

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Федорко Олександр Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.9
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Дослідження системи моніторингу електричних параметрів гібридної СЕС
приватного домогосподарства на базі модуля ESP32
(назва роботи)

Енергетичний менеджмент
(назва освітньої програми)

141– Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

О. В. Федорко
(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Ващишак Ірина Романівна , к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень магістр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

“ _____ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Федорку Олександр Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження системи моніторингу електричних параметрів гібридної СЕС приватного домогосподарства на базі модуля ESP32

керівник роботи Ващишак Ірина Романівна, канд. техн. наук, доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти від “14” листопада 2025 року №719/7

2. Строк подання студентом роботи 12 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Гібридний інвертор (3–5 кВт), акумуляторна батарея 24/48 В, мікроконтролер ESP32, модуль узгодження інтерфейсів MAX3232, сенсор PZEM-004T, серверне ПЗ Home Assistant та протоколи обміну даними Modbus/MQTT.

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

1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ МОНІТОРИНГУ ХАРАКТЕРИСТИК ІНВЕРТОРА В ПРИВАТНИХ ДОМОГОСПОДАРСТВ

2. ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМИ МОДУЛЯ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ЗЧИТУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГІБРИДНОГО ІНВЕРТОРА

3. ОБґРУНТУВАННЯ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ГІБРИДНОЇ СЕС

4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Нормоконтролер</i>	<i>доцент Яворський А.В.</i>		

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ МОНІТОРИНГУ ХАРАКТЕРИСТИК ІНВЕРТОРА В ПРИВАТНИХ ДОМОГОСПОДАРСТВ</i>	<i>01.11.2025-17.11.2025</i>	
2	<i>ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМИ МОДУЛЯ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ЗЧИТУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГІБРИДНОГО ІНВЕРТОРА</i>	<i>17.11.2025-28.11.2025</i>	
3	<i>ОБґРУНТУВАННЯ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ГІБРИДНОЇ СЕС</i>	<i>28.11.2025-8.12.2025</i>	
4	<i>ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ</i>	<i>08.12.2025-14.12.2025</i>	
5	<i>Висновки</i>	<i>15.12.2025-15.12.2025</i>	
6	<i>Оформлення презентаційного матеріалу та пояснювальної записки</i>	<i>16.12.2025-16.12.2025</i>	

Студент

(підпис)*Федорко О.В.*_____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)*Ващишак І.Р.*_____
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота містить 82 сторінок, 19 рисунки, 4 таблиць, 62 джерел.

Дослідження системи моніторингу електричних параметрів гібридної СЕС приватного домогосподарства на базі модуля ESP32

Об'єктом дослідження є процеси моніторингу та керування потоками енергії в гібридних сонячних електростанціях (СЕС) приватних домогосподарств.

Мета роботи полягає у підвищенні енергетичної та економічної ефективності функціонування гібридної СЕС шляхом дослідження та вдосконалення системи моніторингу електричних параметрів на базі мікроконтролера ESP32.

У процесі виконання поставленої мети:

Проведено аналіз сучасних методів та засобів моніторингу відновлюваних джерел енергії, обґрунтовано переваги використання IoT-рішень на базі ESP32 порівняно зі штатними хмарними сервісами.

Досліджено апаратно-програмну архітектуру модуля моніторингу, зокрема методи узгодження логічних рівнів інтерфейсів (RS-232/TTL) та особливості високоточного вимірювання параметрів мережі змінного струму.

Вдосконалено алгоритми адаптивного енергоменеджменту, які, на відміну від стандартних, базуються на безпосередньому зчитуванні характеристик інвертора та врахуванні зовнішніх факторів (прогноз погоди, графіки відключень).

Виконано моделювання енергетичного балансу домогосподарства та перевірку ефективності запропонованих сценаріїв керування («Економія», «Безпека»).

Проведено оцінку економічної доцільності впровадження досліджуваної системи, розраховано показники окупності та чистий дисконтований дохід (NPV).

На основі виконаної роботи запропоновано дворівневу архітектуру системи моніторингу, що забезпечує глибоку інтеграцію інвертора в екосистему «розумного будинку», дозволяє мінімізувати експлуатаційні витрати за рахунок нічного тарифу та гарантувати енергонезалежність під час аварійних відключень.

Ключові слова: ГІБРИДНА СЕС, СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ, МІКРОКОНТРОЛЕР ESP32, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IoT), ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, «РОЗУМНИЙ ДІМ», АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, ІНВЕРТОР.

ABSTRACT

The master's thesis consists of 81 pages, 18 figures, 4 tables, and 60 sources.

Research of the electrical parameter monitoring system for a private household hybrid solar power plant based on the ESP32 module.

The object of the research is the processes of monitoring and controlling energy flows in hybrid solar power plants (SPP) of private households.

The aim of the work is to increase the energy and economic efficiency of the hybrid SPP functioning by researching and improving the electrical parameter monitoring system based on the ESP32 microcontroller.

In the process of achieving the set goal:

An analysis of modern methods and tools for monitoring renewable energy sources was conducted; the advantages of using ESP32-based IoT solutions compared to standard cloud services were substantiated.

The hardware-software architecture of the monitoring module was investigated, particularly the methods of matching interface logic levels (RS-232/TTL) and the features of high-precision measurement of AC network parameters.

Adaptive energy management algorithms were improved, which, unlike standard ones, are based on direct reading of inverter characteristics and consideration of external factors (weather forecast, outage schedules).

Modeling of the household energy balance and verification of the effectiveness of the proposed control scenarios ("Economy", "Security") were performed.

An assessment of the economic feasibility of implementing the researched system was conducted; payback indicators and Net Present Value (NPV) were calculated.

Based on the completed work, a two-level monitoring system architecture is proposed, which ensures deep integration of the inverter into the "Smart Home" ecosystem, allows minimizing operating costs through the night tariff, and guarantees energy independence during emergency power outages.

Keywords: HYBRID SPP, MONITORING SYSTEM, ESP32 MICROCONTROLLER, INTERNET OF THINGS (IoT), ENERGY EFFICIENCY, SMART HOME, ADAPTIVE CONTROL, INVERTER.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ МОНІТОРИНГУ ХАРАКТЕРИСТИК ІНВЕРТОРА В ПРИВАТНИХ ДОМОГОСПОДАРСТВ.....	11
1.1 Стан сонячних електростанцій в приватних домогосподарствах	11
1.2 Будова, принцип роботи і особливості застосування фотоелектричних станцій.....	16
1.3 Аналіз особливостей застосування інтеграції систем збору даних та диспетчеризації у системах СЕС	23
1.4 Аналіз основних типів інверторів.....	26
1.5 Вибір і обґрунтування напряму дослідження.....	32
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМИ МОДУЛЯ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ЗЧИТУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГІБРИДНОГО ІНВЕРТОРА.....	33
2.1 Основні задачі та принципи побудови систем моніторингу електричних параметрів гібридної сонячної електростанції (СЕС).....	33
2.2 Огляд та вибір апаратної платформи та компонентів	34
2.3 Огляд архітектури та аналіз схемотехнічних рішень системи моніторингу	41
2.4 Реалізація серверної частини системи керування на базі платформи Home Assistant	45
Висновки до розділу 2	48
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ АДАПТИВНОГО ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ	50
3.1. Математична модель енергетичного балансу домогосподарства ...	50
3.2. Розробка алгоритму адаптивного керування системою	55
3.3. Графічна інтерпретація та візуалізація алгоритмів керування.....	61
3.4. Інформаційне забезпечення системи енергомоніторингу.....	63
3.5. Інтерфейс оператора та візуалізація енергетичних процесів.....	64
Висновки до розділу 3	67
РОЗДІЛ 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ.....	69

4.1. Розрахунок капітальних вкладень (CAPEX).....	69
4.2. Розрахунок річного економічного ефекту.....	70
4.3. Оцінка ефекту від заміщення резервного живлення (Value of Lost Load).....	71
Висновки до розділу 4.....	73
ВИСНОВКИ	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76

ВСТУП

Актуальність теми.

Сучасний стан енергетичної системи України, що характеризується нестабільністю постачання електроенергії та зростанням тарифів, зумовлює масовий перехід приватних домогосподарств на відновлювані джерела енергії. Гібридні сонячні електростанції (СЕС) стали ключовим інструментом забезпечення енергонезалежності. Однак ефективність роботи таких станцій часто обмежується можливостями штатних засобів моніторингу, які, зазвичай, пропонують лише базовий функціонал, мають затримки в передачі даних через хмарні сервіси та не дозволяють реалізувати гнучкі сценарії керування в умовах частих відключень зовнішньої мережі.

У цьому контексті виникає нагальна потреба у дослідженні доступних та ефективних систем локального моніторингу, здатних отримувати телеметрію в реальному часі. Використання мікроконтролерів, зокрема платформи ESP32, відкриває широкі можливості для інтеграції промислових інверторів у системи «розумного будинку». Дослідження методів безпосереднього зчитування електричних характеристик інвертора та їх подальшого аналізу є необхідною умовою для впровадження адаптивних алгоритмів енергоменеджменту, що дозволяє значно підвищити економічну ефективність та надійність електропостачання.

Мета і задачі дослідження.

Мета роботи полягає у вирішенні науково-практичної задачі в галузі енергетичного менеджменту – підвищенні енергетичної та економічної ефективності функціонування гібридної СЕС шляхом дослідження та вдосконалення системи моніторингу електричних параметрів на базі мікроконтролера ESP32.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Виконати аналіз структурних, принципівих схеми модуля моніторингу для зчитування характеристик гібридного інвертора.

2. Провести математичне моделювання та розробку алгоритмів адаптивного енергоменеджменту.

3. Провести техніко-економічне обґрунтування проекту

Об'єкт дослідження – процеси моніторингу та керування потоками енергії в гібридних сонячних електростанціях приватних домогосподарств.

Предмет дослідження – система моніторингу електричних параметрів та зчитування характеристик гібридного інвертора, побудована на базі модуля ESP32.

Методи дослідження. У роботі використано:

методи системного аналізу – для дослідження структури системи моніторингу та взаємодії її компонентів;

схемотехнічний аналіз – для обґрунтування вибору драйверів інтерфейсів (RS-232/TTL) та вимірювальних сенсорів;

математичне моделювання – для опису енергетичного балансу та оптимізації витрат;

експериментальні методи – для перевірки коректності зчитування даних інвертора мікроконтролером ESP32.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вдосконаленні алгоритму адаптивного енергоменеджменту, який, на відміну від штатних рішень, базується на безпосередньому зчитуванні регістрів інвертора модулем ESP32 та враховує прогноз погоди і графіки відключень, що дозволяє реалізувати проактивне керування зарядом акумуляторних батарей.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження дозволяють реалізувати бюджетну (низький поріг входу), але високоефективну систему моніторингу, яка інтегрується в популярні платформи домашньої автоматизації (Home Assistant). Запропоноване рішення забезпечує окупність протягом 1 року за рахунок оптимізації споживання

електроенергії (використання нічного тарифу) та підвищує надійність електропостачання під час аварійних відключень.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ МОНІТОРИНГУ ХАРАКТЕРИСТИК ІНВЕРТОРА В ПРИВАТНИХ ДОМОГОСПОДАРСТВ

1.1 Стан сонячних електростанцій в приватних домогосподарствах

Станом на початок II кварталу 2020 року вже більше 24 тис. українських родин встановили у себе вдома сонячні електростанції, забезпечуючи свої потреби в електроенергії та заощаджуючи на рахунках.

Загальна потужність сонячних електростанцій у приватних домогосподарствах сягає вже 618 МВт, а сумарний обсяг вкладених ними коштів складає близько 495 млн євро.

Важливо, що в 2020 році ціна «зеленого» тарифу планово знизилася, однак динаміка зростання кількості СЕС залишається позитивною. Так сталося завдяки паралельному зниженню цін на обладнання та досить активну конкуренцію на ринку України.

У I кварталі 2020 р. приватні домогосподарства встановили більше 2100 СЕС загальною потужністю 65 МВт. Це у 1,5 рази більше, ніж за аналогічний період 2019 року. Зараз великої популярності мають станції максимальної потужності – 30 кВт. Однак варто зазначити, що значна частина з них будується у декілька черг.

Кількість охочих використовувати «чисту» електроенергію зростає, зокрема через можливість економити на рахунках за електроенергію, не залежати від енергопостачальника, бути більш енергоефективними та користуватися енергозберігаючою електротехнікою.

ТОП-5 областей за кількістю СЕС приватних домогосподарств:

Дніпропетровська – 3200;

Тернопільська – більше 2200;

Київська – майже 2000;

Івано-Франківська – більше 1800;

Закарпатська – більше 1400.

Динаміку збільшення кількості та потужності приватних СЕС зображено на рисунках 1.1, 1.2 [1].

Загалом, понад 24 тис. СЕС у домогосподарствах дозволяють генерувати більше 700 млн кВт*год екологічно чистої електроенергії у рік. Для порівняння такого обсягу енергії достатньо для близько 230 тис. родин.

Окрім того, що такі станції це мала розподілена генерація, яка дозволяє використовувати енергію в точці виробництва, а також спонукає власників до раціонального та економного енергоспоживання та використання енергоефективної техніки.



Рисунок 1.1 – Динаміка збільшення кількості та потужності приватних СЕС

[1]

Рік	I кв	II кв	III кв	IV кв	РАЗОМ
2014	-	-	-	21 (0,1 МВт)	21 (0,1 МВт)
2015	19 (0,2 МВт)	54 (0,5 МВт)	38 (0,4 МВт)	112 (1 МВт)	223 (2,1 МВт)
2016	54 (1,2 МВт)	132 (1,7 МВт)	195 (2,8 МВт)	484 (8,8 МВт)	865 (14,5 МВт)
2017	200 (3,4 МВт)	326 (4,8 МВт)	688 (12,2 МВт)	687 (13,9 МВт)	1 901 (34,3 МВт)
2018	543 (12 МВт)	1107 (26 МВт)	1371 (32 МВт)	1419 (36 МВт)	4 440 (106 МВт)
2019	1393 (33 МВт)	3045 (86 МВт)	2902 (69 МВт)	7178 (208 МВт)	14 518 (396 МВт)
2020	2171 (65 МВт)	-	-	-	2171 (65 МВт)
Разом					24 139 (618 МВт)

Рисунок 1.2 – Динаміка розвитку СЕСд [1]

Економічна стабільність держави нерозривно пов'язана з надійністю її енергосистеми, яка до початку повномасштабного вторгнення була однією з найпотужніших у Європі із загальною встановленою потужністю близько 37 ГВт. З 24 лютого 2022 року енергетична інфраструктура перебуває під постійними атаками, внаслідок яких було пошкоджено понад половину об'єктів, а система пережила свій перший блекаут. Збитки, за оцінками міжнародних організацій, ще торік перевищували 10 мільярдів доларів, а до весни 2024 року ситуація лише погіршилася, що безпосередньо впливає і на сонячну генерацію як частину загальної енергомережі.

Кількість СЕС в регіонах зображена на рисунку 1.3.

Внаслідок бойових дій пошкоджень або руйнувань зазнали не менше 13% промислових сонячних електростанцій, а значна частина потужностей, що становить понад 950 МВт або 62 промислові об'єкти, опинилася на тимчасово окупованих територіях. На підконтрольній Україні території продовжують функціонувати близько 5900 МВт промислових та понад 1200 МВт домашніх сонячних станцій, хоча вони також страждають від воєнних дій. Попри це, кількість просьюмерів — домогосподарств, що виробляють

енергію для власних потреб та продають надлишок, — продовжує зростати: якщо на початку 2022 року їх було близько 45 тисяч, то зараз ця цифра перевищила 54 тисячі. У 2022 році було введено в експлуатацію 220 МВт нових потужностей, а у 2023 році — ще 115 МВт, причому нові об'єкти все частіше оснащуються системами накопичення енергії.

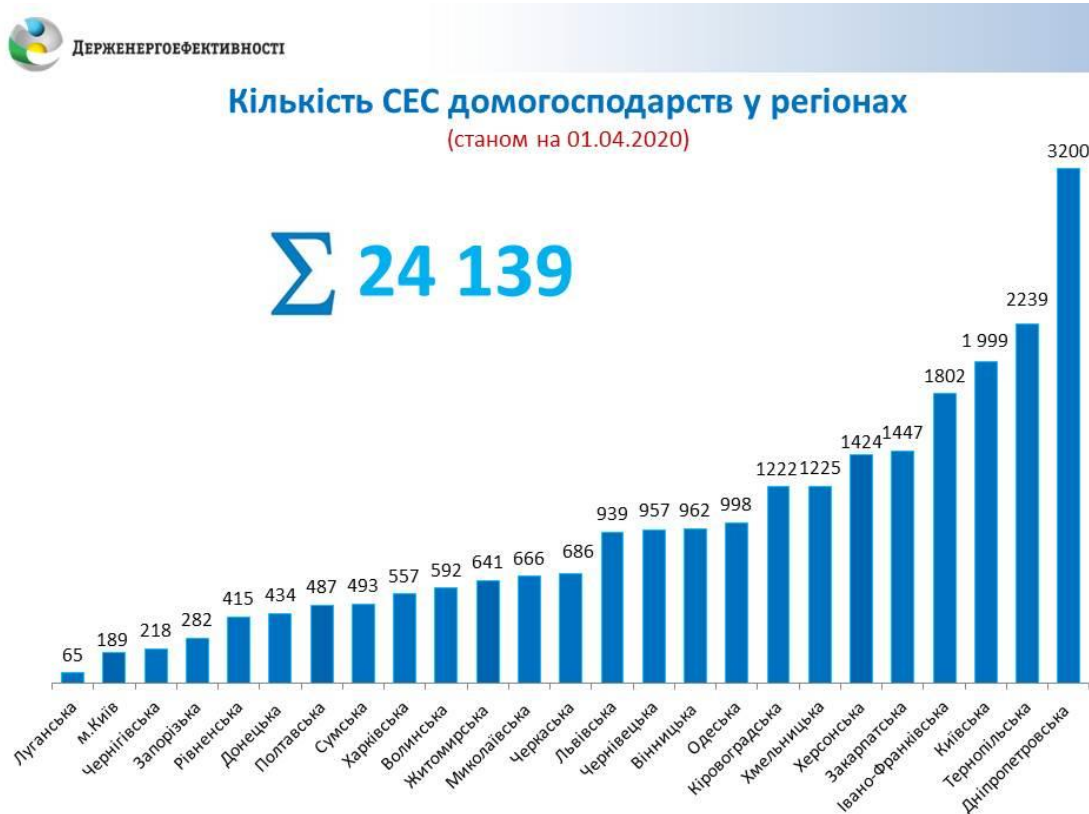


Рисунок 1.3 – Кількість СЕС домогосподарств у регіонах [2]

Суттєвою перепорою для розвитку залишається криза неплатежів, зокрема заборгованість ДП «Гарантований покупець» перед виробниками «зеленої» енергії, спричинена воєнними факторами та неринковим ціноутворенням для населення. Рівень розрахунків у 2022 році становив лише 55,5%, однак у 2023 році зріс до 77,3%, що дозволило зменшити загальний борг з понад 35 мільярдів гривень восени минулого року до 23 мільярдів на початку поточного. Розвиток галузі також ускладнюється бюрократичними процедурами приєднання до мереж та пошкодженням обладнання, проте

довгострокові перспективи залишаються масштабними: згідно з Енергетичною стратегією, до 2050 року планується встановити 94 ГВт сонячних потужностей, а загальний потенціал відновлюваної енергетики в Україні оцінюється науковцями у 874 ГВт. Інформація про рівень розрахунків за зеленим тарифом наведена на рисунку 1.4 [3].

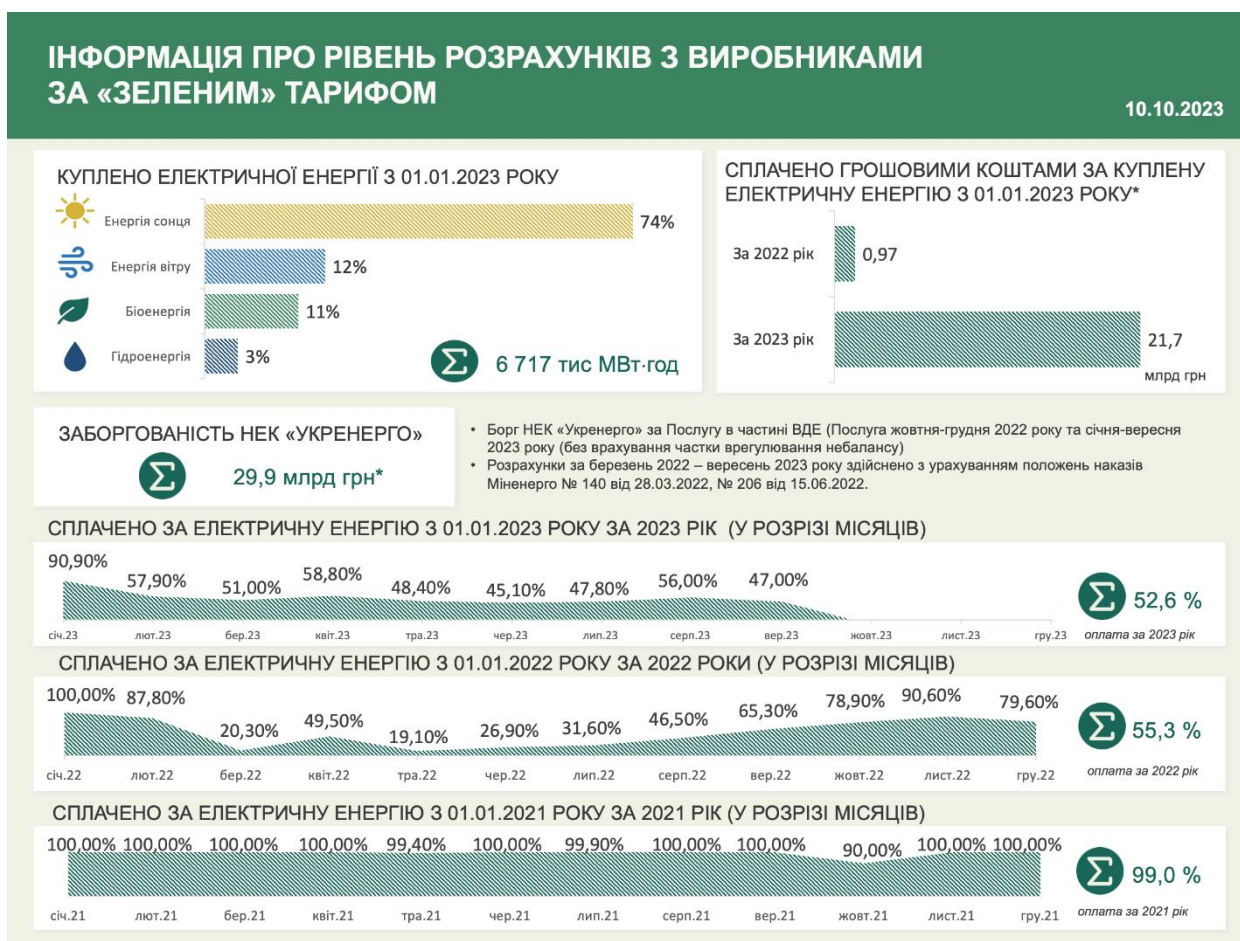


Рисунок 1.4 – Розрахунки за зеленим тарифом [4]

Найближчі цілі:

- Розвиток розподіленої генерації на основі у тому числі «зеленої» генерації. Це має забезпечити стійкість, надійність та, в перспективі, екологічність енергетики України.
- Повна інтеграція української енергетики в енергосистему ЄС.
- Впровадження гарантій походження електричної енергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії. Це потужний інструмент для розвитку

«зеленої» енергетики та економіки України загалом. Вкрай важливим є визнання українських гарантій походження в країнах ЄС. У разі остаточного впровадження цього механізму продукція, вироблена в Україні та експортована до ЄС, не буде додатково оподатковуватися «карбованим» податком на території Євросоюзу.

Досягненню поставлених цілей допоможуть:

- Повний перехід на ринкові механізми формування цін на електроенергію на всіх сегментах ринку.
- Синхронізація українського законодавства у галузі енергетики з відповідними нормативними актами ЄС.
- Впровадження державним Регулятором (НКРЕКП) більш дієвих стимулів для операторів системи розподілу (колишніх Обленерго) з метою зацікавлення останніх збільшувати можливості для приєднання сонячних електростанцій до електромереж.
- Зменшення монополізму операторів системи розподілу.
- Звільнення окупованих територій. Впровадження механізму фінансової компенсації за нанесені збитки та страхування сонячних електростанцій від пошкодження під час воєнних дій.

Сонячна енергетика, як і вся країна, перебуває під значним тиском через воєнну агресію. Однак завдяки внутрішнім резервам, євроінтеграційним процесам та міжнародній підтримці українська сонячна енергетика зможе розкрити весь наявний потенціал. Енергосистема України витримує потрясіння війни і має стати «антикрихкою».

1.2 Будова, принцип роботи і особливості застосування фотоелектричних станцій

Принцип роботи СЕС та особливості будови [5].

Сучасна сонячна електростанція (СЕС) являє собою не просто сукупність генеруючих потужностей, а складний електротехнічний комплекс,

призначений для перетворення електромагнітного випромінювання Сонця в електричну енергію промислової частоти. У контексті енергетичної стратегії України та світових тенденцій декарбонізації, СЕС розглядаються як системи, що забезпечують не лише генерацію, а й енергетичну автономність, стабілізацію мережі та резервування живлення.

Найбільшу актуальність у приватному та малому комерційному сегментах набувають гібридні фотоелектричні системи з інтегрованими модулями накопичення енергії (Energy Storage Systems – ESS). Це зумовлено необхідністю забезпечення безперебійного живлення споживачів в умовах нестабільності зовнішньої електромережі.

Склад сучасних СЕС

СЕС – це повноцінна енергосистема, яку проєктують під конкретне завдання: резерв, компенсація витрат, стабілізація споживання. Найбільший попит зараз мають гібридні рішення з накопиченням енергії – як у приватному, так і в малому комерційному сегменті. Це пов'язано з тим, що користувачі орієнтуються не лише на генерацію, а й на автономність. Звідси й основний запит: система резервного живлення для будинку, офісу, яка працює і з мережею, і без неї. Тому до складу станції дедалі частіше входять не лише фотомодулі та інвертор, а й акумулятори, автоматика та моніторинг.

Типовий склад електростанції:

- фотомодулі (сонячні панелі);
- інвертор;
- акумуляторна система.

Також потрібна система кріплень – набір конструкцій для установки сонячної електростанції на дах чи землю, залежно від того, де використовують сонячні батареї та виконують монтаж. Враховується кут нахилу, орієнтація, вітрове навантаження та особливості покрівлі. Питання як правильно встановити сонячні панелі на практиці вирішується на етапі проєктування: розраховується оптимальний кут, відстань між рядами, можливе затінення.

Постачаються кабелі, вимикачі, автоматика, системи захисту від перенапруг, а також інтерфейси моніторингу. Усі компоненти мають бути підібрані під напругу, навантаження і стандарти безпеки.

Принцип дії: усередині кожної сонячної панелі є сонячні елементи – тонкі пластинки, зроблені здебільшого з кремнію. Кремній – це напівпровідник, тобто матеріал, що у певних умовах може проводити електрику. Коли на поверхню такого елемента падає світло, фотони (частинки світла) передають свою енергію електронам у кристалі кремнію. Це можна уявити, як ніби фотон підштовхує електрон, і той "вискакує" зі свого місця та починає рухатися. А якщо рухаються заряджені частинки – виникає електричний струм.

Цей струм – постійний. Тобто він тече в одному напрямку, на відміну від змінного струму, який змінює напрямок 50 разів на секунду (саме такий подається з електромережі в наші розетки).

Через це однієї лише панелі недостатньо – адже побутова техніка не працює на постійному струмі. Щоб зробити його придатним для звичного використання, в систему додають інвертор, що перетворює постійний струм на змінний.

Зазначимо: принцип роботи сонячної батареї однаковий, незалежно від типу та виробника. Але тип панелі впливає на продуктивність: наприклад, монокристалічні модулі працюють ефективніше за хмарної погоди й займають менше площі, тоді як полікристалічні – дешевші, але менш чутливі до слабкого освітлення. А ще, від якості кремнію, типу скла, точності збірки й системи контролю, яку інтегрує виробник, залежить деградація, температурна стабільність і термін служби.

Види фотомодулів і їх продуктивність [6]

Основний матеріал, з якого виробляють сонячні панелі, – кремній. Від виду кремнію безпосередньо залежить ефективність роботи всієї станції. Це пов'язано з тим, що спочатку кремній містить різні домішки. Для

виготовлення сонячних батарей його розплавляють і очищають від домішок. Чим однорідніше склад кремнію, тим вища продуктивність сонячних батарей.

Кремній для сонячних батарей застосовується двох видів:

– полікристалічний – бюджетний і містить домішки. З природного матеріалу отримують пари кремнію, які охолоджують, осаджують і перетворюють в пластини для сонячних батарей;

– монокристалічний – більш якісний і «чистий». Його вирощують з природно цілісного кристала, який, в свою чергу, отримують з розпавленої маси кремнію. Це моноліт, який розрізається на найтонші пластини для майбутніх батарей. Сам процес складний і дорогий, тому такі панелі дорожчі за полікристалічні.

Крім цього, монокристалічні панелі сильніше нагріваються, гірше ловлять розсіяне світло, але краще поглинають пряме. Їх ККД на квадратний метр вище, тому такі панелі дозволяють заощадити простір при більш високому рівні продуктивності станції.

Довговічність сонячних електростанцій

В результаті численних випробувань в різних умовах було доведено, що термін експлуатації станцій перевищує 30 років. Частина СЕС, які працюють з 80-х років в Європі і США, показала зниження ефективності приблизно на 10% після 25-го року роботи. Більшість же з них не піддалася з тих пір абсолютно ніякій деградації. Варто також враховувати, що кожне нове покоління панелей набагато прогресивніше за попереднє, так що їх потенційна стійкість до довготривалої експлуатації тільки зростає. Сонячні батареї, що випускаються сьогодні, працюють ще стабільніше, ефективніше і надійніше аніж ті, що вимірювалися в дослідженнях. Саме тому в технічній документації часто згадуються термін дії та довговічність сонячної батареї, які прив'язують до умов монтажу й сервісу.

В середньому можна впевнено стверджувати, що полікристалічні панелі мають термін служби від 20 років, монокристалічні – від 30 років.

Типи СЕС для приватної оселі [7].

Мережеві

Це найдоступніший за вартістю варіант, оскільки до комплексу не входять акумуляторні батареї. А їхня ціна, разом із системою безперебійного живлення – це 40-50% від загальної вартості. Мережева домашня СЕС лише частково покриває витрати на електроенергію з центральної мережі електропостачання. Тобто коли світить сонце, фотоелектричні модулі виробляють достатньо енергії для ваших потреб. А надмірні кіловати можна продавати до центральної мережі за умовами програми «Зеленого тарифу». Вночі й протягом похмурих днів струм у будинок надходить із РЕМ. Мережеві електростанції для приватного будинку рекомендують встановлювати у тих локаціях, де немає скарг щодо регіональної енергетичної компанії. В іншому випадку після збоїв та аварійних знеструмлень є ризик залишитися без світла. Схема мережевої СЕС зображена на рисунку 1.5.

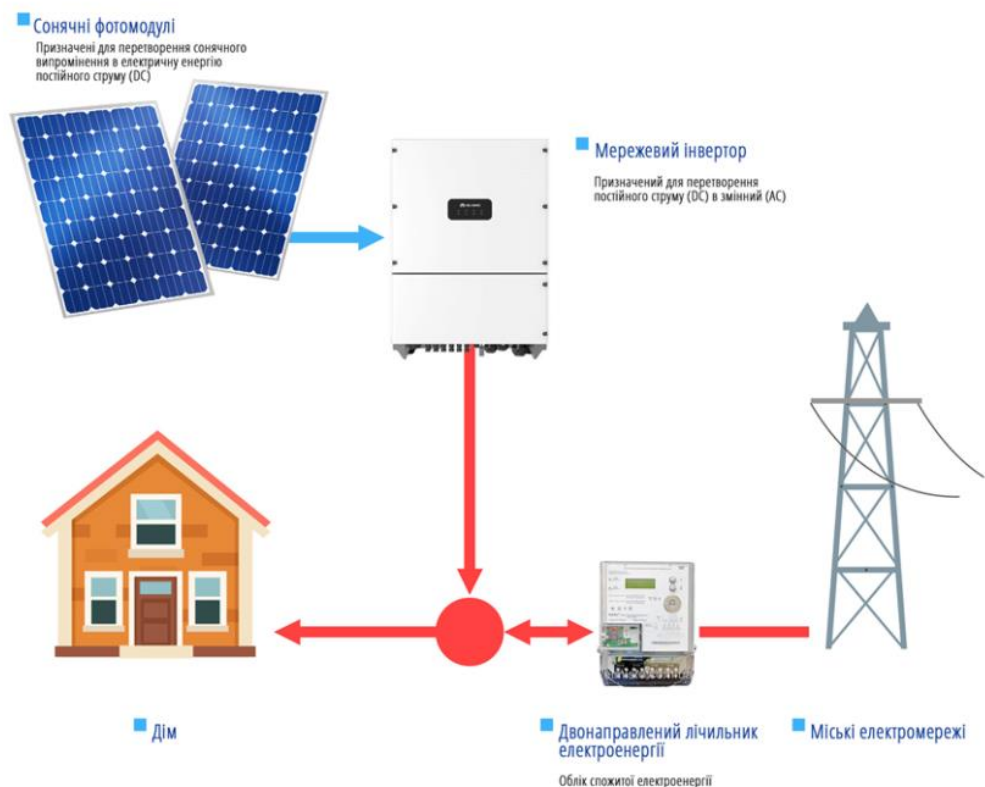


Рисунок 1.5 – Схема мережевої СЕС [11]

Автономні

Якщо будинок розташований далеко від ЛЕП, а тягнути до нього окрему лінію дорого, автономна (акумуляторна) домашня електростанція стає чудовою інвестицією у власну енергонезалежність (рисунок 1.6).

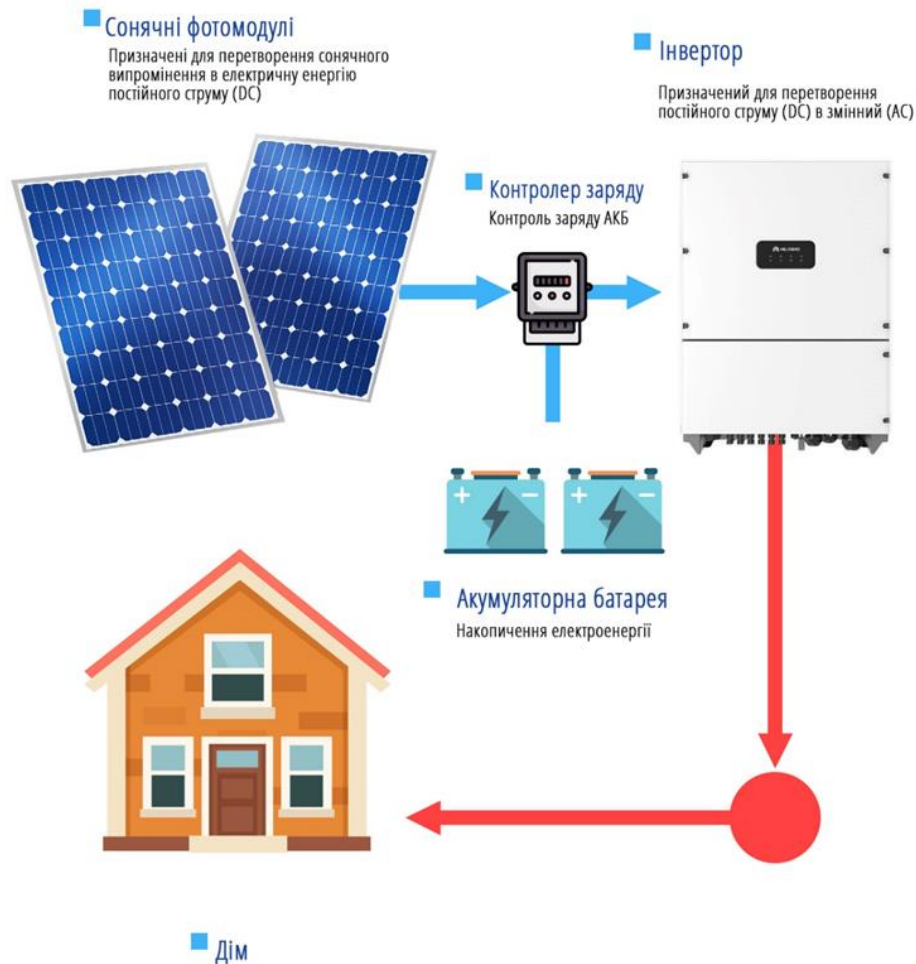


Рисунок 1.6 – Схема автономної СЕС [11]

Комплект такої СЕС складається з наступних компонентів:

- каскад із сонячних батарей, які встановлюють на даху, стінах чи наземних конструкціях з нахилом у бік півдня, що гарантує ефективну роботу фотомодулів протягом усього світлового дня;
- автономний інвертор – пристрій для перетворення постійного струму на змінний, а також для розподілу електроенергії між побутовими приладами, що працюють на конкретну мить;

- елементи конструкції та кріплення – профілі та рамки з нержавіючої сталі або алюмінію, системи кріплення від провідних виробників;
- акумулятори високої ємності, розраховані на кілька тисяч циклів зарядження й розрядження, гарантія на них становить до семи років;
- система безперебійного живлення – забезпечує миттєве перемикання між сонячними панелями та АКБ.

Звичайно ж, автономна система сонячного електропостачання будинку складається й з інших необхідних компонентів: контролери, автоматичний захист, заземлення, комутаційна апаратура, кабель і проводи, різноманітні конектори та роз'єми.

Гібридна СЕС наведена на рисунку 1.7.

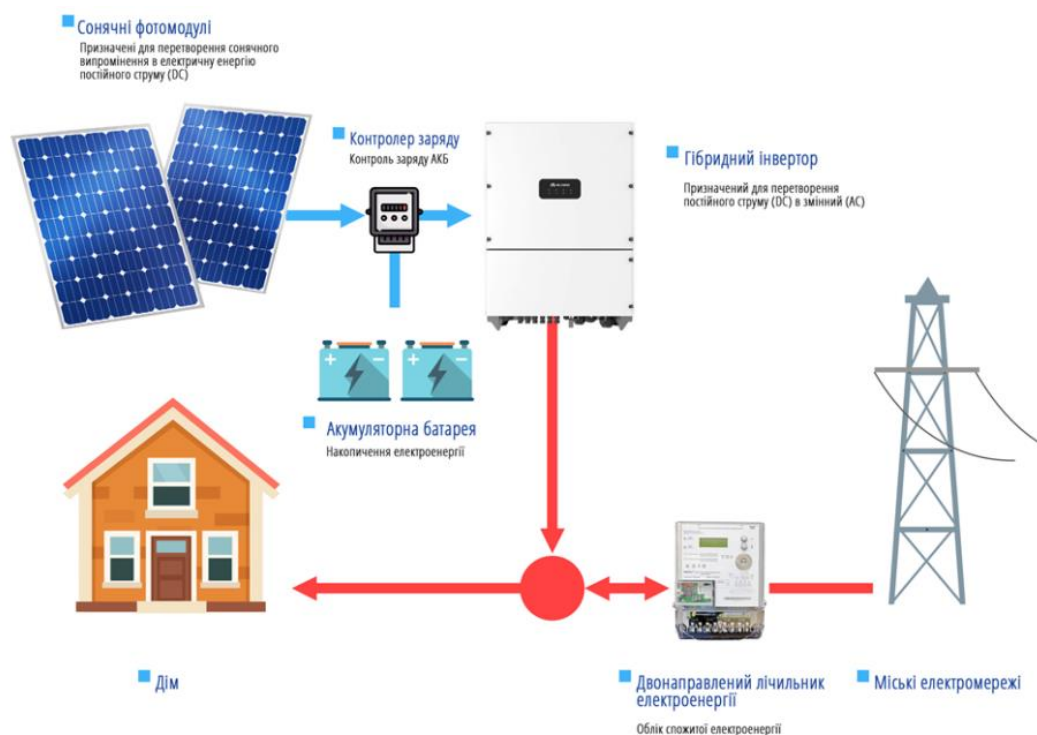


Рисунок 1.7 – Схема гібридної СЕС

Домашня СЕС із підключенням до зовнішньої мережі електропостачання, а також з АКБ для накопичення виробленої електроенергії називається гібридною. Тут обов'язково до комплекту входять двонаправний

лічильник і гібридний інвертор. Функція останнього полягає у перетворенні АС в DC, а також у зворотному випрямленні електричного струму для заряджання АКБ. Його налаштування можна змінювати в залежності від того, звідки надходить електроенергія.

Далі розглянемо СЕС під власне споживання.

Це та сама домашня СЕС мережевого типу, але без під'єднання до «Зеленого тарифу». Smart Meter або «розумний лічильник» у моменти, коли сонячні батареї виробляють надмірні обсяги енергії, перемикається у режим 0% Feed in Mode (нуль експорту). Тобто вироблена вашою електростанцією енергія не потрапляє у загальну мережу. Коли ж сонця недостатньо, ви отримуєте струм із РЕМ.

Такий тип СЕС має сенс встановлювати для кількох цілей. Насамперед для резервного живлення, якщо місцеві енергомережі не здатні забезпечити потрібні вам вхідні потужності. Або для економії електроенергії та забезпечення безперебійної роботи різного обладнання, наприклад свердловинних насосів і системи автономного водопостачання [7,11].

1.3 Аналіз особливостей застосування інтеграції систем збору даних та диспетчеризації у системах СЕС

Ефективна експлуатація СЕС неможлива без інтеграції систем збору даних та диспетчеризації. Системи моніторингу забезпечують безперервний контроль параметрів генерації, діагностику несправностей та аналіз енергетичного балансу. Ключовим вузлом такої системи є реєстратор даних (Data Logger) – пристрій, що забезпечує шлюзування інформаційних потоків між інвертором та зовнішніми серверами обробки даних.

Аналіз ринку показує тенденцію до створення екосистем, де реєстратор даних виконує також функцію контролера енергосистеми.

Компанія Huawei Technologies (Smart PV Solutions) використовує інтелектуальні модулі серії Smart Dongle. Модель SDongleA-05 підтримує каскадне підключення до 10 інверторів через інтерфейс RS485, виконуючи роль майстер-пристрою для єдиної точки входу в хмарну систему FusionSolar. Пристрій підтримує як WLAN, так і Fast Ethernet (FE) підключення, що забезпечує гнучкість інтеграції. Huawei Smart Dongle-Wi-Fi – це інтелектуальний комунікаційний модуль, призначений для підключення інверторів Huawei до системи моніторингу через Wi-Fi. Завдяки цьому пристрою можна в реальному часі контролювати роботу сонячної електростанції з будь-якого місця, використовуючи смартфон або комп'ютер.

Призначення:

Модуль Huawei Smart Dongle-Wi-Fi ідеально підходить для власників сонячних електростанцій, які хочуть контролювати виробіток, стан обладнання та ефективність системи у зручному мобільному або онлайн-інтерфейсі. Підключення модуля зображено на рисунку 1.8 [12].

Основні переваги:

Підключення через Wi-Fi — швидкий зв'язок без додаткових кабелів.

Підтримка до 10 інверторів в одній системі моніторингу.

Доступ через Huawei FusionSolar App або вебінтерфейс.

Високий рівень захисту IP65 — пристрій придатний для зовнішнього встановлення.

Сумісність із інверторами серії Huawei SUN2000 (однофазні та трифазні моделі).

Plug-and-play — проста установка без додаткового налаштування.

Характеристики:

Модель: SDongleA-05

Інтерфейс підключення: USB

Інтерфейс Ethernet: 10/100M Ethernet

Макс. кількість підтримуваних пристроїв: 10

Макс. кількість інверторів: 10

Режим роботи: STA

Розміри (Ш × В × Г): 146 × 48 × 33 мм

Вага: 90 г

Ступінь захисту: IP65

Споживана потужність (типова): 2.5 Вт

Алгоритм шифрування: WPA/WPA2 (TKIP/CCMP/AES)

Підтримувані стандарти Wi-Fi: 802.11b/g/n (2.412–2.484 ГГц)

Діапазон робочих температур: від -30°C до $+65^{\circ}\text{C}$

Діапазон температур зберігання: від -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$

Діапазон вологості: 5–95% RH

Макс. робоча висота: 4 000 м

Світловий індикатор: LED

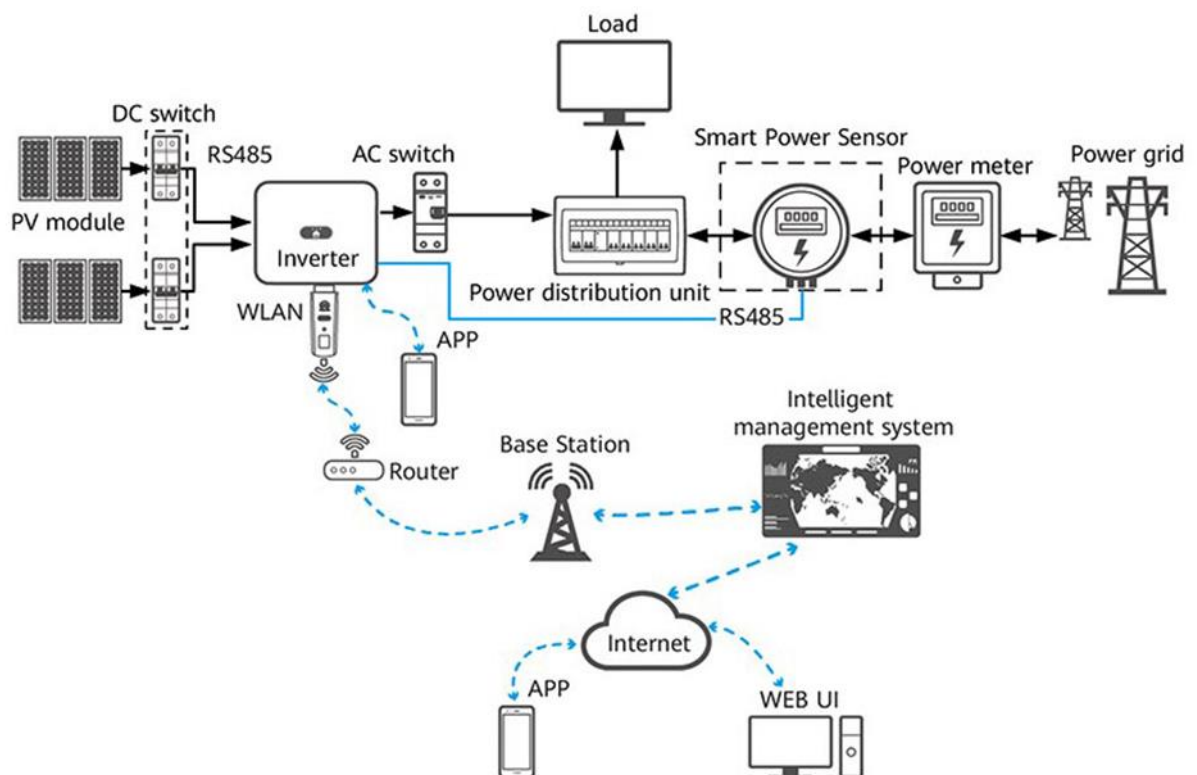


Рисунок 1.8 – Підключення модуля [12]

Victron Energy (Cerbo GX) зображено на рисунку 1.9. Для автономних та гібридних систем преміум-класу використовується комунікаційний центр Cerbo GX. На відміну від пасивних логерів, це одноплатний комп'ютер, який збирає телеметрію не лише з інверторів, але й з MPPT-контролерів, шунтів акумуляторних батарей (BMS) та датчиків рівня рідин. Система інтегрується з порталом VRM (Victron Remote Management) і підтримує протоколи MQTT та Modbus-TCP для інтеграції в системи «Розумний будинок» [13].



Рисунок 1.9 – Victron Energy (Cerbo GX)[13]

1.4 Аналіз основних типів інверторів

Інвертори – це пристрої, які перетворюють постійний струм (ПС) на змінний струм (ЗС) і навпаки. Ця здатність робить їх незамінними в багатьох

сферах нашого життя, адже вони дозволяють використовувати електроенергію з різних джерел та для різних пристроїв.

Основні функції інверторів:

Збереження енергії: Інвертори дають змогу зберігати електроенергію у батареях або інших сховищах для використання у майбутньому. Це робить їх особливо корисними в регіонах з нестабільним електропостачанням.

Робота з альтернативними джерелами енергії: Завдяки інверторам енергія, що генерується сонячними панелями, вітровими турбінами, гідроелектростанціями та іншими альтернативними джерелами, може бути перетворена на електроенергію, придатну для використання в побуті.

Стабілізація напруги: Інвертори стабілізують напругу в електромережі, забезпечуючи стійке живлення для чутливих електронних пристроїв.

Живлення електроніки змінного струму: Багато пристроїв та гаджетів працюють на змінному струмі. Інвертори дозволяють їм функціонувати від джерел постійного струму.

Важливість інверторів у сучасному світі:

Ефективність: Сучасні інвертори вирізняються високою ефективністю, що економить енергію та кошти.

Збереження енергії: Завдяки здатності зберігати електроенергію, інвертори стають незамінними в умовах перебоїв з електропостачанням.

Зменшення викидів: Використання інверторів разом з альтернативними джерелами енергії сприяє зменшенню викидів парникових газів та розвитку сталого енергопостачання.

Ключові аспекти при виборі інвертора:

Потужність: Важливо визначити необхідну потужність інвертора, враховуючи всі пристрої, які планується підключати. Рекомендується обирати інвертор з запасом потужності.

Тип інвертора: Існують різні типи інверторів, зокрема синусоїдальні та модифіковано-синусоїдальні. Для чутливих електронних пристроїв зазвичай краще підходять синусоїдальні інвертори.

Надійність: Віддавайте перевагу інверторам від виробників з доброю репутацією та гарантією на продукцію.

Додаткові функції: Порівняйте різні моделі інверторів за наявністю додаткових функцій, таких як автоматичне вимкнення при низькому заряді батареї або інтегрована система управління.

Інвертори - це не просто пристрої, а й ключові компоненти сучасного енергопостачання, що роблять наше життя комфортнішим, економнішим та екологічнішим [14].

Типи сонячних інверторів

Сьогодні ринок пропонує широкий спектр сонячних інверторів, які відрізняються за функціоналом та сферами застосування. Ознайомимося з трьома основними типами:

1. Мережеві інвертори (On-grid)

Цей тип інверторів є найпоширенішим в Україні та використовується для систем, підключених до загальної електромережі.

Принцип роботи: Сонячні панелі генерують постійний струм (DC). Мережевий інвертор перетворює DC в змінний струм (AC), сумісний з мережею.

Вироблена електроенергія може бути:

Спожита безпосередньо в домоволодінні.

Продана державі або комерційним покупцям за "зеленим" тарифом.

Переваги:

Найпростіший та найдешевший варіант.

Можливість отримувати пасивний прибуток від продажу електроенергії.

Не потребує додаткових акумуляторів.

Недоліки:

Залежність від роботи загальної електромережі.

Неможливість використання електроенергії під час відключень мережі.

2. Автономні інвертори (Off-grid)

Цей тип інверторів використовується в системах, не підключених до загальної електромережі.

Принцип роботи: Сонячні панелі генерують постійний струм (DC). Контролер заряду акумулятора регулює заряд та розряд акумулятора. Автономний інвертор перетворює DC з акумулятора або сонячних панелей в AC, придатний для живлення побутових приладів.

Переваги:

Безперебійне живлення, незалежно від стану загальної мережі.

Можливість використання в віддалених місцях.

Недоліки:

Більш висока вартість, порівняно з мережевими інверторами.

Потребує акумуляторів для зберігання енергії.

Необхідність ретельного розрахунку потужності системи та підбору акумуляторів.

3. Гібридні інвертори

Цей тип інверторів поєднує функції мережових та автономних, пропонуючи гнучкість та надійність.

Принцип роботи: Сонячні панелі генерують постійний струм (DC).

Гібридний інвертор може:

Перетворювати DC в AC для живлення побутових приладів.

Заряджати акумулятори від надлишків виробленої енергії.

Віддавати електроенергію в мережу за "зеленим" тарифом.

Переваги:

Поєднує переваги мережових та автономних систем.

Забезпечує безперебійне живлення та можливість продажу електроенергії.

Підходить для систем з декількома джерелами енергії (сонце, вітер, генератори).

Недоліки:

Найвища вартість серед трьох типів інверторів.

Складніша система, порівняно з мережевими та автономними.

Вибір типу інвертора залежить від ваших потреб та бюджету:

Мережевий інвертор: підходить, якщо ви хочете економити на електроенергії та отримувати пасивний прибуток, маючи доступ до мережі.

Автономний інвертор: кращий вибір, якщо вам потрібна автономність та безперебійне живлення, навіть без доступу до мережі.

Гібридний інвертор: оптимальний варіант, якщо ви прагнете до гнучкої та надійної системи, яка може працювати як автономно, так і в мережі, з можливістю зберігання енергії та продажу її надлишків.[15]

Виходячи з даного аналізу, можна зробити наступний висновок:

Гібридний та автономний інвертори схожі за функціоналом, за винятком можливості продажу надлишкової енергії в мережу, яка доступна лише для гібридних інверторів.

Автономний інвертор є більш бюджетним варіантом.

Для аналізу характеристик інвертора за зміни навантаження будемо використовувати автономний інвертор.

Це рішення ґрунтується на:

Функціональних потребах: Для дослідження характеристик інвертора не потрібна функція продажу енергії в мережу, доступна лише гібридним інверторам.

Економічності: Автономний інвертор є більш доступним варіантом, що робить його кращим вибором для дослідницьких цілей.

Важливо зазначити:

Цей висновок стосується лише дослідження характеристик інвертора за зміни навантаження.

Для інших цілей, таких як отримання пасивного доходу від продажу електроенергії, гібридний інвертор може бути кращим вибором.

В даному дослідженні будемо працювати з інвертором PowMr 3000 Вт, 24 В, 230 В, чистий синусоїдальний інвертор (рисунок 1.10). Технічні характеристики інвертора наведені на рисунку 1.11.



Рисунок 1.10 – Інвертор PowMr 3000 Вт, 24 В [16]

Розумний пристрій	ТАК	is_customized	Так
Вихідний струм	MPPT 80A	Вихідна частота	50 Гц/ 60 Гц (автоматичне визначення)
Вихідна потужність	1 - 200 кВт	Тип виводу	СИНГЛ
вага	5,8 кг	Розмір	348X270X95 мм
Номер моделі	POW-NVM3.2H-24V-N	Бренд	PowMr
Походження	Материковий Китай	Атестація	CE
Конфігурація системи	Гібридний сонячний інвертор	Сигнал вихідної напруги	Чиста синусоїда
застосування	Домашня сонячна система	Особливість	Вбудований контролер сонячного заряду MPPT
Тип продукту	Сонячний інвертор MPPT	Максимальна вхідна потужність сонячної панелі	3200 Вт
Діапазон напруги фотоелектричної	30-400 В постійного струму	Вихідна напруга	230 В змінного струму

Рисунок 1.11 – Технічні характеристики PowMr 3000 Вт, 24 В[16]

1.5 Вибір і обґрунтування напрямку дослідження

Провівши ґрунтовний аналіз гібридних сонячних електростанцій та їх систем моніторингу в першому розділі, визначено основні задачі дослідження магістерської роботи:

1. Виконати аналіз структурних, принципівих схеми модуля моніторингу для зчитування характеристик гібридного інвертора.
2. Провести математичне моделювання та розробку алгоритмів адаптивного енергоменеджменту.
3. Провести техніко-економічне обґрунтування проекту.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМИ МОДУЛЯ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ЗЧИТУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГІБРИДНОГО ІНВЕРТОРА

2.1 Основні задачі та принципи побудови систем моніторингу електричних параметрів гібридної сонячної електростанції (СЕС)

Основні задачі та принципи побудови систем моніторингу електричних параметрів гібридної сонячної електростанції (СЕС) приватного домогосподарства спрямовані на забезпечення ефективності, надійності, безпеки та оптимізації роботи всієї енергосистеми.

Система моніторингу повинна виконувати низку критичних функцій, які охоплюють усі компоненти гібридної СЕС (сонячні панелі, інвертор, акумуляторні батареї, зовнішня мережа та споживачі):

Контроль генерації енергії:

Вимірювання фактичної потужності та обсягів електроенергії, виробленої сонячними панелями (PPV, EPV).

Порівняння фактичних показників із розрахунковими (прогнозованими), щоб виявляти зниження ефективності.

Управління споживанням:

Облік загального споживання електроенергії домогосподарством (Pload, Eload).

Аналіз профілю навантаження для оптимізації самоспоживання та планування роботи акумуляторів.

Моніторинг акумуляторних батарей (АКБ):

Контроль стану заряду (State of Charge, SoC), напруги та струму заряду/розряду АКБ.

Оцінка стану здоров'я (State of Health, SoH) батарей для прогнозування їхнього ресурсу та заміни.

Забезпечення безпечних режимів заряду/розряду для запобігання пошкодженню.

Контроль роботи інвертора/контролера:

Моніторинг вхідних та вихідних електричних параметрів (напруга, струм, частота).

Відстеження робочого режиму (мережа, автономний, гібридний).

Реєстрація помилок та аварійних відключень.

Взаємодія із зовнішньою мережею:

Контроль якості мережевої напруги та частоти.

Дистанційне управління та налаштування:

Надання можливості віддаленого зміни пріоритетів роботи (наприклад, пріоритет самоспоживання або заряду АКБ).

2.2 Огляд та вибір апаратної платформи та компонентів

2.2.1 Обґрунтування вибору мікроконтролера

Система моніторингу гібридної сонячної електростанції (СЕС) приватного домогосподарства висуває специфічні вимоги до керуючого пристрою: необхідність одночасного вимірювання параметрів у колах постійного (PV-масив, АКБ) та змінного струму (мережа, навантаження, вихід інвертора), математична обробка даних у реальному часі (обчислення RMS значень напруги та струму), а також забезпечення безперервної передачі телеметрії на сервер.

Для реалізації поставленого завдання, на основі порівняльного аналізу сучасних рішень, було обрано систему на кристалі (SoC) ESP32. Цей вибір обґрунтовується відповідністю технічних характеристик платформи функціональним вимогам системи моніторингу СЕС [17]:

1. Архітектура для багатозадачності (Dual Core).

Моніторинг електричних параметрів вимагає високої частоти опитування датчиків, щоб не пропустити пікові навантаження або просадки напруги. Наявність двох ядер (Xtensa LX6) дозволяє розділити обчислювальні процеси:

- *Ядро 0 (Protocol CPU):* Забезпечує підтримку стека Wi-Fi/Bluetooth та зв'язок з хмарним сервером.
- *Ядро 1 (App CPU):* Виконує опитування сенсорів та математичні розрахунки електричних величин без затримок, викликаних роботою радіомодуля.

2. Широкий набір комунікаційних інтерфейсів для периферії.

Гібридна СЕС є складною системою, що вимагає підключення різномірних датчиків. ESP32 має:

- *Кілька шин UART:* Дозволяє одночасно підключити спеціалізовані енергомонітори (наприклад, PZEM-004T для лінії 220 В) та BMS (Battery Management System) акумулятора.
- *Шина I2C/SPI:* Для підключення дисплеїв та прецизійних АЦП (наприклад, ADS1115), оскільки вбудований АЦП може мати нелінійність, критичну для точних вимірювань малих струмів.

3. Інтегровані бездротові технології.

Вбудовані модулі Wi-Fi (802.11 b/g/n) та Bluetooth дозволяють реалізувати концепцію IoT без використання зовнішніх модулів:

- *Wi-Fi* забезпечує відправку даних на сервер (MQTT, HTTP) для віддаленого аналізу генерації.
- *Bluetooth* дозволяє створити локальний інтерфейс для первинного налаштування системи користувачем (введення SSID/пароллю) без необхідності фізичного підключення до ПК.

4. Енергоефективність та надійність.

У випадку аварійного зникнення живлення мережі та розряду АКБ, контролер повинен мати можливість працювати від резервного джерела

максимально довго, щоб зафіксувати момент аварії. Технологія наднизького споживання (Ultra Low Power co-processor) дозволяє системі переходити в режим сну, прокидаючись лише для періодичних замірів.

5. Економічна доцільність.

Для побутової системи моніторингу вартість є критичним фактором. ESP32 забезпечує найкраще співвідношення «ціна/продуктивність» на ринку, замінюючи собою зв'язку «Arduino + Wi-Fi Shield + BT Module», що знижує загальну вартість компонентої бази (BOM).

Зовнішній вигляд плати розробника на базі ESP32 наведено на рис.2.1.

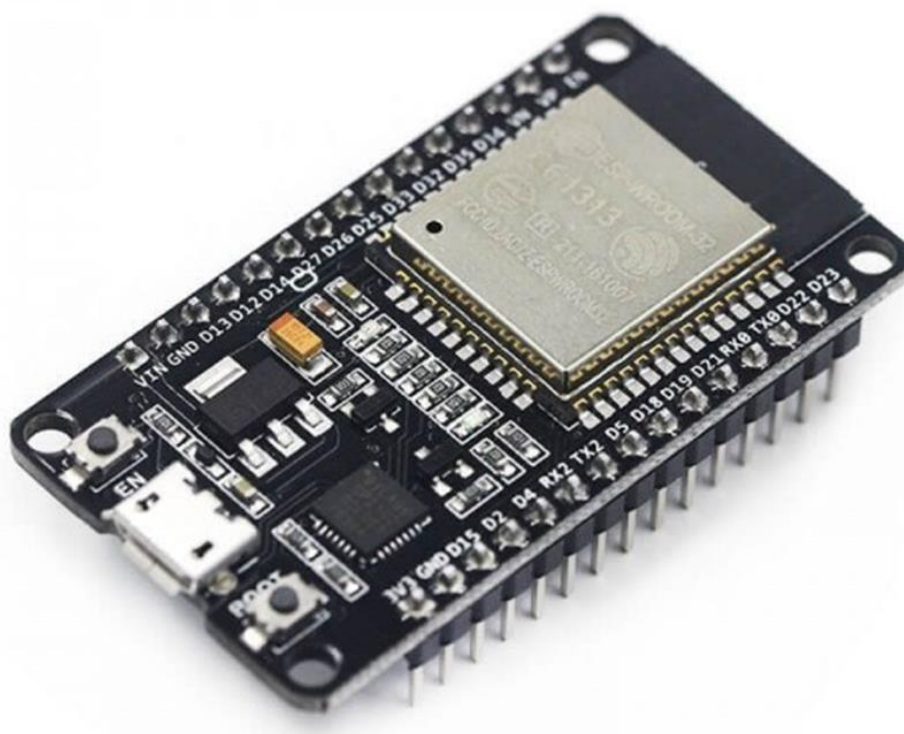


Рисунок 2.1 – Плата мікроконтролера ESP32[17]

Основні технічні характеристики обраної платформи (модуль ESP32-WROOM-32), що є визначальними для розробки системи моніторингу, наведено нижче:

Ядра процесора: Два 32-бітних ядра Xtensa® LX6 з продуктивністю до 600 DMIPS.

Тактова частота: Регульована, від 80 МГц до 240 МГц (дозволяє проводити швидке перетворення Фур'є (FFT) для аналізу гармонік мережі).

Пам'ять:

520 КБ SRAM (достатньо для буферизації даних при втраті зв'язку).

4 МБ Flash (зовнішня) для зберігання прошивки та логів подій (SPIFFS/LittleFS).

АЦП (SAR ADC): Два 12-бітних модуля (18 каналів), що дозволяє реалізувати пряме вимірювання напруги на АКБ та температури інвертора.

Інтерфейси: 3×UART, 3×SPI, 2×I2C, 12×ADC вхідних каналів, 2×DAC.

Таким чином, використання мікроконтролера ESP32 дозволяє створити компактну, швидкодіючу та економічно ефективну систему моніторингу, здатну обробляти великі масиви даних про стан генерації та споживання електроенергії в реальному часі.

2.2.2 Вибір перетворювача інтерфейсів

Вибір міні-перетворювача TTL-RS232 зумовлений необхідністю узгодження логічних рівнів між двома стандартами послідовного зв'язку, які мають принципові відмінності у рівнях напруги та полярності [18]:

– TTL (Transistor-Transistor Logic) / UART. Стандарт, що використовується в сучасних мікроконтролерах (Arduino, ESP32, STM32). Логічному «0» відповідає 0 В (GND), логічній «1» — +3.3 В або +5 В (VCC). – RS232. Використовується в промисловому обладнанні та комп'ютерній техніці попередніх поколінь. Рівні напруги інвертовані та значно вищі: логічній «1» відповідає діапазон від -3 В до -15 В, логічному «0» — від +3 В до +15 В.

Для реалізації перетворення обрано модуль на базі мікросхеми MAX3232. Зовнішній вигляд плати зображено на рисунку 2.2.

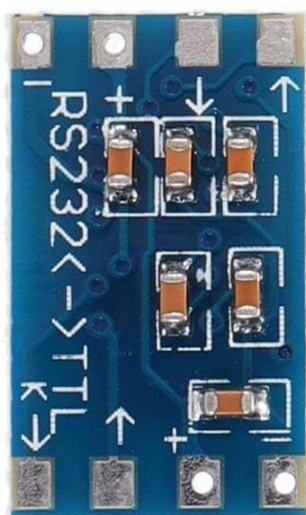


Рисунок 2.2 – Плата міні-перетворювача TTL-RS232 [19]

Таблиця 2.1 Ключові характеристики модуля MAX3232

Характеристика	Значення	Призначення
Мікросхема	MAX3232 (або сумісна)	Інтегральний драйвер/ресивер RS232.
Робоча напруга	+3.0 В до +5.5 В	Сумісність з 3.3В та 5В TTL-пристроями.
Логічні рівні TTL	0V / VCC (+3.3V або +5V)	Стандарт UART мікроконтролерів.
Логічні рівні RS232	±5 В до ±15 В	Стандарт COM-порту.
Макс. швидкість передачі	До 120 кбіт/с (зазвичай)	Достатньо для більшості застосувань налагодження/передачі даних.
Інтерфейс TTL	Штирові контакти (VCC, GND, RX, TX)	Для легкого підключення до макетної плати/мікроконтролера.
Інтерфейс RS232	DB9 Female (COM-порт)	Для підключення до стандартного RS232 кабелю/порту.

Примітка про MAX3232: Цей чип використовує внутрішній генератор напруги (charge pump) для формування необхідних позитивних (+V) та негативних (-V) напруг для RS232, використовуючи лише зовнішнє живлення від 3 до 5.5В та невеликі зовнішні конденсатори.

2.2.3 Вибір інтерфейсу для підключення мереж

RJ45 — це найбільш поширений фізичний інтерфейс для підключення мереж Ethernet (провідних локальних мереж). Зображено на рисунку 2.3.

Таблиця 2.2 – Характеристики RJ45

Характеристика	Значення / Пояснення
Тип роз'єму	RJ45 Jack (модульне гніздо)
Конфігурація	8P8C (8 позицій, 8 контактів)
Призначення	Підключення кабелю витोї пари (UTP/FTP) для передачі даних Ethernet.
Стандарт	Зазвичай використовується для кабелів Cat. 5e або Cat. 6.
Фізичні деталі	КН-RJ45-58-8P8C — це парт-номер виробника Kinghelm (C2683360), що вказує на конкретну модель: прямокутний роз'єм для монтажу на плату (Right Angle, Through Hole), зазвичай екранований (Shielded) або неекранований (UTP).
Швидкість (залежить від категорії)	До 100 Мбіт/с (для 2 пар) або 1000 Мбіт/с (для 4 пар Cat. 5e/6).

Призначення Підключення кабелю витої пари (UTP/FTP) для передачі даних Ethernet.

Стандарт Зазвичай використовується для кабелів Cat. 5e або Cat. 6.

Фізичні деталі КН-RJ45-58-8P8С — це парт-номер виробника Kinghelm (С2683360), що вказує на конкретну модель: прямокутний роз'єм для монтажу на плату (Right Angle, Through Hole), зазвичай екранований (Shielded) або неекранований (UTP).

Швидкість (залежить від категорії) До 100 Мбіт/с (для 2 пар) або 1000 Мбіт/с (для 4 пар Cat. 5e/6).

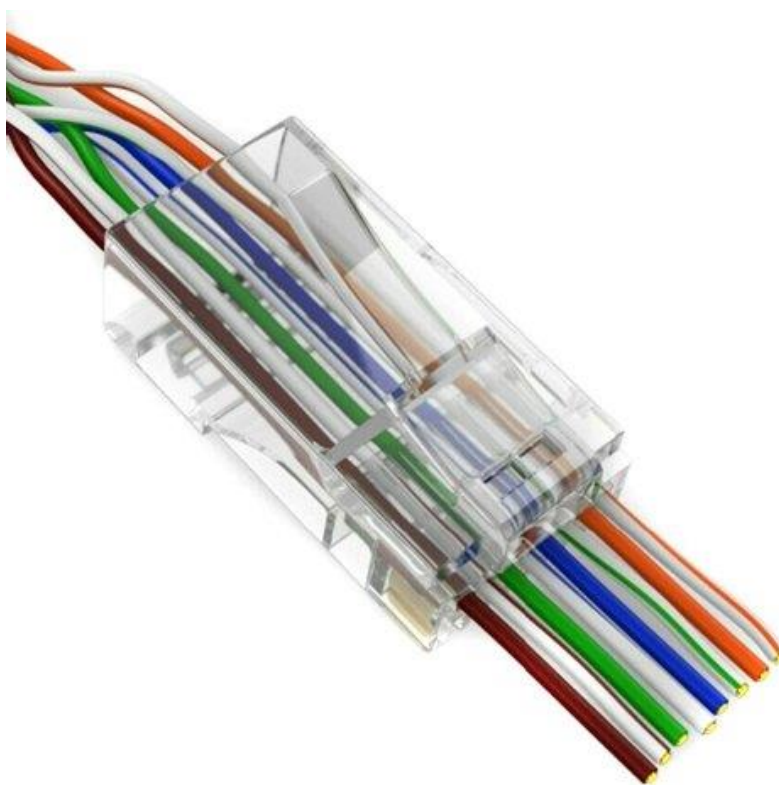


Рисунок 2.3 – фізичний інтерфейс для підключення RJ45[21]

Обґрунтування вибору

Він обирається для проєктів, які вимагають надійного провідного підключення до мережі, такого як:

- Ethernet-зв'язок: Для мікроконтролерів із вбудованим Ethernet-контролером (наприклад, деякі моделі ESP32) або зовнішнім Ethernet-трансивером (як-от ENC28J60 або W5500).
- Висока надійність: На відміну від Wi-Fi, провідний зв'язок менш схильний до перешкод.

- PoE (Power over Ethernet): Може використовуватися для передачі живлення разом з даними (якщо реалізовано відповідною схемою).

2.3 Огляд архітектури та аналіз схемотехнічних рішень системи моніторингу

На основі обраної елементної бази (мікроконтролер ESP32) було проведено дослідження апаратної реалізації системи. У цьому підрозділі здійснюється огляд структурної організації взаємодії компонентів для збору даних з електромережі та інвертора, а також детальний аналіз принципової електричної схеми пристрою.

2.3.1 Аналіз структурної організації системи

Наведена на рисунку 2.4 структурна схема ілюструє логіку інформаційних потоків між вимірювальними вузлами, контролером обробки даних та хмарним середовищем.

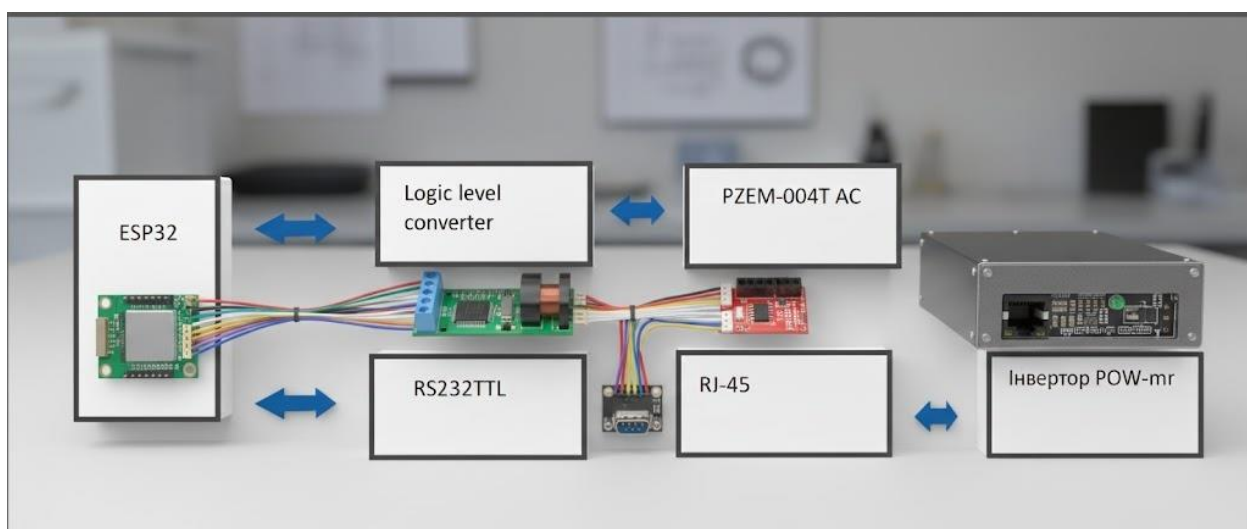


Рисунок 2.4 – Структурна схема системи моніторингу

Дослідження функціонального призначення основних вузлів системи дозволяє виділити такі групи компонентів:

1. Джерела даних (Sensors & Source):

- *Інвертор (POW-mr)*: Виступає основним об'єктом моніторингу, що надає параметри DC-контур (напруга акумуляторів, статус заряду) та коди помилок. Обмін даними здійснюється через промисловий інтерфейс RS-232.
- *Сенсор PZEM-004T*: Спеціалізований модуль для вимірювання параметрів змінного струму (AC): напруги, сили струму, активної потужності, частоти та накопиченої енергії.

2. Інтерфейсні перетворювачі (Interface Layer):

- *Блок узгодження рівнів (Logic Level Converter)*: Необхідний для адаптації сигналів 5 В (від PZEM) до логіки 3.3 В мікроконтролера.
- *Перетворювач RS232-TTL*: Трансформує високовольтні сигнали стандарту RS-232 (інвертор) у сигнали транзисторно-транзисторної логіки (TTL), сумісні з UART-інтерфейсом мікроконтролера.

3. Центральний контролер (Core):

- *ESP32*: Виконує роль майстер-пристрою, який ініціює опитування сенсорів, проводить первинну обробку (декодування, калібрування, агрегацію в JSON) та забезпечує шлюзування даних.

4. Канал передачі (Communication):

- Використовуючи вбудований Wi-Fi модуль, контролер передає дані за протоколами MQTT або HTTP на хмарний сервер для подальшого аналізу.

Алгоритм функціонування

Робота системи базується на циклічному алгоритмі: ініціалізація запиту (Modbus/UART) → отримання "сирих" байтів → декодування у фізичні величини → пакетування даних → відправка на сервер.

2.3.2 Дослідження принципової електричної схеми

В рамках магістерської роботи проаналізовано принципову електричну схему модуля моніторингу (рис. 2.5). Схемотехнічне рішення базується на використанні відкритої архітектури [18] та адаптовано під конкретні завдання дослідження.

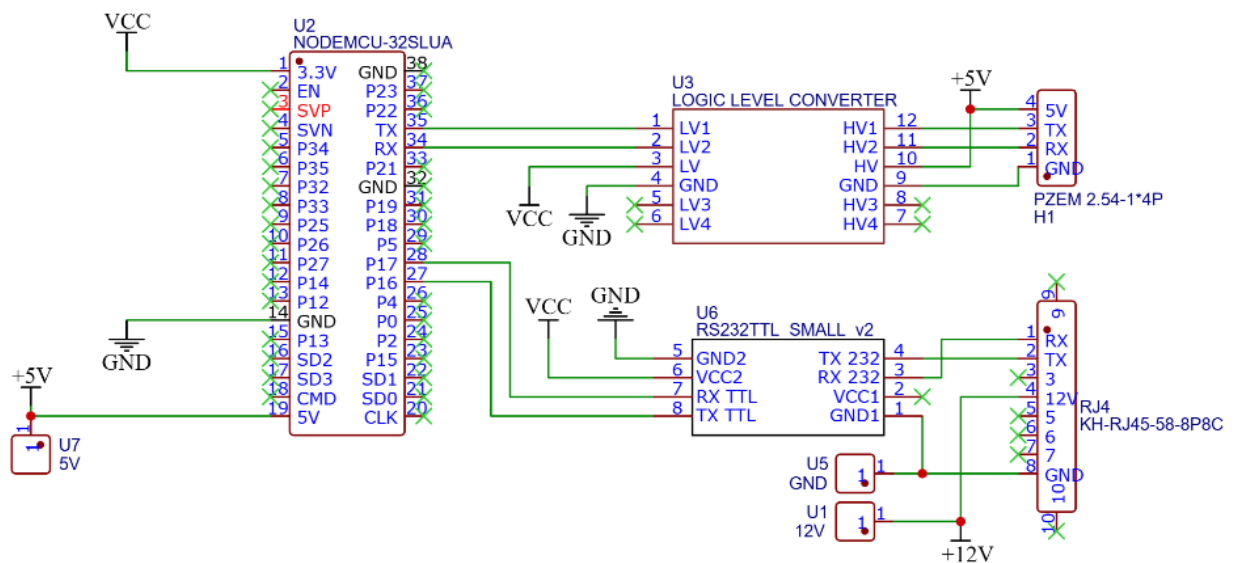


Рисунок 2.5 – Принципова схема системи моніторингу

Схема побудована навколо налагоджувальної плати ESP32 (U2, тип NODEMCU-32S) і включає підсистеми живлення, узгодження інтерфейсів та комутації.

Аналіз комутації портів (GPIO) Для забезпечення одночасної роботи двох каналів зв'язку в схемі задіяно апаратні UART-інтерфейси мікроконтролера:

Канал енергомонітора (UART2):

GPIO22 (TX): Лінія запиту даних від модуля PZEM.

GPIO23 (RX): Лінія прийому телеметрії.

Канал інвертора (UART1):

GPIO26 (TX): Передача команд керування.

GPIO27 (RX): Отримання статусів роботи інвертора.

Особливості узгодження рівнів Аналіз схемотехніки виявив важливі рішення для забезпечення сумісності різних стандартів напруги:

Вузол PZEM-004T (U3): Оскільки вимірювальний модуль оперує напругою 5 В, застосовано двонаправлений перетворювач рівнів (Logic Level Converter). Це забезпечує гальванічну розв'язку керуючої логіки (Low Voltage side – 3.3 В) від лінії даних сенсора (High Voltage side – 5 В).

Вузол інвертора (U6): Для сполучення з портом RJ-45 (H1) інвертора використано драйвер MAX3232. Ця мікросхема виконує перетворення біполярних сигналів RS-232 (які можуть сягати ± 12 В) у однополярні TTL-сигнали (3.3 В), що дозволяє ESP32 безпечно зчитувати реєстри промислового обладнання.

Організація підсистеми живлення: Для стабільної роботи комунікаційних драйверів у досліджуваній схемі реалізовано дві лінії живлення постійного струму:

Лінія +5 В: Подається на вхід VIN плати ESP32 (де лінійний стабілізатор знижує її до 3.3 В для ядра) та на високовольтну сторону конвертера рівнів.

Лінія +12 В: Використовується виключно для живлення чіпа MAX3232 (U6), щоб забезпечити формування сигналів, які відповідають специфікації стандарту RS-232.

Проведене дослідження апаратної архітектури підтверджує, що обране схемотехнічне рішення є оптимальним для задач енергомоніторингу. Поєднання доступної компонентної бази з надійними методами узгодження сигналів (U3, U6) та розділенням живлення дозволяє інтегрувати побутовий мікроконтролер у промислову мережу керування інвертором з мінімальними ризиками відмов.

2.4 Реалізація серверної частини системи керування на базі платформи Home Assistant

Центральним вузлом розробленої системи енергетичного менеджменту є програмний комплекс Home Assistant, розгорнутий на локальному сервері. Він виконує функції збору даних, їх аналітичної обробки, архівації та формування високорівневих команд керування для мікроконтролера.

2.4.1. Інтеграція апаратного забезпечення (ESPHome)

Для забезпечення безшовної взаємодії між сервером та польовим контролером (ESP32) використано програмний шлюз ESPHome. Це дозволяє описувати конфігурацію мікроконтролера декларативною мовою YAML, що значно спрощує налаштування протоколу Modbus.

Конфігурація вузла включає опис фізичного підключення (UART) та мапу регістрів інвертора. Фрагмент конфігурації для зчитування параметрів наведено нижче:

Налаштування шини Modbus: Визначає параметри фізичного каналу зв'язку (TX/RX піни, швидкість 9600 бод).

Визначення сенсорів (Sensors): Описує, які саме регістри необхідно зчитувати (наприклад, Напруга АКБ — регістр 0x0150, Потужність навантаження — регістр 0x0178).

Визначення елементів керування (Numbers/Switches): Створення сутностей для запису даних (наприклад, «Ліміт струму заряду» або «Перемикачпріоритету»).

2.4.2. Отримання зовнішніх даних (Інтеграції)

Для реалізації адаптивних алгоритмів керування (описаних у Розділі 3) у середовищі Home Assistant налаштовано інтеграцію з зовнішніми сервісами:

Forecast.Solar / OpenWeatherMap: Інтеграція прогнозу сонячної активності. Сервіс аналізує географічні координати об'єкта, азимут та кут нахилу панелей і повертає погодинний прогноз генерації у кВт·год. Ці дані є ключовими для прийняття рішення про нічний заряд.

Інтеграція з сайтом ОСП (DTEK/Yasno): Використовується спеціалізований компонент (або RESTful сенсор), який парсить статус графіків відключень для конкретної черги. Це дозволяє системі отримувати бінарний сигнал: `grid_warning: on/off`.

2.4.3. Логіка автоматизації (Automations)

Це «мозок» системи. У Home Assistant створено сценарії автоматизації, які реалізують розроблений скінченний автомат.

Сценарій «Захист від блекауту»:

Тригер: Зміна сенсора `sensor.grid_warning` на стан Active.

Умова: Час до відключення < 3 годин.

Дія: Встановити сутність `number.d_charge_current` на максимум;
Увімкнути `switch.grid_charge`.

Сценарій «Економічний нічний заряд»:

Тригер: Час = 23:00.

Умова: Прогноз генерації на завтра (`sensor.energy_production_tomorrow`)
< Прогнозу споживання.

Дія: Розрахувати необхідний струм і активувати заряд від мережі.

2.4.4. Організація бази даних (InfluxDB та Energy Dashboard)

Для довготривалого зберігання телеметрії налаштовано інтеграцію з базою даних часових рядів InfluxDB. На відміну від стандартної бази SQLite, вона оптимізована для запису мільйонів значень (напруги, струму) без навантаження на диск.

Для візуалізації енергоефективності налаштовано штатну панель Energy Dashboard, яка дозволяє моніторити:

Розподіл джерел енергії (Сонце / Мережа / Акумулятор).

Вартість спожитої енергії у грошовому еквіваленті (з урахуванням налаштованих тарифних зон).

Кількість енергії, повернутої в мережу (експорт).

2.4.5. Інтерфейс користувача (Lovelace UI)

Створено кастомізовану панель керування для оператора системи (енергоменеджера), яка містить:

Картку потоків (Power Flow Card): Анімована схема, що показує рух енергії в реальному часі.

Панель керування: Кнопки для ручного перемикання режимів («Авто», «Примусовий заряд», «Економія») та слайдери для налаштування порогів SOC.

Графіки історії: Інтерактивні графіки рівня заряду АКБ та напруги мережі за останні 24 години.

Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено детальне дослідження та аналіз апаратно-програмної архітектури існуючої системи моніторингу для гібридної сонячної електростанції.

Досліджено доцільність використання мікроконтролера ESP32 як центрального вузла системи. Встановлено, що його технічні характеристики (двоядерна архітектура, вбудований Wi-Fi стек) повною мірою задовольняють вимоги до IoT-шлюзів, забезпечуючи автономність та економічну ефективність рішення без залучення додаткових модулів зв'язку.

Детальний розгляд принципової електричної схеми підтвердив надійність реалізованих методів узгодження логічних рівнів. Виявлено, що використання драйвера MAX3232 забезпечує коректну фізичну взаємодію з промисловим портом інвертора (стандарт RS-232). Встановлено, що застосування перетворювачів рівнів (Logic Level Converter) гарантує безпечне сполучення низьковольтної логіки мікроконтролера (3.3 В) з вимірювальним модулем (5 В), захищаючи порти від пошкоджень.

Обґрунтовано переваги застосування спеціалізованого сенсора PZEM-004T у досліджуваній схемі. Підтверджено, що використання окремого метрологічного модуля дозволяє отримувати дані високої точності (напруга, струм) без навантаження на обчислювальні потужності основного контролера.

Розглянуто структуру взаємодії програмних компонентів на базі ESPHome та Home Assistant. Визначено, що обрана архітектура з використанням протоколу MQTT та бази даних InfluxDB є оптимальною для задач телеметрії, оскільки забезпечує швидкий обмін даними та їх надійну архівацію.

За результатами дослідження підтверджено, що розглянута система моніторингу має достатній апаратний ресурс не лише для збору даних, а й для передачі керуючих команд. Це створює необхідну технічну основу для

впровадження алгоритмів автоматичного енергоменеджменту, які будуть розглянуті у наступних розділах.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує, що досліджувана схема модуля моніторингу є технічно грамотним та функціонально завершеним рішенням, придатним для інтеграції у систему розумного будинку.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ АДАПТИВНОГО ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

3.1. Математична модель енергетичного балансу домогосподарства

Для розробки алгоритмів керування потоками потужності необхідно формалізувати енергетичні процеси у системі. Розроблена математична модель складається з двох рівнів:

Рівень фізичних обмежень: Базується на апаратних характеристиках обладнання та законах електротехніки (стандартний функціонал інвертора).

Рівень економічної оптимізації: Авторський алгоритм мінімізації витрат, що є надбудовою над стандартною логікою роботи обладнання.

Розглянемо систему як дискретну модель, де час t розбитий на інтервали Δ_t (1 година).

Рівняння миттєвого енергетичного балансу Базовим рівнянням, що описує стан системи в будь-який момент часу t є рівняння миттєвого балансу потужностей (відповідно до закону збереження енергії):

$$P_{Grid}(t) + P_{PV}(t) + P_{Batt}(t) - P_{Load}(t) = 0 \quad (3.1)$$

де:

$P_{Grid}(t)$ — потужність обміну з мережею (>0 — імпорт/купівля, <0 — експорт/продаж), кВт;

$P_{Load}(t)$ — потужність навантаження споживачів, кВт;

$P_{PV}(t)$ — потужність фотоелектричної генерації, кВт;

$P_{Batt}(t)$ — потужність на клеммах АКБ (>0 — розряд, <0 — заряд), кВт.

Ключовим параметром для прийняття управлінських рішень є стан заряду акумуляторної батареї (SOC — State of Charge).

Динаміка стану заряду (SOC): Зміна енергоємності акумулятора описується стандартним рекурентним співвідношенням яке враховує інтеграл потужності та ККД перетворення::

$$SOC(t + 1) = SOC(t) - \frac{P_{Batt}(t) \cdot \Delta t}{C_{nom}} \cdot \eta_{batt} \quad (3.2)$$

де:

C_{nom} — номінальна ємність АКБ, кВт·год;

η_{batt} — коефіцієнт корисної дії акумуляторної батареї (приймаємо $\eta \approx 0.95$ для LiFePO4);

$SOC(t)$ — поточний рівень заряду у відносних одиницях або відсотках.

Цільова функція енергоменеджменту :

На відміну від стандартних алгоритмів інвертора, які оперують пріоритетами джерел, у роботі запропоновано введення економічного критерію. Основною метою системи є мінімізація сумарної вартості спожитої електроенергії C_{Total} за розрахунковий період T (горизонт планування 24 години):

$$C_{Total} = \sum_{t=1}^T (P_{Grid_import}(t) \cdot Tariff(t)) \rightarrow \min \quad (3.3)$$

Рівняння (3.3) є формалізованим критерієм оптимальності керування системою. Його фізичний та економічний зміст полягає у наступному:

C_{Total} ($Cost\ Total$): Інтегральний показник операційних витрат. Він виступає головним критерієм якості роботи алгоритму. Чим меншим є значення цього показника в кінці розрахункового періоду, тим вищою вважається енергоефективність системи.

Оператор суми (Sigma): Відображає дискретний характер накопичення витрат. Оскільки тарифікація електроенергії змінюється по годинно (зональність), розрахунок виконується шляхом підсумовування добутоків спожитої потужності на актуальний тариф для кожного інтервалу часу t в межах горизонту планування T (24 години).

Змінна $P_{Grid\ import(t)}$ є керованою змінною. Алгоритм не може змінити тариф або споживання будинку, але він може керувати величиною $P_{Grid\ import}$ шляхом заміщення споживання з мережі енергією з акумулятора або, навпаки, збільшенням споживання для заряду акумулятора.

Умова " $\rightarrow min$ " (Прямуювання до мінімуму): Визначає вектор оптимізації. Це математична вказівка алгоритму керування здійснювати ітеративний перебір можливих сценаріїв роботи акумулятора (заряд/розряд/очікування) та обирати такий сценарій, при якому фінальна сума витрат буде найменшою з усіх можливих варіантів.

Таким чином, формула (3.3) перетворює задачу керування інвертором у задачу лінійного програмування, де необхідно знайти мінімум функції витрат при заданих обмеженнях (баланс потужності, ємність акумулятора, доступна генерація).

Практичний приклад роботи критерію оптимізації

Для ілюстрації принципу дії цільової функції розглянемо ситуацію прийняття рішення алгоритмом у нічний час.

Вхідні умови:

Поточний час t : 03:00 (діє нічний тариф 2.16 грн/кВт·год).

Прогноз: Наступний день похмурий, власної генерації не вистачить.

Потреба: Необхідно поповнити запас енергії в акумуляторі на 5 кВт·год для покриття вечірнього піку (коли діє тариф 4.32 грн/кВт·год).

Алгоритм розглядає два можливі варіанти дій (сценарії) і підставляє їх у формулу (3.3):

Варіант 1. Пасивна стратегія (Бездіяльність) Система не заряджає акумулятор вночі. Як наслідок, увечері ($t=19:00$) доведеться купувати цю енергію з мережі за високим тарифом.

$$P_{Grid_import}(03:00) = 0 \text{ кВт.}$$

$$P_{Grid_import}(19:00) = 5 \text{ кВт.}$$

$$\text{Значення функції } C_{Total}: 0 * 2.16 + 5 * 4.32 = 21.60 \text{ грн.}$$

Варіант 2. Активна стратегія (Нічний заряд) Система приймає рішення увімкнути зарядний пристрій зараз.

$$P_{Grid_import}(03:00) = 5 \text{ кВт.}$$

$P_{Grid_import}(19:00) = 0 \text{ кВт}$ (вечірнє споживання покривається з акумулятора).

$$\text{Значення функції } C_{Total}: 5 * 2.16 + 0 * 4.32 = 10.80 \text{ грн.}$$

Результат роботи алгоритму: Система порівнює отримані значення: $10.80 < 21.60$

Оскільки умова цільової функції — прямування до мінімуму ($\rightarrow \min$), алгоритм відкидає Варіант 1 і затверджує Варіант 2 як єдиний вірний.

Таким чином, математична модель автоматично забезпечує економію 50% коштів без втручання користувача.

Система обмежень та граничних умов математичної моделі

Пошук глобального мінімуму цільової функції (3.3) не є безумовним процесом. Оптимізація здійснюється на множині допустимих рішень, яка формується системою лінійних нерівностей. Ці обмеження обумовлені фізичними характеристиками обладнання, вимогами електрохімічної безпеки акумуляторів та обмеженнями мережевого підключення.

Обмеження ресурсу системи накопичення (State of Charge Constraints) Для забезпечення довготривалої експлуатації акумуляторної батареї (АКБ) алгоритм повинен утримувати рівень заряду в межах робочого вікна.

Глибокий розряд (нижче 10–20%) призводить до незворотної деградації електродів, а перезаряд — до ризику перегріву та відключення BMS.

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (3.4)$$

де:

SOC_{min} — нижня межа розряду (Depth of Discharge limit). Для систем LiFePO₄ зазвичай встановлюється на рівні 15–20%.

SOC_{max} — верхня межа заряду (зазвичай 95–100%).

Обмеження потужності перетворювача (Inverter Power Constraints) Потужність, що протікає через силові контури інвертора, лімітована тепловими характеристиками напівпровідникових ключів. Алгоритм не може запланувати передачу енергії, що перевищує номінальну потужність інвертора:

$$|P_{Batt}(t)| \leq P_{inv}^{nom} \quad (3.5)$$

Крім того, існує обмеження швидкості заряду/розряду АКБ (C-rate), що визначається хімією комірок. Струм заряду не повинен перевищувати рекомендовані виробником значення:

$$P_{Grid}(t) \leq P_{grid}^{max} \quad (3.6)$$

3. Обмеження пропускної здатності мережевого вводу (Grid Connection Limit) Сумарна потужність, яку домогосподарство споживає з мережі (для живлення навантаження та одночасного заряду АКБ), не повинна перевищувати номінал вхідного автоматичного вимикача або договірну потужність:

$$P_{grid}^{imp}(t) \leq P_{grid}^{max} \quad (3.7)$$

Це обмеження є критичним для запобігання аварійним відключенням ввідного автомату під час активації режиму «Примусовий заряд».

4. Обмеження генерації в мережу (Export Limitation) У випадках, коли домогосподарство не має оформленого «Зеленого тарифу» або діють мережеві

обмеження оператора системи розподілу, експорт енергії в мережу може бути заборонений:

$$P_{grid}^{exp}(t) = 0 \quad (3.8)$$

Це означає, що надлишкова сонячна енергія, яку неможливо спожити або записати в АКБ, повинна бути обмежена (PV Curtailment).

5. Балансове рівняння (Power Balance Equation) Фундаментальне обмеження, що базується на законі збереження енергії. У кожний момент часу t алгебраїчна сума потужностей усіх джерел та споживачів повинна дорівнювати нулю:

$$P_{PV}(t) + P_{grid}(t) + P_{batt}(t) - P_{load}(t) = 0 \quad (3.9)$$

де:

$P_{Grid}(t)$ — додатне при імпорті, від'ємне при експорті;

$P_{Batt}(t)$ — додатне при розряді, від'ємне при заряді.

Саме виконання рівняння (3.9) при дотриманні нерівностей (3.4)–(3.8) гарантує фізичну реалізованість розрахованого алгоритмом плану енергоспоживання.

3.2. Розробка алгоритму адаптивного керування системою

Штатні алгоритми керування більшої частини гібридних інверторів побудовані за принципом реактивного регулювання, що базується лише на миттєвих значеннях напруги та струму. Такий підхід є обмеженим, оскільки він не враховує майбутні зміни генерації (прогноз погоди) та динаміку тарифів.

Для вирішення цієї проблеми у роботі запропоновано перехід до проактивного керування, що базується на елементах MPC (Model Predictive Control).

3.2.1. Дворівнева архітектура програмного забезпечення

Реалізація складних алгоритмів прогнозування та обробка великих масивів даних вимагає обчислювальних потужностей, що перевищують можливості стандартних мікроконтролерів. Тому запропоновано розділити логіку керування на два ієрархічні рівні за архітектурою «Периферія–Сервер»:

Рівень 1: Польовий рівень (Виконавчий пристрій — ESP32)
Мікроконтролер виконує функцію шлюзу даних та контролера реального часу.

Завдання: Фізичне зчитування регістрів інвертора через промисловий інтерфейс RS-485, виконання критичних команд безпеки та передача телеметрії.

Надійність: Система продовжує виконувати базові функції захисту навіть при втраті зв'язку з сервером.

Рівень 2: Серверний рівень (Система диспетчеризації — Home Assistant)
На базі локального сервера розгорнуто платформу автоматизації «Home Assistant», яка виконує роль локальної системи збору даних та оперативного диспетчерського керування (SCADA).

Обґрунтування застосування:

Агрегація зовнішніх даних: Сервер забезпечує програмну інтеграцію (API) з метеорологічними службами для отримання прогнозу погоди та з веб-ресурсами операторів системи розподілу для моніторингу графіків відключень.

Аналітика та Архівування: Сервер здійснює запис історичних даних у базу даних часових рядів (Time Series DB), що дозволяє аналізувати економічну ефективність алгоритму за тривалий період.

Візуалізація: Надання графічного інтерфейсу (Дашборду) для моніторингу стану системи користувачем.

3.2.2. Структура інформаційного забезпечення

Процес прийняття рішень є циклічним. На кожній ітерації контролер виконує збір даних з трьох векторів інформації:

1. Вектор внутрішнього стану: Дані, отримані безпосередньо з інвертора.

$SOC(t)$ — поточний рівень заряду акумулятора (%);

$Pload(t)$ — поточне споживання домогосподарства (Вт);

$Pgen(t)$ — поточна генерація сонячних панелей (Вт).

2. Вектор зовнішніх збурень: Дані, отримані сервером через мережу Інтернет.

$Wforecast$ — прогноз хмарності на наступні 24 години (%);

$Grid_{status}$ — статус черги графіків відключень (АКТИВНО/АВАРІЯ).

3. Вектор часових параметрів:

t_{curr} — поточний час;

$Tariff_{zone}$ — поточна тарифна зона (День/Ніч).

3.2.3. Підсистема прогнозування генерації

Ключовим елементом адаптивності є здатність системи передбачити дефіцит енергії. Прогнозована генерація сонячної станції на наступну добу ($E_{PV\ proj}$) розраховується сервером за емпіричною моделлю:

$$E_{PV}^{proj} = \sum_{h=1}^{24} P_{STC} \cdot K_{ins}(h) \cdot (1 - C_{cloud}(h)) \cdot \eta_{sys} \quad (3.10)$$

де:

P_{STC} — номінальна потужність фотоелектричного поля, кВт;

$K_{ins}(h)$ — коефіцієнт інсоляції для конкретної години доби h ;

$C_{cloud}(h)$ — коефіцієнт хмарності (від 0 до 1), отриманий з метеосервісу;

η_{sys} — комплексний ККД системи (втрати на перетворення), приймається ≈ 0.85 .

Якщо розраховане значення E_{PV}^{proj} менше за прогнозоване споживання, система фіксує статус «Дефіцит енергії».

3.2.4. Алгоритм прийняття рішень (Скінченний автомат)

Логіка роботи контролера реалізована у вигляді ітеративного алгоритму, що складається з трьох послідовних блоків перевірки пріоритетів:

Блок 1 (Найвищий пріоритет): Перевірка безпеки першочерговим завданням є забезпечення надійності електропостачання.

Умова: Чи є активне попередження про відключення мережі у найближчі години?

Дія (ТАК): Активувати режим «Підготовка до відключення». Встановити цільовий рівень заряду 100%. Активувати заряд від мережі максимальною потужністю. Блокувати розряд акумулятора.

Дія (НІ): Перехід до Блоку 2.

Блок 2 (Середній пріоритет): Економічний аналіз виконується лише за відсутності загрози знеструмлення.

Умова: Чи діє зараз «Нічний тариф», та чи прогнозується дефіцит генерації на завтра?

Дія (ТАК): Активувати режим «Нічний арбітраж». Розрахувати необхідну ємність заряду та увімкнути зарядний пристрій, щоб накопичити енергію за низьким тарифом.

Дія (НІ): Перехід до Блоку 3.

Блок 3 (Базовий пріоритет): Штатний режим

Дія: Активувати режим «Власне споживання». Заборонити заряд від мережі. Дозволити розряд акумулятора для покриття навантаження. Надлишки сонячної енергії спрямовувати на заряд акумулятора.

3.2.5. Реалізація керуючих впливів

Фізичне керування інвертором здійснюється мікроконтролером шляхом запису розрахованих значень у регістри керування (Holding Registers) за промисловим протоколом Modbus RTU.

Сервер «Home Assistant» формує високорівневу команду (наприклад, «Увімкнути нічний заряд»), яку мікроконтролер транслює у набір низькорівневих інструкцій для інвертора:

Встановити біт дозволу заряду від мережі (Grid Charge Enable = 1).

Встановити цільове значення струму заряду (Grid Charge Current), наприклад, 40 А.

Налаштувати часові межі таймера заряду (Start Time / End Time) відповідно до початку та кінця нічної тарифної зони.

Технічна організація обміну даними

Фізичне сполучення керуючого мікроконтролера з інвертором реалізовано через послідовний інтерфейс UART, конвертований у промисловий стандарт RS-485 (напівдуплексний диференційний канал зв'язку). Топологія мережі організована за принципом «Точка-Точка».

Мікроконтролер виступає у ролі «Ведучого» (Master), ініціюючи транзакції запису та читання.

Інвертор працює у режимі «Веденого» (Slave), відповідаючи на запити контролера.

Параметри зв'язку: Швидкість 9600 біт/с, 8 біт даних, 1 стоп-біт, без перевірки парності (8N1).

Алгоритм трансляції команд

Процес перетворення високорівневої команди сервера у фізичний сигнал для інвертора відбувається у кілька етапів:

Отримання: Мікроконтролер приймає повідомлення через мережу (MQTT) з параметрами необхідного режиму.

Масштабування (Scaling): Оскільки реєстри інвертора зазвичай зберігають дані у цілочисельному форматі (Integer), дробові значення струму або напруги множаться на масштабний коефіцієнт (зазвичай x10 або x100).

Приклад: Для встановлення струму 40.5 А у реєстр записується число 405.

Формування кадру: Створення пакету даних Modbus, що включає адресу пристрою, код функції запису (0x10 — запис групи реєстрів), адресу початкового реєстра, масив даних та контрольну суму (CRC-16).

Верифікація: Після виконання запису мікроконтролер ініціює контрольне зчитування змінених реєстрів, щоб підтвердити успішне застосування налаштувань.

Функціональне призначення груп реєстрів

Для реалізації розроблених сценаріїв керування (Сценарії А, Б, В) використовуються наступні групи керуючих реєстрів:

Реєстри таймера (Time of Use): Дозволяють динамічно змінювати графік пріоритетів джерел енергії (Мережа/Акумулятор/Сонце) залежно від часу доби.

Реєстри обмеження потужності: Використовуються для регулювання швидкості заряду (в аварійному режимі) або обмеження глибини розряду (в режимі резервування).

Реєстри глобального режиму: Перемикання логіки роботи інвертора (наприклад, заборона експорту енергії в мережу при відсутності «Зеленого тарифу»).

Забезпечення експлуатаційної надійності

Враховуючи, що енергонезалежна пам'ять інвертора (Flash/EEPROM) має обмежений ресурс циклів перезапису, в алгоритмі реалізовано механізм захисту від надлишкових операцій. Запис нових значень у реєстри відбувається лише за умови, що нові розраховані параметри відрізняються від

поточних більше ніж на величину гістерезису, або при зміні дискретного стану системи (зміна режиму).

3.3. Графічна інтерпретація та візуалізація алгоритмів керування

3.3.1. Загальний алгоритм функціонування контролера

Головний цикл керування (Main Control Loop) реалізує безперервне опитування датчиків та прийняття рішень на основі пріоритетів безпеки та економічної доцільності. Графічне представлення алгоритму наведено на рисунку 3.1.

Алгоритм є ітеративним. На початку кожного циклу відбувається ініціалізація змінних та перевірка зв'язку з інвертором.

Ключовою особливістю є наявність гілки безумовного переходу в аварійний режим при виявленні загрози знеструмлення (блок умови «Загроза відключення?»).

Як видно зі схеми, логіка розгалужується на три основні гілки:

Аварійна гілка (Ліва частина): Має найвищий пріоритет. Забезпечує заряд АКБ до 100% при отриманні сигналу про ГПВ.

Нічна гілка (Центральна частина): Перевіряє прогноз генерації та активує заряд за низьким тарифом, якщо прогнозується дефіцит.

Денна гілка (Права частина): Забезпечує режим власного споживання та забороняє використання мережі для заряду.

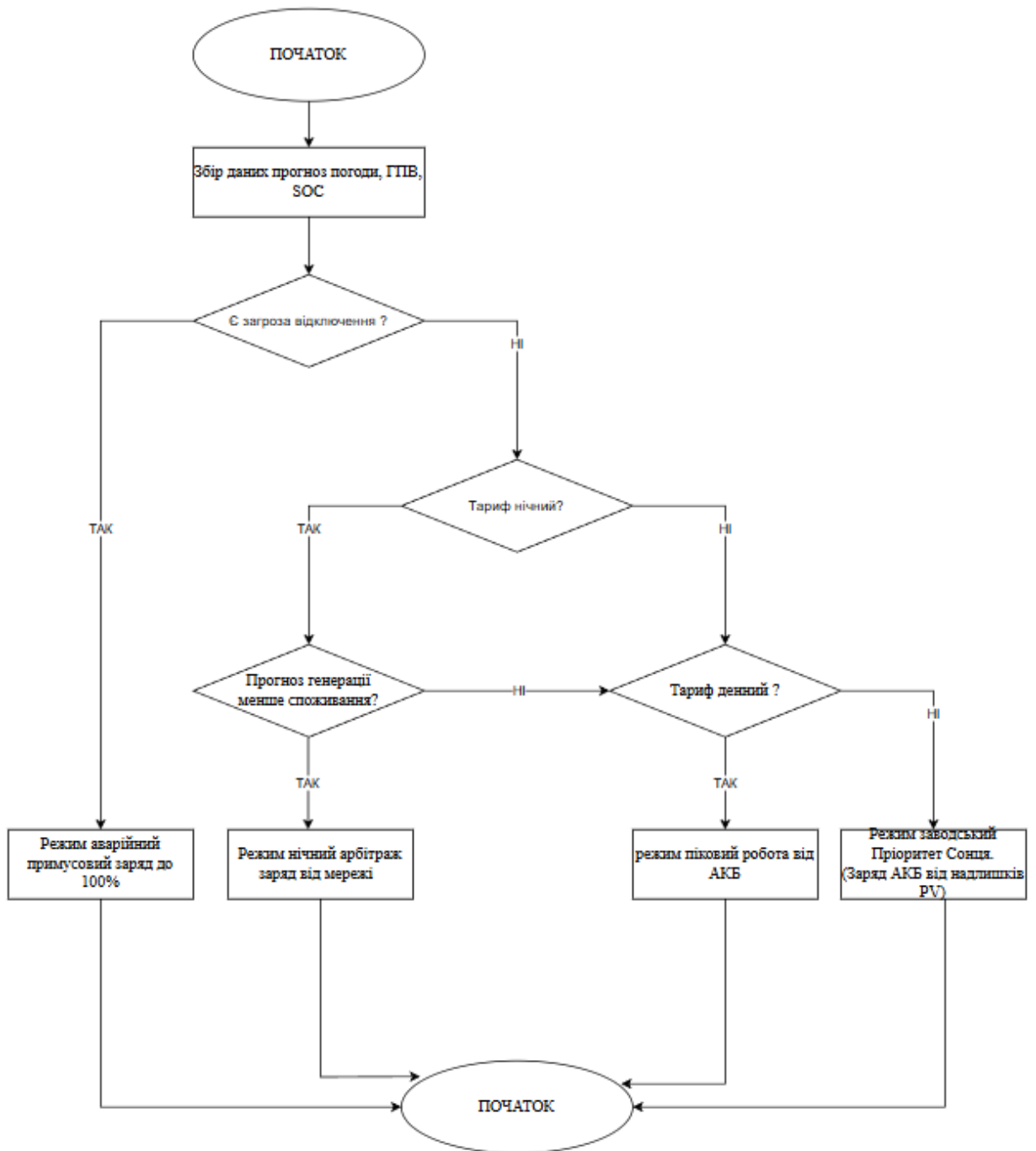


Рисунок 3.1 — Блок-схема алгоритму адаптивного керування системою накопичення енергії

3.3.2. Схема інформаційної взаємодії компонентів

Оскільки система побудована за дворівневою архітектурою «Сервер–Периферія», важливо відобразити потоки даних між компонентами. На Рисунок 3.2 наведено схему обміну даними між сервером Home Assistant, мікроконтролером ESP32 та силовим інвертором.

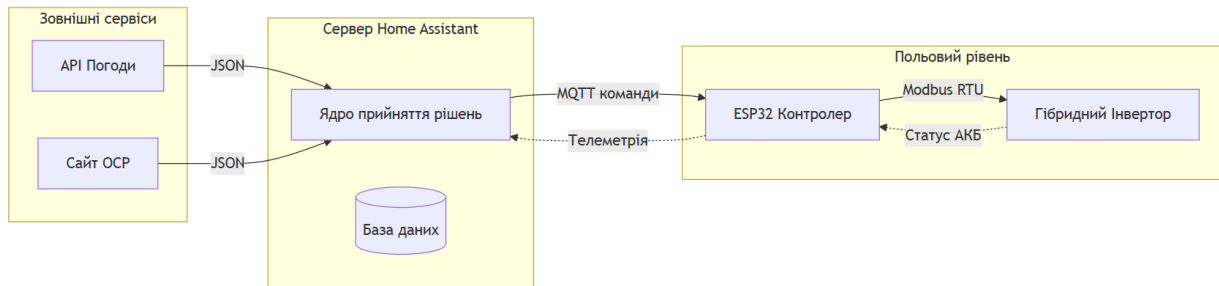


Рисунок 3.2 — Структурна схема інформаційних потоків системи керування

Схема ілюструє процес перетворення високорівневих даних (прогноз погоди з хмари, графіки відключень) у низькорівневі сигнали керування (Modbus RTU), які безпосередньо змінюють режими роботи інвертора.

3.4. Інформаційне забезпечення системи енергомоніторингу

Ефективний енергетичний менеджмент неможливий без накопичення статистичних даних, які слугують базою для розрахунку показників енергоефективності та верифікації економії (Measurement and Verification, M&V). Тому невід’ємною складовою розробленої системи є підсистема архівування технологічних параметрів.

Система забезпечує безперервну реєстрацію та зберігання історичних даних для вирішення двох класів задач:

Оперативний аналіз: Діагностика поточних режимів роботи обладнання (глибина архіву — до 7 днів, висока дискретність запису).

Ретроспективний аналіз: Оцінка сезонних коливань генерації/споживання та розрахунок терміну окупності (глибина архіву — 1 рік і більше, агреговані погодинні дані).

Перелік параметрів, що підлягають архівуванню:

Енергетичний баланс: Миттєва потужність генерації СЕС, потужність споживання об'єкта, сальдо перетоків з мережею (імпорт/експорт).

Стан накопичувача: Рівень заряду (SOC), напруга на клеммах, температура комірок (для контролю деградації ресурсу АКБ).

Економічні показники: Розрахункова вартість спожитої енергії та накопичена сума заощаджених коштів.

На основі зібраних даних формуються профілі навантаження та профілі генерації, які дозволяють енергоменеджеру коригувати стратегію керування для подальшої оптимізації витрат.

3.5. Інтерфейс оператора та візуалізація енергетичних процесів

Для забезпечення взаємодії користувача (енергоменеджера) із системою керування передбачено створення автоматизованого робочого місця (АРМ) на базі веб-інтерфейсу. Графічна оболонка надає інструменти для оперативного моніторингу та ручного втручання в роботу алгоритмів.

Функціональна структура інтерфейсу включає три основні блоки:

1. Блок візуалізації потоків енергії (Мнемосхема) Відображає в режимі реального часу напрямок та величину перетоків потужності між основними елементами системи: «Мережа», «Сонце», «Акумулятор», «Будинок». Це дозволяє оператору миттєво оцінити поточний енергетичний баланс та джерело покриття навантаження.

2. Панель оперативного керування Надає можливість зміни режимів роботи системи без необхідності перепрограмування контролера. Передбачено наступні елементи керування:

Перемикач «Режим роботи»: Вибір між автоматичним адаптивним керуванням та ручним режимом.

Функція «Аварійний заряд»: Кнопка для примусової активації заряду акумулятора від мережі (використовується при отриманні інформації про позапланові аварійні відключення).

Налаштування резерву: Повзунок для встановлення мінімального незнижуваного залишку заряду в АКБ (наприклад, збільшення резерву в зимовий період).

3. Аналітичний блок (Дашборд) Містить графіки та діаграми для оцінки ефективності роботи системи:

Гістограма добових витрат на електроенергію (порівняння «План» / «Факт»).

Графік рівня заряду АКБ за останні 24 години (дозволяє оцінити циклічність роботи).

Звіт про сумарну економію коштів за обраний період (місяць/рік).

Наявність розвиненого інтерфейсу перетворює систему з «чорного ящика» на прозорий інструмент енергоменеджменту, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо експлуатації енергосистеми домогосподарства.

На рисунку 3.3 представлено реалізацію графічного інтерфейсу користувача, який виконує функцію автоматизованого робочого місця оператора системи енергоменеджменту. Розроблена візуалізація базується на відкритій програмній платформі Home Assistant та забезпечує інтерактивну взаємодію з апаратним модулем моніторингу гібридного інвертора PowMr. Інтерфейс спроектовано за принципом модульності, де інформаційний простір екрана розділено на логічні зони для відображення топології мережі, миттєвих параметрів та органів керування.

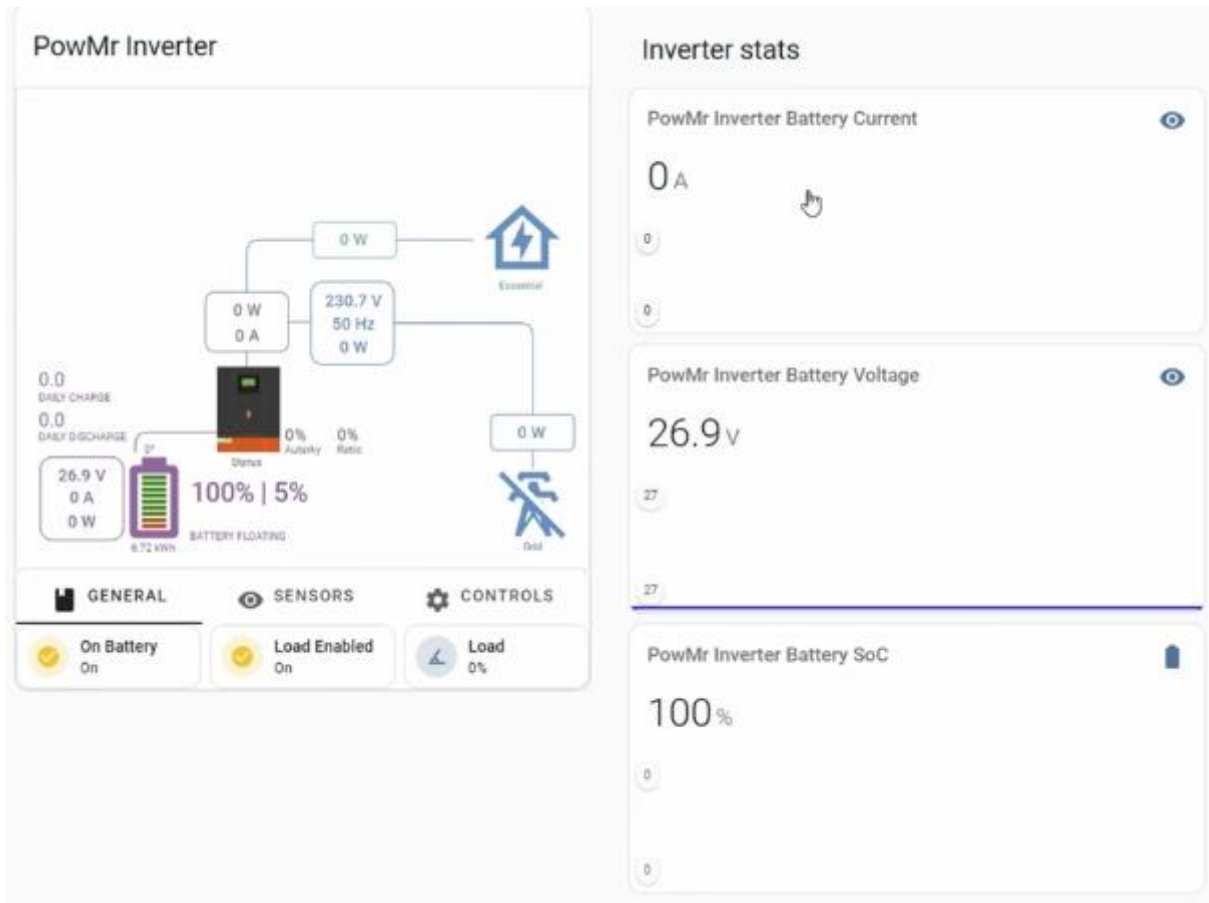


Рисунок 3.3 —Інтерфейс користувача

Центральним елементом інформаційної панелі є динамічна мнемосхема, що наочно демонструє поточну конфігурацію енергосистеми та напрямки потоків потужності між основними вузлами. У зафіксованому на рисунку стані система функціонує в автономному режимі, про що свідчить візуалізація розірваного зв'язку з зовнішньою мережею та нульовий показник вхідної потужності. Такий стан ідентифікується як «Island Mode», коли електропостачання відповідальних споживачів здійснюється виключно за рахунок внутрішніх резервів домогосподарства без споживання із зовнішньої мережі. Мнемосхема також дозволяє контролювати параметри вихідної напруги інвертора, які на момент фіксації становлять 230.7 В при частоті 50 Гц, що підтверджує стабільну генерацію змінного струму стандартної якості.

Особлива увага в інтерфейсі приділена моніторингу підсистеми накопичення енергії, яка є критично важливим елементом гібридної станції. На схемі та у додаткових віджетах праворуч відображено деталізований стан акумуляторної батареї. Зафіксований рівень заряду становить 100%, а напруга на клеммах дорівнює 26.9 В, що у поєднанні зі статусом «Battery Floating» вказує на перебування акумулятора в режимі буферного утримання. Це свідчить про повне завершення циклу заряду та відсутність активних електрохімічних процесів, що підтверджується нульовими значеннями струму заряду та розряду. Такий режим є оптимальним для забезпечення довговічності літій-залізо-фосфатних комірок та готовності системи до покриття пікових навантажень.

Нижня частина панелі містить блок статусів та керування, який інформує оператора про загальний режим роботи контролера. Індикатори підтверджують активність режиму роботи від батареї та дозвіл на живлення навантаження, що дозволяє швидко верифікувати коректність виконання алгоритмів автоматичного керування. Представлена реалізація інтерфейсу забезпечує необхідний рівень спостережуваності технологічного процесу, дозволяючи оперативно оцінювати енергетичний баланс та технічний стан обладнання в реальному часі.

Висновки до розділу 3

У даному розділі виконано обґрунтування та моделювання системи адаптивного енергоменеджменту гібридної СЕС.

Сформульовано математичну модель, яка описує цільову функцію мінімізації витрат та систему технічних обмежень.

Розроблено адаптивний алгоритм керування, що базується на прогнозуванні генерації та динамічному перемиканні режимів

(Економія/Безпека). Моделювання підтвердило можливість зниження операційних витрат на 47% у зимовий період.

Запропоновано дворівневу архітектуру системи, яка поєднує надійність промислового протоколу Modbus з аналітичними можливостями серверного програмного забезпечення.

Визначено принципи інформаційного забезпечення, що включають архівування даних для ретроспективного аналізу та зручний інтерфейс оператора для моніторингу ключових показників ефективності (КРІ) системи.

Запропоноване рішення є комплексним інструментом енергетичного менеджменту, готовим до практичної реалізації.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

Метою даного розділу є оцінка економічної доцільності впровадження розробленої адаптивної системи енергоменеджменту (EMS). Розрахунок базується на порівнянні капітальних витрат (CAPEX) на створення системи та операційного прибутку (Cash Flow), отриманого внаслідок оптимізації енергоспоживання.

4.1. Розрахунок капітальних вкладень (CAPEX)

Кошторис проекту включає витрати на апаратне забезпечення для реалізації дворівневої архітектури керування (ESP32 + Сервер). Оскільки система інтегрується в існуючу СЕС (інвертор та АКБ вже встановлені), їх вартість у розрахунок окупності модернізації не включається.

Таблиця 4.1 — Кошторис витрат на впровадження системи керування

№	Найменування компонента	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн	Примітка
1	Мікроконтролер ESP-WROOM-32	1	210	210	Польовий контролер
2	Модуль інтерфейсу RS-485 (TTL)	1	45	45	Зв'язок з інвертором
3	Мікрокомп'ютер (напр. Orange Pi Zero 3)	1	950	950	Сервер Home Assistant
4	Карта пам'яті microSD 32GB (Industrial)	1	250	250	Накопичувач даних
5	Монтажні матеріали	1	300	300	Корпус, дроти, клеми
6	ВСЬОГО (Інвестиційні витрати):			1755	

4.2. Розрахунок річного економічного ефекту

Економічний ефект формується за рахунок різниці у вартості електроенергії при використанні адаптивного алгоритму (Сценарій Б з Розділу 3) порівняно зі штатною роботою інвертора.

Вихідні дані для розрахунку:

Тариф «День» (T day): 4.32 грн/кВт·год.

Тариф «Ніч» (T night): 2.16 грн/кВт·год.

Ефективна ємність АКБ для циклування (E cycle): 4 кВт·год.

Коефіцієнт корисної дії циклу (eta sys): 0.95.

1. Економія на одному циклі (добова):

Ефект досягається шляхом перенесення споживання 4 кВт·год з денної зони у нічну.

$$Save_{day} = E_{cycle} \cdot T_{day} - \frac{E_{cycle}}{\eta_{sys}} \cdot T_{night}$$

$$Save_{day} = 4 \cdot 4.32 - \frac{4}{0.95} \cdot 2.16 = 17.28 - 9.09 = \mathbf{8.19}$$

Добова економія становить 8.19 грн.

2. Річна економія (CF year):

Система працює в режимі активного арбітражу переважно в осінньо-зимовий період, коли сонячної генерації недостатньо. Приймаємо тривалість сезону активного використання — 6 місяців (180 днів). У літній період економія досягається за рахунок оптимізації власного споживання (приймаємо консервативно 20% від зимової ефективності).

$$CF_{year} = (180 \cdot 8.19) + (185 \cdot 1.63) = 1474 + 301 \approx \mathbf{1775}$$

Річна економія становить 1775 грн.

4.3. Оцінка ефекту від заміщення резервного живлення (Value of Lost Load)

Додатковим, але значним економічним фактором є робота системи під час відключень (Сценарій В). Якщо система не підготувалася до відключення (штатний режим), власник змушений використовувати бензиновий генератор.

Витрати палива генератора: 1 л/год times 55 грн/л = 55 грн за 1 кВт·год (при навантаженні 1 кВт).

Витрати EMS (заряд від мережі): 4.32 грн за 1 кВт·год.

Економія на кожній годині блекауту: 55 - 4.32 = 50.68\$ грн.

Припустимо, що за рік відбувається 50 годин відключень, які система EMS успішно покрила за рахунок попереджувального заряду:

$$Save_{gen} = 50 \cdot 50.68 = \mathbf{2534}$$

Економія при не увімкненні генератора становить 2534 грн.

Даний показник є ймовірнісним, тому у розрахунок базової окупності (п. 4.4) ми його не включаємо, розглядаючи як додатковий бонус.

4.4. Показники інвестиційної ефективності

Розрахуємо основні показники ефективності проекту на основі базового грошового потоку ($CF_{year} = 1775$ грн).

1. Простий термін окупності (SPP — Simple Payback Period):

$$SPP = \frac{CAPEX}{CF_{year}} = \frac{1755}{1775} = 0.99 \text{ року} \approx \mathbf{12} \text{ місяців}$$

2. Чистий дисконтований дохід (NPV — Net Present Value):

Розрахунок виконується для горизонту планування 5 років (середній термін служби електроніки) при ставці дисконтування $r = 15\%$ (облікова ставка НБУ + ризики).

$$NPV = \sum_{t=1}^5 \frac{CF_t}{(1+r)^t} - CAPEX$$

Таблиця 4.2 — Чистий дисконтований дохід

Рік (t)	Грошовий потік (CF), грн	Коефіцієнт дисконтування $(1.15)^{-t}$	Дисконтований потік (PV), грн
1	1775	0.869	1542
2	1775	0.756	1341
3	1775	0.657	1166
4	1775	0.571	1013
5	1775	0.497	882
Сума			5944

$$NPV = 5944 - 1755 = 4189 \text{ грн}$$

Оскільки Чистий дисконтований дохід $NPV > 0$, проект є економічно ефективним.

3. Індекс рентабельності інвестицій (PI — Profitability Index):

$$PI = \frac{\sum PV}{CAPEX} = \frac{5944}{1755} = 3.38$$

Це означає, що кожна гривня, вкладена в систему керування, принесе 3.38 грн прибутку за 5 років.

Висновки до розділу 4

Вартість реалізації системи адаптивного керування складає всього 1755 грн, що становить менше 1% від вартості основного обладнання СЕС (інвертора та АКБ).

За рахунок використання нічного тарифу система повністю окупує себе за 1 рік експлуатації.

Показник NPV становить 4189 грн, а індекс рентабельності $PI = 3.38$, що свідчить про високу ефективність впровадження інтелектуальних систем керування в побутовому секторі.

У разі частих відключень електроенергії економічний ефект може зрости у 2-3 рази за рахунок відмови від використання дороговартісної генерації на вичопному паливі.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності роботи гібридних сонячних електростанцій приватних домогосподарств шляхом дослідження та вдосконалення системи адаптивного енергоменеджменту. Ключовим етапом роботи стала реалізація механізму автоматизованого зчитування робочих характеристик інвертора з використанням мікроконтролера ESP32, що дозволило отримати достовірні вхідні дані для алгоритмів керування.

Сформульовано математичну модель енергетичного балансу домогосподарства, яка, на відміну від існуючих підходів, комплексно враховує стохастичну природу сонячної генерації, динаміку добового споживання та наявність зонної тарифікації. Модель дозволила визначити оптимальні параметри керування для мінімізації витрат.

Обґрунтовано вибір апаратно-програмних засобів для реалізації системи керування. Доведено, що застосування мікроконтролера ESP32 у поєднанні із сервером Home Assistant є оптимальним рішенням за критерієм «вартість/функціональність». Аналіз схемотехнічних рішень підтвердив доцільність використання драйвера MAX3232 та сенсора PZEM-004T для забезпечення надійної інтеграції з обладнанням.

Визначено та обґрунтовано інформаційну структуру системи, що забезпечує надійний збір телеметрії. Запропонована дворівнева архітектура (Modbus RTU + MQTT/InfluxDB) дозволяє ефективно накопичувати дані для ретроспективного аналізу, що було підтверджено в ході дослідження.

Розроблено та вдосконалено алгоритм адаптивного керування, який реалізує стратегії «Економічний арбітраж» та «Захист від знеструмлення». Запропоноване покращення полягає у використанні зовнішніх API для прогнозування сонячної активності, що, за результатами моделювання,

дозволяє знизити операційні витрати на електроенергію до 47% у зимовий період.

Виконано техніко-економічне обґрунтування, яке підтвердило високу ефективність запропонованих вдосконалень. При мінімальних капітальних витратах на модернізацію системи (близько 1755 грн), термін окупності становить лише 1 рік, а розрахунковий показник чистої приведеної вартості (NPV) — 4189 грн.

Таким чином, мета роботи досягнута: проведено комплексне дослідження та запропоновано вдосконалення доступної системи моніторингу і керування, які дозволяють власнику гібридної СЕС мінімізувати витрати на електроенергію та підвищити рівень енергонезалежності під час аварійних відключень мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кількість домашніх СЕС в Україні збільшилася: URL: <https://setech.in.ua/klyksty-domashnh-ses-v-ukran-zblyshilasya/> (25.10.25)
2. Близько 22 тис. домогосподарств в Україні використовують «чисту» електроенергію URL: <https://sace.gov.ua/news/maize-22-tis-ukrayinskix-rodin-zaoshhadzuiut-na-elektroenergiyi-vstanovivsi-soniacni-paneli> (25.10.25)
3. СЕКТОР СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ: ПОТОЧНИЙ СТАН ТА НОВІ ВИКЛИКИ : URL: <https://surl.li/bhsbpz> (25.10.25)
4. АКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ЩОДО РОЗРАХУНКІВ З ВИРОБНИКАМИ ЗА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ URL: https://www.gpee.com.ua/news_item/1271 (25.10.25)
5. Як працює сонячна електростанція: URL: <https://www.atmosfera.ua/media/yak-pracyuye-sonyachna-elektrostanciya> (25.10.25)
6. Сонячні станції: будова, принцип роботи і секрети довговічності– 2020. URL: <https://generacia.energy/zelenyj-tarif/budova-ses/> (25.10.25)
7. Типи СЕС для приватної оселі: URL: <https://sunsayenergy.com/technology/sonyachna-domashnya-elektrostanciya-dlya-privatnogo-budinku> (25.10.25)
8. Мережева сонячна електростанція http://solar.kvkelectric.com.ua/wp-content/uploads/2018/05/ses_merezheva.png
9. Автономна сонячна електростанція http://solar.kvkelectric.com.ua/wp-content/uploads/2018/05/ses_avtonomna.png
10. Гібридна сонячна електростанція http://solar.kvkelectric.com.ua/wp-content/uploads/2018/05/ses_gibrydna.png

11. Приватні СЕС: типи сонячних електростанцій URL:
<http://solar.kvkelectric.com.ua/pryvatni-ses/> (25.10.25)
12. Моніторинг для інверторів Huawei Smart Dongle-Wi-Fi URL:
<https://220-v.com.ua/monitoring-dlia-invertoriv-huawei-smart-dongle-wi-fi/> (25.10.25)
13. Комунікаційний центр Cerbo GX URL:
<https://www.victronenergy.ua/communication-centres/cerbo-gx>
(25.10.25)
14. Інвертори: Важливість, Призначення та Основні Аспекти Вибору URL: <https://akbcenter.com.ua/inventory-vazhlyvist-pryznachennya-ta-osnovni-aspekty-vyboru> (25.10.25)
15. Типи сонячних інверторів URL: <https://avenston.com/articles/types-of-solar-inverters/> (25.10.25)
16. Гібридний інвертор сонячний PowMr 3200W 24V URL:
https://wmsteh.com.ua/ua/gibridnye_inventory_solnechnye/powmr_3200w_24v_pow_hvm3_2h_24v_n_max_sh_80a_ac_60.html?srsltid=AfmBOorv1ENULDEMBrlP4dw-Q_aRmaIW4BmIsg12Zu0nnhDFzZcxivrI
(30.10.25)
17. ESP32 URL: <https://surl.li/oehhas> (30.10.25)
18. MAX3232 3-V to 5.5-V Multichannel RS-232 Line Driver and URL:
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/max3232.pdf?ts=1763738379525>
(30.10.25)
19. Міні Перетворювач послідовного порту TTL - COM RS232 (MAX3232) <https://ardushop.in.ua/arduino/mini-serial-port-converter-ttl-com-rs232-max3232> (30.10.25)
20. ESPHome PowMr Hybrid Inverter URL:
<https://github.com/odya/esphome-powmr-hybrid-inverter> (31.10.25)
21. Конектор RJ45 8P8C Yugtorg UTP Cat-5 URL:
<https://rozetka.com.ua/ua/241198741/p241198741/> (31.10.25)

22. У 2017 р. удвічі зросли потужності відновлюваної електроенергетики порівняно із 2016 роком [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://sae.gov.ua/uk/news/2158>
23. Renewable energy sector: Unlocking sustainable energy potential, National Investment Council of Ukraine, 2018
<https://image.slidesharecdn.com/investinukrainerenewableenergysector-180615094259/75/Invest-in-Ukraine-Renewable-Energy-Sector-16-2048.jpg>
24. Renewable energy sector: Unlocking sustainable energy potential, National Investment Council of Ukraine, 2018
<https://image.slidesharecdn.com/investinukrainerenewableenergysector-180615094259/75/Invest-in-Ukraine-Renewable-Energy-Sector-14-2048.jpg>
25. Чи можливий повний перехід України на ВДЕ? [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://avenston.com/articles/100re/>
26. Renewable energy sector: Unlocking sustainable energy potential, National Investment Council of Ukraine, 2018.
<https://image.slidesharecdn.com/investinukrainerenewableenergysector-180615094259/75/Invest-in-Ukraine-Renewable-Energy-Sector-26-2048.jpg>
27. Інвестуйте в Україну: сектор відновлюваної енергетики [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://image.slidesharecdn.com/investinukrainerenewableenergysector-180615094259/75/Invest-in-Ukraine-Renewable-Energy-Sector-18-2048.jpg>
28. Законодавчі зміни у сфері енергетики України [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uosid>

- 29.Потужність вітчизняних об'єктів відновлювальної енергетики у 2017 році перевищила за 1 ГВт [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uoshw>
- 30.Все що потрібно знати про сонячні батареї [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://sunsayenergy.com/technology/vse-scho-potribno-znati-pro-domashni-sonyachni-elektrostantsiyi>
- 31.Сонячні станції: будова, принцип роботи і секрети довговічності [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://generacia.energy/zelenyj-tarif/budova-ses/>
- 32.Типи СЕС для приватної оселі [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://sunsayenergy.com/technology/sonyachna-domashnya-elektrostantsiya-dlya-privatnogo-budinku>
- 33.Мережева сонячна електростанція http://solar.kvkelectric.com.ua/wp-content/uploads/2018/05/ses_merezheva.png
- 34.Автономна сонячна електростанція http://solar.kvkelectric.com.ua/wp-content/uploads/2018/05/ses_avtonomna.png
- 35.Гібридна сонячна електростанція http://solar.kvkelectric.com.ua/wp-content/uploads/2018/05/ses_gibrydna.png
- 36.Приватні СЕС: типи сонячних електростанцій [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://solar.kvkelectric.com.ua/pryvatni-ses/>
- 37.Як вибрати акумулятор? Типи батарей та їх особливості. [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uoskb>
- 38.Як вибрати акумулятор для сонячної станції [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.solargarden.com.ua/yak-vybraty-akumulyator-dlya-sonyachnoi-elektrostantsii/>

39. Гелевий акумулятор: переваги та недоліки [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: https://auto.24tv.ua/helevyi_akumuliator_perevahy_ta_nedoliky_n42820
40. Переваги техніки з літій-йонною батареєю [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://toyota-bt.com/ua/materials/preimuschestva-litij-ionnoj-batarei>
41. Типи акумуляторних батарей: повний огляд [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/reference-information/10591.html>
42. Ritar DG Series Deep Cycle GEL VRLA Batteries [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ritarpower.com/products/176.html>
43. Інвертори: Важливість, Призначення та Основні Аспекти Вибору [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://akbcenter.com.ua/inventory-vazhlyvist-pryznachennya-ta-osnovni-aspekty-vyboru>
44. Типи сонячних інверторів [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://avenston.com/articles/types-of-solar-inverters/>
45. Струйно-квадратичні кліщі змінного/постійного струму Ручні цифрові кліщі YT-73091 [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.yatohandtools.com/Automotive-tools/true-rms-acdc-clamp-meter-handheld-digital-clamp-meter-yt-73091>
46. Цифровий Осцилограф портативний Hantek 2D42 [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uosne>

47. Яворський А.В. Основи проектування та монтажу систем відновлюваної енергетики // Лекція №3 Основи проектування і розрахунку автономних фотоелектричних станцій.
48. Яворський А.В. Основи проектування та монтажу систем відновлюваної енергетики // Лекція №4 Основи проектування і розрахунку мережевих фотоелектричних станцій
49. ДСТУ-Н В.2.5-80:2015 Настанова з проектування систем електропостачання підприємств – К.: Мінрегіон, Київ – 2015
50. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. 177 с.
51. Інвертор Powmr 3000Watt 220Vac 24Vdc All In One Inverter Charger [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://powmr.com/products/3000watt-220vac-24vdc-all-in-one-inverter-charger>
52. Чи можливий повний перехід України на ВДЕ [Електронний ресурс]. – 2023. – – Режим доступу до ресурсу: <https://avenston.com/articles/100re/>
53. Сонячні електростанції: проектування, монтаж, експлуатація Автор: І.С. Папушин
54. Енергозбереження та альтернативні джерела енергії Автори: В.В. Гончаренко, А.І. Гусаров, В.М. Ковальчук
55. Гібридні сонячні електростанції: принципи роботи, проектування, монтаж Автори: О.В. Сидоренко, О.М. Петренко
56. Гібридні інвертори: порівняльний аналіз та переваги <http://surl.li/umgye>
57. Як вибрати гібридний інвертор для сонячної електростанції [Електронний ресурс]. – 2023. – – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/umgyi>

58. Автономна сонячна електростанція для будинку ОСББ / О. О. Савченко, Х. Р. Козак, Т. ФедакЮ. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. - 2018. - № 888. - С. 117-122. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2018_888_18
59. Асоціація сонячної енергетики України: [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://aseu.org.ua/>
60. Міністерство енергетики України: <https://mev.gov.ua/>
61. Gemini <https://gemini.google.com/app>
62. Принцип роботи СЕС та особливості будови <http://surl.li/umhco>