Усі розроблені технічні рішення та алгоритми відповідають вимогам сформульованого технічного завдання та становлять основу для побудови імітаційної моделі системи в середовищі Matlab/Simulink, що виконується в Розділі 4.

РОЗДІЛ 4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ

У цьому розділі описано імітаційну модель автоматизованої системи обліку та балансування енергоспоживання локальної смарт-грід мікромережі, побудовану в середовищі MATLAB/Simulink, а також наведено результати її дослідження за п'ятьма сценаріями, що в сукупності охоплюють усі робочі та аварійні режими роботи системи. Модель реалізує енергетичний баланс мікромережі з двома інтелектуальними вузлами обліку, спільним накопичувачем та фотоелектричним джерелом і відтворює керуючу логіку, описану в розділі 3.

4.1 Опис стенду комп'ютерного моделювання

4.1.1 Програмне середовище та інструменти

Імітаційну модель розроблено в середовищі MATLAB/Simulink версії R2023a. Для реалізації окремих частин системи використано такі компоненти середовища:

- Simulink — базове середовище блочного імітаційного моделювання, у якому зібрано енергетичну частину системи (генерація, споживання, накопичувач, баланс потужності);
- Stateflow — інструмент для опису скінченно-автоматної керуючої логіки; у ньому реалізовано діаграму станів системи з восьми режимів роботи;
- Simulink Dashboard — бібліотека інтерактивних елементів керування та індикації (гейджі, перемикачі, повзунки, лампи), що утворюють панель оператора для демонстрації роботи системи в реальному часі;
- Instrument Control Toolbox — пакет, що надає блоки UDP Send / UDP Receive для організації обміну даними між моделлю та зовнішнім програмним мостом.

Дискретизацію моделі задано фіксованим кроком $T_s = 1$ с, що відповідає періоду опитування датчиків та періоду роботи регулятора, прийнятим у розділі 3. Розв'язувач (solver) обрано дискретного типу (fixed-step, discrete), оскільки модель не містить неперервних станів — накопичувач реалізовано дискретним інтегратором заряду.

Параметри моделі винесено в окремий скрипт ініціалізації `mg_params.m`, який автоматично виконується перед кожним запуском моделі (через виклик `InitFcn`).

Такий підхід забезпечує єдине джерело числових даних і дозволяє швидко змінювати умови між сценаріями моделювання, не редагуючи саму схему.

4.1.2 Структура імітаційної моделі

Структурно імітаційна модель складається з шести функціональних підсистем, що відповідають архітектурі, наведеній у розділі 3:

- підсистема фотоелектричної генерації (PV) — формує потужність сонячного джерела з урахуванням добового циклу та випадкової складової хмарності;
- підсистема спільного накопичувача — обчислює стан заряду (SOC) на основі балансу потужності з урахуванням коефіцієнтів корисної дії заряду та розряду;
- підсистеми споживання вузлів A і B — задають потужність навантаження двох ділянок мережі;
- керуюча підсистема Stateflow — приймає рішення про вмикання/вимикання категорій навантаження та обмеження генерації залежно від стану системи;
- підсистема зв'язку MQTT/UDP — забезпечує обмін станом між моделлю та фізичним вузлом A (для HIL-режиму);
- інтерактивна панель Dashboard — засоби керування та візуалізації стану системи в реальному часі.

Загальну структуру моделі з усіма підсистемами та зв'язками між ними наведено на рисунку 4.1. Контур керування є замкненим: обчислений стан заряду надходить до керуючого автомата Stateflow, який формує команди вмикання навантажень та обмеження генерації; ці команди впливають на ефективне споживання та генерацію, що, у свою чергу, змінює баланс потужності й стан заряду накопичувача.

частиною мікромережі (вузол В, накопичувач, генерація), а фізичний прилад — реальним вузлом А.

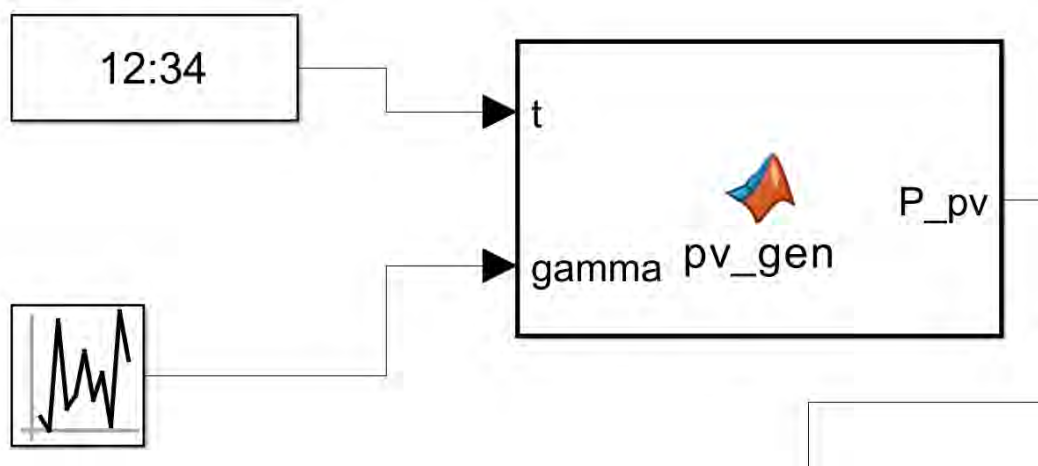
4.2 Реалізація моделей компонентів системи

4.2.1 Модель фотоелектричної генерації

Підсистема фотоелектричної генерації формує миттєву потужність сонячного джерела як добуток детермінованого добового тренда та випадкового коефіцієнта прозорості атмосфери, що імітує мінливу хмарність. Детермінований тренд описано напівхвилею синуса від моменту сходу до моменту заходу сонця, що відповідає формулам (2.31)–(2.32) розділу 2.

Для коректної роботи моделі за різної тривалості модельної доби моменти сходу та заходу задано як частки доби (f_{sunrise} , f_{sunset}), які масштабуються разом із періодом T_{day} . Випадкову складову хмарності формує блок Uniform Random Number у діапазоні $[\gamma_{\text{min}}; 1]$ з періодом оновлення 60 с, що забезпечує плавнішу зміну освітленості порівняно зі щосекундним шумом. Обчислення потужності виконує функціональний блок MATLAB Function за наведеним алгоритмом; вихідну потужність обмежено фізичними межами $[0; 3000]$ Вт.

Результат роботи підсистеми за повну модельну добу наведено на рисунку 4.2: потужність дорівнює нулю в нічні години, плавно зростає після сходу сонця, сягає пікового значення близько 3000 Вт опівдні та спадає до заходу; випадкові коливання верхньої частини «горба» відповідають мінливій хмарності.



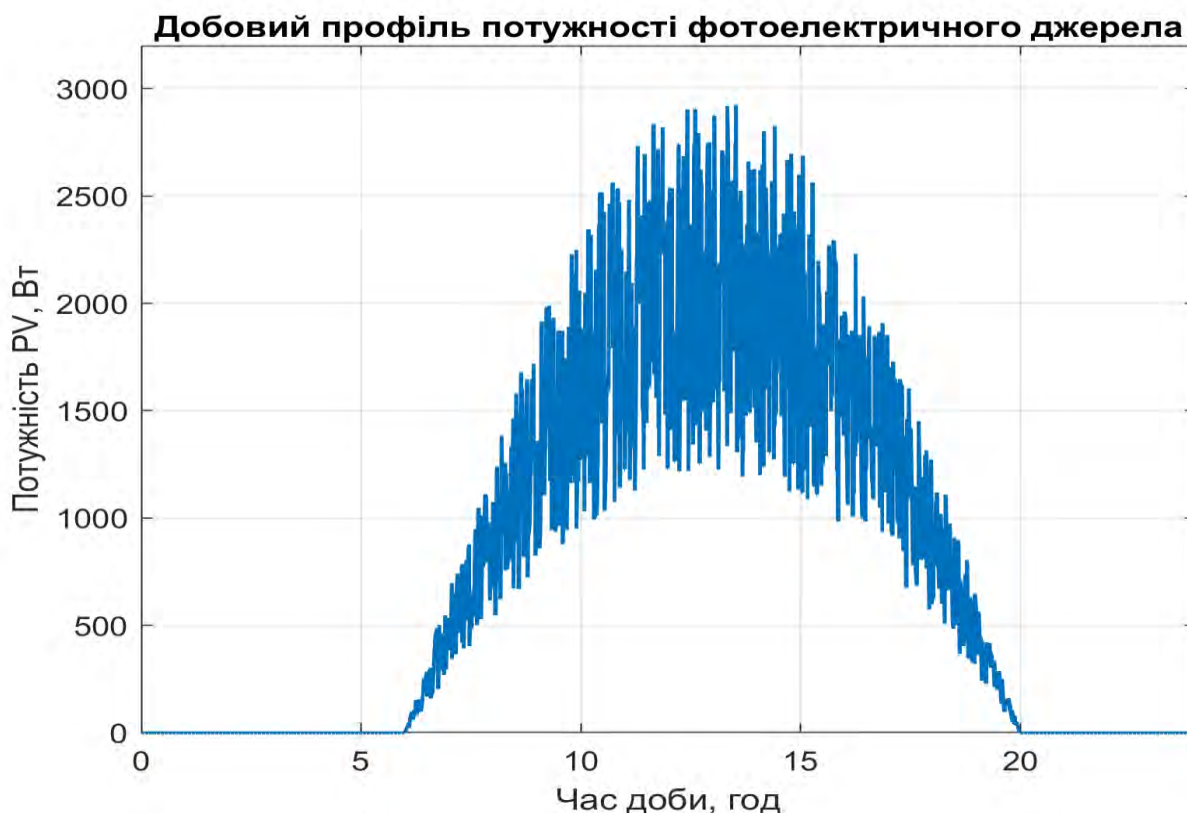


Рисунок 4.2 — Підсистема фотоелектричної генерації та добовий профіль потужності

4.2.2 Модель спільного накопичувача

Спільний накопичувач реалізовано не повною електрохімічною моделлю, а моделлю стану заряду на основі дискретного інтегратора, оскільки для задачі енергетичного балансування достатньо враховувати накопичену енергію, а не напругу й внутрішній опір елемента. Такий підхід відповідає енергетичній постановці задачі та узгоджується з параметрами накопичувача, прийнятими в розділах 2 і 3.

Модель обчислює стан заряду SOC за формулою (2.26): миттєва потужність накопичувача P_{bat} множиться на коефіцієнт корисної дії ($\eta_{\text{заряду}}$ при заряді або $1/\eta$ при розряді, що обирається блоком Switch залежно від знака потужності), нормується на повну енергоємність накопичувача та інтегрується дискретним інтегратором з обмеженням виходу в межах $[SOC_{min}; SOC_{max}] = [0,10; 0,90]$. Початковий стан заряду SOC_0 задається параметром і змінюється під конкретний сценарій.

Прийняті параметри накопичувача: номінальна енергоємність 5 кВт·год, максимальна потужність заряду/розряду 2 кВт, циклічний коефіцієнт корисної дії 95 %. За таких параметрів розрядження робочого діапазону SOC (0,80) потужністю 2 кВт триває близько 1,95 год, що повністю узгоджується з розрахунками автономії, наведеними в розділі 3 (таблиця 3.10). Коректність роботи моделі заряду й розряду перевірено окремими тестовими прогонами та підтверджено в межах сценаріїв (підрозділ 4.4).

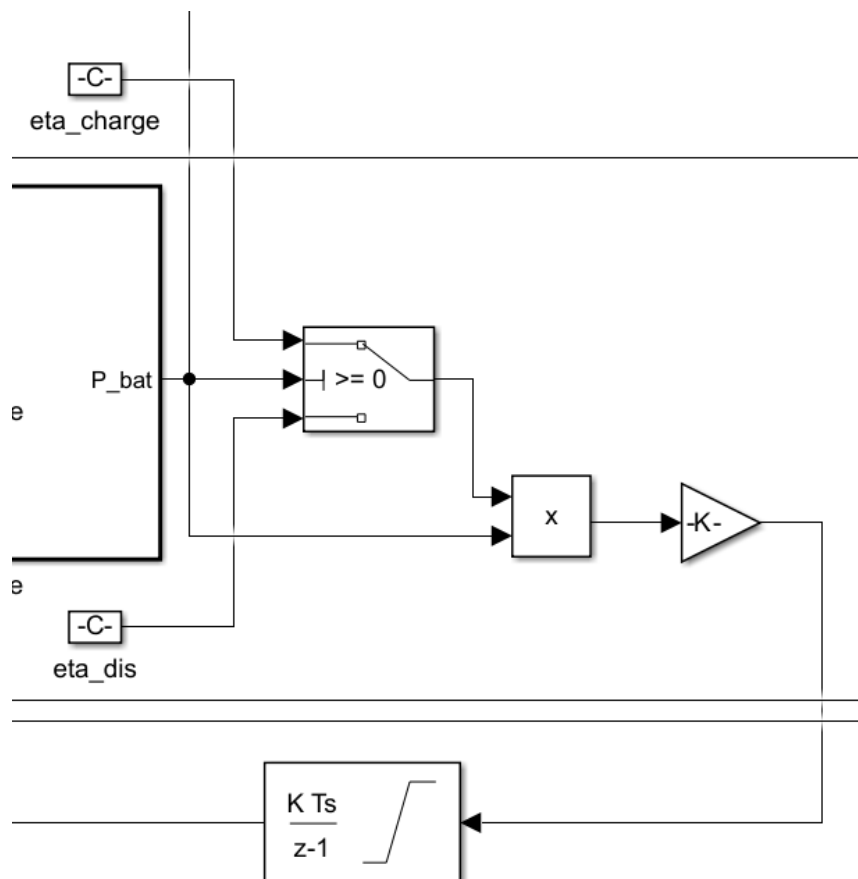


Рисунок 4.3 — Підсистема спільного накопичувача (ланцюг обчислення SOC)

4.2.3 Моделі споживання вузлів А і В

Споживання двох ділянок мережі задано окремими джерелами потужності, сума яких утворює сумарне навантаження мікромережі. Споживання вузла В задається константою, прив'язаною до повзунка панелі Dashboard, що дозволяє оператору змінювати навантаження в реальному часі під час демонстрації. Споживання вузла А в автономних сценаріях (1–4) задається сталим значенням-заглушкою, оскільки модель має повноцінно працювати незалежно від наявності

фізичного приладу. У сценарії HIL (5) це значення замінюється реальним споживанням, що надходить від фізичного вузла А через міст MQTT/UDP.

Окремий функціональний блок реалізує реальне зменшення споживання під час аварійного розвантаження: сумарне навантаження множиться на частку увімкнених категорій споживачів. Прийнято розподіл категорій 50 % / 30 % / 20 % (побутові / важливі / критичні) відповідно до таблиці 3.10. Таким чином, при повному навантаженні множник дорівнює 1,0 (100 %), після відключення побутових — 0,5 (50 %), при живленні лише критичних — 0,2 (20 %). Команди вмикання категорій формує керуюча підсистема Stateflow.

4.2.4 Реалізація керуючої логіки у Stateflow

Керуючу логіку системи реалізовано у вигляді скінченного автомата (діаграми станів) Stateflow, що містить вісім станів: NORMAL, CHARGING_PV, BATTERY_FULL_CURTAILMENT, BLACKOUT_DISCHARGE, EMERGENCY_LOAD_SHED_LEVEL1, EMERGENCY_LOAD_SHED_LEVEL2, EMERGENCY_CRITICAL_ONLY та RECOVERY. Автомат працює з дискретним кроком оновлення $T_s = 1$ с та приймає на вхід стан заряду SOC, потужність генерації, сумарне споживання та ознаку наявності зовнішньої мережі grid_on.

Залежно від поточного стану автомат формує вихідні команди: ознаки вмикання трьох категорій навантаження (load_household, load_important, load_critical), ознаку обмеження генерації (curtail) та код стану системи (sys_code: 0 — норма, 1 — блекаут, 2 — аварійне розвантаження). Переходи між станами визначаються пороговими значеннями SOC (90 %, 50 %, 30 %, 20 %, 10 %) з урахуванням гістерезису 2 %, що запобігає «дребезгу» на межах перемикавання. Повну діаграму станів з усіма переходами наведено на рисунку 4.4

Така реалізація відокремлює керуючу логіку від енергетичної частини моделі та дозволяє наочно простежити поведінку системи: під час моделювання активний стан підсвічується на діаграмі, що зручно для верифікації алгоритму та для демонстрації на захисті.

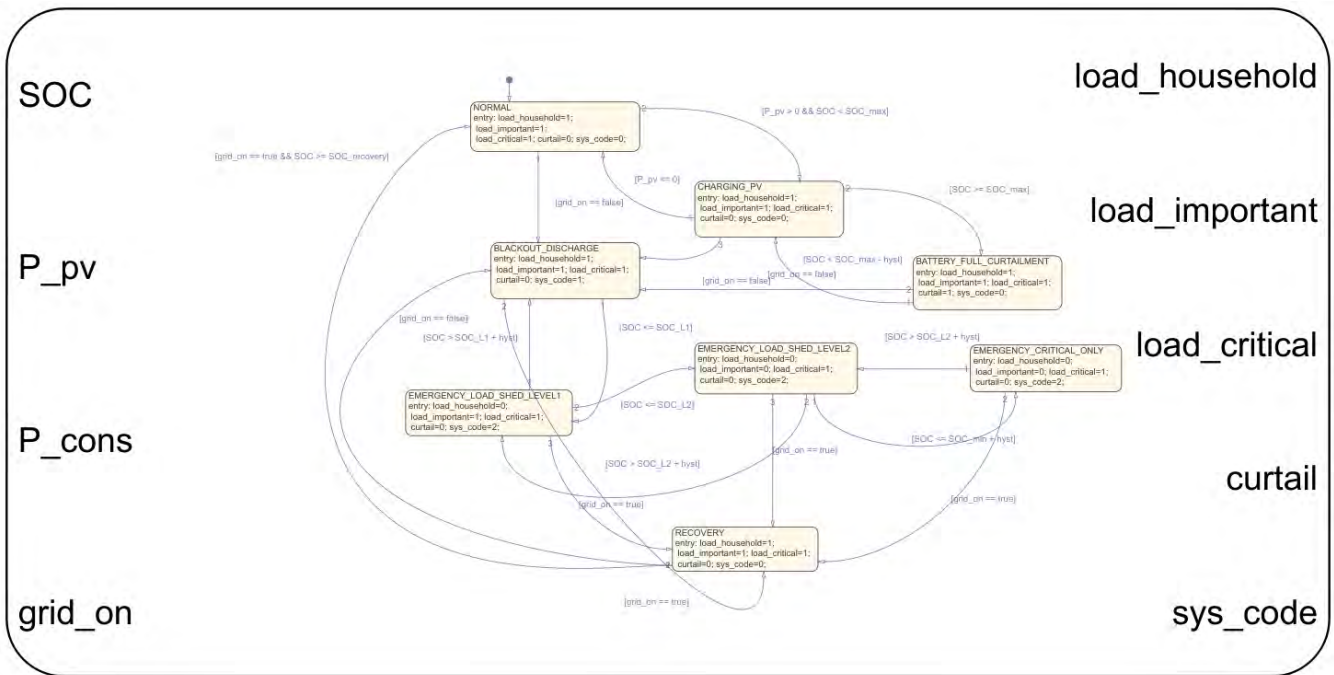


Рисунок 4.4 — Діаграма станів керуючого автомата Stateflow

4.3 Інтерактивна панель керування (Dashboard)

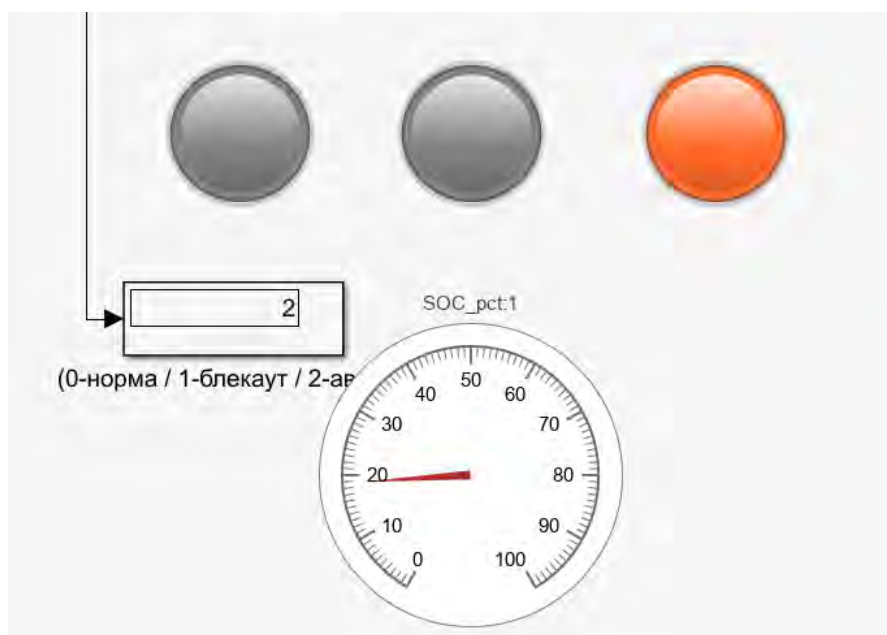
Для демонстрації роботи системи в реальному часі та для оперативного керування під час захисту створено інтерактивну панель на основі блоків бібліотеки Simulink Dashboard. Панель містить такі елементи:

- стрілковий індикатор (Gauge) стану заряду накопичувача у відсотках (діапазон 0–100 %);
- перемикач (Rocker Switch) «Мережа», що дозволяє оператору вмикати та вимикати зовнішню мережу, імітуючи блекаут безпосередньо під час моделювання;
- повзунок (Slider) навантаження вузла В (діапазон 0–3000 Вт) для плавної зміни споживання;
- лампи-індикатори стану трьох категорій навантаження, що відображають їх увімкнення/вимкнення керуючим автоматом;
- індикатор коду стану системи (sys_code).

Під час роботи моделі в режимі реального часу (із синхронізацією темпу моделювання) оператор може змінювати навантаження повзунком та перемикати

мережу, спостерігаючи відповідну реакцію стану заряду на індикаторі та зміну станів керуючого автомата. Загальний вигляд панелі наведено на рисунку 4.5.

Рисунок 4.5 — Інтерактивна панель керування (Dashboard)



4.4 Сценарії моделювання та результати

Для дослідження моделі розроблено п'ять сценаріїв, що в сукупності демонструють усі режими роботи системи — від штатної до аварійної. Для кожного сценарію задано початкові умови, описано хід процесу та наведено отримані графіки. Сценарії 1–4 виконано у програмній моделі; сценарій 5 описує методику НІЛ-демонстрації з фізичним вузлом А.

Час доби в моделі задається параметром Start time: значення 36000 с відповідає приблизно 10-й годині ранку (генерація активна), значення 0 — півночі (генерація відсутня). Для отримання фізично коректних графіків (з віссю в реальних одиницях часу) прогони виконано без демонстраційного прискорення; для живої демонстрації передбачено пришвидшений режим із синхронізацією темпу моделювання.

4.4.1 Сценарій 1 — нормальна робота із зарядом від PV

Початкові умови: зовнішня мережа увімкнена ($\text{grid_on} = \text{true}$), початковий стан заряду $\text{SOC} = 40\%$, денний час (генерація активна), помірне навантаження (сумарно близько 1000 Вт).

Хід сценарію: фотоелектричне джерело заряджає накопичувач, стан заряду поступово зростає, усі категорії навантаження живляться. Система перебуває у станах NORMAL та CHARGING_PV. При досягненні верхньої межі (SOC = 90 %) активується обмеження генерації, і стан заряду стабілізується на цьому рівні.

Результати: отриманий графік (рисунок 4.4.1) демонструє плавне зростання SOC від 40 % до 90 % з подальшим виходом на верхню межу; споживання залишається сталим протягом усього прогону, що підтверджує штатний режим роботи без розвантаження. Сценарій підтверджує коректність моделі заряду накопичувача.

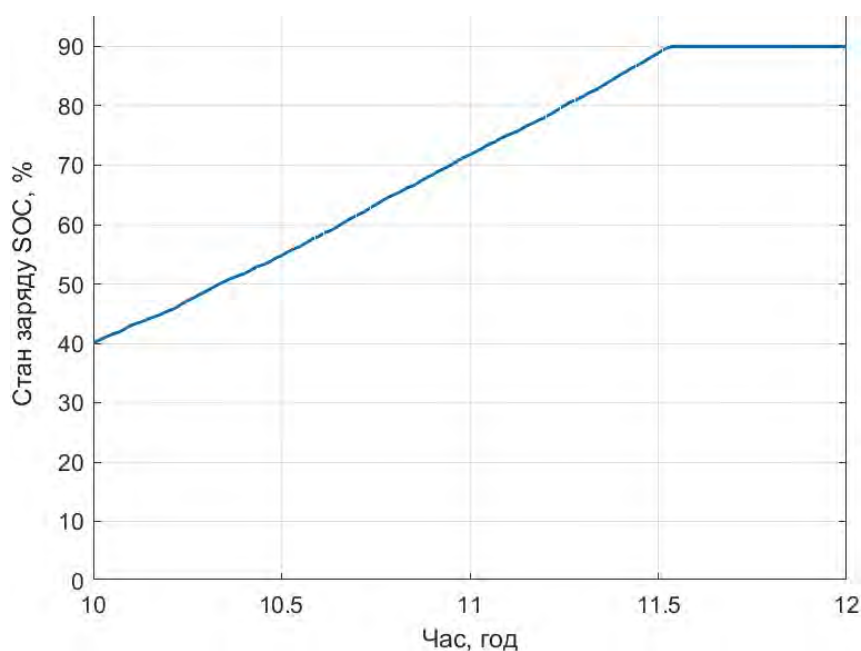


Рисунок 4.6 — Сценарій 1: зростання стану заряду під час нормальної роботи

4.4.2 Сценарій 2 — обмеження генерації при повному заряді

Початкові умови: мережа увімкнена, початковий стан заряду SOC = 85 %, яскравий день (висока генерація, нижня межа коефіцієнта прозорості підвищена), низьке навантаження (близько 700 Вт).

Хід сценарію: стан заряду швидко зростає та досягає верхньої межі 90 %, після чого активується алгоритм обмеження генерації (curtail = true), система переходить у стан BATTERY_FULL_CURTAILMENT, а ефективна потужність фотоелектричного джерела, що надходить до балансу, знижується, запобігаючи перезарядженню накопичувача.

Результати: на графіку (рисунки 4.4.2) стан заряду зростає від 85 % і виходить на горизонтальну «полицю» 90 %, що відповідає роботі алгоритму обмеження. Споживання залишається сталим. Сценарій підтверджує коректність алгоритму curtailment та утримання SOC на верхній межі.

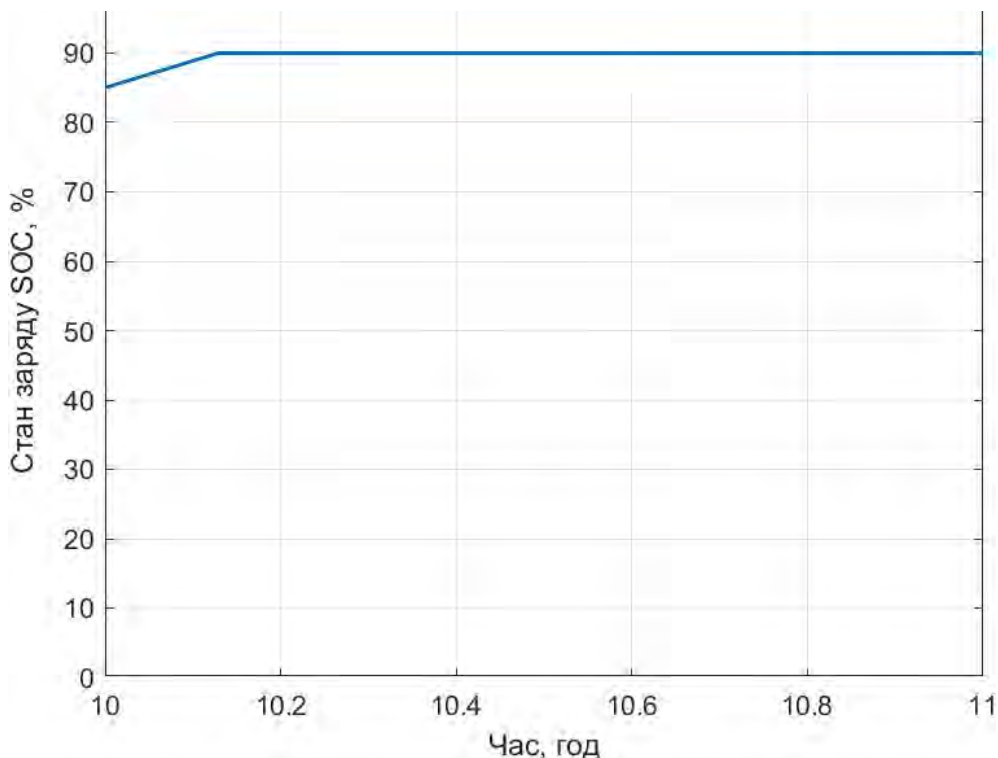


Рисунок 4.7 — Сценарій 2: обмеження генерації при досягненні повного заряду

4.4.3 Сценарій 3 — блекаут і острівна робота

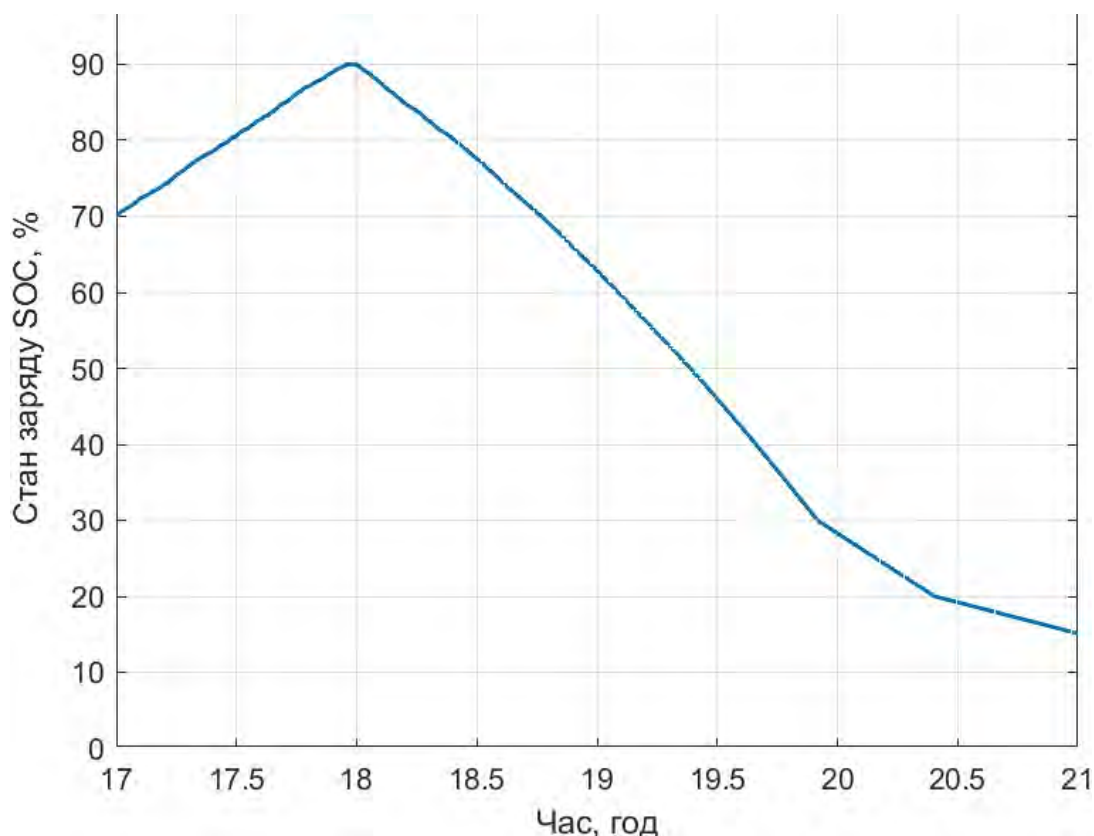
Початкові умови: початковий стан заряду SOC = 70 %, помірне навантаження; на початку прогону мережа увімкнена, у заданий момент часу відбувається відключення мережі (імітація блекауту).

Хід сценарію: до моменту блекауту система працює штатно (за наявності сонячної генерації стан заряду зростає). Після відключення мережі система переходить у стан BLACKOUT_DISCHARGE, накопичувач починає живити навантаження в острівному режимі, і стан заряду знижується. Усі категорії навантаження поки що живляться. Фізичний вузол А, отримавши через MQTT ознаку блекауту (sys_state = BLACKOUT), переходить у відповідний режим.

Результати: графік (рисунки 4.9) має характерну форму: спочатку зростання або утримання стану заряду, потім чітку точку перелому в момент блекауту, після якої стан заряду монотонно знижується. На пізніших етапах розряду спостерігаються

додаткові переломи нахилу, що відповідають увімкненню аварійного розвантаження. Сценарій підтверджує автоматичний перехід в острівний режим та фізичну коректність моделі — накопичувач не розряджається, поки сонячної генерації достатньо для покриття навантаження.

Рисунок 4.8 — Сценарій 3: блекаут та перехід в острівний режим



4.4.4 Сценарій 4 — аварія з повним розрядом і поетапним розвантаженням

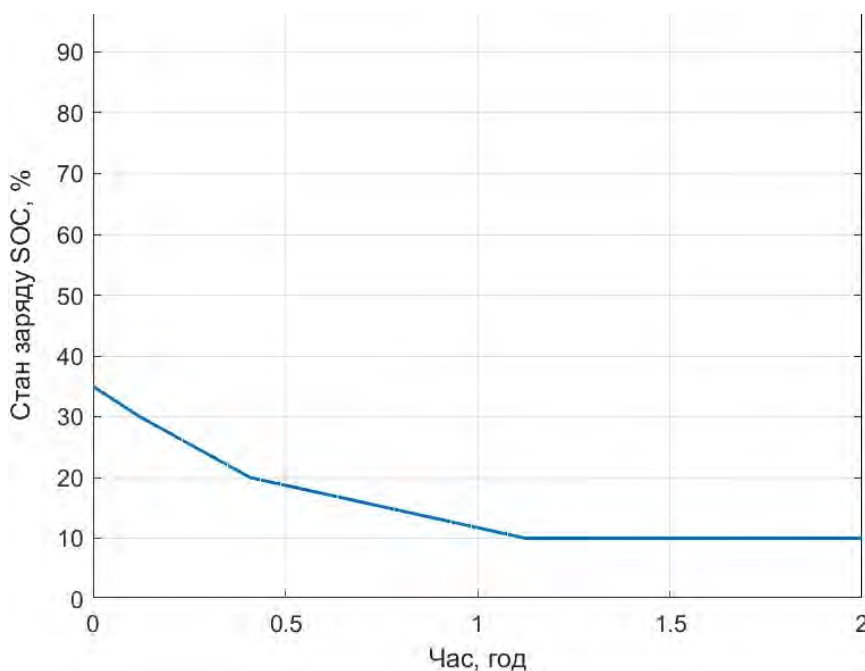
Початкові умови: мережа відсутня (острівний режим), ніч (генерація відсутня), початковий стан заряду SOC = 35 %, підвищене навантаження (близько 3000 Вт).

Хід сценарію: стан заряду поступово знижується; при досягненні порога 30 % відключаються побутові навантаження (стан EMERGENCY_LOAD_SHED_LEVEL1), при 20 % — важливі (EMERGENCY_LOAD_SHED_LEVEL2), при наближенні до 10 % система переходить у стан EMERGENCY_CRITICAL_ONLY, утримуючи живлення лише критичних споживачів. На кожному щаблі споживання стрибкоподібно зменшується

(з 3000 до приблизно 1500, а потім до 600 Вт), завдяки чому розряд накопичувача сповільнюється, і поблизу 10 % припиняється.

Результати: це головний сценарій, що демонструє роботу аварійного розвантаження за пріоритетами. На графіку стану заряду (рисунок 4.10) чітко простежуються переломи нахилу в точках 30 % та 20 %, які точно збігаються зі «сходинками» зменшення споживання. Узгодженість моментів перемикання станів зі зміною споживання підтверджує коректність роботи керуючого автомата та системи пріоритетів — критичні споживачі залишаються під живленням до останнього. Результати цього сценарію є основою плаката СхІ графічної частини.

Рисунок 4.9 — Сценарій 4: повний розряд із поетапним розвантаженням за пріоритетами



4.4.5 Сценарій 5 — демонстрація НІЛ з фізичним вузлом А

Початкові умови: одночасно запущено фізичний вузол А (ESP32 з датчиком PZEM-004T), брокер Mosquitto, програмний міст MQTT/UDP та імітаційну модель; до вузла А підключено реальне навантаження.

Хід сценарію: зміна реального навантаження на фізичному вузлі А (вмикання приладу) передається через MQTT-міст у модель і впливає на загальний баланс потужності мікромережі. У зворотному напрямку програмний блекаут, ініційований у моделі, передається фізичному вузлу А, який реагує на нього перемиканням власних

реле (відключенням некритичних навантажень). Таким чином, фізичний та віртуальний вузли поведуться узгоджено в єдиному контурі.

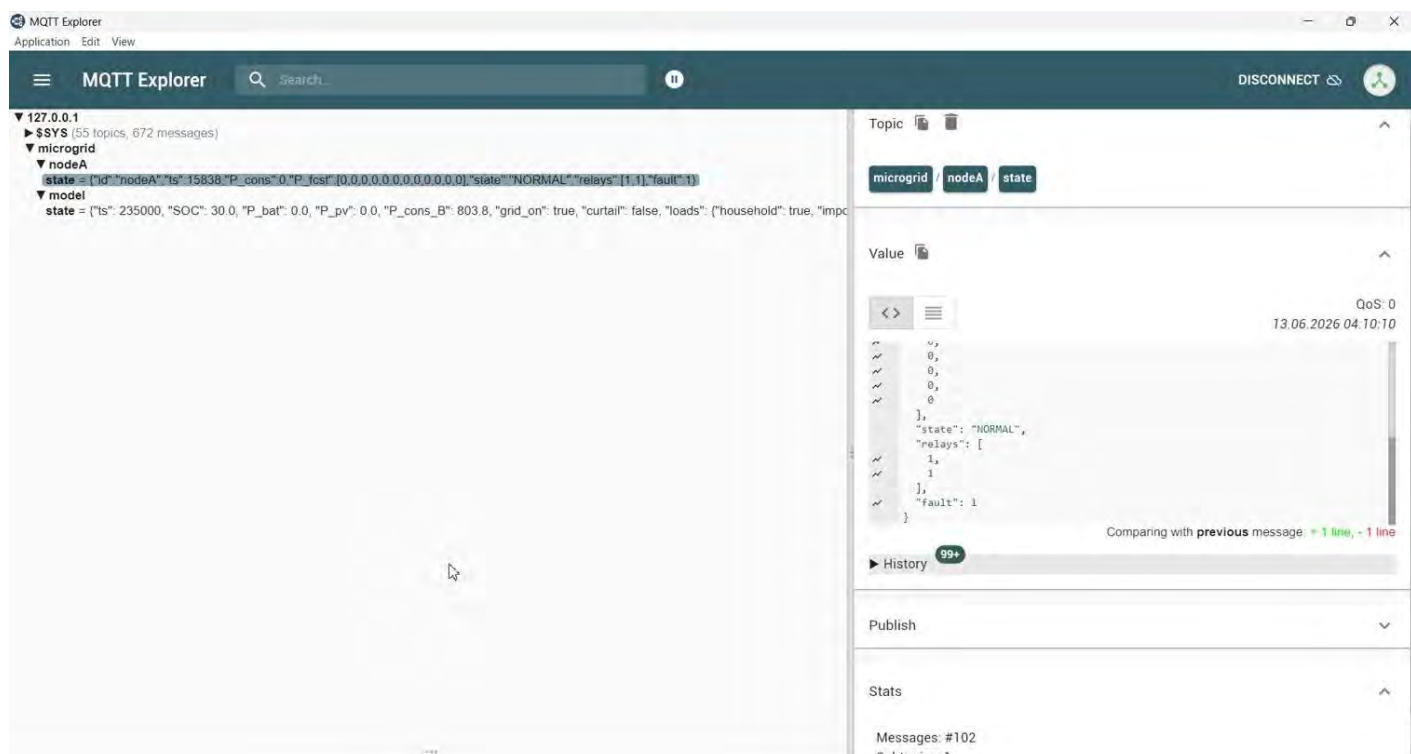


Рисунок 4.10 — Фізичний стенд та HIL-демонстрація (сценарій 5)

4.5 Допоміжний інтелектуальний агент прогнозування споживання

Описана вище керуюча логіка є реактивною: автомат змінює режим роботи лише після того, як стан заряду перетнув відповідний поріг. Щоб надати системі властивості проактивності, її доповнено допоміжним інтелектуальним агентом прогнозування навантаження. Важливо підкреслити, що агент не замінює класичну автоматику й не приймає рішень про комутацію навантажень самостійно — він лише завчасно інформує систему про очікувані зміни споживання, залишаючись допоміжним елементом, тоді як основою керування залишається детермінований автомат.

Агент реалізовано як окремий програмний модуль, що працює на тому самому брокері MQTT, що й вузли системи. Він підписується на повідомлення з даними споживання вузлів А і В, накопичує часовий ряд навантаження та періодично формує прогноз на заданий горизонт. У термінах агентного підходу систему можна розглядати як мультиагентну: локальний агент прогнозування обробляє дані вузлів, а керуючий автомат виконує роль реактивного агента аварійного реагування.

Для прогнозування застосовано метод подвійного експоненційного згладжування (метод Хольта), що враховує як рівень, так і тренд часового ряду споживання. Згладжений рівень, складова тренду та прогноз на h кроків уперед обчислюються за виразами (4.1)–(4.3):

$$L_t = \alpha \cdot y_t + (1 - \alpha) \cdot (L_{t-1} + T_{t-1}), \quad (4.1)$$

$$T_t = \beta \cdot (L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta) \cdot T_{t-1}, \quad (4.2)$$

$$\hat{y}_{t+h} = L_t + h \cdot T_t, \quad (4.3)$$

де y_t — фактичне споживання у момент t ; L_t — згладжений рівень; T_t — складова тренду; α і β — коефіцієнти згладжування рівня та тренду відповідно. У роботі прийнято $\alpha = 0,4$ і $\beta = 0,15$; прогноз оновлюється кожні 5 хв на горизонт 1 год, що відповідає періодичності, прийнятій у розділі 3.

Сформований прогноз агент публікує в окрему тему MQTT разом із рекомендацією для системи. Якщо прогнозоване споживання зростає одночасно з низьким станом заряду накопичувача, агент завчасно сигналізує про ризик дефіциту потужності, і керуючий автомат може застосувати обмеження ще до фактичного спрацювання порогів. Завдяки цьому розвантаження відбувається плавніше, а живлення критичних споживачів зберігається довше.

4.6 Аналіз результатів моделювання

Результати моделювання за всіма сценаріями підтверджують працездатність розробленої системи та коректність прийнятих проєктних рішень. Зведені результати наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 — Зведені результати моделювання за сценаріями

Сценарій	Режим / стани, що активуються	Підтверджений результат
1	NORMAL / CHARGING_PV	Зростання SOC 40→90 %, штатне живлення всіх навантажень
2	BATTERY_FULL_CURTAILMENT	Утримання SOC на 90 %, обмеження генерації

3	BLACKOUT_DISCHARGE	Перехід в острівний режим, початок розряду після блекауту
4	LEVEL1 → LEVEL2 → CRITICAL_ONLY	Поетапне розвантаження 100→50→20 %, утримання критичних до SOC≈10 %
5	HIL (взаємодія з вузлом A)	Узгоджена поведінка фізичного та модельного вузлів через MQTT

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі узагальнення. По-перше, модель коректно відтворює енергетичний баланс мікромережі в усіх режимах: накопичувач заряджається лише за наявності сонячної генерації та розряджається тільки в острівному режимі за дефіциту потужності, що відповідає фізиці процесу. По-друге, керуючий автомат своєчасно перемикає режими роботи відповідно до встановлених порогів стану заряду, а введений гістерезис запобігає коливанням на межах перемикавання. По-третє, система пріоритетного розвантаження працює узгоджено: моменти зміни споживання точно збігаються з перемиканням станів автомата, а критичні споживачі зберігають живлення найдовше, що є ключовою вимогою до системи.

Окремо слід відзначити, що часові показники моделі узгоджуються з інженерними розрахунками розділу 3: тривалість розряду робочого діапазону стану заряду відповідає розрахунковій автономії накопичувача, наведеній у таблиці 3.10. Це підтверджує адекватність прийнятої моделі накопичувача.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі розроблено імітаційну модель автоматизованої системи обліку та балансування енергоспоживання локальної смарт-грід мікромережі в середовищі MATLAB/Simulink R2023a з використанням Stateflow, бібліотеки Dashboard та засобів обміну даними через UDP.

Модель реалізує шість функціональних підсистем — фотоелектричну генерацію зі стохастичною складовою хмарності, спільний накопичувач на основі

дискретного інтегратора стану заряду, споживання двох інтелектуальних вузлів, керуючий автомат із восьми станів, підсистему зв'язку MQTT/UDP та інтерактивну панель оператора. Контур керування є замкненим: стан заряду визначає рішення керуючого автомата, які впливають на споживання й генерацію та, відповідно, на подальшу зміну стану заряду.

Працездатність системи досліджено за п'ятьма сценаріями, що охоплюють усі режими роботи — від штатного заряду до аварійного поетапного розвантаження та апаратно-програмної взаємодії з фізичним вузлом. Результати моделювання підтвердили коректність керуючої логіки, узгодженість роботи системи пріоритетного розвантаження та відповідність часових показників моделі інженерним розрахункам попередніх розділів. Отримані графіки та діаграма станів становлять основу для графічної частини проєкту (плакат СхІ).

Висновки

У дипломному проєкті розроблено автономну систему моніторингу та оптимізації енергоспоживання локальної смарт-грід мікромережі з розподіленими інтелектуальними вузлами, у якій надійне класичне керування доповнено допоміжним інтелектуальним агентом прогнозування навантаження.

У ході роботи отримано такі основні результати:

- проаналізовано сучасний стан систем моніторингу та керування мікромережами й сформовано вимоги до системи; обґрунтовано двовузлову архітектуру з інтелектуальними вузлами обліку, спільним накопичувачем і фотоелектричним джерелом;
- виконано інженерні розрахунки вузлів системи — тракту вимірювання на основі смарт-датчика, параметрів накопичувача, регуляторів та теплового режиму, що підтвердили реалізованість прийнятих технічних рішень;
- розроблено керуючу логіку у вигляді скінченного автомата з восьми станів із пріоритетним розвантаженням навантажень і гістерезисом на порогах перемикавання, що запобігає коливанням режимів;
- спроектовано допоміжний інтелектуальний агент прогнозування навантаження на основі методу подвійного експоненційного згладжування, що надає системі властивості проактивності, залишаючись допоміжним елементом керування;
- створено імітаційну модель системи в середовищі MATLAB/Simulink зі Stateflow і досліджено її роботу за п'ятьма сценаріями; результати підтвердили коректність енергетичного балансу, своєчасність перемикавання режимів і збереження живлення критичних споживачів до останнього;
- реалізовано програмну частину апаратно-програмної взаємодії (HIL) фізичного вузла з моделлю через міст MQTT/UDP, що забезпечує узгоджену поведінку фізичного та віртуального вузлів.

Часові показники моделі узгоджуються з інженерними розрахунками автономії накопичувача, що підтверджує адекватність прийнятих моделей. Розроблена система придатна для застосування в локальних громадських мікромережах і системах

вуличного освітлення з резервуванням живлення відповідальних споживачів під час відключень зовнішньої мережі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Hatziargyriou N. Microgrids: Architectures and Control. Chichester : John Wiley & Sons, 2014. 344 p.
2. IEEE Std 2030-2011. IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS). New York : IEEE, 2011.
3. IEC 61850. Communication networks and systems for power utility automation. Geneva : International Electrotechnical Commission.
4. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and Practice. 3rd ed. Melbourne : OTexts, 2021. URL: <https://otexts.com/fpp3/> (дата звернення: __.__.2026).
5. OASIS. MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard, 2014. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/> (дата звернення: __.__.2026).
6. Modbus Organization. MODBUS Application Protocol Specification V1.1b3. 2012. URL: <https://www.modbus.org/specs.php> (дата звернення: __.__.2026).
7. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. Version 4.x. URL: <https://www.espressif.com/> (дата звернення: __.__.2026).
8. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. URL: <https://www.espressif.com/> (дата звернення: __.__.2026).
9. PZEM-004T v3.0 AC Communication Module. User Manual / Datasheet. Peacefair.
10. Hongfa. HF41F Subminiature Power Relay. Datasheet.
11. Solomon Systech. SSD1306 128 x 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller. Datasheet.
12. The MathWorks, Inc. Simulink and Stateflow Documentation (R2023a). Natick, MA : MathWorks, 2023. URL: <https://www.mathworks.com/help/> (дата звернення: __.__.2026).
13. Eclipse Foundation. Eclipse Mosquitto — An open source MQTT broker. URL: <https://mosquitto.org/> (дата звернення: __.__.2026).
14. Eclipse Foundation. Eclipse Paho MQTT Python Client. URL: <https://www.eclipse.org/paho/> (дата звернення: __.__.2026).

15. Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.
16. Муравйов О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум: навчальний посібник / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с.
17. Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.
18. Комп'ютерне проектування електронних схем. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / Р. М. Галаган ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,33 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.
19. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
20. Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.

Додатки

Надаються за зверненням до авторів