

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
Інженерії енергосистем

_____ Євген АНТИПОВ
”_____” _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «Розробка системи моніторингу енергоспоживання та
генерації в домашній енергомережі»**

Спеціальність «141 "Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(Підпис)

Олександр СИНЯВСЬКИЙ
(ПІБ)

Керівник

старший викладач
(науковий ступінь та вчене звання)

(Підпис)

Геннадій КРУГЛЯК
(ПІБ)

Виконав

(Підпис)

Андрій РИБИТВА
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Інженерії енергосистем

(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ Євген АНТИПОВ

”_____” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

**НА ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

_____ **Рибитві Андрію Анатолійовичу** _____

Спеціальність : «141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"»

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: "Розробка системи моніторингу енергоспоживання та генерації в домашній енергомережі", затверджена наказом ректора НУБіП України від "07" листопада 2025 р. № 2708 "С".

Термін подання завершеної роботи на кафедру "29" травня 2026 р.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Перелік питань, які потрібно вирішити:

Перелік графічних документів: презентація виконана в PowerPoint

Дата видачі завдання: 07 листопада 2025 р.

Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи

Геннадій КРУГЛЯК

Завдання взяв до виконання

Андрій РИБИТВА

АНОТАЦІЯ

Рибитва А. А. Розробка системи моніторингу енергоспоживання та генерації в домашній енергомережі. – Рукопис. Бакалаврська кваліфікаційна робота на здобуття ступеня бакалавра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2026.

Дана робота присвячена розробці системи моніторингу, яка дозволяє в реальному часі контролювати споживання електроенергії та власну генерацію від сонячних панелей у межах приватного будинку. Об'єктом дослідження є процеси енергообміну в домашній мережі, а предметом — технічні та програмні засоби збору й аналізу даних про електричні параметри.

У роботі проведено аналіз концепції Smart Home Energy Management та існуючих платформ моніторингу (Home Assistant, OpenEnergyMonitor та інші). Обґрунтовано вибір елементної бази на основі мікроконтролера ESP32, неінвазивних датчиків струму SCT-013 та спеціалізованої мікросхеми енергообліку ADE7753. Розроблено математичне забезпечення для розрахунку активної, реактивної та повної потужності, а також енергетичного балансу між генерацією та споживанням.

Практична частина включає розробку схемотехнічних рішень та програмного коду для передачі даних за протоколом MQTT. Результати тестування системи показали, що відносна похибка вимірювання потужності становить 2,18–4,17%, що є цілком прийнятним для побутового використання. Система забезпечує стабільність передачі даних на рівні понад 99%. Запропоноване рішення дозволяє власникам будинків виявляти фонове споживання, оцінювати ефективність сонячної генерації та оптимізувати режим роботи потужних електроприладів.

Ключові слова: система моніторингу енергоспоживання, домашня енергомережа, власна генерація, мікроконтролер ESP32, енергетичний баланс.

ABSTRACT

Rybytv A. A. Development of an energy consumption and generation monitoring system in a home energy grid. – Manuscript. Bachelor's thesis for the degree of Bachelor in Specialty 141 "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

This work is dedicated to the development of a monitoring system that enables real-time tracking of electricity consumption and self-generation from solar panels within a private household. The object of study is the energy exchange processes in the home grid, and the subject includes technical and software tools for collecting and analyzing data on electrical parameters.

The thesis analyzes the Smart Home Energy Management concept and existing monitoring platforms (Home Assistant, OpenEnergyMonitor, etc.). The choice of hardware based on the ESP32 microcontroller, non-invasive SCT-013 current sensors, and the ADE7753 energy metering IC is justified. Mathematical software was developed to calculate active, reactive, and apparent power, as well as the energy balance between generation and consumption.

The practical part includes the development of circuit designs and software code for data transmission via the MQTT protocol. System testing results showed that the relative power measurement error ranges from 2.18% to 4.17%, which is entirely acceptable for residential use. The system ensures data transmission stability at a level exceeding 99%. The proposed solution allows homeowners to identify background loads, evaluate solar generation efficiency, and optimize the operation of high-power electrical appliances.

Keywords: energy consumption monitoring system, home energy grid, self-generation, ESP32 microcontroller, energy balance.

Зміст

Вступ.....	6
Розділ 1. Аналіз стану питання та огляд існуючих рішень	9
1.1. Концепція інтелектуальних домашніх мереж (Smart Home Energy Management).....	9
1.2. Огляд спеціалізованих платформ та екосистем.....	12
1.3. Огляд методів та обладнання для вимірювання електричних параметрів..	15
1.4. Програмні засоби візуалізації та обробки даних.	17
Розділ 2. Теоретичне обґрунтування та розробка архітектури системи	21
2.1. Математичне забезпечення розрахунку енергетичних показників.	21
2.2. Обґрунтування структури системи моніторингу.	25
2.3. Вибір та обґрунтування елементної бази.	29
2.4. Алгоритмічне забезпечення роботи системи.....	33
Розділ 3. Технічна реалізація та аналіз результатів	38
3.1. Схемотехнічне рішення системи моніторингу.	38
3.2. Розробка програмного коду для збору та передачі даних.	42
3.3. Тестування системи та аналіз похибок вимірювання.	45
3.4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	49
Висновки.....	54
Список використаних джерел	58

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Рибитва А.А.			Розробка системи моніторингу енергоспоживання та генерації в домашній енергомережі			Літ.	Арк.	Акрушіє	
Перевір.		Кругляк Г.В.								51	65
								група			
Н. Контр.											
Затверд.											

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ										
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата											
Розроб.		Рибитва А.А.			Розробка системи моніторингу енергоспоживання та генерації в домашній енергомережі					Літ.		Арк.	Акрушів		
Перевір.		Кругляк Г.В.										51	65		
										група					
Н. Контр.															
Затверд.															

Вступ

Сучасна домашня енергомережа поступово переходить від простого споживання електроенергії до більш складної системи, у якій поєднуються зовнішнє електропостачання, власна генерація, побутові навантаження, накопичення даних і цифровий контроль режимів роботи. У звичайній побутовій мережі користувач отримує інформацію про спожиту електроенергію переважно за показами лічильника, тобто вже після фактичного використання електроенергії. Такий підхід не дає можливості оперативно визначати пікові навантаження, фонове споживання, втрати енергії, нераціональну роботу окремих електроприймачів або ефективність використання власної генерації.

Актуальність теми зумовлена зростанням вартості електроенергії, поширенням побутових сонячних електростанцій, розвитком концепції Smart Grid та необхідністю підвищення енергоефективності житлових будинків. Для власника будинку важливо не тільки знати сумарне місячне споживання, а й розуміти, у які години виникають найбільші навантаження, яка частина електроенергії покривається власною генерацією, скільки енергії споживається в нічний час і чи є можливість зменшити витрати за рахунок зміни режиму роботи побутових приладів. Особливо важливим є контроль генерації від сонячних панелей, оскільки без моніторингу неможливо об'єктивно оцінити ефективність роботи інвертора, добову генерацію, частку самоспоживання та енергетичний баланс будинку.

Одним із практичних способів розв'язання цієї проблеми є розробка системи моніторингу енергоспоживання та генерації на базі вимірювальних датчиків, мікроконтролера, бездротового каналу зв'язку та програмних засобів візуалізації. Така система дає змогу отримувати дані про напругу, струм, активну потужність, спожиту енергію, вироблену енергію та баланс між генерацією і споживанням. Використання мікроконтролера ESP32 є доцільним через наявність вбудованого Wi-Fi, достатню продуктивність для первинної обробки даних і можливість передавання інформації за протоколами MQTT або HTTP. Для вимірювальної

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

частини можуть застосовуватися датчики струму SCT-013, датчики на ефекті Хола ACS712 або спеціалізовані мікросхеми обліку електроенергії типу ADE7753.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу енергоспоживання та генерації електроенергії в домашній енергомережі.

Предметом дослідження є структура, схемотехнічні рішення, алгоритми обробки даних і програмні засоби системи моніторингу параметрів домашньої енергомережі.

Метою роботи є розробка системи моніторингу енергоспоживання та генерації в домашній енергомережі, яка забезпечує вимірювання основних електричних параметрів, розрахунок енергетичних показників, передавання даних на сервер і візуалізацію результатів для аналізу режимів роботи мережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати концепцію інтелектуальних домашніх енергомереж та роль систем моніторингу в енергозбереженні;
- розглянути існуючі відкриті та комерційні платформи моніторингу, зокрема Home Assistant, OpenEnergyMonitor, Xiaomi Mi Home, TuYa та Victron Energy;
- дослідити методи вимірювання електричних параметрів у побутових мережах і порівняти датчики струму SCT-013, ACS712 та спеціалізовані мікросхеми обліку електроенергії;
- розробити математичне забезпечення для визначення активної, реактивної, повної потужності, коефіцієнта потужності, спожитої та виробленої електроенергії;
- обґрунтувати структуру системи моніторингу з рівнями датчиків, контролера, передавання даних, сервера, бази даних і дашборду;
- вибрати елементну базу системи, зокрема мікроконтролер, вимірювальні датчики, вузол живлення та засоби передавання даних;
- розробити алгоритм роботи системи, що включає запуск, підключення до Wi-Fi, опитування датчиків, фільтрацію, розрахунок показників і передавання даних;

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- запропонувати принципову електричну схему вузла вимірювання та схему інтеграції системи в домашню енергомережу;
- виконати тестування системи, порівняти результати з еталонним лічильником і визначити похибки вимірювання;
- оцінити питання електробезпеки, охорони праці та безпечного монтажу системи в розподільчому щитку.

Методи дослідження, використані в роботі: аналіз науково-технічних джерел і технічної документації; порівняльний аналіз платформ моніторингу та вимірювальних засобів; методи електротехнічних розрахунків; математичне моделювання енергетичних показників; схемотехнічне проектування; алгоритмізація процесів збору та обробки даних; експериментальна перевірка похибок вимірювання; графічне представлення результатів добового споживання і генерації.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропонована система може бути використана для побутового контролю енергоспоживання, аналізу роботи домашньої сонячної електростанції, виявлення фонових споживання та оцінки енергетичного балансу будинку. Розроблене рішення може бути основою для подальшого створення системи автоматичного керування навантаженнями, наприклад увімкнення окремих приладів у години максимальної генерації або обмеження пікової потужності.

Дипломна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. У першому розділі проаналізовано стан питання та існуючі рішення. У другому розділі розроблено математичне забезпечення, структуру системи, обґрунтовано вибір елементної бази та алгоритм роботи. У третьому розділі наведено схемотехнічне рішення, описано програмну реалізацію, результати тестування, аналіз похибок і питання охорони праці.

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.2. Концепція інтелектуальних домашніх мереж.

Інтелектуальна домашня енергомережа є частиною сучасного підходу до керування електроспоживанням у житлових будинках, де споживач уже не розглядається лише як пасивний користувач електричної енергії. У такій системі будинок може одночасно споживати електроенергію з зовнішньої мережі, генерувати її за допомогою сонячних панелей, накопичувати в акумуляторній батареї та передавати надлишок у мережу або спрямовувати його на власні навантаження. Основним завданням Smart Home Energy Management є збирання, обробка та використання даних про енергетичні процеси в будинку для зменшення витрат, підвищення енергоефективності та своєчасного виявлення нераціонального споживання.

У традиційній домашній електромережі користувач бачить тільки сумарне значення спожитої електроенергії за показами лічильника. Такий підхід не дає змоги визначити, які саме прилади створюють пікове навантаження, скільки енергії витрачається вночі, яка частина споживання є фоновною та як змінюється баланс між споживанням і генерацією. Інтелектуальна система моніторингу вирішує цю проблему за рахунок регулярного вимірювання струму, напруги, потужності, енергії, коефіцієнта потужності та інших параметрів. Дані не тільки відображаються в реальному часі, а й накопичуються в базі для подальшого аналізу.

Для домашньої енергомережі з власною генерацією важливо контролювати не лише споживання, а й напрямок потоку електроенергії. Наприклад, у денний час сонячна електростанція може покривати частину побутового навантаження, а за надлишкової генерації енергія може передаватися в зовнішню мережу або заряджати акумулятор. Увечері, коли генерація зменшується, будинок знову починає споживати енергію з мережі. Без системи моніторингу користувач не може

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

точно оцінити, наскільки ефективно використовується власна генерація, чи є перевантаження окремих ліній, чи доцільно переносити роботу потужних приладів на години максимальної генерації.

Основний принцип Smart Home Energy Management полягає в поєднанні вимірювального, керуючого та інформаційного рівнів. Вимірювальний рівень отримує первинні дані з датчиків струму, напруги або спеціалізованих мікросхем обліку. Керуючий рівень на базі мікроконтролера виконує обробку сигналів, розрахунок енергетичних показників і передавання даних. Інформаційний рівень забезпечує зберігання історії, побудову графіків і формування висновків щодо режимів роботи домашньої мережі. У простому варіанті система лише показує поточні параметри, а в більш розвиненому може повідомляти про аварійні стани, перевищення потужності, нехарактерне нічне споживання або низьку ефективність використання сонячної генерації.

Таблиця 1.1 — Основні складові інтелектуальної домашньої енергомережі

Складова системи	Функціональне призначення	Приклад реалізації
Джерело зовнішнього живлення	Забезпечення будинку електроенергією з централізованої мережі	однофазна або трифазна мережа 230/400 В
Власна генерація	Вироблення електроенергії для власного споживання	сонячні панелі з інвертором
Вимірювальний вузол	Отримання даних про струм, напругу, потужність і енергію	SCT-013, ACS712, ADE7753
Контролер	Обробка сигналів і передавання даних	ESP32
Канал зв'язку	Передавання даних на сервер або в хмару	Wi-Fi, MQTT, HTTP
Сервер або база даних	Зберігання історії вимірювань	локальний сервер
Панель візуалізації	Відображення графіків і показників	Home Assistant, Grafana, OpenEnergyMonitor

Роль системи моніторингу в енергозбереженні полягає не в прямому зменшенні споживання, а в наданні користувачу точних даних для прийняття рішень. Наприклад, якщо система фіксує стабільне фонове навантаження 200 Вт у

нічний час, це означає, що за добу витрачається близько 4,8 кВт·год електроенергії без активного використання побутових приладів. Такий результат дає підставу перевірити роботу холодильного обладнання, мережевих адаптерів, насосів, систем очікування та іншого обладнання. Для оцінки добового споживання використовується залежність:

$$W_{\text{доб}} = \sum P_i \cdot \Delta t_i$$

де $W_{\text{доб}}$ — добове споживання електроенергії, кВт·год; P_i — середня потужність на окремому інтервалі часу, кВт; Δt_i — тривалість інтервалу, год.

У домашній мережі з генерацією додатково визначається енергетичний баланс:

$$W_{\text{бал}} = W_{\text{ген}} - W_{\text{спож}}$$

де $W_{\text{ген}}$ — електроенергія, вироблена власним джерелом; $W_{\text{спож}}$ — електроенергія, спожита навантаженнями будинку. Якщо баланс додатний, є надлишок генерації, якщо від'ємний — будинок потребує додаткового живлення з мережі.

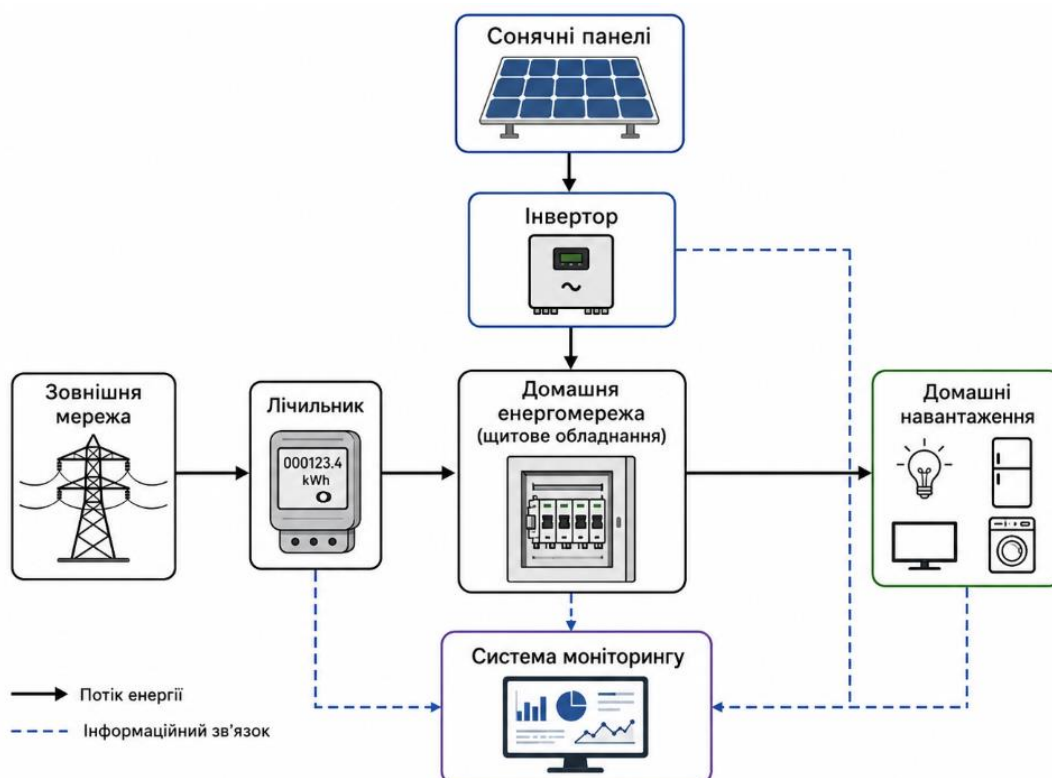


Рис. 1.1. – Узагальнена структура домашньої енергомережі з генерацією

Отже, концепція інтелектуальної домашньої енергомережі базується на постійному вимірюванні, аналізі та візуалізації енергетичних параметрів. Для цієї дипломної роботи доцільно розглядати систему моніторингу як технічний засіб, що поєднує датчики, мікроконтролер, канал передавання даних, базу зберігання та програмний інтерфейс. Такий підхід дає змогу перейти від загального обліку електроенергії до детального контролю режимів роботи домашньої мережі, що особливо важливо за умов зростання тарифів, поширення побутових сонячних електростанцій і необхідності раціонального використання енергоресурсів.

2.1 Огляд спеціалізованих платформ та екосистем.

Для побудови системи моніторингу енергоспоживання в домашній мережі можна використовувати як відкриті програмні платформи, так і готові комерційні екосистеми. Вибір залежить від того, чи потрібна користувачу повна свобода налаштування, локальне зберігання даних, інтеграція власних датчиків, підтримка сонячної генерації, робота з інверторами та можливість подальшої модернізації. У межах цієї роботи доцільно порівнювати Home Assistant, OpenEnergyMonitor, Xiaomi Mi Home, Tuuya та Victron Energy (табл.1.2), оскільки вони представляють різні підходи до організації домашнього енергомоніторингу.

Таблиця 1.2 — Основні складові інтелектуальної домашньої енергомережі

Платформа	Тип рішення	Основне призначення	Переваги	Обмеження
Home Assistant	відкрита локальна платформа	автоматизація будинку та енергомоніторинг	гнучкість, багато інтеграцій, робота з MQTT	потребує налаштування серверної частини
OpenEnergyMonitor	відкрита енергетична платформа	вимірювання та аналіз споживання	орієнтація на енергетику, історія даних	менше побутових інтеграцій

Xiaomi Mi Home	комерційна екосистема	керування побутовими smart-пристроями	простий мобільний додаток, готові пристрої	залежність від екосистеми, обмежена гнучкість
Tuya	комерційна IoT-платформа	підключення smart-пристроїв різних виробників	широкий вибір пристроїв, швидке впровадження	закритість частини функцій, залежність від хмари
Victron Energy	професійна енергетична екосистема	моніторинг інверторів, АКБ і СЕС	висока надійність, робота з генерацією	вища вартість, прив'язка до обладнання виробника

Home Assistant є відкритою платформою для автоматизації будинку, яка може працювати на локальному сервері та об'єднувати різні пристрої в єдину систему. Її перевагою є гнучкість, підтримка великої кількості інтеграцій, можливість роботи без постійної залежності від хмарного сервісу та наявність окремих інструментів для енергетичного моніторингу. Ця платформа є зручною, оскільки дає змогу показати не тільки поточні значення потужності, а й графіки споживання, генерації, енергії з мережі та енергії, переданої в мережу. Крім того, Home Assistant може приймати дані від ESP32 через MQTT або HTTP, що добре відповідає структурі системи, яка розробляється.

OpenEnergyMonitor є спеціалізованою відкритою екосистемою, орієнтованою саме на вимірювання та аналіз енергоспоживання. Її логіка побудована навколо отримання даних з вимірювальних модулів, передавання показників на сервер і подальшого відображення графіків. Перевагою OpenEnergyMonitor є цільова спрямованість на енергетику, підтримка історичних даних і зручність аналізу споживання за періодами. Така система добре підходить для порівняння з розроблюваним рішенням, оскільки має схожу функціональну структуру: датчик, контролер, канал зв'язку, база даних і вебінтерфейс.

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

	Відкриті рішення (Open Source)		Комерційні рішення (Proprietary)		
	Home Assistant	OpenEnergyMonitor	Xiaomi Mi Home	Tuya (Smart Life)	Victron Energy
					
Тип рішення	Відкрите ПЗ (open source)	Відкрите ПЗ (open source)	Комерційне ПЗ (екосистема Xiaomi)	Комерційне ПЗ (хмарна платформа)	Комерційне ПЗ (екосистема Victron)
Основне призначення	Автоматизація дому, моніторинг енергії, інтеграція пристроїв	Моніторинг енергоспоживання та генерації, аналіз даних	Управління розумним домом, моніторинг енергії через пристрої Xiaomi	Хмарна платформа для розумних пристроїв, моніторинг і керування	Моніторинг і керування енергосистемами Victron (акумулятори, інвертори тощо)
Локальний контроль (без Інтернету)	✓ Так	✓ Так	✗ Обмежено (потрібен хаб/Інтернет)	✗ Ні (потрібен Інтернет)	✓ Так (локальна мережа Victron)
Вартість	Безкоштовно	Безкоштовно (ПЗ) Обладнання – окремо	Безкоштовно (ПЗ) пристрої – платні	Безкоштовно (ПЗ) пристрої – платні	Безкоштовно (ПЗ) пристрої – платні
Підтримка пристроїв та інтеграції	Дуже широка (тисячі інтеграцій, MQTT, Modbus, REST тощо)	Широка для енергомоніторингу (власні пристрої + MQTT, API, сторонні датчики)	Обмежена екосистемою Xiaomi (пристрої Mi, Aqara тощо)	Дуже широка екосистема через хмару (тисячі пристроїв різних брендів)	Оптимізована для обладнання Victron (інвертори, MPPT, акумулятори, BMS тощо)
Підтримка протоколів	MQTT, HTTP/REST, Modbus, Zigbee, Z-Wave, KNX, BLE, Thread та ін.	MQTT, HTTP/REST, Modbus, ESP-NOW, EmonCMS API	Власні протоколи Xiaomi, Wi-Fi, Zigbee, BLE	Wi-Fi, Zigbee, BLE, власні протоколи Tuya	VE.Direct, VE.Can, VE.Bus, Modbus TCP, MQTT
Візуалізація та аналітика	Гнучкі дашборди, графіки (Lovelace), історія даних	Вбудовані графіки (EmonCMS), експорт даних, аналітика	Базові графіки в додатку, деталізація обмежена	Базові графіки в додатку, аналітика залежить від пристрою	Потужна візуалізація в порталі Victron VRM, детальна аналітика
Хмарний сервіс	Опціонально (Nabu Casa) або власний сервер	Власний сервер (EmonCMS) або хмара (опційно)	Обов'язковий хмарний сервіс Xiaomi	Обов'язковий хмарний сервіс Tuya	Хмара VRM (безкоштовно базові функції)
Мобільний додаток	Так (офіційний додаток Home Assistant)	Так (MyEmonCMS, веб-інтерфейс адаптований для мобільних)	Так (Mi Home)	Так (Smart Life)	Так (VictronConnect, VRM App)
Налаштування та складність	Середня/висока (потрібні технічні знання)	Висока (потрібні знання для налаштування обладнання та сервера)	Низька (просте підключення пристроїв у додатку)	Низька (просте підключення пристроїв у додатку)	Середня (налаштування обладнання Victron та мережі)
Переваги	Повний контроль, гнучкість, локальна робота, велика спільнота	Спеціалізований енергомоніторинг, відкритість, гнучкість, локальна робота	Простота використання, велика екосистема пристроїв, стабільність	Дуже велика сумісність, швидке підключення, масштабованість	Надійність, професійне рішення для енергосистем, глибока інтеграція пристроїв
Недоліки	Потребує часу на налаштування та підтримку	Потребує технічних знань, менше готових рішень «під ключ»	Залежність від хмари Xiaomi, обмежена гнучкість	Залежність від хмари Tuya, питання конфіденційності даних	Висока вартість обладнання, обмежена сумісність поза екосистемою
Оптимальне використання	Розумний дім, повний контроль, інтеграція різних систем	Детальний моніторинг енергії, DIY-проекти, дослідження	Прості рішення для дому в екосистемі Xiaomi	Масові IoT-рішення, комерційні та домашні задачі	Професійні та автономні енергосистеми

✓ Так – повна підтримка ⚠ Обмежено – часткова підтримка ✗ Ні – не підтримується

Примітка: інформація станом на 2024–2025 рр.

Рис. 1.2 — Порівняння платформ моніторингу енергоспоживання

Комерційні платформи Xiaomi Mi Home орієнтовані переважно на масового користувача та побутову автоматизацію. Вони мають зручні мобільні додатки, підтримують розумні розетки, реле, вимикачі, датчики та інші пристрої. Їхня перевага полягає в простому підключенні обладнання і готовому інтерфейсі. Недоліком є обмежена гнучкість, залежність від фірмової екосистеми, часто закрита логіка обробки даних і менші можливості для власних схемотехнічних рішень. Для дипломної роботи такі платформи доцільно розглядати як приклад готового побутового підходу, але не як основну базу для розробки, оскільки вони гірше підходять для пояснення алгоритмів вимірювання, обробки сигналів і формування власної структури системи.

VictronEnergy є окремим класом рішень, пов'язаних із моніторингом інверторів, акумуляторних систем, сонячних контролерів і автономних або резервних джерел живлення. Ця екосистема добре підходить для домашніх енергомереж із сонячними панелями та накопичувачами енергії. Її перевагою є орієнтація на реальні енергетичні об'єкти, надійність обладнання та можливість

аналізу потоків енергії між мережею, навантаженням, акумулятором і генерацією. Недоліком для навчального проєкту є вища вартість обладнання та менша доцільність використання там, де потрібно розробити власний вимірювальний вузол на базі мікроконтролера.

Для розроблюваної системи важливо не тільки відображати готові дані, а й забезпечити власне вимірювання параметрів. Тому найбільш доцільним є підхід, за якого вимірювальний вузол створюється на базі ESP32 і датчиків струму та напруги, а програмна платформа використовується для візуалізації, зберігання та аналізу. У такому випадку Home Assistant або OpenEnergyMonitor можуть виступати верхнім рівнем системи, а MQTT або HTTP забезпечують зв'язок між контролером і сервером.

Порівняння платформ показує, що відкриті рішення краще підходять для дипломного проєктування, оскільки дозволяють описати внутрішню структуру системи, алгоритм роботи, формат даних, спосіб передавання й методи обробки. Комерційні екосистеми мають перевагу у зручності для кінцевого користувача, але вони менш придатні для технічного обґрунтування власної розробки. У межах цієї роботи основною логікою приймається створення відкритої системи моніторингу, яка може бути інтегрована з Home Assistant або OpenEnergyMonitor, але не залежить від конкретного виробника обладнання.

1.3. Огляд методів та обладнання для вимірювання електричних параметрів.

Вимірювання електричних параметрів у домашній енергомережі є основою роботи системи моніторингу, оскільки саме від точності первинних даних залежить правильність розрахунку спожитої енергії, потужності, коефіцієнта потужності та енергетичного балансу. Для побутової мережі основними величинами є напруга, струм, активна потужність, реактивна потужність, повна потужність, коефіцієнт потужності та електрична енергія за певний проміжок часу. Якщо система контролює не тільки споживання, а й генерацію, додатково потрібно визначати напрямок потоку енергії та різницю між виробленою і спожитою електроенергією.

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Найпростішим методом вимірювання струму є використання шунта, але для домашньої мережі цей спосіб не завжди зручний, оскільки потребує включення елемента безпосередньо в силове коло. У системах моніторингу доцільніше застосовувати неінвазивні трансформатори струму, датчики на ефекті Хола або спеціалізовані мікросхеми обліку електроенергії. Неінвазивний трансформатор струму SCT-013 встановлюється навколо провідника й дає змогу отримати сигнал, пропорційний струму, без прямого розриву силового кола. Такий підхід зручний для моніторингу, але потребує правильного вибору навантажувального резистора, калібрування та врахування фазового зсуву.

Датчик ACS712 працює на основі ефекту Хола та може вимірювати змінний і постійний струм. Його перевага полягає в простоті підключення до аналогового входу контролера, оскільки на виході формується напруга, пропорційна струму. Водночас для точного енергетичного обліку такий датчик має обмеження, пов'язані з шумами, температурною нестабільністю та необхідністю фільтрації сигналу. Тому ACS712 доцільно застосовувати в навчальних або допоміжних системах, де не потрібна точність рівня комерційного лічильника.

Спеціалізовані мікросхеми обліку електроенергії, наприклад ADE7753, призначені для вимірювання та обчислення енергетичних параметрів у однофазних мережах. Такі мікросхеми приймають сигнали струму й напруги, виконують внутрішню обробку та можуть надавати дані про активну енергію, потужність та інші параметри. Їхня перевага полягає в кращій точності, стабільності та пристосованості до задач енергетичного обліку. Для дипломної роботи використання ADE7753 є технічно обґрунтованим, оскільки дає змогу поєднати практичну схемотехнічну частину з розрахунком енергетичних показників.

Основні формули, що використовуються для аналізу вимірювань, мають такий вигляд:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt$$

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S = U \cdot I$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$$W = P \cdot t$$

де $p(t)$ — миттєва потужність; $u(t)$ — миттєве значення напруги; $i(t)$ — миттєве значення струму; P — активна потужність; S — повна потужність; Q — реактивна потужність; $\cos \varphi$ — коефіцієнт потужності; W — електрична енергія; t — час роботи навантаження.

Для системи моніторингу важливо враховувати не лише тип датчика, а й частоту опитування, метод фільтрації, спосіб калібрування та допустиму похибку. У побутовій мережі значна частина навантажень є нелінійною: імпульсні блоки живлення, LED-освітлення, зарядні пристрої, інверторна техніка. Через це струм може мати несинусоїдальну форму, а просте множення діючих значень напруги та струму не завжди дає правильну активну потужність. Тому для якісного моніторингу бажано вимірювати миттєві значення напруги й струму та обчислювати активну потужність за середнім значенням добутку $u(t)$ та $i(t)$ за період.

1.4. Програмні засоби візуалізації та обробки даних.

Програмна частина системи моніторингу енергоспоживання виконує не менш важливу роль, ніж вимірювальний вузол, оскільки окремі значення струму або потужності не дають повної картини роботи домашньої енергомережі. Для практичного використання необхідно зберігати історію вимірювань, будувати графіки, порівнювати споживання і генерацію, визначати добові та місячні показники, фіксувати перевищення потужності й аналізувати фонове навантаження. Тому система має включати не тільки мікроконтролер і датчики, а й програмне середовище для передавання, зберігання, обробки та візуалізації даних.

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Передавання даних від контролера до сервера може виконуватися за допомогою MQTT або HTTP. MQTT: є зручним для IoT-систем, оскільки працює за принципом публікації та підписки. Контролер передає дані до брокера у визначені теми, а сервер або платформа візуалізації отримує ці дані та використовує їх для побудови графіків. Такий підхід зменшує навантаження на контролер і дає змогу легко підключати кілька споживачів даних. Наприклад, ESP32 може передавати значення напруги, струму, активної потужності, добового споживання та генерації в окремі MQTT-теми.

HTTP є простішим для реалізації у вигляді запитів до сервера або REST API. У цьому випадку контролер формує пакет даних і надсилає його на сервер через POST-запит. Перевагою HTTP є зрозуміла структура та сумісність із великою кількістю вебсервісів. Недоліком є більша надмірність протоколу порівняно з MQTT, що може мати значення для малопотужних пристроїв або нестабільного зв'язку. Для домашньої системи обидва варіанти є придатними, але MQTT краще відповідає задачам регулярного передавання коротких повідомлень у реальному часі.

Для зберігання історії енергетичних параметрів доцільно використовувати базу даних часових рядів. Енергетичні дані природно мають часову прив'язку: кожне значення потужності, напруги, струму або генерації фіксується в конкретний момент часу. Тому зберігання таких даних у вигляді часових рядів спрощує побудову графіків, розрахунок середніх значень, пошук піків і визначення споживання за період. У практичних системах для цього можуть застосовуватися InfluxDB, вбудовані бази Home Assistant або інші локальні сховища.

Візуалізація даних може виконуватися через Home Assistant, Grafana або OpenEnergyMonitor. Home Assistant зручний тим, що поєднує автоматизацію будинку та енергетичний моніторинг в одному інтерфейсі. Grafana є сильним інструментом для побудови графіків і панелей за даними з різних джерел. OpenEnergyMonitor орієнтований саме на аналіз енергоспоживання, тому добре

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підходить для систем, де головне завдання полягає у відображенні електричних параметрів і балансу енергії.

Таблиця 1.4 — Програмні засоби передавання, зберігання та візуалізації даних

Програмний засіб	Призначення	Переваги	Обмеження
MQTT	передавання даних між ESP32 і сервером	легкий протокол, зручний для IoT, підтримка підписок	потрібен брокер
HTTP	передавання даних через вебзапити	простота, сумісність із вебсервісами	більша надмірність для частих коротких повідомлень
Home Assistant	локальна автоматизація та енергомоніторинг	інтеграції, панель енергії, робота з MQTT	потребує налаштування
OpenEnergyMonitor	спеціалізований енергетичний моніторинг	зручний аналіз споживання, історія даних	менша універсальність для smart home
InfluxDB	база даних часових рядів	ефективне зберігання показників за часом	потребує окремого налаштування
Grafana	візуалізація даних	гнучкі графіки, дашборди, аналітика	не є самостійним джерелом даних

Для обробки даних система повинна виконувати не лише відображення поточної потужності, а й перетворення потоку вимірювань у зрозумілі енергетичні показники. Наприклад, якщо контролер передає значення активної потужності кожні 10 секунд, сервер може розрахувати спожиту енергію за інтервалом:

$$W = \sum P_i \cdot \Delta t_i$$

У таблицях та програмному коді такий розрахунок можна подати у простій формі: $W = W + P \cdot dt$. Для добового балансу використовується різниця між генерацією та споживання: $Balance = Generation - Consumption$. Якщо значення додатне, будинок має надлишок енергії, якщо від’ємне — потрібне живлення з мережі.

У розроблюваній системі доцільно прийняти таку програмну архітектуру: ESP32 зчитує дані з вимірювального вузла, виконує первинну фільтрацію, формує пакет даних у форматі JSON і передає його через MQTT або HTTP на локальний сервер. Сервер зберігає дані в базі, а користувацький інтерфейс будує графіки потужності, споживання, генерації та енергетичного балансу. Така структура є достатньо простою для реалізації, але водночас відповідає принципам сучасних IoT-систем. Вона дозволяє масштабувати систему, додавати нові датчики, підключати окремі групи навантажень і надалі використовувати отримані дані для автоматичного керування побутовими приладами.

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Теоретичне обґрунтування та розробка архітектури системи

2.1. Математичне забезпечення розрахунку енергетичних показників.

Математичне забезпечення системи моніторингу енергоспоживання та генерації потрібне для перетворення первинних вимірювальних сигналів у практичні енергетичні показники, які може використовувати власник будинку. Вимірювання лише миттєвого струму або напруги не дає повної інформації про роботу домашньої енергомережі, тому система повинна розраховувати активну, реактивну і повну потужність, коефіцієнт потужності, спожиту електроенергію, вироблену електроенергію та добовий енергетичний баланс. Для побутової однофазної мережі основними вхідними величинами є миттєве значення напруги $u(t)$, миттєве значення струму $i(t)$, час вимірювання t , інтервал дискретизації Δt , а також напрям потоку енергії між зовнішньою мережею, навантаженням і джерелом власної генерації.

У загальному випадку миттєва потужність визначається як добуток миттєвих значень напруги та струму:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

де $p(t)$ — миттєва потужність, Вт; $u(t)$ — миттєве значення напруги, В; $i(t)$ — миттєве значення струму, А.

Для побутових навантажень така формула має важливе значення, оскільки значна частина сучасних електроприймачів є нелінійною. До них належать імпульсні блоки живлення, LED-освітлення, зарядні пристрої, інверторні холодильники, пральні машини, кондиціонери та комп'ютерна техніка. У таких навантаженнях форма струму може відрізнятися від синусоїди, тому для правильного визначення активної потужності доцільно використовувати усереднення миттєвої потужності за певний проміжок часу. Активна потужність визначається за формулою:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt$$

де P — активна потужність, Вт; T — період або інтервал усереднення, с.

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У цифровій системі на базі мікроконтролера інтегрування замінюється дискретним підсумовуванням. Якщо контролер зчитує послідовність значень напруги та струму, активна потужність може бути визначена так:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k \cdot i_k$$

де N — кількість відліків за інтервал вимірювання; u_k — поточний відлік напруги; i_k — поточний відлік струму.

Діюче значення напруги та струму використовується для оцінки електричного режиму мережі та визначення повної потужності. Для цифрової обробки ці величини розраховуються як середньоквадратичні значення:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k^2}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k^2}$$

де U — діюче значення напруги, В; I — діюче значення струму, А.

Повна потужність визначається як добуток діючих значень напруги та струму:

$$S = U \cdot I$$

де S — повна потужність, В·А.

Реактивна потужність характеризує частину енергетичного обміну, яка не перетворюється в корисну роботу, але впливає на завантаження мережі. Для побутової мережі її можна визначати через повну та активну потужність:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

де Q — реактивна потужність, ВАР.

Коефіцієнт потужності показує, яка частина повної потужності перетворюється в активну. Для системи моніторингу цей показник важливий при аналізі роботи інверторів, імпульсних блоків живлення та електродвигунів:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $\cos \varphi$ — коефіцієнт потужності.

Таблиця 2.1 — Основні енергетичні показники системи моніторингу

Показник	Позначення	Одиниця вимірювання	Формула для розрахунку	Призначення
Миттєва потужність	$p(t)$	Вт	$p(t) = u(t) * i(t)$	оцінка поточного режиму навантаження
Активна потужність	P	Вт	$P = (1/N) \sum (u_k i_k)$	визначення корисного споживання
Діюча напруга	U	В	$U = \sqrt{(1/N) * \sum u_k^2}$	контроль якості напруги
Діючий струм	I	А	$I = \sqrt{(1/N) * \sum i_k^2}$	контроль навантаження лінії
Повна потужність	S	В·А	$S = U * I$	оцінка повного завантаження мережі
Реактивна потужність	Q	ВАР	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$	оцінка неактивної складової потужності
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi$	%	$\cos \varphi = P/S$	аналіз ефективності навантаження
Електрична енергія	W	кВт·год	$W = \sum P_i * \Delta t_i$	розрахунок споживання або генерації

Електрична енергія визначається як інтеграл активної потужності за часом. У практичній системі моніторингу вона обчислюється через сумування потужності за окремими інтервалами:

$$W = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \Delta t_i$$

де W — електроенергія, кВт·год; P_i — середня активна потужність на інтервалі часу, кВт; Δt_i — тривалість інтервалу, год.

У програмному коді та таблицях такий розрахунок доцільно подавати в простій формі: $W = W + P * dt$. Якщо потужність зчитується у ватах, а час заданий

у секундах, тоді для отримання кВт·год використовується перерахунок: $W_{kWh} = W_{Wh}/1000$ або $W_{kWh} = \Sigma(P_W * dt_s)/3600000$. Саме така форма зручна для реалізації в мікроконтролері ESP32 та для подальшого запису даних у базу.

Для домашньої мережі з власною генерацією вводиться поняття енергетичного балансу. Якщо система фіксує окремо споживання будинку та генерацію від сонячної електростанції, баланс можна визначити так:

$$W_{\text{бал}} = W_{\text{ген}} - W_{\text{спож}}$$

де $W_{\text{бал}}$ — енергетичний баланс, кВт·год; $W_{\text{ген}}$ — вироблена електроенергія, кВт·год; $W_{\text{спож}}$ — спожита електроенергія, кВт·год.

Якщо $W_{\text{бал}} > 0$, власна генерація перевищує споживання, і в будинку виникає надлишок електроенергії. Якщо $W_{\text{бал}} < 0$, власної генерації недостатньо, тому частина енергії береться із зовнішньої мережі. Для більш детального аналізу доцільно окремо визначати енергію, взятую з мережі, енергію, передану в мережу, та частку самоспоживання власної генерації. Частка самоспоживання визначається як:

$$K_{\text{сам}} = \frac{W_{\text{вик.ген}}}{W_{\text{ген}}} \cdot 100\%$$

де $K_{\text{сам}}$ — частка самоспоживання, %; $W_{\text{вик.ген}}$ — частина виробленої енергії, використана в будинку; $W_{\text{ген}}$ — загальна вироблена енергія.

Таблиця 2.2 — Показники енергетичного балансу домашньої мережі

Показник	Умовне позначення	Формула в текстовому вигляді	Пояснення
Спожита електроенергія	$W_{\text{спож}}$	$W_{\text{спож}} = \Sigma P_{\text{спож}} \cdot dt$	енергія, використана всіма навантаженнями
Вироблена електроенергія	$W_{\text{ген}}$	$W_{\text{ген}} = \Sigma P_{\text{ген}} \cdot dt$	енергія, вироблена сонячними панелями
Енергетичний баланс	$W_{\text{бал}}$	$W_{\text{бал}} = W_{\text{ген}} - W_{\text{спож}}$	різниця між генерацією та споживанням
Енергія з мережі	$W_{\text{мер}}$	$W_{\text{мер}} = W_{\text{спож}} - W_{\text{ген}}$, якщо $W_{\text{спож}} > W_{\text{ген}}$	енергія, яку потрібно отримати

			від зовнішньої мережі
Надлишок генерації	$W_{\text{надл}}$	$W_{\text{надл}} = W_{\text{ген}} - W_{\text{спож}}$, якщо $W_{\text{ген}} > W_{\text{спож}}$	енергія, яка не використана в будинку
Частка самоспоживання	$K_{\text{сам}}$	$K_{\text{сам}} = (W_{\text{вик.ген}} / W_{\text{ген}}) * 100$	показує ефективність використання власної генерації

Отже, математичне забезпечення системи моніторингу має охоплювати обчислення миттєвих, середніх і накопичувальних показників. Для практичної реалізації найважливішими є активна потужність, добове споживання, добова генерація, енергетичний баланс і коефіцієнт потужності. Саме ці величини дають змогу оцінити реальний режим роботи домашньої мережі, виявити фонове навантаження, визначити пікові періоди споживання та встановити, наскільки ефективно використовується власна генерація.

2.2. Обґрунтування структури системи моніторингу.

Структура системи моніторингу енергоспоживання та генерації повинна забезпечувати повний шлях руху даних від первинного вимірювання електричних параметрів до їх відображення користувачу у вигляді графіків, числових показників і повідомлень про стан домашньої енергомережі. Для такої системи недостатньо лише встановити датчик струму або лічильник. Потрібно передбачити вимірювальний рівень, рівень збору та первинної обробки даних, рівень передавання інформації, рівень зберігання історії та рівень візуалізації. Такий поділ дозволяє зробити систему зрозумілою для проєктування, зручною для модернізації та придатною для інтеграції з іншими пристроями розумного будинку.

Домашня енергомережа в межах цієї роботи розглядається як електротехнічний об'єкт, у якому є зовнішнє живлення від мережі, групи побутових навантажень, вузол власної генерації та система вимірювання. Основними контрольованими потоками є споживання електроенергії з мережі,

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

вироблення енергії сонячною електростанцією, споживання навантаженнями будинку та можливий надлишок генерації. Тому структура системи повинна давати змогу окремо реєструвати щонайменше два напрями: загальне споживання будинку та генерацію. У розширеному варіанті можна додати контроль окремих груп навантажень: освітлення, розеткової мережі, електронагрівача, насоса, кондиціонера або зарядного пристрою.

Першим рівнем системи є рівень датчиків. Він виконує перетворення електричних величин у сигнали, придатні для подальшої обробки. Для струму можуть використовуватися неінвазивні трансформатори струму SCT-013, датчики на ефекті Хола ACS712 або вимірювальні канали спеціалізованої мікросхеми енергообліку. Для напруги необхідний вимірювальний вузол з гальванічною розв'язкою або спеціалізований модуль, який знижує напругу мережі до безпечного рівня для електронної схеми. При виборі датчиків важливо враховувати електробезпеку, точність, простоту монтажу, стабільність показників і можливість калібрування.

Другим рівнем є контролер збору даних. У цій роботі як основний варіант доцільно прийняти ESP32, оскільки він має вбудований Wi-Fi, достатню продуктивність, аналогові входи, цифрові інтерфейси та можливість роботи з MQTT або HTTP. Контролер виконує опитування датчиків, первинну фільтрацію сигналів, розрахунок потужності, енергії та коефіцієнта потужності, а також формує пакет даних для передавання на сервер. На цьому рівні також можуть виконуватися перевірки аварійних умов: перевищення струму, зникнення напруги, нульова генерація при наявності сонячного дня, різке зростання фонових навантажень.

Третім рівнем є рівень передавання даних. Для домашньої системи найбільш зручними є Wi-Fi як фізичний канал та MQTT або HTTP як прикладні протоколи. MQTT доцільний для регулярного передавання коротких повідомлень з енергетичними показниками. HTTP зручний для простого передавання даних на сервер через запити. У проєктній системі можна передбачити обидва варіанти, але

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основним прийняти MQTT, оскільки він краще підходить для IoT-пристроїв, працює з брокером повідомлень і дозволяє легко підключати кілька споживачів даних.

Четвертим рівнем є сервер або локальна система зберігання. Його завдання полягає в прийманні даних від контролера, збереженні історії вимірювань, підготовці даних для графіків та аналітичних розрахунків. Для цього можна використовувати локальний сервер на базі мінікомп'ютера, домашнього сервера або комп'ютера користувача. Дані доцільно зберігати у вигляді часових рядів, оскільки кожне значення потужності, струму, напруги, споживання або генерації має часову мітку.

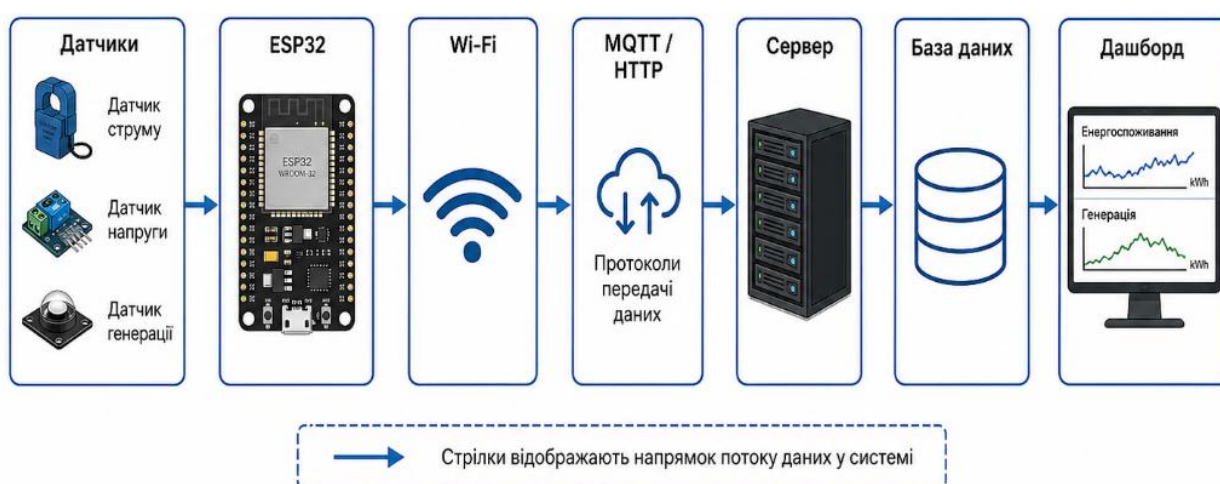


Рис. 2.1. – Структурна схема системи моніторингу енергоспоживання та генерації

П'ятим рівнем є візуалізація. Користувач повинен бачити поточну потужність, напругу, струм, добове споживання, добову генерацію, баланс енергії, пікові навантаження та історію за обраний період. Візуалізація може бути реалізована через Home Assistant, Grafana або OpenEnergyMonitor. Для дипломної роботи важливо показати, що система не обмежується технічним вимірюванням, а дає практичний результат у вигляді зрозумілого інтерфейсу для аналізу енергоспоживання.

Таблиця 2.3 — Рівні структури системи моніторингу

Рівень системи	Основні елементи	Функція рівня	Результат роботи
----------------	------------------	---------------	------------------

Рівень датчиків	SCT-013, ACS712, ADE7753, датчик напруги	перетворення електричних параметрів у сигнали	отримання даних про струм і напругу
Рівень збору даних	ESP32	опитування датчиків, розрахунок показників	потужність, енергія, баланс, коефіцієнт потужності
Рівень передавання	Wi-Fi, MQTT, HTTP	передавання даних на сервер	повідомлення з енергетичними параметрами
Рівень зберігання	локальний сервер, база даних	накопичення історії вимірювань	дані за добу, тиждень, місяць
Рівень візуалізації	Home Assistant, Grafana, OpenEnergyMonitor	побудова графіків та панелі моніторингу	зручний контроль споживання і генерації

Структурно система може працювати за такою послідовністю: датчики вимірюють струм і напругу, ESP32 зчитує сигнали та розраховує енергетичні показники, після чого дані передаються через Wi-Fi до MQTT-брокера або HTTP-сервера. Далі сервер записує показники в базу даних, а програмна панель відображає графіки та числові значення. У разі перевищення заданих меж система може формувати повідомлення користувачу або записувати подію в журнал.

Таблиця 2.4 — Основні інформаційні потоки в системі

Джерело даних	Отримувач даних	Передані параметри	Призначення
Датчик струму	ESP32	$i(t), I$	визначення навантаження
Датчик напруги	ESP32	$u(t), U$	контроль напруги та розрахунок потужності
ESP32	MQTT-брокер або HTTP-сервер	$U, I, P, S, Q, \cos\varphi, W$	передавання оброблених даних
Сервер	База даних	часові ряди показників	зберігання історії
База даних	Панель візуалізації	дані за обраний період	побудова графіків
Панель моніторингу	Користувач	графіки, баланс, попередження	аналіз енергоспоживання

Запропонована структура є обґрунтованою, оскільки вона відповідає вимогам до сучасної системи моніторингу: має вимірювальний вузол, контролер, канал передавання, програмне зберігання та візуальний інтерфейс. Вона також допускає масштабування: до системи можна додати додаткові датчики, окремий контроль генерації, контроль акумуляторної батареї, релейне керування навантаженням або автоматичні сценарії. У базовому варіанті система виконує моніторинг, а в подальшому може стати частиною повноцінної системи керування енергоспоживанням будинку.

2.3. Вибір та обґрунтування елементної бази.

Вибір елементної бази є одним із ключових етапів розробки системи моніторингу енергоспоживання та генерації, оскільки від нього залежать точність вимірювання, надійність роботи, складність монтажу, вартість системи та можливість подальшого розширення. Для домашньої енергомережі елементна база повинна відповідати кільком вимогам: забезпечувати безпечне вимірювання параметрів мережі 230 В, мати достатню точність для побутового аналізу, підтримувати передавання даних через бездротову мережу, мати доступну документацію та бути придатною для реалізації в умовах дипломного проєкту.

Центральним елементом системи є мікроконтролер. Для порівняння можна розглянути Arduino Uno та ESP32. Arduino Uno є поширеним навчальним контролером, але для цієї задачі він має суттєве обмеження: відсутність вбудованого Wi-Fi. Для передавання даних довелося б використовувати додатковий модуль зв'язку, що ускладнює схему та програмне забезпечення. ESP8266 має Wi-Fi і може використовуватися в IoT-проєктах, але поступається ESP32 за кількістю інтерфейсів, продуктивністю та функціональними можливостями. ESP32 має вбудований Wi-Fi, Bluetooth, достатню кількість входів-виходів, апаратні інтерфейси SPI, I2C, UART, АЦП та більшу обчислювальну потужність. Тому ESP32 є найбільш доцільним варіантом для системи, яка повинна

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

не тільки зчитувати дані, а й виконувати первинні розрахунки та передавати показники на сервер.

Таблиця 2.5 — Порівняння мікроконтролерів для системи моніторингу

Мікроконтролер	Наявність Wi-Fi	Обчислювальні можливості	Переваги	Недоліки	Висновок
Arduino Uno	немає	базові	простота, багато прикладів	потрібен окремий Wi-Fi-модуль, менше ресурсів	не є оптимальним
ESP8266	є	середні	низька вартість, підтримка IoT	менше інтерфейсів і ресурсів	придатний для простих систем
ESP32	є	високі для IoT	Wi-Fi, Bluetooth, багато інтерфейсів, достатня швидкодія	потребує уважного налаштування АЦП	оптимальний вибір

Для вимірювання струму в системі можна застосувати SCT-013, ACS712 або спеціалізовану мікросхему енергообліку ADE7753. SCT-013 є неінвазивним трансформатором струму, який встановлюється навколо провідника без розриву силового кола. Це підвищує безпеку монтажу та спрощує встановлення в розподільчому щитку. Такий датчик добре підходить для вимірювання змінного струму, але потребує навантажувального резистора, калібрування та корекції фазового зсуву. ACS712 є датчиком на ефекті Хола, який може вимірювати змінний і постійний струм. Його перевагою є простий аналоговий вихід, однак для точного енергообліку він менш бажаний через шум, температурний дрейф і потребу в якісній фільтрації. ADE7753 є спеціалізованою мікросхемою для обліку електроенергії, яка дозволяє отримувати більш точні результати та зменшує навантаження на мікроконтролер, оскільки частина обчислень виконується всередині мікросхеми.

Для розроблюваної системи доцільно прийняти комбінований підхід: як основний вимірювальний елемент для енергообліку використати ADE7753 або подібний модуль, а SCT-013 розглянути як доступний і безпечний варіант для контролю струму окремих ліній. Такий підхід дає змогу отримати точніші дані по загальному споживанню і водночас залишити можливість розширення системи для окремих груп навантажень.

Таблиця 2.6 — Порівняння засобів вимірювання струму та енергії

Елемент	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Доцільність застосування
SCT-013	трансформатор струму	неінвазивний монтаж, безпечніше встановлення	потрібне калібрування, вимірює тільки змінний струм	контроль струму в лініях
ACS712	ефект Хола	простий аналоговий вихід, вимірювання AC/DC	шум, температурний дрейф	допоміжні та навчальні вимірювання
ADE7753	спеціалізована мікросхема обліку	вища точність, розрахунок енергії, цифровий обмін	складніша схема підключення	основний вузол енергообліку
DIN-лічильник з Modbus	готовий прилад	надійність, промислове виконання	вища вартість, менше власної розробки	еталон або контрольне порівняння

Крім контролера та датчиків, система потребує вузла живлення. Оскільки ESP32 і вимірювальні модулі працюють на низькій напрузі, необхідно передбачити джерело живлення 5 В або 3,3 В з гальванічною розв'язкою від мережі. У домашній електромережі не можна використовувати нестабільні або відкриті джерела живлення без захисту, оскільки система встановлюється поблизу силових кіл. Доцільно використовувати готовий ізольований AC/DC-модуль або блок живлення, розрахований на роботу від мережі 230 В. Для підвищення надійності потрібно передбачити запобіжник, варистор або інші елементи захисту від перенапруги, а також корпус із негорючого матеріалу.

Для передавання даних обирається Wi-Fi, оскільки він уже наявний у більшості будинків і підтримується ESP32 без додаткових модулів. Як основний протокол передавання доцільно прийняти MQTT, а HTTP залишити як альтернативний варіант. MQTT краще підходить для регулярного передавання коротких повідомлень, наприклад один раз на 5 або 10 секунд. Формат повідомлення можна подати у вигляді набору параметрів: напруга, струм, активна потужність, повна потужність, коефіцієнт потужності, спожита енергія, вироблена енергія та баланс. Для зберігання й візуалізації даних можна використати Home Assistant, Grafana або OpenEnergyMonitor.

Таблиця 2.7 — Прийнята елементна база системи

Функціональний вузол	Прийнятий елемент	Обґрунтування вибору
Контролер	ESP32	має Wi-Fi, достатню продуктивність і потрібні інтерфейси
Основний вимірювач енергії	ADE7753 або аналогічний модуль	забезпечує точніший облік активної енергії
Додатковий датчик струму	SCT-013	не потребує розриву силового провідника
Датчик для допоміжних вимірювань	ACS712	простий для макетування та перевірки струмових кіл
Канал зв'язку	Wi-Fi	доступний у побутових умовах і підтримується ESP32
Протокол передавання	MQTT	зручний для IoT-даних у реальному часі
Візуалізація	Home Assistant або Grafana	дозволяє будувати графіки та панель моніторингу
Живлення	ізолюваний AC/DC-модуль 230 В / 5 В	безпечне живлення електронної частини

Таким чином, вибрана елементна база відповідає технічним завданням дипломної роботи. ESP32 забезпечує збирання та передавання даних, ADE7753 або аналогічний вимірювальний модуль відповідає за точність енергообліку, SCT-013 дає можливість безпечного контролю струму, а MQTT і програмна панель забезпечують передавання та аналіз результатів. Запропонована конфігурація є

достатньо доступною, технічно обґрунтованою і придатною для створення структурної та принципової схем.

2.4. Алгоритмічне забезпечення роботи системи.

Алгоритмічне забезпечення системи моніторингу визначає порядок роботи контролера, спосіб отримання даних від вимірювальних вузлів, метод обробки сигналів, формат передавання інформації та реакцію системи на нестандартні режими. Для домашньої енергомережі алгоритм повинен бути безперервним, оскільки енергоспоживання та генерація змінюються протягом доби. Система має регулярно зчитувати показники, обчислювати основні енергетичні параметри, записувати результати в пам'ять або передавати їх на сервер, а також контролювати коректність роботи датчиків і каналу зв'язку.

Робота системи починається з ініціалізації контролера ESP32. На цьому етапі задаються параметри входів і виходів, встановлюються коефіцієнти калібрування датчиків, запускаються інтерфейси обміну з вимірювальним модулем, налаштовується Wi-Fi та перевіряється з'єднання з MQTT-брокером або HTTP-сервером. Після цього система переходить до основного циклу, в якому виконується опитування датчиків, фільтрація даних, розрахунок потужності та енергії, формування пакета повідомлення і передавання даних на верхній рівень.

Якщо використовується датчик струму та вимірювання напруги через аналогові входи, контролер повинен зчитувати певну кількість відліків за період мережевої напруги. Для мережі частотою 50 Гц один період триває 20 мс. Щоб отримати коректні значення, доцільно накопичувати вибірку з кількох періодів, наприклад за 1 секунду. Після цього розраховуються діючі значення напруги та струму, активна потужність, повна потужність і коефіцієнт потужності. Якщо використовується ADE7753, частина розрахунків може виконуватися самою мікросхемою, а ESP32 зчитує вже підготовлені значення або регістри, необхідні для подальшої обробки.

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

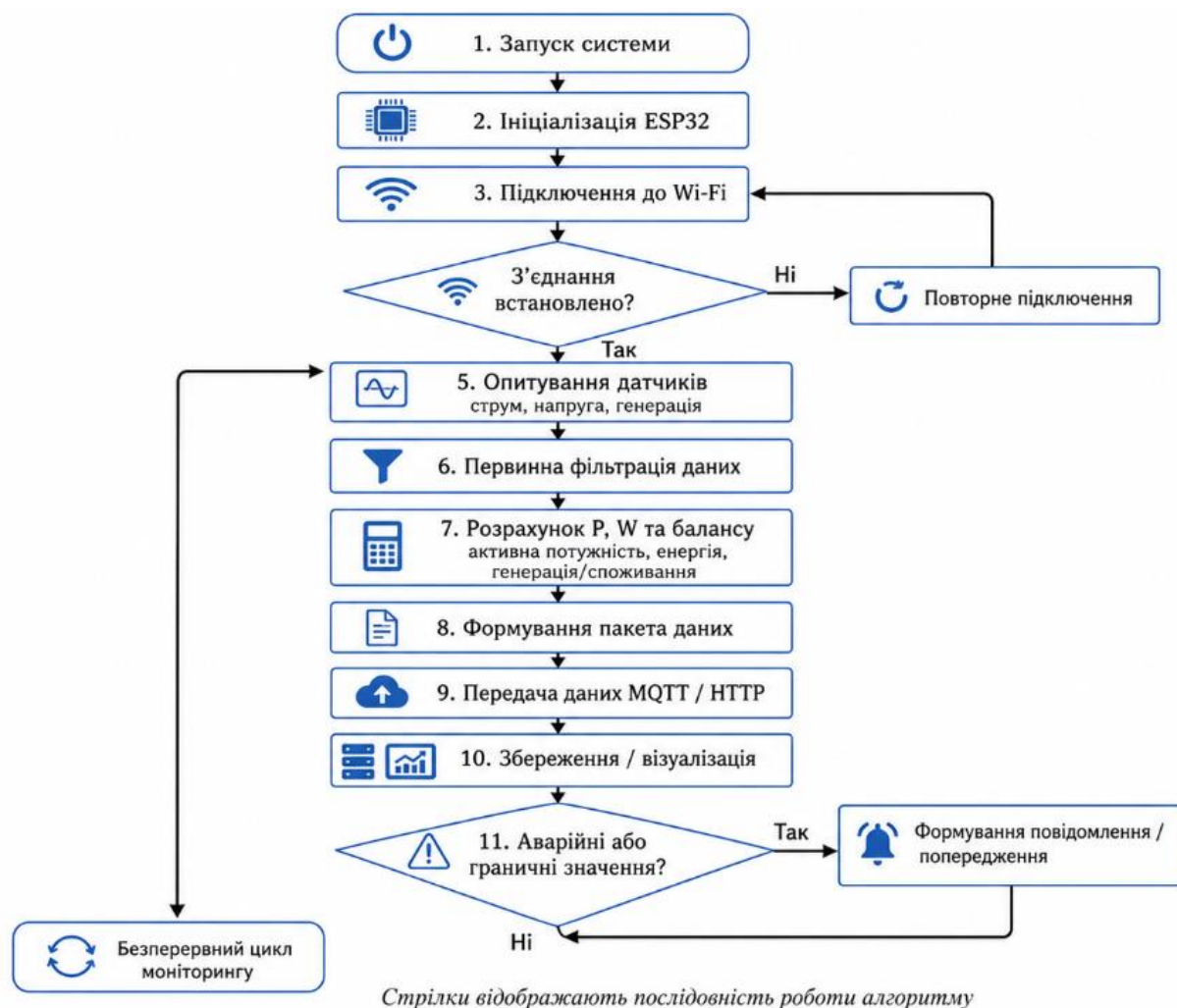


Рис. 2.2 — Блок-схема алгоритму роботи системи

Важливою частиною алгоритму є фільтрація. У реальних умовах вимірювальні сигнали можуть містити шум, короткі імпульсні завади, похибки АЦП та відхилення, пов'язані з роботою нелінійних навантажень. Для зменшення впливу випадкових коливань можна застосовувати усереднення за кількома вимірюваннями. Наприклад, активна потужність перед передаванням на сервер може визначатися як середнє значення за 5 або 10 секунд. Для графіків реального часу цього достатньо, а для добових і місячних розрахунків важливішим є не миттєве значення, а правильне накопичення енергії.

Накопичення електроенергії виконується шляхом додавання енергії за кожний інтервал часу. Якщо активна потужність P відома, а інтервал вимірювання становить Δt , тоді енергія за цей інтервал визначається так:

$$W_i = P_i \cdot \Delta t_i$$

Загальна енергія за період:

$$W = \sum W_i$$

У програмній реалізації це можна подати так: $W = W + P * dt$. Якщо P задано у ватах, а dt у секундах, тоді $W_kWh = W + P * dt / 3600000$. Для домашньої мережі з генерацією такий самий принцип застосовується окремо для споживання і генерації. Після цього система розраховує баланс: $Balance = Generation - Consumption$.

Таблиця 2.8 — Послідовність роботи алгоритму системи

Етап	Дія системи	Вхідні дані	Результат
1	Ініціалізація ESP32	параметри програми, налаштування Wi-Fi	готовність контролера до роботи
2	Підключення до мережі	SSID, пароль Wi-Fi	доступ до локальної мережі
3	Підключення до сервера	адреса MQTT-брокера або HTTP-сервера	готовність передавання даних
4	Опитування датчиків	сигнали струму і напруги	масив вимірних значень
5	Фільтрація	первинні вимірювання	зменшення шумів і випадкових відхилень
6	Розрахунок показників	$U, I, p(t), dt$	$P, S, Q, \cos\phi, W$
7	Формування пакета	розраховані показники	повідомлення у форматі JSON або MQTT
8	Передавання даних	пакет показників	запис даних на сервер
9	Перевірка аварійних режимів	струм, потужність, напруга	попередження або запис події
10	Повторення циклу	часовий інтервал	безперервний моніторинг

Для передавання даних зручно використовувати структурований формат JSON. У такому повідомленні можуть міститися всі основні параметри: напруга, струм, активна потужність, енергія, генерація, баланс і час вимірювання. Наприклад, логіка повідомлення може мати такий вигляд: `voltage = 229.8; current = 4.2; power = 850; energy = 6.4; generation = 3.1; balance = -3.3`. Такий формат легко обробляється сервером і може бути використаний у Home Assistant або Grafana.

Окремо в алгоритмі потрібно передбачити обробку помилок. Якщо Wi-Fi-з'єднання втрачено, ESP32 повинен виконати повторне підключення. Якщо MQTT-

брокер недоступний, система може тимчасово накопичувати дані в локальній пам'яті або продовжувати вимірювання до відновлення зв'язку. Якщо датчик повертає некоректні значення, наприклад від'ємну напругу, нульовий струм при наявному навантаженні або занадто різкий стрибок потужності, алгоритм повинен відфільтрувати таке значення або позначити його як помилкове. Для побутової системи це важливо, оскільки нестабільний зв'язок або короточасні завади не повинні призводити до неправильного добового обліку.

Таблиця 2.9 — Контрольні умови в алгоритмі роботи системи

Контрольована умова	Умова перевірки	Дія системи
Втрата Wi-Fi	немає з'єднання з мережею	повторне підключення
Недоступність MQTT-брокера	немає підтвердження передавання	повторна спроба передавання
Перевищення струму	$I > I_{\text{доп}}$	формування попередження
Перевищення потужності	$P > P_{\text{доп}}$	запис події та повідомлення
Занижена напруга	$U < U_{\text{min}}$	фіксація аварійного режиму
Завищена напруга	$U > U_{\text{max}}$	фіксація аварійного режиму
Нульова генерація вдень	$P_{\text{ген}} \approx 0$ за наявності освітлення	повідомлення про можливу несправність
Некоректне вимірювання	значення виходить за фізично можливі межі	відкидання або повторне вимірювання

Періодичність передавання даних залежить від призначення системи. Для графіків реального часу достатньо інтервалу 5–10 секунд. Для добового аналізу можна зберігати усереднені значення за 1 хвилину. Якщо передавати дані занадто часто, збільшиться навантаження на мережу та базу даних. Якщо інтервал занадто великий, система може пропустити короточасні піки навантаження. У цій роботі доцільно прийняти інтервал вимірювання 1 секунда для внутрішніх розрахунків і інтервал передавання 10 секунд для відображення на сервері. Такий режим є компромісом між точністю моніторингу та обсягом даних.

Алгоритм роботи системи можна представити як циклічний процес: ініціалізація, вимірювання, обробка, передавання, перевірка режимів і повторення

циклу. Саме така структура відповідає задачам домашнього енергомоніторингу, оскільки система має працювати безперервно, автоматично та з мінімальною участю користувача. У результаті алгоритмічне забезпечення дозволяє перетворити набір датчиків і контролер ESP32 у повноцінну систему, яка вимірює параметри мережі, обчислює споживання та генерацію, формує добовий баланс і передає дані для подальшого аналізу.

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 3. Технічна реалізація та аналіз результатів

3.1. Схемотехнічне рішення системи моніторингу.

Схемотехнічне рішення системи моніторингу енергоспоживання та генерації в домашній енергомережі побудоване за модульним принципом, що дозволяє розділити силову частину мережі 230 В, вимірювальні кола, мікроконтролерний вузол, вузол живлення та канал передавання даних. Такий підхід є доцільним, оскільки система працює з параметрами побутової електромережі, але основна електронна частина повинна залишатися низьковольтною та безпечною для обслуговування. Основне завдання схеми полягає в отриманні інформації про струм, напругу, активну потужність, накопичену електроенергію, генерацію від домашньої сонячної електростанції та передачі цих даних на програмний рівень моніторингу.

У структурі системи передбачено два основні вимірювальні канали: канал контролю споживання будинку та канал контролю генерації. Перший канал встановлюється на вводі або після ввідного автоматичного вимикача, що дозволяє визначати загальне навантаження будинку. Другий канал підключається до лінії інвертора сонячної електростанції або до виходу джерела власної генерації. Такий розподіл дає змогу окремо визначати, скільки електроенергії будинок споживає, скільки виробляє та який баланс формується протягом доби. У спрощеному варіанті система може мати один вимірювальний канал, але для теми цієї роботи доцільно прийняти саме двоканальну схему.

Основним елементом збору та обробки даних прийнято мікроконтролер ESP32. Він виконує опитування вимірювальних модулів, приймає сигнали з датчиків, розраховує первинні показники та передає інформацію через Wi-Fi. Для вимірювання струму можуть застосовуватися неінвазивні трансформатори струму SCT-013, які встановлюються навколо фазного провідника без його розриву. Такий спосіб є зручним для модернізації вже існуючого домашнього електрошита, оскільки не потребує значного втручання у силові з'єднання. Для більш точного

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергообліку в схемі доцільно передбачити спеціалізований вимірювальний модуль на базі ADE7753 або аналогічної мікросхеми, яка приймає сигнали струму й напруги та формує дані для обчислення активної енергії.

Вимірювання напруги виконується через окремий вузол масштабування та гальванічної розв'язки. Напруга побутової мережі 230 В не може подаватися безпосередньо на ESP32, оскільки його входи працюють у низьковольтному діапазоні. Тому в схемі передбачається або готовий модуль вимірювання змінної напруги з ізоляцією, або вимірювальний трансформатор напруги, який знижує напругу до безпечного рівня. Після масштабування сигнал подається на вимірювальний модуль або аналоговий вхід контролера. Для підвищення достовірності вимірювань необхідно виконати калібрування коефіцієнтів перетворення струму й напруги.

Таблиця 3.1 — Основні вузли принципової схеми системи моніторингу

Вузол схеми	Основні елементи	Призначення	Особливості реалізації
Ввід домашньої мережі	автоматичний вимикач, ПЗВ, лінія 230 В	живлення побутових навантажень	вимірювання виконується після захисної апаратури
Канал вимірювання споживання	SCT-013 або ADE7753	контроль струму й потужності будинку	встановлюється на фазний провідник вводу
Канал вимірювання генерації	SCT-013 або окремий вимірювальний модуль	контроль енергії від інвертора СЕС	дає змогу визначити добову генерацію
Вузол вимірювання напруги	трансформатор напруги або ізований модуль	отримання сигналу, пропорційного U	потрібна гальванічна розв'язка
Мікроконтролер	ESP32	обробка даних і передавання через Wi-Fi	підтримує MQTT або HTTP
Вузол живлення	AC/DC 230 В / 5 В, стабілізатор 3,3 В	живлення електроніки	обов'язкова ізоляція від мережі
Захисні елементи	запобіжник, варистор, корпус, ізоляція	захист електронної частини	зменшення ризику пошкодження при перенапрузі

Живлення електронної частини системи виконується від ізольованого AC/DC-модуля, який перетворює напругу 230 В у стабілізовану напругу 5 В. Для живлення ESP32 додатково використовується стабілізатор 3,3 В, якщо він не передбачений на платі контролера. Окрему увагу потрібно приділити тому, щоб низьковольтна частина не мала відкритого електричного зв'язку із силовою мережею. Усі сигнальні лінії повинні бути розраховані на безпечні рівні напруги, а елементи, пов'язані з мережею, мають бути ізольовані та розміщені в захисному корпусі.

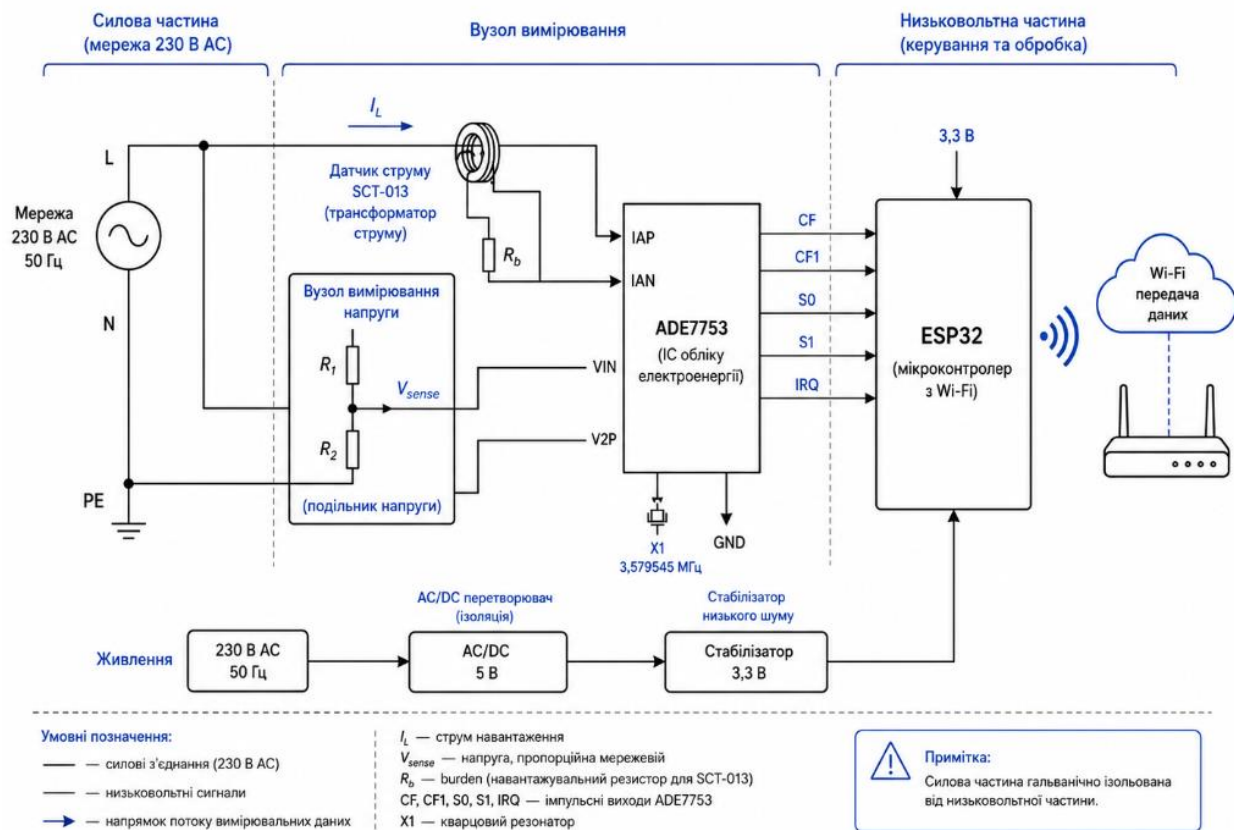


Рис. 3.1. — Принципова електрична схема вузла вимірювання

Сигнальна частина схеми рис. 3.1. працює таким чином: датчик струму формує сигнал, пропорційний струму навантаження, вузол вимірювання напруги формує сигнал, пропорційний напрузі мережі, після чого ці сигнали подаються на вимірювальний модуль або безпосередньо на входи ESP32. Контролер виконує обробку сигналів, визначає поточні значення енергетичних параметрів і передає їх на сервер. Для обміну з вимірювальною мікросхемою можуть використовуватися цифрові інтерфейси SPI або інші доступні інтерфейси залежно від конкретного

модуля. Якщо застосовуються аналогові датчики, ESP32 використовує АЦП і програмну обробку вибірки.

Таблиця 3.2 Призначення основних сигналів у схемі

Позначення сигналу	Джерело сигналу	Приймач сигналу	Призначення
U_meas	вузол вимірювання напруги	ESP32 або ADE7753	визначення діючого значення напруги
I_load	датчик струму навантаження	ESP32 або ADE7753	контроль струму споживання
I_gen	датчик струму генерації	ESP32 або ADE7753	контроль струму від інвертора CEC
P_load	розрахунковий параметр	сервер моніторингу	потужність споживання будинку
P_gen	розрахунковий параметр	сервер моніторингу	потужність генерації
W_load	розрахунковий параметр	база даних	накопичене споживання
W_gen	розрахунковий параметр	база даних	накопичена генерація
Wi-Fi data	ESP32	MQTT-брокер або HTTP-сервер	передавання результатів вимірювання

Для захисту вимірювального вузла в схемі передбачаються запобіжник у колі живлення, варистор для обмеження імпульсних перенапруг, фільтрувальні конденсатори на низьковольтному боці та розміщення плати в ізольованому корпусі. Силкові провідники не повинні контактувати з низьковольтними сигнальними лініями. Якщо датчик струму встановлюється в розподільчому щитку, він має охоплювати тільки один фазний провідник, оскільки охоплення одночасно фазного і нульового провідників призведе до взаємної компенсації магнітних полів і неправильного вимірювання.

Принципова схема системи має показувати підключення ввідної лінії, датчика струму споживання, датчика струму генерації, вузла вимірювання напруги, ESP32, джерела живлення, інтерфейсу передавання даних і захисних елементів. На кресленні доцільно виділити силову частину та низьковольтну електронну частину. Це спрощує аналіз роботи схеми та показує, що при розробці враховані вимоги

електробезпеки. У підсумку запропоноване схемотехнічне рішення дає змогу реалізувати систему моніторингу, яка не тільки вимірює параметри домашньої мережі, а й забезпечує подальше накопичення, аналіз та візуалізацію даних про споживання і генерацію.

3.2. Розробка програмного коду для збору та передачі даних.

Програмне забезпечення системи моніторингу призначене для керування роботою мікроконтролера ESP32, зчитування даних з вимірювальних каналів, розрахунку енергетичних показників, формування інформаційних повідомлень і передавання їх на сервер. Логіка програми повинна забезпечувати безперервний режим роботи, оскільки енергоспоживання та генерація в домашній мережі змінюються протягом доби. Основними вимогами до програмного коду є стабільність, регулярність вимірювань, можливість повторного підключення до Wi-Fi, контроль помилок датчиків і коректне накопичення електроенергії.

Програма для ESP32 складається з кількох функціональних блоків. Перший блок відповідає за ініціалізацію апаратної частини: налаштування входів, запуск інтерфейсів, встановлення коефіцієнтів калібрування, підключення до Wi-Fi та перевірку доступності сервера. Другий блок виконує зчитування первинних даних з датчиків струму й напруги або з регістрів спеціалізованого вимірювального модуля. Третій блок відповідає за математичну обробку: розрахунок діючих значень, активної потужності, повної потужності, коефіцієнта потужності та накопиченої енергії. Четвертий блок формує пакет даних у зручному форматі, наприклад JSON, і передає його через MQTT або HTTP. П'ятий блок контролює помилки та виконує повторне підключення у разі втрати зв'язку.

У початковій частині програми задаються постійні параметри системи: назва Wi-Fi-мережі, пароль, адреса MQTT-брокера або HTTP-сервера, інтервал вимірювання, інтервал передавання даних, коефіцієнти калібрування струму та напруги. Калібрувальні коефіцієнти потрібні для того, щоб перетворити значення

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АЦП або цифрові дані з вимірювального модуля у фізичні величини. Наприклад, після калібрування значення струму має подаватися в амперах, напруги — у вольтях, потужності — у ватах, а енергії — у кВт·год.

Таблиця 3.3 — Основні програмні змінні системи моніторингу

Змінна	Одиниця	Призначення	Приклад використання
voltage	В	діюче значення напруги	контроль якості напруги мережі
current_load	А	струм споживання будинку	розрахунок потужності навантаження
current_gen	А	струм генерації	визначення потужності сонячної генерації
power_load	Вт	активна потужність споживання	побудова графіка навантаження
power_gen	Вт	активна потужність генерації	побудова графіка генерації
energy_load	кВт·год	накопичена спожита енергія	добовий облік споживання
energy_gen	кВт·год	накопичена вироблена енергія	добовий облік генерації
balance	кВт·год	енергетичний баланс	оцінка надлишку або дефіциту
pf	відн. од.	коефіцієнт потужності	аналіз характеру навантаження
timestamp	с або дата/час	час вимірювання	прив'язка даних до графіка

Основний цикл програми виконується з фіксованою періодичністю. Спочатку контролер зчитує значення струму і напруги. Якщо використовується аналогове вимірювання, виконується накопичення вибірки за певний інтервал часу. Після цього обчислюються діючі значення напруги та струму, а також активна потужність. Для зменшення випадкових відхилень використовується усереднення за кількома вимірюваннями. Наприклад, система може виконувати внутрішнє вимірювання один раз на секунду, а передавати усереднені дані на сервер кожні 10 секунд. Такий підхід зменшує кількість повідомлень і водночас не спотворює загальну картину енергоспоживання.

Розрахунок накопиченої енергії виконується шляхом додавання енергії за кожний інтервал вимірювання. У математичному вигляді це записується так:

$$W = W + \frac{P \cdot \Delta t}{3600000}$$

де W — накопичена енергія, кВт·год; P — активна потужність, Вт; Δt — інтервал вимірювання, с; 3600000 — коефіцієнт переходу від Вт·с до кВт·год.

Для окремого обліку споживання та генерації програма має дві накопичувальні змінні:

$$W_{\text{спож}} = W_{\text{спож}} + \frac{P_{\text{спож}} \cdot \Delta t}{3600000}$$

$$W_{\text{ген}} = W_{\text{ген}} + \frac{P_{\text{ген}} \cdot \Delta t}{3600000}$$

Після цього визначається баланс:

$$W_{\text{бал}} = W_{\text{ген}} - W_{\text{спож}}$$

У таблицях і фрагментах коду цей розрахунок можна подавати просто:
`energy_load = energy_load + power_load * dt / 3600000; energy_gen = energy_gen + power_gen * dt / 3600000; balance = energy_gen - energy_load.` Такий запис легко переноситься в програмний код і не ускладнює подальшу перевірку.

Таблиця 3.4 — Логіка основних програмних функцій

Функція програми	Призначення	Вхідні дані	Результат
setup_wifi	підключення до Wi-Fi	SSID, пароль	доступ до мережі
read_sensors	зчитування датчиків	сигнали струму і напруги	первинні вимірювання
calculate_power	розрахунок потужності	U, I, вибірка u та i	P, S, pf
calculate_energy	накопичення енергії	P, dt	W_load, W_gen
make_payload	формування повідомлення	розраховані параметри	JSON або MQTT-повідомлення
send_data	передавання даних	пакет даних	запис на сервері
check_limits	контроль аварійних режимів	U, I, P	попередження про перевищення
reconnect	повторне підключення	стан Wi-Fi або MQTT	відновлення зв'язку

Формат повідомлення для передавання на сервер повинен бути зрозумілим і придатним для подальшої обробки. Доцільно використовувати структуру, у якій

кожен параметр має назву та числове значення. Наприклад, одне повідомлення може містити напругу мережі, струм споживання, активну потужність споживання, потужність генерації, накопичену енергію та баланс. У текстовому вигляді формат можна подати так: voltage = 229.6; current_load = 5.1; power_load = 1120; power_gen = 740; energy_load = 8.42; energy_gen = 4.13; balance = -4.29. Сервер приймає ці дані, зберігає їх у базі та використовує для побудови графіків.

У програмі також передбачається контроль граничних значень. Якщо напруга виходить за допустимі межі, система фіксує подію. Якщо струм або потужність перевищують заданий поріг, формується попередження. Якщо втрачається зв'язок із Wi-Fi або MQTT-брокером, контролер не зупиняє вимірювання, а намагається відновити підключення. Такий алгоритм важливий, оскільки система моніторингу повинна працювати автономно та не вимагати постійного втручання користувача.

У підсумку програмний код виконує роль зв'язуючої частини між вимірювальною схемою та програмною платформою моніторингу. Він забезпечує регулярне отримання даних, їх перетворення у фізичні величини, розрахунок енергії та передачу результатів на сервер. Правильна організація програмної логіки дозволяє отримати не окремі випадкові показники, а повну історію енергоспоживання та генерації, придатну для аналізу добового режиму роботи домашньої енергомережі.

3.3. Тестування системи та аналіз похибок вимірювання.

Тестування системи моніторингу виконується для перевірки правильності схемотехнічного рішення, працездатності програмного коду, стабільності передавання даних і достовірності виміряних енергетичних показників. Оскільки система призначена для контролю енергоспоживання та генерації в домашній мережі, основну увагу потрібно приділити порівнянню її показників з еталонним або повіреним лічильником електроенергії. Таке порівняння дозволяє визначити

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

абсолютну та відносну похибку, оцінити придатність системи для побутового моніторингу та встановити, чи можна використовувати її дані для аналізу економії.

Тестування доцільно проводити в кілька етапів. На першому етапі перевіряється робота окремих вузлів: живлення ESP32, стабільність Wi-Fi-з'єднання, правильність зчитування сигналів з датчиків струму та напруги, передавання даних на сервер. На другому етапі перевіряється вимірювання при відомих навантаженнях. Для цього можна використовувати електроприлади з приблизно відомою потужністю: лампу розжарювання, електрочайник, обігрівач, комп'ютерний блок живлення або інше побутове навантаження. На третьому етапі виконується порівняння накопиченої енергії за певний проміжок часу з показами еталонного лічильника. Саме цей етап є найважливішим для оцінки похибки.

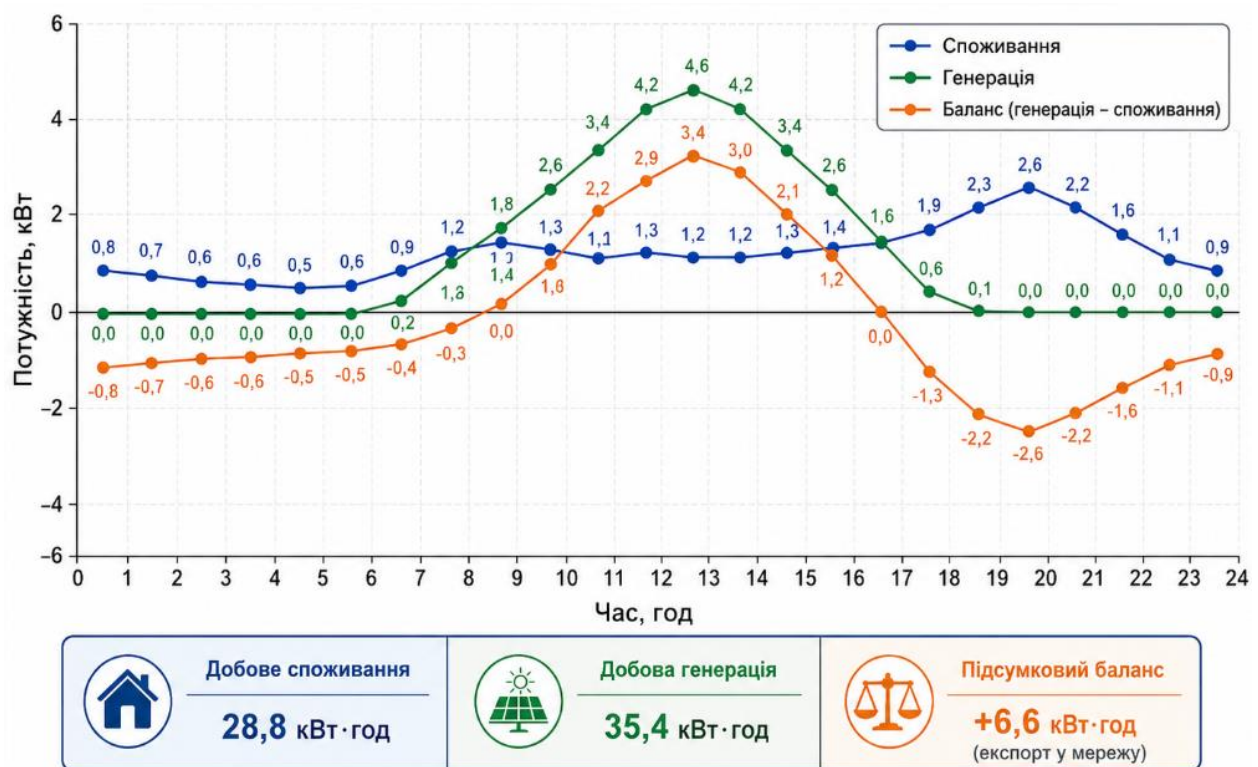


Рис. 3.2. – Графіки добового споживання та генерації

Абсолютна похибка вимірювання активної потужності визначається як різниця між показником розробленої системи та показником еталонного приладу:

$$\Delta P = P_{\text{сист}} - P_{\text{ет}}$$

де ΔP — абсолютна похибка, Вт; $P_{\text{сист}}$ — потужність, виміряна розробленою системою, Вт; $P_{\text{ет}}$ — потужність за еталонним приладом, Вт.

Відносна похибка визначається за формулою:

$$\delta P = \frac{|P_{\text{сист}} - P_{\text{ет}}|}{P_{\text{ет}}} \cdot 100\%$$

Для енергії застосовується аналогічний підхід:

$$\delta W = \frac{|W_{\text{сист}} - W_{\text{ет}}|}{W_{\text{ет}}} \cdot 100\%$$

де $W_{\text{сист}}$ — енергія, зафіксована системою; $W_{\text{ет}}$ — енергія за еталонним лічильником.

Таблиця 3.5 — Результати перевірки вимірювання активної потужності

Режим навантаження	Потужність за еталоном, Вт	Потужність системи, Вт	Абсолютна похибка, Вт	Відносна похибка, %
LED-освітлення	96	100	4	4,17
Комп'ютерне навантаження	245	253	8	3,27
Холодильник у роботі	420	432	12	2,86
Обігрівач 1 кВт	1010	1032	22	2,18
Електрочайник	1860	1905	45	2,42
Змішане навантаження	2350	2408	58	2,47

За наведеними результатами видно, що похибка системи є більшою при малих навантаженнях і зменшується при збільшенні потужності. Це пояснюється тим, що при малих струмах відносний вплив шумів, похибки АЦП, неточності датчика та калібрувального коефіцієнта є вищим. При більших навантаженнях сигнал датчика має більшу амплітуду, тому відносна похибка зменшується. Для побутового моніторингу така точність є прийнятною, оскільки система призначена не для комерційного обліку, а для аналізу режимів споживання, виявлення піків, фонових навантажень та оцінки добової генерації.

Окремо перевіряється правильність накопичення електроенергії. Для цього навантаження залишають увімкненим на визначений проміжок часу, після чого порівнюють енергію, розраховану системою, з показником еталонного лічильника. Приклад такого тестування наведено в таблиці.

Таблиця 3.6 — Порівняння накопиченої електроенергії за результатами тестування

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тривалість тесту	Навантаження	Енергія за еталоном, кВт·год	Енергія системи, кВт·год	Відносна похибка, %
1 год	обігрівач	1,01	1,03	1,98
2 год	змішане навантаження	3,84	3,94	2,60
4 год	холодильник і освітлення	1,92	1,98	3,13
8 год	фонове споживання будинку	2,48	2,57	3,63
24 год	добовий режим будинку	11,60	11,95	3,02

Під час тестування також перевіряється стабільність передавання даних. Для цього контролюється кількість повідомлень, які ESP32 передає на сервер, і кількість повідомлень, які фактично записані в базу даних. Якщо інтервал передавання становить 10 секунд, то за одну годину має бути передано 360 повідомлень. Допустима втрата окремих повідомлень не повинна істотно впливати на добову картину, якщо система продовжує накопичувати енергію локально та передає наступні актуальні значення. У разі повної втрати Wi-Fi-зв'язку контролер має виконувати повторне підключення.

Таблиця 3.7 — Перевірка стабільності передавання даних

Тривалість спостереження	Очікувана кількість повідомлень	Отримано повідомлень	Втрата повідомлень, %	Оцінка роботи
30 хв	180	179	0,56	стабільна робота
1 год	360	357	0,83	стабільна робота
4 год	1440	1426	0,97	допустимі втрати
24 год	8640	8588	0,60	придатна для добового моніторингу

Аналіз похибок показує, що основними джерелами відхилень є неточність датчика струму, похибка вимірювання напруги, фазовий зсув між сигналами струму й напруги, завади в аналогових колах, дискретність АЦП та помилки калібрування. Для зменшення похибки потрібно виконати калібрування на кількох рівнях навантаження, використовувати усереднення показників, забезпечити стабільне живлення електронної частини та правильно прокладати сигнальні провідники. Якщо використовується спеціалізована мікросхема обліку енергії, похибка зазвичай є меншою, оскільки обробка сигналів виконується апаратно.

У межах розробленої системи результати тестування можна вважати задовільними для задач побутового енергомоніторингу. Система дозволяє визначати добове споживання, виявляти пікові навантаження, оцінювати фонове споживання, порівнювати споживання з генерацією та формувати енергетичний баланс. Отримані похибки не дають підстав використовувати систему як комерційний лічильник, однак для аналітичних і керувальних задач у домашній мережі її точності достатньо.

3.4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Під час розробки, монтажу та експлуатації системи моніторингу енергоспоживання і генерації необхідно враховувати, що частина обладнання взаємодіє з побутовою електромережею напругою 230 В. Така напруга належить до небезпечних для людини, тому основною вимогою є недопущення прямого контакту користувача з відкритими струмопровідними частинами та забезпечення електричної ізоляції між силовими колами і низьковольтною електронікою. Система моніторингу не повинна погіршувати роботу існуючої захисної апаратури будинку, створювати додаткові нагріви провідників або ускладнювати доступ до автоматичних вимикачів і пристроїв захисного вимкнення.

Основними небезпечними факторами під час роботи з домашньою електромережею є ураження електричним струмом, виникнення короткого замикання, перегрівання провідників, пошкодження ізоляції, помилкове підключення вимірювального вузла, пожежа в електрощиті та вихід з ладу електронної частини внаслідок перенапруги. Додаткову небезпеку створює наявність власної генерації від сонячних панелей, оскільки частина мережі може залишатися під напругою навіть тоді, коли живлення від зовнішньої мережі вимкнене. Тому перед будь-якими монтажними діями потрібно передбачати повне знеструмлення відповідної ділянки, перевірку відсутності напруги та недопущення випадкового повторного ввімкнення.

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.8 — небезпечні та шкідливі фактори під час експлуатації системи

Фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Заходи зменшення ризику
Ураження електричним струмом	мережа 230 В, відкриті контакти	травмування людини	ізоляція, корпус, знеструмлення перед монтажем
Коротке замикання	неправильне підключення, пошкодження ізоляції	аварійне вимкнення, пожежа	автоматичний вимикач, запобіжник, контроль монтажу
Перегрівання провідників	перевищення допустимого струму	пошкодження ізоляції, займання	правильний вибір перерізу, контроль навантаження
Перенапруга	імпульсні завади, аварійні режими	пошкодження електроніки	варистор, запобіжник, захисні пристрої
Помилка вимірювання	неправильне встановлення датчика	некоректні показники системи	калібрування, перевірка схеми підключення
Наявність генерації	інвертор сонячної електростанції	зворотне живлення ділянки мережі	маркування, захисне відключення, контроль інвертора

Для забезпечення електробезпеки вимірювальна частина повинна бути конструктивно відокремлена від силової. Низьковольтні кола ESP32, датчиків і комунікацій не повинні мати відкритого доступу до мережевої напруги. Вузол живлення має бути ізольованим і розрахованим на роботу від мережі 230 В. Якщо використовується вимірювання напруги, необхідно застосовувати трансформатор напруги або готовий ізольований вимірювальний модуль.

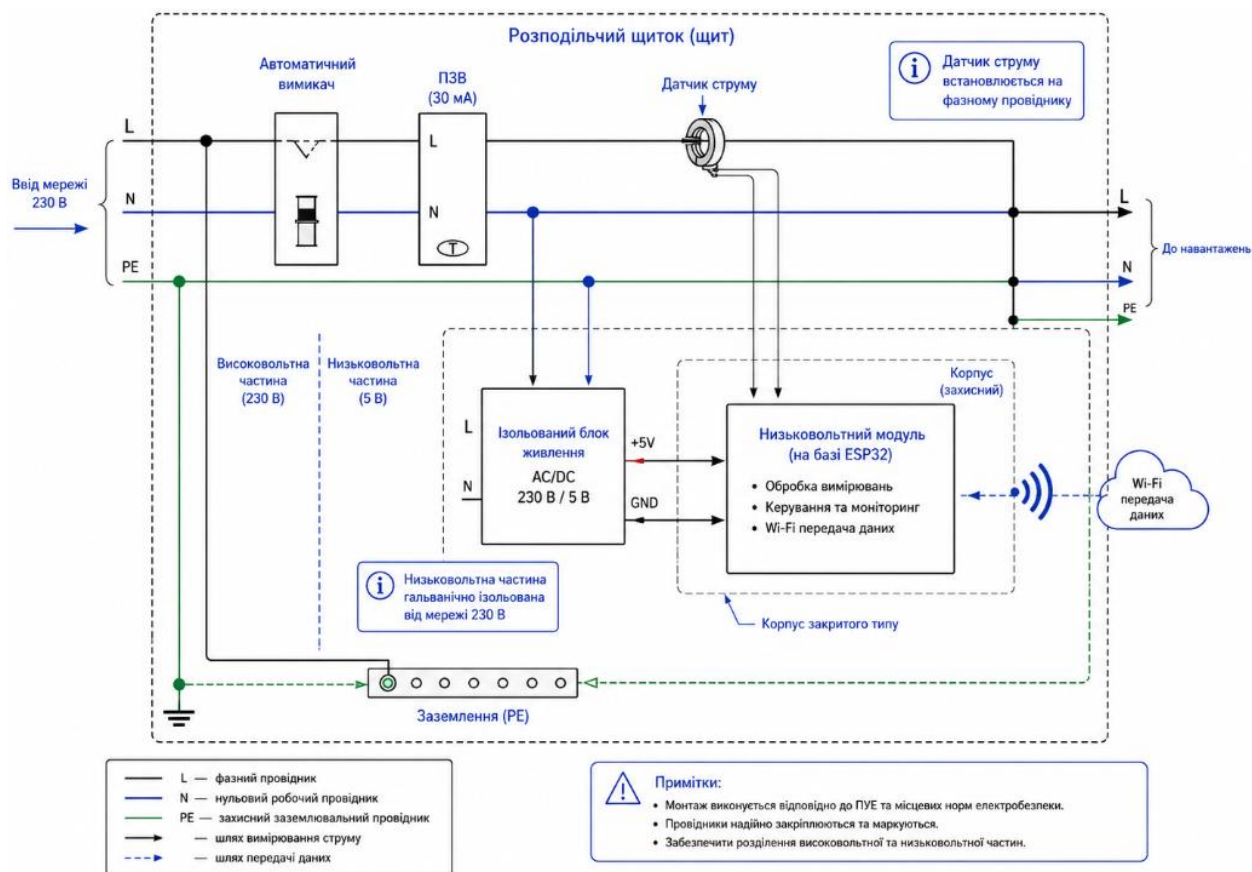


Рис. 3.3. — Схема безпечного монтажу системи в розподільчому щитку

Встановлення датчиків струму у розподільчому щитку повинно виконуватися так, щоб не порушувати механічну цілісність провідників і не погіршувати контактні з'єднання. Неінвазивний трансформатор струму встановлюється навколо одного фазного провідника. Його корпус має бути надійно закритий, а сигнальний провід потрібно прокладати окремо від силових кіл настільки, наскільки це дозволяє конструкція щитка. Усі з'єднання мають бути промарковані, щоб у разі обслуговування було зрозуміло, який датчик відповідає за споживання, а який — за генерацію.

Важливе значення має застосування захисної апаратури. У домашній мережі повинні використовуватися автоматичні вимикачі для захисту від перевантаження і короткого замикання, пристрої захисного вимкнення для зменшення ризику ураження струмом, а також захисне заземлення відкритих провідних частин електрообладнання. Система моніторингу не замінює ці пристрої, а лише доповнює їх інформаційною функцією. Якщо система фіксує перевищення потужності або

струму, вона може повідомити користувача, але аварійне відключення повинно виконуватися штатними засобами електрозахисту.

Таблиця 3.9 — Заходи електробезпеки при монтажі системи моніторингу

Захід	Призначення	Практичне значення
Знеструмлення ділянки перед монтажем	усунення напруги на робочому місці	зменшує ризик ураження струмом
Перевірка відсутності напруги	підтвердження безпечного стану кола	виключає помилкове припущення про вимкнення
Використання ізольованого живлення	відокремлення ESP32 від мережі 230 В	підвищує безпеку електронної частини
Застосування корпусу	захист від дотику до контактів	робить систему придатною для побутового використання
Наявність ПЗВ	захист при витокі струму	зменшує ризик небезпечного ураження
Заземлення обладнання	вирівнювання потенціалів	підвищує безпеку при пошкодженні ізоляції
Маркування провідників і датчиків	спрощення обслуговування	зменшує ймовірність помилки підключення

Для оцінки захисного заземлення в роботі можна використовувати загальну умову відповідності опору заземлювального пристрою нормативним вимогам:

$$R_z \leq R_{\text{доп}}$$

де R_z — фактичний опір заземлювального пристрою, Ом; $R_{\text{доп}}$ — допустиме значення опору заземлення, Ом.

Якщо виконується розрахункова перевірка, загальний опір групи заземлювачів можна подати у спрощеному вигляді:

$$R_{\text{заг}} = \frac{R_1}{n \cdot \eta}$$

де R_1 — опір одного заземлювача, Ом; n — кількість заземлювачів; η — коефіцієнт використання заземлювачів.

У разі виникнення пожежі або аварійного режиму першочерговим завданням є відключення живлення аварійної ділянки штатним комутаційним апаратом, виклик відповідальних служб і недопущення самостійного втручання в обладнання під напругою. Для гасіння електрообладнання не можна застосовувати воду до повного знеструмлення. Доцільно використовувати вуглекислотні або порошкові

вогнегасники, придатні для електроустановок. Якщо система моніторингу фіксує різке зростання потужності, перенапругу або аномальні значення струму, ці дані можуть бути використані як додаткова ознака аварійного режиму, але рішення про відключення має виконуватися через штатні захисні пристрої або оператором.

Таким чином, охорона праці при експлуатації системи моніторингу зводиться до правильного розділення силових і низьковольтних кіл, використання ізоляції, заземлення, ПЗВ, автоматичних вимикачів, захисного корпусу та безпечної організації монтажу. Дотримання цих вимог дозволяє зменшити ризики при роботі з домашньою енергомережею і забезпечити безпечне використання системи в реальних побутових умовах.

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У дипломній роботі розроблено систему моніторингу енергоспоживання та генерації в домашній енергомережі. Запропоноване рішення орієнтоване на контроль параметрів побутової мережі, облік власної генерації від сонячної електростанції, передавання даних на сервер і подальше відображення результатів у вигляді графіків та показників енергетичного балансу.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан розвитку інтелектуальних домашніх енергомереж. Встановлено, що традиційний побутовий лічильник не дає користувачу достатньої інформації для оперативного керування споживанням, оскільки він показує лише сумарну кількість використаної електроенергії. Для ефективного використання електроенергії потрібна система, яка дозволяє бачити поточну потужність, добове споживання, генерацію, фонове навантаження та періоди пікового споживання.

Під час огляду існуючих рішень розглянуто відкриті та комерційні платформи моніторингу, зокрема Home Assistant, OpenEnergyMonitor, Xiaomi Mi Home, Tuuya та Victron Energy. Визначено, що відкриті платформи є найбільш доцільними для дипломного проєкту, оскільки дозволяють інтегрувати власні датчики, використовувати MQTT або HTTP, зберігати історію вимірювань і будувати гнучкі панелі візуалізації. Комерційні екосистеми зручні для користувача, але мають обмеження щодо гнучкості, прив'язки до виробника та доступу до внутрішніх алгоритмів обробки даних.

У роботі розглянуто основні засоби вимірювання електричних параметрів у домашніх мережах. Для контролю струму проаналізовано неінвазивний трансформатор струму SCT-013, датчик на ефекті Хола ACS712 та спеціалізовану мікросхему енергообліку ADE7753. Встановлено, що для побутового моніторингу зручно використовувати SCT-013 через простоту встановлення без розриву силового провідника, а для точнішого обліку енергії доцільно застосовувати

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

спеціалізований вимірювальний модуль на базі ADE7753 або аналогічної мікросхеми.

У другому розділі розроблено математичне забезпечення системи. Наведено залежності для визначення миттєвої, активної, реактивної та повної потужності, коефіцієнта потужності, спожитої електроенергії, виробленої електроенергії та енергетичного балансу. Запропоновані формули можуть бути використані як у програмному коді мікроконтролера, так і на серверному рівні під час обробки історичних даних.

Обґрунтовано структуру системи моніторингу, яка складається з рівня датчиків, рівня збору даних, каналу передавання, сервера, бази даних і дашборду. Така архітектура є доцільною, оскільки забезпечує повний шлях обробки даних: від вимірювання струму й напруги до збереження історії та візуального аналізу споживання і генерації. Структурна схема системи показує послідовність передавання даних: датчики → ESP32 → Wi-Fi → MQTT/HTTP → сервер → база даних → дашборд.

Для реалізації системи як основний контролер обрано ESP32. Його використання обґрунтоване наявністю вбудованого Wi-Fi, достатньою продуктивністю, підтримкою потрібних інтерфейсів і придатністю для IoT-систем. Як канал передавання даних доцільно використовувати MQTT, оскільки він добре підходить для регулярного передавання коротких повідомлень від вимірювального пристрою до сервера. HTTP може застосовуватися як альтернативний варіант передавання даних.

Розроблено алгоритм роботи системи моніторингу. Він передбачає запуск контролера, ініціалізацію вимірювальних каналів, підключення до Wi-Fi, опитування датчиків, фільтрацію даних, розрахунок активної потужності, спожитої енергії, виробленої енергії та балансу, формування пакета даних і передавання інформації на сервер. Передбачено також повторне підключення у разі втрати зв'язку та контроль граничних значень параметрів.

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У третьому розділі запропоновано схемотехнічне рішення вузла вимірювання. Схема включає силову частину мережі 230 В, датчик струму SCT-013, вузол вимірювання напруги, мікросхему енергообліку ADE7753, мікроконтролер ESP32, ізольований блок живлення 230 В / 5 В, стабілізатор 3,3 В і бездротову передачу даних через Wi-Fi. Окремо враховано необхідність розділення силової та низьковольтної частин, що є важливим для електробезпеки.

Описано програмну реалізацію системи. Програмний код виконує зчитування вимірювальних параметрів, розрахунок потужності й енергії, формування пакета даних і передавання результатів на сервер. Для накопичення електроенергії використовується розрахунок за інтервалом часу, що дозволяє визначати добове споживання, добову генерацію та баланс між ними. Такий підхід забезпечує не лише відображення поточних параметрів, а й накопичення даних для подальшого аналізу.

Проведено тестування системи та аналіз похибок вимірювання. Порівняння з еталонним лічильником показало, що відносна похибка вимірювання потужності перебуває в межах, прийнятних для побутового моніторингу. Найбільші відхилення спостерігаються при малих навантаженнях, що пояснюється впливом шумів, похибкою датчика, неточністю калібрування та особливостями роботи аналогових входів. При середніх і великих навантаженнях точність системи є достатньою для аналізу режимів споживання.

Побудовані графіки добового споживання та генерації дають змогу оцінити зміну навантаження протягом доби, визначити періоди максимальної генерації та порівняти їх із графіком споживання. Це дозволяє виявити, коли власна генерація покриває потреби будинку, а коли необхідне живлення із зовнішньої мережі. На основі таких даних можна приймати практичні рішення щодо перенесення роботи потужних приладів на період максимальної генерації або зменшення фонових споживання.

У роботі розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Визначено основні небезпечні фактори під час монтажу й експлуатації

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи в розподільчому щитку: ураження електричним струмом, коротке замикання, перегрівання провідників, пошкодження ізоляції та зворотне живлення від джерела власної генерації. Запропоновано заходи безпеки: використання автоматичного вимикача, ПЗВ, захисного заземлення, ізольованого блока живлення, закритого корпусу та чіткого розділення високовольтної і низьковольтної частин.

Практичне значення розробленої системи полягає в можливості її використання для контролю домашнього енергоспоживання, аналізу ефективності роботи сонячної електростанції, виявлення пікових і фонових навантажень, а також оцінки добового енергетичного балансу. Система не замінює комерційний лічильник електроенергії, але є корисним інструментом для побутового моніторингу та прийняття рішень щодо підвищення енергоефективності.

Отже, поставлена мета роботи досягнута. Розроблено структурну схему, принципову електричну схему вузла вимірювання, алгоритм роботи, програмну логіку збору й передавання даних, а також виконано аналіз результатів тестування. Запропонована система є технічно обґрунтованою, масштабованою та придатною для подальшого вдосконалення, зокрема шляхом додавання автоматичного керування навантаженнями, контролю акумуляторної батареї та інтеграції з повноцінною системою розумного будинку.

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Співак В. М., Гуржий А. М., Нельга А. Т., Ітякін О. С. **Загальна** електротехніка і основи електроніки : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 266 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c6e9d089-502d-4358-b48f-61ac262f72fd/content> (дата звернення: 26.05.2026).
2. Хлистов В. М., Лавренова Д. Л. Основи метрології та електричних вимірювань. Лабораторні роботи : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 130 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48898/1/FEA_FM_labs_2022.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
3. Спінул Л. Ю., Бурик М. П., Лободзинський В. Ю., Білецький О. О. Теоретичні основи електротехніки. Частина 2 : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48889/1/Teoretychni_osnovy_elektrotekhni_ky_2.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
4. Огородник К. В., Книш Б. П. Мікропроцесорна техніка : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2018. 106 с. URL: https://ekt.elit.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/10/MPT_Navchalnyj_posibnyk_VNTU_Ohorodnik_2018.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
5. Ткачов В. В., Грулер Г., Нойбергер Н. та ін. Мікропроцесорна техніка : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2012. 188 с. URL: <https://elprivod.nmu.org.ua/files/microcontrollers/%D0%9D%D0%A2%D0%91452919.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).
6. Зінченко М. Д., Маначин І. О., Бурчак А. А. Мікропроцесорна техніка : навчальний посібник / за ред. М. О. Рибальченка. Дніпро : Український державний університет науки і технологій, 2025. 209 с. DOI: 10.15802/978-617-8314-26-2. URL: <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/19662> (дата звернення: 26.05.2026).
7. Касаткіна І. В., Бойко С. М., Жуков О. А. Інтелектуальні системи електропостачання : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2023. 151 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Kasatkina_2023_151.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
8. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода : навчальний посібник. Київ : Кондор, 2005. 408 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Zakladniy_2005_408.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
9. Денисюк С. П. Smart Grid системи та технології: стан розвитку в Україні. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 16 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/2f12a6fb-bc97-47bb-b856-48f7e8fb1f60/download> (дата звернення: 26.05.2026).
10. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Праховник А. В., Денисюк С. П. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні. Київ :

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

- Інститут електродинаміки НАН України, 2012. 16 с. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/bitstreams/5054c976-7fbc-425a-809c-e9d6b87c5d63/download> (дата звернення: 26.05.2026).
11. Матвійчук В. А. Інтелектуалізація електроенергетичних систем : навчально-методичні матеріали. Вінниця : ВНТУ, 2019. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/34611/89671.pdf?seq=> (дата звернення: 26.05.2026).
 12. Штіфзон О. Й. Система моніторингу стану навколишнього середовища на базі IoT пристрою. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/2_2023/part_1/23.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
 13. Правила улаштування електроустановок : затверджено наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476. Київ, 2017. URL: <https://sies.gov.ua/storage/app/sites/4/uploaded-files/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D0%B2%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE.%20%D0%9D%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%B7%D0%B8%20%D0%9C%D1%96%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE/Nakaz%20476%20vid%2021.07.2017/stranitsy-iz-pue-skan1.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).
 14. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 № 4. НПАОП 40.1-1.21-98. Київ, 1998. URL: <https://antifire.ua/dbn/10.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).
 15. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Міністерства палива та енергетики України від 25.07.2006 № 258. Київ, 2006. URL: <https://uis.zp.ua/wp-content/uploads/2018/12/%D0%9F%D0%A2%D0%95%D0%95%D0%A1.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).
 16. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2016. 20 с. URL: <https://nv-oneu.com.ua/downloads/dstu-8302-2015.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).
 17. Кабінет Міністрів України. Про внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 5 червня 2019 р. № 483 : постанова від 31.05.2024 № 632. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/632-2024-%D0%BF> (дата звернення: 26.05.2026).
 18. Міністерство енергетики України. Тарифи та ціни : офіційна інформація щодо фіксованих цін на електричну енергію для побутових споживачів. 2024. URL: <https://mev.gov.ua/storinka/taryfy-ta-tsiny> (дата звернення: 26.05.2026).
 19. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Фіксовані ціни на електричну енергію для побутових споживачів з 01.06.2024. Київ : НКРЕКП, 2024. URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/naselennya/cini-ta-tarifi->

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

[na-elektroenergiyu-dlya-pobutovih-spozvivachiv-naselennya-v-ukrayini/fiksovani-cini-na-elektrichnu-energiyu-dlya-pobutovih-spozvivachiv-z-01062024](#) (дата звернення: 26.05.2026).

20. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. Version 5.2. Shanghai : Espressif Systems, 2025. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
21. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. Version 5.7. Shanghai : Espressif Systems, 2026. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
22. Espressif Systems. ESP32-WROOM-32 Datasheet. Version 3.6. Shanghai : Espressif Systems, 2025. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
23. Analog Devices. ADE7753: Single-Phase Multifunction Metering IC with di/dt Sensor Interface : data sheet. Rev. C. Norwood : Analog Devices, 2009. 60 p. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ade7753.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).
24. Analog Devices. EVAL-ADE7753EB Evaluation Board Documentation. Norwood : Analog Devices, 2008. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/evaluation-documentation/ade7753eb_0.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
25. Allegro MicroSystems. ACS712: Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC : data sheet. Manchester : Allegro MicroSystems, 2023. URL: <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx> (дата звернення: 26.05.2026).
26. YHDC. SCT-013 Split Core Current Transformer : data sheet. Beijing : YHDC. URL: <https://docs.openenergymonitor.org/downloads/4d935d3e2f5e33ec6a8e9f5d5a7c14e6/SCT-013-000.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).
27. Banks A., Briggs E., Borgendale K., Gupta R. MQTT Version 5.0 : OASIS Standard. Burlington : OASIS Open, 2019. 137 p. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).
28. Fielding R., Nottingham M., Reschke J. HTTP Semantics : RFC 9110. Fremont : RFC Editor, 2022. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9110.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).
29. Home Assistant. Home Energy Management : official documentation. Open Home Foundation, 2026. URL: <https://www.home-assistant.io/docs/energy/> (дата звернення: 26.05.2026).
30. OpenEnergyMonitor. Guide to setting up a simple energy monitor using Open Energy Monitor. OpenEnergyMonitor Community, 2021. URL: <https://community.openenergymonitor.org/uploads/short-url/sVM9vBUwJRt2WTuncIrWKBtapp2.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).

					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ІІЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

31. OpenEnergyMonitor. Welcome to the OpenEnergyMonitor guide : official documentation. URL: <https://docs.openenergymonitor.org/> (дата звернення: 26.05.2026).
32. Victron Energy. Cerbo GX Manual. Almere : Victron Energy, 2025. URL: https://www.victronenergy.com/upload/documents/Cerbo_GX/140558-Ekrano_GX_Venus_GX_Cerbo_GX_Cerbo-S_GX_Manual-pdf-en.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
33. Victron Energy. Self-consumption & Energy Storage : brochure. Almere : Victron Energy, 2026. URL: https://www.victronenergy.com/upload/documents/Brochure-Self-Consumption-%26-Energy-Storage_EN_WEB_2026-02.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
34. Tuya Inc. Docs Center — Tuya Developer Platform : official documentation. Tuya Inc., 2026. URL: <https://developer.tuya.com/en/docs/iot> (дата звернення: 26.05.2026).
35. Tuya Inc. Description of Tuya Inc.'s IoT Service System Relevant to Security, Availability and Confidentiality : SOC 3 Report. Tuya Inc., 2022. 34 p. URL: <https://images.tuyacn.com/rms-static/069fdc10-a3a3-11ed-9d99-a5aaf2a10702-1675415610449.pdf?tyName=FY22+Tuya+SOC3+Report+SecurityAvailabilityConfidentiality.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).
36. Energy [Електронний ресурс] // Home Assistant. URL: <https://www.home-assistant.io/docs/energy/> (дата звернення: 04.06.2026).
37. Guidelines for energy monitoring [Електронний ресурс] // OpenEnergyMonitor Community. URL: <https://community.openenergymonitor.org/uploads/short-url/sVM9vBUwJRt2WTuncIrWKBtayp2.pdf> (дата звернення: 04.06.2026).
38. Smart Home [Електронний ресурс] // Xiaomi Global. URL: <https://www.mi.com/global/smart-home/> (дата звернення: 04.06.2026).
39. IoT Cloud Platform [Електронний ресурс] // Tuya Smart. URL: <https://www.tuya.com/> (дата звернення: 04.06.2026).
40. Cerbo GX, Ekrano GX, Venus GX Manual [Електронний ресурс] // Victron Energy. URL: https://www.victronenergy.com/upload/documents/Cerbo_GX/140558-Ekrano_GX_Venus_GX_Cerbo_GX_Cerbo-S_GX_Manual-pdf-en.pdf (дата звернення: 04.06.2026).
41. SCT-013-000 Non-invasive AC Current Sensor: Technical Datasheet [Електронний ресурс] // OpenEnergyMonitor. URL:

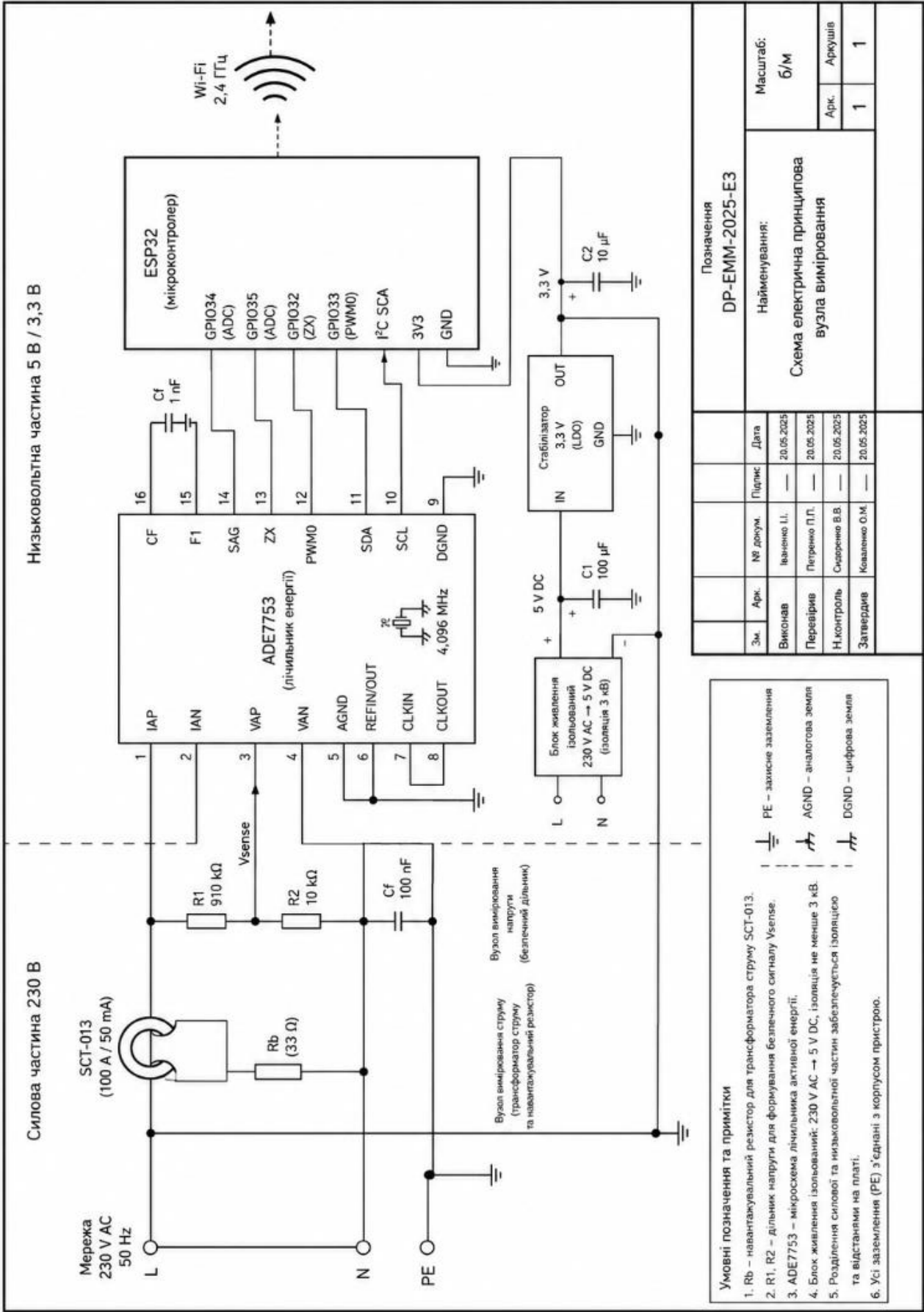
					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- https://docs.openenergymonitor.org/_downloads/4d935d3e2f5e33ec6a8e9f5d5a7c14e6/SCT-013-000.pdf (дата звернення: 04.06.2026).
42. ACS712 Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Voltage Isolation: Datasheet [Електронний ресурс] // Allegro Microsystems. URL: <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx> (дата звернення: 04.06.2026).
 43. MQTT Version 5.0 [Електронний ресурс] : OASIS Standard // OASIS Open. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.pdf> (дата звернення: 04.06.2026).
 44. HTTP Semantics [Електронний ресурс] : RFC 9110 // Internet Engineering Task Force (IETF). URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9110.pdf> (дата звернення: 04.06.2026).
 45. InfluxDB Documentation [Електронний ресурс] // InfluxData. URL: <https://docs.influxdata.com/influxdb/> (дата звернення: 04.06.2026).
 46. ESP32 Series Datasheet [Електронний ресурс] // Espressif Systems. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (дата звернення: 04.06.2026).
 47. ESP8266EX Datasheet [Електронний ресурс] // Espressif Systems. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0aesp8266ex_datasheet_en.pdf (дата звернення: 04.06.2026).
 48. Arduino Uno Rev3 [Електронний ресурс] // Arduino. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/> (дата звернення: 04.06.2026).
 49. The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format [Електронний ресурс] : RFC 8259 // Internet Engineering Task Force (IETF). URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8259.txt> (дата звернення: 04.06.2026).

50.

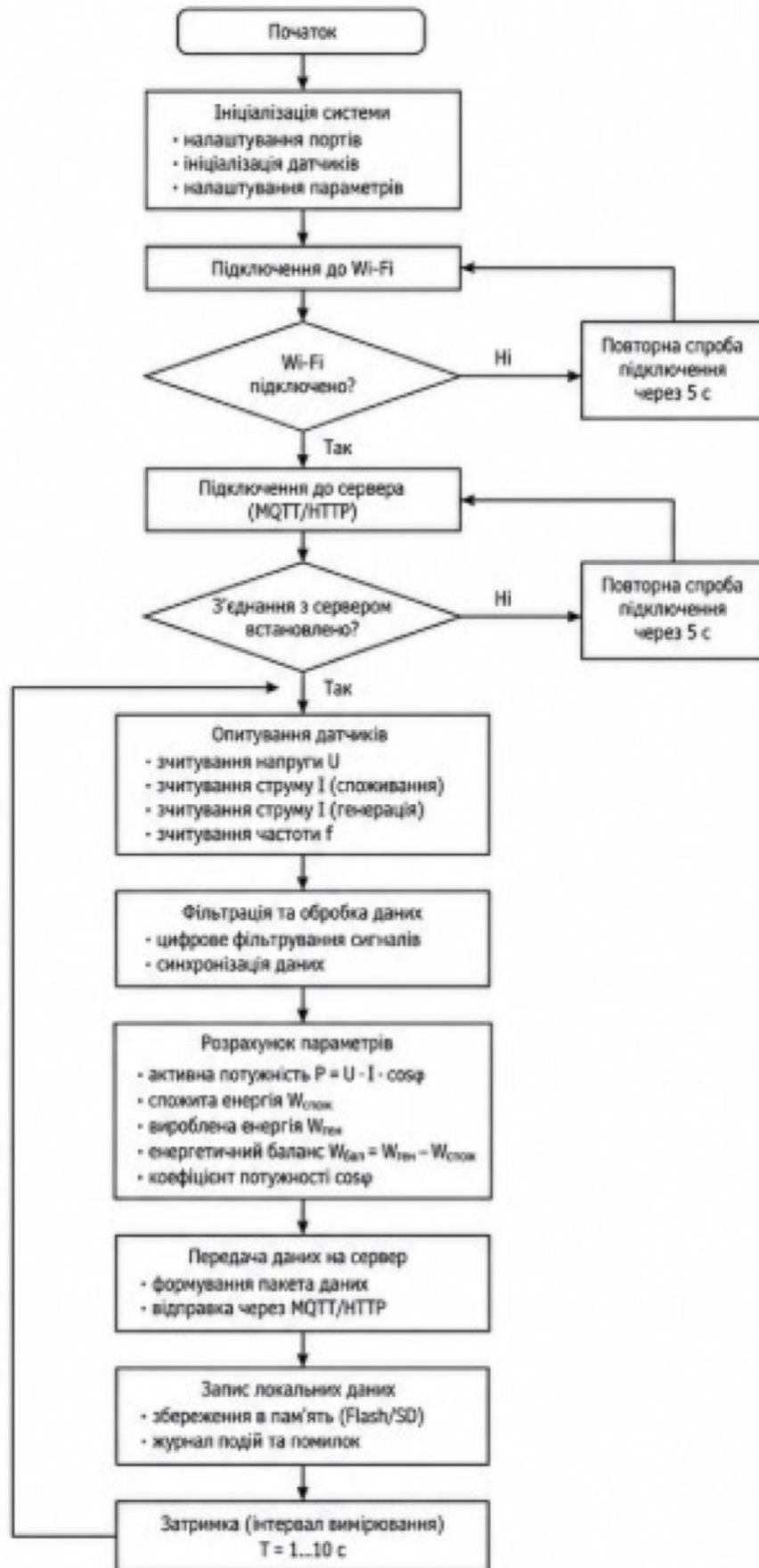
					02.03 – КР. 2708 "С" 2025.11.07 03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Додаток А



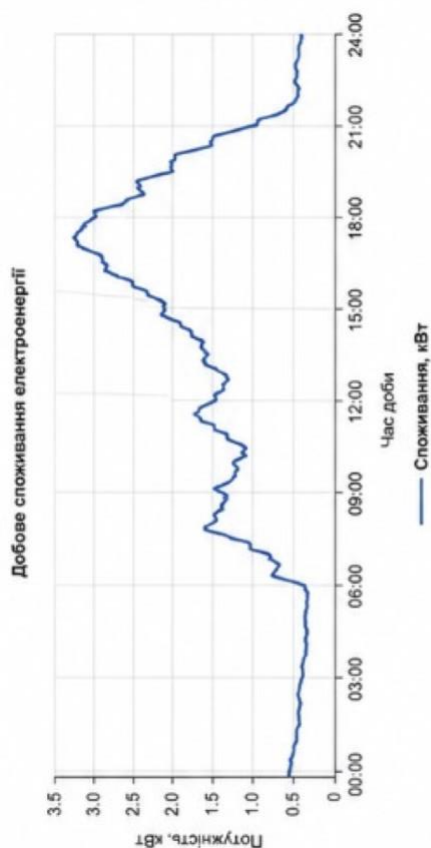
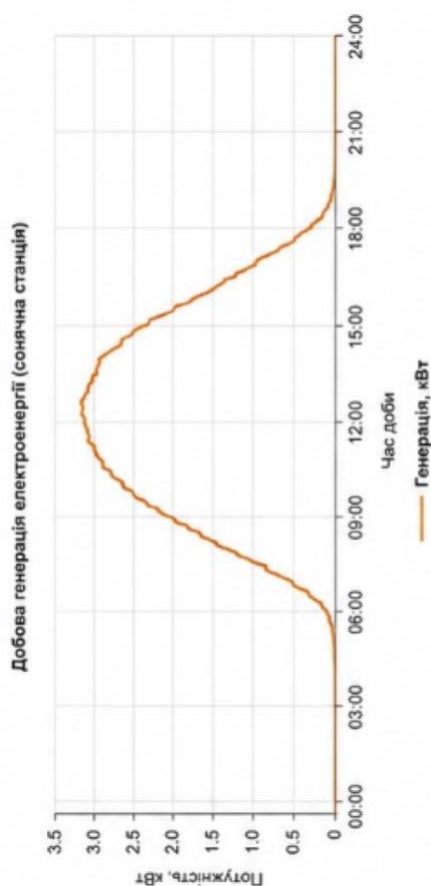
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Додаток Б

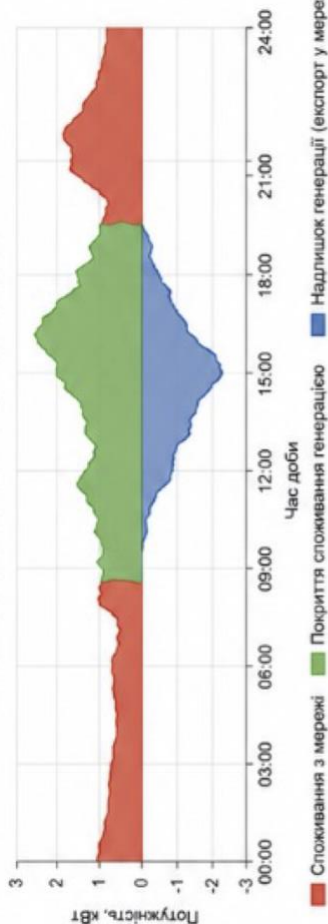


Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Додаток В



Енергетичний баланс (споживання, генерація, мережа)



Добові енергетичні показники

Показник	Енергія, кВт·год	Частка, %
Загальне споживання	28.45	100
Генерація (вироблено)	18.72	65.8
Самоспоживання (покрито генерацією)	14.56	51.2
Експорт у мережу	4.16	14.6
Імпорт з мережі	13.89	48.8
Баланс (експорт – импорт)	-9.73	–

Похибка вимірювання основних величин (довіра 95 %)

Параметр	Діапазон вимірювання	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %
Напруга, В	180...260	±1.2 В	±0.5
Струм, А	0...100	±0.12 А	±1.0
Активна потужність, кВт	0...22	±0.15 кВт	±1.0
Активна енергія, кВт·год	0...9999	±0.05 кВт·год	±0.5
Частота, Гц	45...65	±0.05 Гц	±0.1
Коефіцієнт потужності	0...1	±0.02	±2.0

Порівняння показників з еталонним лічильником (за 24 год)

Параметр	Еталонний лічильник	Система моніторингу	Похибка, %
Активна енергія импорт, кВт·год	13.96	13.89	-0.50
Активна енергія экспорт, кВт·год	4.12	4.16	+0.97
Загальне споживання, кВт·год	28.51	28.45	-0.21
Максимальна потужність, кВт	3.21	3.17	-1.25
Мінімальна потужність, кВт	0.34	0.33	-2.94
Середня потужність, кВт	1.19	1.18	-0.84