

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

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики, ав-
томатики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

_____ /Каплун В.В./
(підпис)

_____ /Антипов Є.О./
(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

« _____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Оптимізація роботи генерації гібридних систем з використанням ІоТ»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

Доцент, кандидат технічних наук _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Усенко С.М.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Доцент, кандидат технічних наук _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Павленко В.М.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Мошкало М.О.
(ПІБ)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРИТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем
к.т.н доцент _____ Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

МОШКАЛО МИХАЙЛО ОЛЕКСАНДРОВИЧ
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)
Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи **«Оптимізація роботи гібридних енергетичних систем з використанням IoT»** затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 18.11.2024 р. № 2061 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14.11.2025 р.
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи ПУЕ, ДБН, ДНАОП, ГКД, ситуаційний план місцевості з геолокацією, архітектурний план будівлі, каталоги виробників обладнання

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Огляд сучасних гібридних енергетичних систем та IoT-технологій.
2. Моделювання об'єкта дослідження.
3. Розробка IoT-моделі оптимізації.
4. Оцінка ефективності впровадженого рішення
5. Безпека та охорона праці при експлуатації IoT-систем

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному забезпеченні MS Power Point

Дата видачі завдання «18» листопада 2024 р.

Керівник магістерської роботи _____ Павленко В.М.

Завдання прийняв до виконання _____ Мошкало М.О.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 74 с., 15 рис., 50 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Гібридна енергетична система, Інтернет речей, Оптимізація, Адаптивне керування, Енергетична автономність, MATLAB/Simulink, Кіберзахист.

Об'єкт дослідження – процес забезпечення енергетичної автономності навчального закладу в умовах нестабільного енергопостачання.

Предмет дослідження – параметри, режими роботи та ефективність гібридної фотоелектричної системи з резервним генератором, інтегрованої з IoT-компонентами.

Метою даної магістерської роботи є розробка та техніко-економічне обґрунтування автономної гібридної системи електроживлення для навчального закладу з використанням сонячних панелей, акумуляторних батарей, дизельного генератора та технологій Інтернету речей.

Робота складається з п'яти основних розділів. У першому розділі проведено аналіз сучасних гібридних енергетичних систем та IoT-архітектур, що дозволило обґрунтувати вибір фотоелектричної конфігурації з автоматизованим керуванням. У другому розділі змодельовано об'єкт дослідження, визначено профіль навантаження та проблеми, що виникають без оптимізованого керування. Третій розділ присвячено розробці IoT-моделі: обрано апаратно-програмну платформу, реалізовано алгоритми керування та виконано моделювання в середовищах MATLAB/Simulink, PVsyst і Python.

У четвертому, аналітичному розділі, проведено порівняльну оцінку роботи системи до та після впровадження IoT, розраховано економічну ефективність, визначено термін окупності та екологічні переваги. П'ятий розділ охоплює питання безпеки: проаналізовано ризики, запропоновано технічні засоби захисту, організаційні заходи та елементи кіберзахисту.

Наукова новизна роботи полягає у створенні адаптивної IoT-моделі оптимізації, яка враховує технічні, інформаційні та екологічні параметри системи, дозволяючи підвищити її ефективність, надійність та стійкість до зовнішніх впливів. Практичне

значення полягає у можливості впровадження моделі в освітніх установах, об'єктах критичної інфраструктури, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців з енергетики та автоматизації.

ABSTRACT

Qualification thesis: 74 pages, 15 figures, 26 references.

KEYWORDS: Hybrid Energy System, Internet of Things, Optimization, Adaptive Control, Energy Autonomy, MATLAB/Simulink, Cybersecurity.

Object of the study – the process of ensuring energy autonomy for an educational institution under conditions of unstable power supply.

Subject of the study – parameters, operating modes, and efficiency of a hybrid photovoltaic system with a backup generator integrated with IoT components.

The aim of this master's thesis is to develop and provide a techno-economic justification for an autonomous hybrid power supply system for an educational institution using solar panels, battery storage, a diesel generator, and Internet of Things (IoT) technologies.

The thesis consists of five main chapters. The first chapter presents an analysis of modern hybrid energy systems and IoT architectures, which substantiates the choice of a photovoltaic configuration with automated control. The second chapter models the research object, defines the load profile, and identifies problems that arise without optimized control. The third chapter focuses on the development of the IoT model: the hardware-software platform is selected, control algorithms are implemented, and modeling is performed in MATLAB/Simulink, PVsyst, and Python environments.

The fourth, analytical chapter provides a comparative assessment of system performance before and after IoT implementation, calculates economic efficiency, determines the payback period, and highlights environmental benefits. The fifth chapter addresses safety issues: risks are analyzed, technical protection measures, organizational procedures, and cybersecurity elements are proposed.

The scientific novelty of the work lies in the development of an adaptive IoT-based optimization model that accounts for the technical, informational, and environmental parameters of the system, thereby enhancing its efficiency, reliability, and resilience to external influences. The practical significance lies in the potential implementation of the model in educational institutions, critical infrastructure facilities, and in the training process for specialists in energy and automation.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ	12
1.1. Типи та принципи роботи гібридних енергосистем.....	12
1.2. ІоТ у керуванні енергосистемами: архітектура, протоколи, застосування	15
1.3. Аналіз сучасних досліджень, проєктів і нормативних документів.....	19
Висновки до розділу 1	20
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ	22
2.1. Характеристика обраної гібридної системи	22
2.2. Енергетичні баланси, профілі навантаження та робочі режими	24
2.3. Основні проблеми без оптимізованого керування.....	26
2.3.1. Типові проблеми при відсутності керування.....	27
2.3.2. Наслідки для навчального закладу.....	28
2.3.3. Потреба в оптимізації та автоматизації	29
Висновки до розділу 2	30
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ІОТ-МОДЕЛЕЙ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	31
3.1. Вибір апаратно-програмної платформи	31
3.2. Алгоритми оптимального керування генерацією та споживанням	32
3.3. Моделювання системи у середовищах MATLAB/SIMULINK, PVSYST, PYTHON.....	34
Висновки до розділу 3	39
РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕНОГО РІШЕННЯ.....	40
4.1. Порівняльний аналіз системи до та після впровадження ІоТ	40
4.2. Техніко-економічна оцінка	41
4.3. Екологічна доцільність і стійкість рішення	43

Висновки до розділу 4	45
РОЗДІЛ 5 БЕЗПЕКА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІОТ-СИСТЕМ	47
5.1. АНАЛІЗ РИЗИКІВ І ЗАГРОЗ ПІД ЧАС РОБОТИ ЕНЕРГОУСТАТКУВАННЯ.....	47
5.2. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНІ ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ.....	49
5.3. КІБЕРЗАХИСТ І ШИФРУВАННЯ ДАНИХ.....	50
Висновки до розділу 5	52
ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	56
ДОДАТКИ	62
Додаток А.....	62
Додаток Б	73
Додаток В.....	74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АВР – автоматичне вмикання резерву;

ГЕС – гібридні енергетичні системи;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВЕУ – вітроенергетична установка;

ДЕС – дизель-електрична станція;

СЕ – сонячний елемент;

СЕС – сонячна електростанція;

ФЕП – фотоелектрична панель;

ІоТ – інтернет речей

ВСТУП

У сучасних умовах глобального енергетичного переходу, зумовленого необхідністю зниження викидів парникових газів, підвищенням енергоефективності та забезпеченням енергетичної безпеки, особливої актуальності набуває впровадження гібридних енергетичних систем (ГЕС). Ці системи поєднують у собі різні джерела енергії — як відновлювані (сонячна, вітрова, біоенергетика), так і традиційні (дизельні генератори, мережеве живлення) — з метою забезпечення стабільного, надійного та економічно доцільного енергопостачання [1, 2].

Особливої ваги набуває застосування ГЕС у критично важливих об'єктах, зокрема в умовах надзвичайних ситуацій, воєнного стану або нестабільного енергопостачання. У таких випадках ефективне керування енергетичними потоками, балансування навантаження та забезпечення автономності системи є ключовими завданнями. Саме тут на перший план виходять технології Інтернету речей (Internet of Things, IoT), які дозволяють здійснювати моніторинг, аналіз та оптимізацію роботи енергосистем у режимі реального часу [3].

Інтеграція IoT у структуру ГЕС відкриває нові можливості для автоматизованого керування генерацією, накопиченням та споживанням енергії. Завдяки використанню сенсорів, контролерів, бездротових протоколів зв'язку та хмарних платформ, з'являється змога не лише підвищити ефективність роботи системи, а й забезпечити її адаптивність до змін зовнішніх умов та навантаження [4].

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері відновлюваної енергетики та цифрових технологій, питання оптимізації роботи саме комбінованих енергетичних систем із використанням IoT залишається відкритим. Особливо актуальним є створення моделей, які враховують реальні умови експлуатації, обмеження апаратної частини, особливості алгоритмів керування та специфіку об'єкта енергоспоживання.

Метою даної магістерської роботи є розробка та дослідження IoT-орієнтованої моделі оптимізації роботи комбінованої енергетичної системи, що включає відновлювані джерела енергії, акумуляторні накопичувачі та резервні генератори. Для досягнення цієї мети передбачено виконання таких завдань:

- аналіз сучасних типів ГЕС та архітектур IoT у сфері енергетики;
- побудова математичної та структурної моделі об'єкта дослідження;
- розробка алгоритмів оптимального керування;
- моделювання системи в середовищах MATLAB/Simulink та PVsyst;
- оцінка ефективності впровадженого рішення за техніко-економічними та екологічними критеріями.

Об'єктом дослідження є комбінована енергетична система з інтеграцією IoT-компонентів. Предметом дослідження є процеси оптимізації керування енергетичними потоками в умовах змінного навантаження та обмежених ресурсів.

Наукова новизна роботи полягає у створенні адаптивної IoT-моделі оптимізації, яка враховує як технічні, так і інформаційні параметри системи, що дозволяє підвищити її ефективність, надійність та стійкість до зовнішніх впливів.

Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження розробленої моделі в реальні об'єкти, зокрема в автономні енергетичні комплекси, критичну інфраструктуру, а також у навчальний процес для підготовки фахівців з енергетики та автоматизації.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ

1.1. Типи та принципи роботи гібридних енергосистем

Гібридні енергетичні системи (ГЕС) — це складні технічні комплекси, які поєднують у собі декілька джерел енергії з метою забезпечення безперебійного, ефективного та адаптивного енергопостачання. У сучасному світі, де зростає попит на енергетичну автономність, екологічну безпеку та цифрову керованість, ГЕС стають ключовим елементом переходу до сталих енергетичних рішень [1].

Основна ідея гібридної системи полягає в інтеграції різних джерел енергії — як відновлюваних (сонячна, вітрова, біоенергетика), так і традиційних (дизельні генератори, мережеве живлення) — з накопичувачами енергії та інтелектуальними системами керування. Такий підхід дозволяє компенсувати недоліки окремих джерел, забезпечити гнучкість у режимах роботи та підвищити загальну ефективність системи [2].

Типи гібридних енергетичних систем класифікуються за складом джерел, режимами роботи та рівнем автоматизації.

Найпоширенішими є такі конфігурації:

– Сонячна + вітрова + акумуляторна система — забезпечує добову стабільність генерації, особливо в регіонах з різною сезонною активністю.

– Сонячна + дизель-генератор — актуальна для об'єктів, де потрібне резервне живлення в умовах нестабільної погоди.

– Вітрова + біомаса — використовується в аграрних регіонах з доступом до біологічних відходів.

– Сонячна + гідроенергія — характерна для гірських районів з водними ресурсами.

– Гібридна система з підключенням до мережі — дозволяє продавати надлишкову енергію або отримувати резервне живлення.

Таблиця 1.1

Порівняння типів гібридних енергетичних систем

Тип гібридних енергосистем	Склад джерел	Основні переваги	Основні обмеження	Тип споживача	Рівень автономності
Сонячна + вітрова + акумулятор	PV, вітрова турбіна, батарея	Висока екологічність, добова стабільність	Залежність від погодних умов, висока вартість	Домогосподарства, школи, офіси	Високий
Сонячна + дизель-генератор	PV, дизель-генератор	Надійність, резервне живлення	Викиди CO ₂ , витрати на паливо	Медичні заклади, військові об'єкти	Середній-Високий
Вітрова + біомаса	Вітрова турбіна, біогенератор	Використання місцевих ресурсів, стабільність	Сезонність біомаси, шумове забруднення	Аграрні підприємства	Середній
Сонячна + гідроенергія	PV, міні-ГЕС	Висока надійність, низькі експлуатаційні витрати	Географічна прив'язка, складність будівництва	Гірські регіони, туризм	Високий
Гібридна з підключенням до мережі	PV, вітрова, мережа, батарея	Можливість продажу енергії, гнучкість	Залежність від тарифів, складність синхронізації	Промислові об'єкти, міські будівлі	Низький–середній

Принципи роботи гібридних систем базуються на кількох ключових механізмах:

– Синхронізація генерації — узгодження роботи різних джерел енергії для уникнення конфліктів у навантаженні.

– Балансування навантаження — розподіл енергетичних потоків відповідно до поточного попиту, з урахуванням пріоритетів.

– Накопичення надлишкової енергії — зберігання енергії в акумуляторах або інших накопичувачах для використання в періоди пікового навантаження.

– Резервування — використання дизель-генераторів або мережі як резервного джерела у випадку відмови основних компонентів.

– Адаптивне керування — застосування алгоритмів, які враховують зміну погодних умов, графіки споживання, технічний стан обладнання.

У сучасних реалізаціях ГЕС дедалі частіше використовуються цифрові системи керування, які дозволяють здійснювати моніторинг, прогнозування та оптимізацію роботи в режимі реального часу. Наприклад, система може автоматично перемикатися між джерелами залежно від рівня заряду акумуляторів, інтенсивності сонячного випромінювання або швидкості вітру. Такі функції реалізуються за допомогою мікроконтролерів, сенсорів, протоколів зв'язку та програмного забезпечення, що буде детально розглянуто в наступному підрозділі [5].

Особливу увагу слід приділити режимам роботи ГЕС. У денний час пріоритет надається сонячній генерації, у нічний — акумуляторам або дизельному резерву. Перехідні режими, наприклад, у похмуру погоду або при піковому навантаженні, вимагають складного балансування між джерелами. У цьому контексті важливим є поняття енергетичного балансу, тобто відповідності між генерацією та споживанням, що досягається за допомогою систем моніторингу, прогнозування та керування.

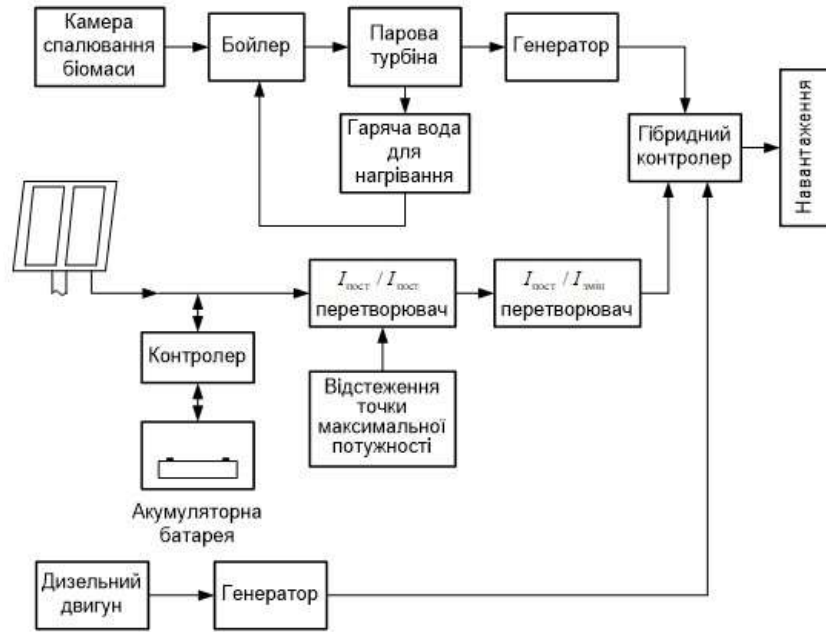


Рис. 1.1. Структурна схема типової гібридної енергетичної системи на основі використання енергії біопалива, сонячної енергії та дизель-генератора

Таким чином, гібридні енергетичні системи є не лише технічним рішенням, а й концептуальною моделлю сталого розвитку, яка поєднує енергетичну ефективність, екологічну відповідальність та цифрову трансформацію.

1.2. IoT у керуванні енергосистемами: архітектура, протоколи, застосування

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) є однією з ключових технологій цифрової трансформації енергетики. Його впровадження в структуру гібридних енергетичних систем відкриває нові можливості для моніторингу, аналізу та оптимізації енергетичних процесів у режимі реального часу. Завдяки IoT, енергосистеми набувають властивостей адаптивності, самоконтролю та прогнозування, що особливо важливо в умовах змінного навантаження, нестабільного енергопостачання або автономної роботи [7].

Типова архітектура IoT у керуванні енергосистемами складається з трьох рівнів:

Фізичний рівень (датчики та виконавчі пристрої) — включає сенсори температури, напруги, струму, освітленості, а також реле, контролери заряду, інвертори. Ці пристрої здійснюють первинний збір даних та керування обладнанням.

Комунікаційний рівень — забезпечує передачу даних між пристроями та центральною системою. Залежно від умов, використовуються дротові (RS-485, Ethernet) або бездротові протоколи (Wi-Fi, Zigbee, LoRaWAN, NB-IoT). Вибір протоколу залежить від дальності, енергоспоживання, швидкості передачі та стійкості до перешкод [8].

Аналітичний рівень (хмара або локальний сервер) — тут відбувається обробка даних, візуалізація, прийняття рішень. Використовуються хмарні платформи (AWS IoT, Azure IoT Hub, ThingsBoard) або локальні SCADA-системи. Саме на цьому рівні реалізуються алгоритми оптимізації, прогнозування та аварійного реагування.

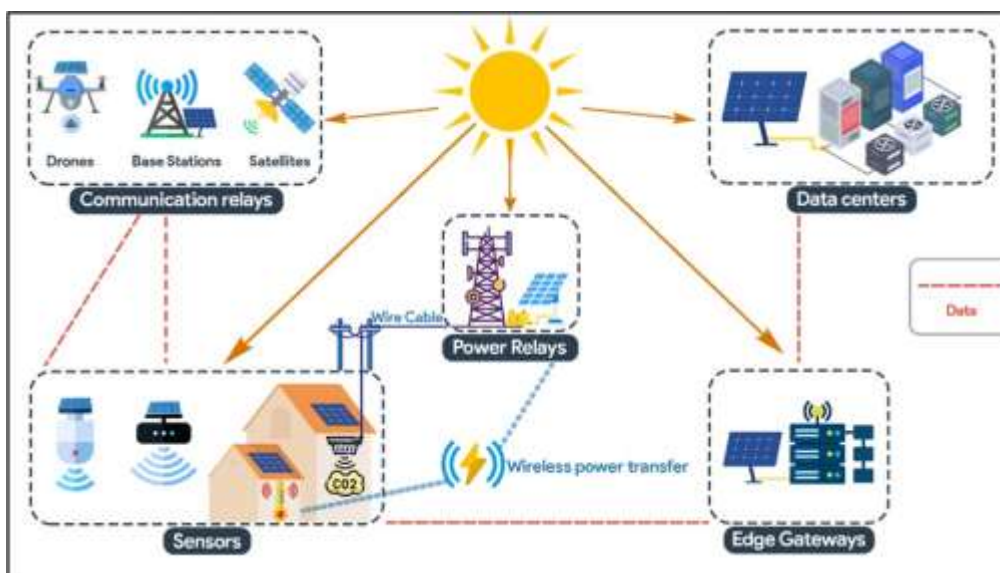


Рис.1.2. Архітектура IoT-системи в енергетиці на основі сонячного живлення

На рисунку 1.2 представлено приклад реалізації IoT-архітектури, що включає сенсори, шлюзи, комунікаційні вузли та хмарні сервіси, інтегровані в енергетичну систему на основі ВДЕ.

У сфері енергетики використовуються специфічні протоколи, які забезпечують надійність, безпеку та масштабованість системи:

– MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) — легкий протокол для передачі даних між пристроями, особливо ефективний у умовах обмеженого каналу зв'язку.

– Modbus — широко застосовується в промисловості, підтримує як дротову, так і бездротову передачу, сумісний із багатьма контролерами.

– Zigbee — енергоефективний протокол для локальних мереж, часто використовується в будинкових системах.

– LoRaWAN — протокол для передачі даних на великі відстані з низьким енергоспоживанням, актуальний для сільських або розподілених об'єктів.

– NB-IoT — мобільний протокол, що працює через стільникові мережі, забезпечує високу надійність і захист [9].

Таблиця 1.2

Порівняння IoT-протоколів для енергетичних систем

Протокол	Дальність передачі	Енергоспоживання	Швидкість передачі	Захист даних	Сумісність з обладнанням
MQTT	До 100 м (через Wi-Fi)	Низьке	Середня (до 256 Кбіт/с)	TLS/SSL	Arduino, ESP32, Raspberry Pi
Modbus	До 1200 м (RS-485)	Низьке	Висока (до 10 Мбіт/с)	CRC, паролі	PLC, промислові контролери
Zigbee	До 100 м (mesh)	Дуже низьке	Низька (до 250 Кбіт/с)	AES-128	Smart Home, сенсори

Продовження таблиці 1.2

LoRaWAN	До 15 км (сільська зона)	Дуже низьке	Низька (до 50 Кбіт/с)	AES-128	Віддалені об'єкти, датчики
NB-IoT	До 35 км (через LTE)	Низьке	Середня (до 100 Кбіт/с)	SIM, TLS	Мобільні модулі, промислові IoT

Застосування IoT у гібридних енергосистемах дозволяють реалізувати такі функції:

- Моніторинг генерації та споживання енергії — у реальному часі, з візуалізацією на панелях керування.
- Прогнозування навантаження — на основі історичних даних та погодних умов.
- Автоматичне перемикання режимів роботи — між джерелами, накопичувачами та резервами.
- Виявлення аномалій та аварійне реагування — наприклад, при перегріванні акумуляторів або перевантаженні інвертора.
- Оптимізація зарядки/розрядки батарей — з урахуванням графіків споживання та тарифів.
- Кіберзахист та шифрування даних — особливо важливо для критичних об'єктів.

IoT є не просто інструментом автоматизації, а стратегічним компонентом сучасної енергетичної системи, що забезпечує її гнучкість, надійність та стійкість до зовнішніх викликів.

1.3. Аналіз сучасних досліджень, проєктів і нормативних документів

Упродовж останніх десятиліть гібридні енергетичні системи (ГЕС) стали об'єктом активного наукового та прикладного дослідження, особливо в контексті інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та цифрових технологій. Зростання частки ВДЕ в енергетичному балансі країн, а також потреба в автономних, стійких і адаптивних системах живлення, зумовили появу нових підходів до проєктування, моделювання та керування ГЕС [11].

Одним із ключових напрямів досліджень є оптимізація балансу потужності в умовах змінного навантаження та нестабільної генерації. Застосування гібридних систем для оперативного керування енергетичним балансом, з урахуванням динамічних характеристик фотоелектричних та вітрових електростанцій. Автори акцентують увагу на необхідності розробки адаптивних алгоритмів, які враховують погодні умови, графіки споживання та технічні обмеження обладнання [11].

У контексті цифровізації енергетики, IoT-технології розглядаються як інструмент підвищення ефективності та надійності ГЕС. Аналітична доповідь Національного інституту стратегічних досліджень [12] висвітлює вплив новітніх енергетичних технологій на функціонування систем енергопостачання, зокрема в аспектах кібербезпеки, автоматизації та інтеграції хмарних сервісів. Згідно з доповіддю, впровадження IoT дозволяє здійснювати моніторинг у реальному часі, прогнозування навантаження, а також аварійне реагування, що критично важливо для об'єктів критичної інфраструктури.

На практичному рівні, в Україні реалізуються проєкти з впровадження ГЕС у комунальному секторі, аграрних підприємствах та освітніх установах. Наприклад, у межах програми «Енергоефективність громад» здійснюється встановлення сонячних панелей у поєднанні з акумуляторними системами та дизельними резервами, з інтеграцією IoT-моніторингу через платформи типу ThingsBoard або Blynk.

Ще одним важливим аспектом є нормативне регулювання. На сайті НЕК «Укренерго» [13] публікуються чинні галузеві нормативні документи, що регламентують будівництво, реконструкцію та експлуатацію енергетичних об'єктів. Особливу увагу слід звернути на «Мережеві кодекси» ENTSO-E, які визначають вимоги до синхронізації, частоти, потужності та безпеки в об'єднаній енергосистемі. Вони є основою для розробки технічних умов при інтеграції ГЕС у мережу.

У період 2022–2025 рр. спостерігається активне зростання кількості досліджень, присвячених оптимізації роботи гібридних енергетичних систем із використанням IoT, штучного інтелекту та адаптивних алгоритмів керування. Зокрема, у працях [27–50] розглядаються питання інтеграції сенсорних мереж, прогнозування навантаження, енергетичного балансування, кіберзахисту, а також застосування технологій штучного інтелекту для автоматизованого керування генерацією та споживанням енергії. Частина джерел індексується в наукометричних базах Scopus та Web of Science, що підтверджує їхню наукову вагу та актуальність для даної тематики. Окрему увагу приділено моделюванню ГЕС у середовищах MATLAB/Simulink, PVsyst та Python, що дозволяє реалізувати адаптивні стратегії керування в умовах змінного навантаження та обмежених ресурсів.

Отже, сучасні дослідження та нормативні документи підтверджують актуальність теми магістерської роботи, а також надають теоретичну та практичну базу для розробки IoT-орієнтованої моделі оптимізації гібридної енергетичної системи.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного огляду встановлено, що гібридні енергетичні системи є перспективним напрямом розвитку сучасної енергетики, особливо в умовах потреби в автономності, енергоефективності та стійкості до зовнішніх впливів. Їхня

структура базується на інтеграції різних джерел енергії — сонячної, вітрової, біоенергетики, дизельних генераторів — у поєднанні з накопичувачами та системами керування, що дозволяє забезпечити гнучке реагування на зміну навантаження та погодних умов.

Застосування технологій Інтернету речей (IoT) у керуванні гібридними енергосистемами відкриває нові можливості для моніторингу, аналізу та оптимізації енергетичних процесів. Типова IoT-архітектура включає сенсори, контролери, комунікаційні протоколи та хмарні платформи, які забезпечують збирання, передачу та обробку даних у режимі реального часу. Протоколи зв'язку, такі як MQTT, Modbus, Zigbee, LoRaWAN та NB-IoT, мають різні технічні характеристики, що дозволяє адаптувати систему до конкретних умов експлуатації.

Аналіз сучасних досліджень і нормативних документів підтверджує актуальність теми магістерської роботи. Наукові публікації акцентують увагу на необхідності розробки адаптивних алгоритмів керування, а практичні проекти демонструють ефективність впровадження ГЕС у різних секторах. Нормативна база, зокрема мережеві кодекси та технічні регламенти, визначає вимоги до інтеграції таких систем у загальну енергетичну інфраструктуру.

Гібридні енергетичні системи з інтеграцією IoT-технологій становлять комплексне рішення, що поєднує технічну ефективність, цифрову керованість та екологічну доцільність, і є обґрунтованою основою для подальшого моделювання та оптимізації в межах даної магістерської роботи.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика обраної гібридної системи

У межах даної магістерської роботи об'єктом дослідження обрано автономну гібридну енергетичну систему для забезпечення безперебійного електроживлення навчального закладу в місті П'ятихатки Дніпропетровської області. Вибір об'єкта зумовлений актуальністю проблеми енергетичної незалежності освітніх установ в умовах нестабільного електропостачання, а також потребою в інтеграції сучасних цифрових технологій для підвищення ефективності та надійності енергосистеми.

Обрана система поєднує три основні компоненти: фотоелектричну установку, акумуляторну батарею та дизель-генератор. Така конфігурація дозволяє забезпечити денну генерацію від сонячної енергії, накопичення надлишкової потужності для використання в нічний час, а також резервне живлення у разі несприятливих погодних умов або пікового навантаження.

Фотоелектрична частина системи складається з шести модулів JA Solar JAM60S20-375/MR, кожен потужністю 375 Вт, що забезпечує загальну встановлену потужність 4,5 кВт. Модулі з'єднані через контролер заряду Victron SmartSolar MPPT 150/70, який реалізує алгоритм відстеження точки максимальної потужності (MPPT) для оптимізації генерації. Перетворення постійного струму в змінний здійснюється за допомогою інвертора Victron Multiplus-II 48/5000/70-50, який також підтримує автоматичне перемикання між джерелами живлення.

Акумуляторна батарея представлена двома модулями Pylontech US3000C типу LiFePO₄, кожен ємністю 3,5 кВт·год, що забезпечує загальну накопичувальну

ємність 14,0 кВт·год. Обраний тип акумуляторів характеризується високою глибиною розряду, тривалим терміном служби та можливістю інтеграції з системами моніторингу через інтерфейси RS485 або CAN.

Резервне живлення забезпечується інверторним генератором Hyundai DHY6000SE потужністю 5,2 кВт, який активується у випадку критичного розряду акумуляторів або перевищення допустимого навантаження. Генератор обладнаний електростартером, що дозволяє реалізувати автоматичний запуск за сигналом від контролера.

Керування системою здійснюється за допомогою мікроконтролера ESP32 DevKit V1, який виконує функції моніторингу, логіки перемикання джерел, контролю заряду/розряду та передачі даних. До складу IoT-компонентів входять сенсори струму (INA219), температури (DS18B20), навантаження (ACS712), а також модулі бездротового зв'язку (Wi-Fi або LoRa), що дозволяє реалізувати дистанційний контроль через платформи Blynk або ThingsBoard.

Обладнання системи адаптоване до потреб навчального закладу, включаючи електричне опалення, кондиціонування, приготування їжі та гаряче водопостачання. Загальна встановлена потужність фотоелектричної установки становить 4,5 кВт, акумуляторна ємність — 14,0 кВт·год, а резервне живлення забезпечується дизель-генератором потужністю 5,2 кВт. Детальні технічні характеристики наведено в Додатку А.

Обрана система є збалансованою з точки зору вартості, складності реалізації та енергетичної ефективності. Вона дозволяє забезпечити автономну роботу навчального закладу протягом доби, мінімізувати витрати на паливо, а також інтегрувати цифрові технології для підвищення надійності, керованості та адаптивності. У подальших розділах буде здійснено моделювання цієї системи в середовищах MATLAB/Simulink та PVsyst, з урахуванням реальних погодних умов П'ятихаток, графіків навантаження та сценаріїв аварійного реагування.

2.2. Енергетичні баланси, профілі навантаження та робочі режими

Енергетичний баланс гібридної системи визначається співвідношенням між генерацією, накопиченням та споживанням електроенергії протягом добового циклу. У межах моделі, розробленої для навчального закладу в місті П'ятихатки, передбачається забезпечення повного спектра побутових і технічних потреб: приготування їжі, гарячого водопостачання, освітлення, електричного опалення та кондиціонування.

Типовий добовий профіль навантаження включає ранкову активність (06:00–09:00), денну фазу (09:00–17:00), вечірнє навантаження (17:00–22:00) та нічний режим. У ранкові години активується бойлер, електроплити, освітлення та частково опалення, що формує навантаження до 3,5–4,0 кВт. У денний період працює освітлення, вентиляція, кондиціонери, а також кухонне обладнання — загальне навантаження становить 4,5–5,5 кВт. У вечірній час навантаження знижується до 2,0–2,5 кВт, а вночі — до 0,8 кВт, переважно за рахунок підтримки температури та резервного освітлення.

Генерація електроенергії від фотоелектричних модулів у весняно-літній період становить до 18–20 кВт·год на добу, що дозволяє покрити частину денного навантаження та зарядити акумуляторну батарею. Акумуляторна ємність 14 кВт·год забезпечує живлення в нічний час або в періоди недостатньої генерації. При зниженні заряду нижче критичного порогу (2,0 кВт·год) активується дизель-генератор потужністю 5,2 кВт, який забезпечує живлення опалювального обладнання, бойлера, кондиціонерів та одночасно заряджає батареї.

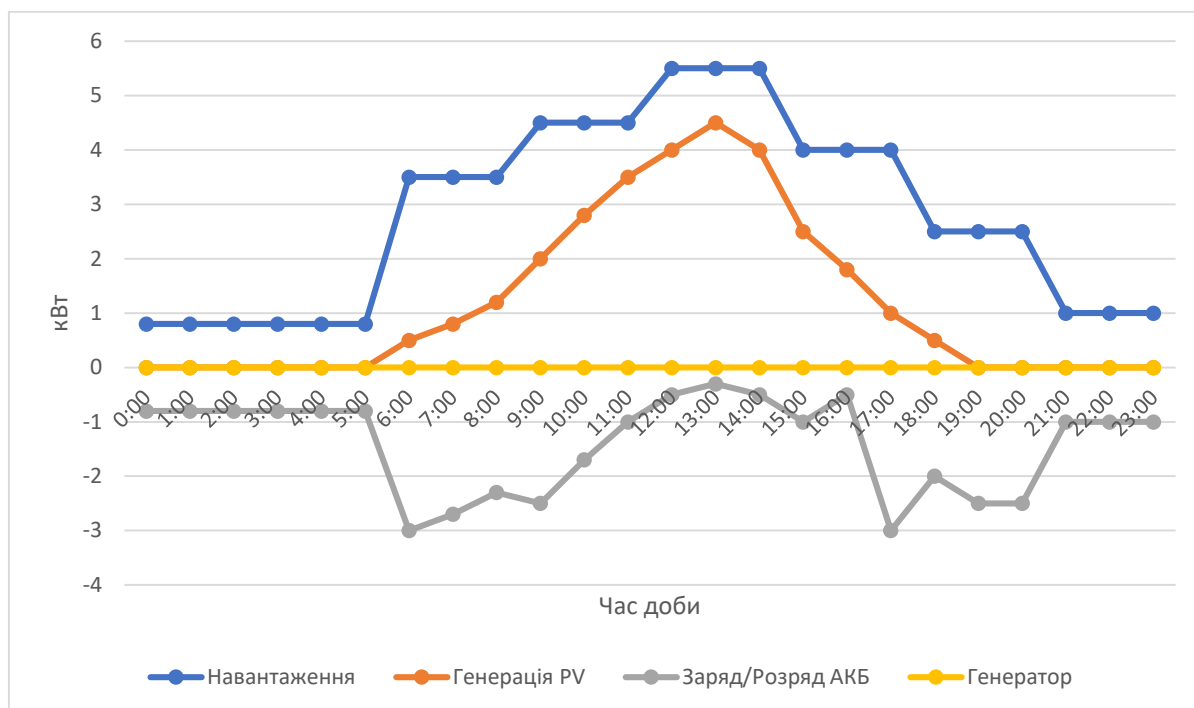


Рис.2.1. Добовий енергетичний баланс гібридної системи навчального закладу у місті П'ятихатки

На рисунку 2.1 представлено добовий енергетичний баланс гібридної системи, що забезпечує автономне живлення навчального закладу. Графік демонструє зміну навантаження, генерації від фотоелектричної установки, режимів заряджання/розряджання акумуляторної батареї та активації дизельного генератора протягом 24 годин, числові дані до графіка наведено в додатку Б. Видно, що в денний період генерація покриває основне навантаження, а надлишок енергії накопичується в АКБ. У вечірній та нічний час система переходить на живлення від акумулятора, а при його розрядженні активується резервний генератор, що забезпечує безперервність енергопостачання.

Навантаження системи має чітко виражені пікові періоди: з 11:00 до 15:00, коли одночасно працюють освітлення, кондиціонери та кухонне обладнання. У цей час генерація PV досягає максимуму, що дозволяє частково компенсувати спожи-

вання та зарядити АКБ. У вечірній період (17:00–22:00) навантаження зростає повторно, але генерація вже недостатня, тому система переходить на живлення від АКБ, а при її розрядженні — на генератор.

Робочі режими системи класифікуються за джерелом живлення:

- PV-режим – генерація покриває навантаження, батарея заряджається;
- Акумуляторний режим – навантаження живиться від батареї;
- Генераторний режим – генератор активується при низькому заряді або піковому навантаженні;
- Змішаний режим – одночасне використання PV та генератора для покриття дефіциту.

Система забезпечує адаптивне керування джерелами живлення відповідно до реального графіка споживання, що дозволяє досягти високої автономності, енергоефективності та надійності в умовах нестабільного енергопостачання.

2.3. Основні проблеми без оптимізованого керування

У сучасних умовах нестабільного енергопостачання, особливо в освітніх установах, що функціонують як укриття, питання надійності та автономності енергетичних систем набуває критичного значення. Гібридна система, яка поєднує фотоелектричну генерацію, акумуляторне накопичення та резервне дизельне живлення, має потенціал забезпечити безперервне функціонування закладу. Однак без впровадження оптимізованої логіки керування така система втрачає свою ефективність, надійність і здатність адаптуватися до змінних умов навантаження та генерації.

2.3.1. Типові проблеми при відсутності керування

Без логіки перемикання режимів система працює за принципом прямого споживання: енергія від PV надходить безпосередньо на навантаження, надлишки не накопичуються, а дефіцит не компенсується своєчасно. Це призводить до таких проблем:

Надлишкова генерація в денний період у години пікової генерації (12:00–15:00) PV виробляє більше енергії, ніж потрібно для поточного навантаження. Без керування ця енергія не накопичується в АКБ, а просто втрачається, що знижує загальну ефективність системи.

Розряд АКБ у критичний момент у вечірній та нічний період, коли PV не генерує, навантаження покривається з АКБ. Якщо батарея не була заряджена вдень, вона швидко розряджається, і система переходить у режим дефіциту. Без автоматичного перемикання на генератор — це призводить до повного знеструмлення.

Несвоєчасна активація генератора у системах без логіки генератор часто активується вручну або з затримкою, що не дозволяє вчасно компенсувати дефіцит. Це створює перебої в живленні критичних зон — кухні, опалення, освітлення, вентиляції.

Перевантаження генератора якщо генератор вмикається лише після повного розряду АКБ, він змушений одночасно жити навантаження і заряджати батарею, що перевищує його номінальну потужність. Це скорочує ресурс обладнання та підвищує витрати пального.

Відсутність адаптації до погодних умов без врахування температури зовнішнього середовища система не регулює роботу кондиціонерів та опалення. Наприклад, у спекотні дні кондиціонери можуть створити пікове навантаження, яке не буде компенсоване генерацією, якщо система не передбачає пріоритети.

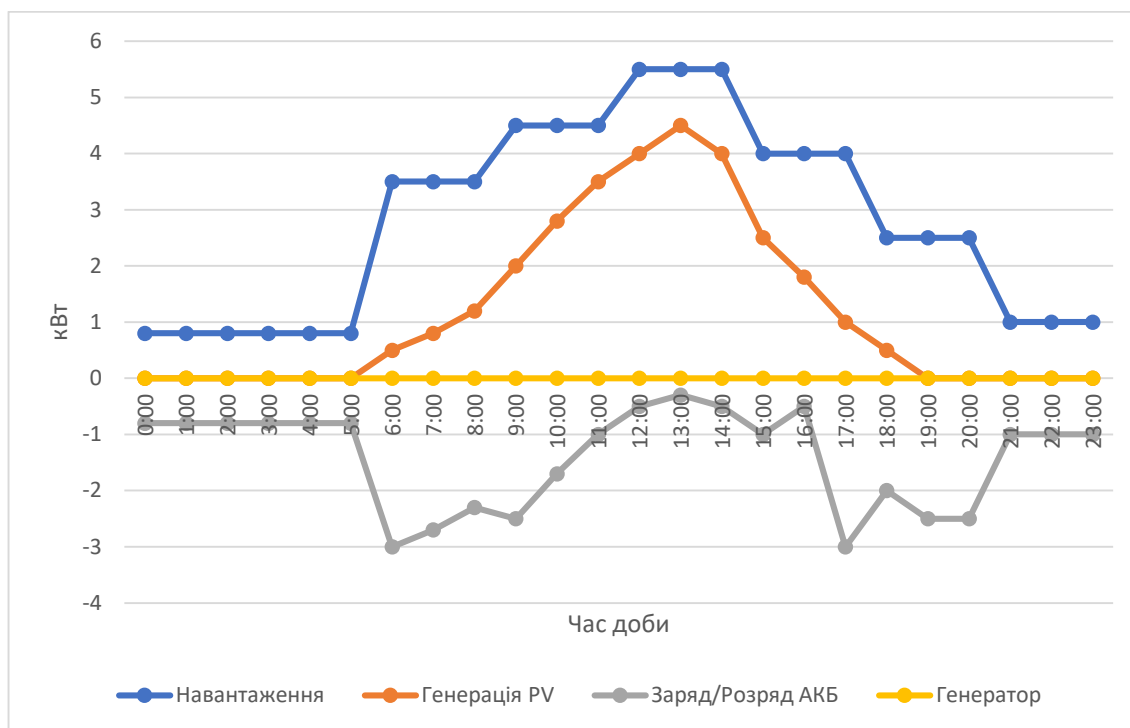


Рис.2.2. Добовий енергетичний баланс без логіки керування

Графік ілюструє ситуацію, коли система працює без оптимізованого керування: АКБ розряджається до нуля, генератор активується із запізненням або надмірно, а надлишкова генерація PV не накопичується. Це призводить до перебоїв у живленні та перевантаження обладнання.

2.3.2. Наслідки для навчального закладу

Для навчального закладу, що виконує функції укриття, наслідки неефективного керування енергетичною системою можуть бути критичними.

Перебої в освітленні та вентиляції без стабільного живлення системи освітлення та вентиляції не можуть працювати безперервно, що створює ризики для перебування людей в укритті.

Втрата тепла та гарячої води бойлери та електроопалення потребують стабільного живлення. У разі розряду АКБ та несвоєчасної активації генератора температура в приміщенні падає, а доступ до гарячої води припиняється.

Неможливість підтримки температурного режиму кондиціонери та обігрівачі мають працювати відповідно до температури зовнішнього середовища. Без керування вони або не вмикаються, або працюють надмірно, створюючи перевантаження.

Ризик для безпеки та навчального процесу перебої в енергопостачанні порушують навчальний процес, створюють психологічний дискомфорт, а в умовах надзвичайної ситуації — загрозу для життя і здоров'я.

2.3.3. Потреба в оптимізації та автоматизації

Оптимізоване керування дозволяє системі працювати адаптивно, враховуючи: поточне навантаження, рівень генерації PV, залишкову ємність АКБ, температурні умови, пріоритети споживачів (освітлення, опалення, вентиляція).

Логіка перемикавання режимів, описана в розділі 2.2, дозволяє: заряджати АКБ у години надлишкової генерації → розряджати АКБ у години дефіциту → активувати генератор при критичному розряді → забезпечити безперервне живлення пріоритетних зон → зменшити витрати пального та знос обладнання.

Впровадження автоматизованої логіки керування є не просто бажаним, а необхідним елементом для забезпечення автономності, енергоефективності та безпеки навчального закладу. Це дозволяє перетворити гібридну систему з набору обладнання на повноцінну енергетичну платформу, здатну адаптуватися до реальних умов експлуатації.

Висновки до розділу 2

У ході моделювання добового енергетичного балансу гібридної системи для навчального закладу було встановлено, що ефективне функціонування системи можливе лише за умови впровадження оптимізованої логіки керування. Побудована модель дозволила визначити характерні фази навантаження, пікові періоди споживання, а також оцінити потенціал фотоелектричної генерації та акумуляторного накопичення.

Аналіз показав, що без логіки перемикання режимів система не здатна адаптуватися до змінних умов: надлишкова генерація не накопичується, АКБ розряджається до критичного рівня, а генератор активується із запізненням або надмірно. Це призводить до перебоїв у живленні, перевантаження обладнання та зниження загальної енергоефективності.

Впровадження логіки керування дозволяє забезпечити адаптивне живлення, своєчасне заряджання та розряджання АКБ, а також раціональне використання резервного генератора. Такий підхід забезпечує безперервність роботи навчального закладу, зменшує витрати пального та підвищує надійність системи в умовах нестабільного зовнішнього живлення.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ІoT-МОДЕЛЕЙ ОПТИМІЗАЦІЇ

3.1. Вибір апаратно-програмної платформи

Для реалізації ІoT-моделі оптимізації енергетичної системи навчального закладу було обрано апаратно-програмну платформу, яка забезпечує збір, обробку та передачу даних між компонентами системи в режимі реального часу. Основними критеріями вибору стали сумісність з енергетичним обладнанням, підтримка промислових протоколів зв'язку, можливість локального та хмарного зберігання даних, а також доступність бібліотек для моделювання в середовищах Python, MATLAB та Simulink.

Апаратна частина моделі включає мікроконтролер ESP32 або одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4, які забезпечують взаємодію з датчиками струму, напруги, температури, а також з реле навантаження для керування генератором. Датчики типу DS18B20, ACS712 та INA219 дозволяють здійснювати моніторинг параметрів системи з високою точністю. Реле твердотільного типу (SSR) забезпечують безпечне перемикання режимів живлення без механічного зносу.

Програмна частина реалізується через середовище Node-RED, яке дозволяє візуально моделювати логіку керування, а також через скрипти на Python, що відповідають за обробку даних, прогнозування навантаження та прийняття рішень. Для моделювання енергетичних потоків використовується MATLAB/Simulink, а для оцінки генерації фотоелектричних модулів за погодними умовами — середовище PVsyst.

Обрана платформа дозволяє інтегрувати всі компоненти системи в єдину логічну структуру, забезпечуючи адаптивне керування, гнучке масштабування та

можливість віддаленого моніторингу. Такий підхід є оптимальним для умов навчального закладу, що виконує функції укриття, оскільки дозволяє забезпечити стабільне живлення критичних зон, зменшити витрати пального та підвищити загальну енергоефективність системи.

3.2. Алгоритми оптимального керування генерацією та споживанням

Оптимальне керування гібридною енергетичною системою передбачає автоматичне перемикання між джерелами живлення залежно від поточного навантаження, рівня генерації, залишкового заряду акумуляторної батареї та температурних умов. Основна мета алгоритму — забезпечити безперервне живлення критичних зон, мінімізувати витрати пального та продовжити ресурс обладнання.

У межах IoT-моделі реалізовано логіку, яка враховує чотири основні режими роботи: живлення від PV, живлення від АКБ, живлення від генератора та змішаний режим. Перемикання між режимами відбувається на основі порогових значень, які задаються у вигляді змінних у програмному коді.

Базовий алгоритм керування реалізовано у вигляді умовних операторів, які виконуються циклічно з інтервалом у 5 хвилин. На кожному кроці система зчитує значення потужності навантаження, потужності генерації, рівня заряду АКБ та температури. На основі цих даних приймається рішення про джерело живлення та необхідність заряджання або розряджання батареї.

У реальній реалізації алгоритм доповнюється перевіркою температури, щоб обмежити роботу кондиціонерів у разі дефіциту енергії, а також врахуванням пріоритетів споживачів. Наприклад, освітлення та вентиляція мають вищий пріоритет, ніж зарядка мобільних пристроїв або робота побутової техніки.

У середовищі Node-RED ця логіка реалізується у вигляді блок-схеми з вузлами типу “if/else”, “function”, “switch” та “inject”. У Python-реалізації використовуються цикли з умовами, а також бібліотеки pandas для обробки даних та matplotlib для візуалізації.

У рамках дослідження реалізовано п'ять алгоритмів оптимального керування енергетичною системою, кожен з яких візуалізовано у вигляді блок-схеми Додаток В. Алгоритми охоплюють ключові аспекти функціонування гібридної енергетичної системи, зокрема:

Алгоритм вибору джерела живлення залежно від потужності сонячної генерації (PV), навантаження (Load) та рівня заряду акумулятора (SOC);

Алгоритм розподілу потужності за пріоритетом, що забезпечує енергопостачання критичних споживачів у разі обмежених ресурсів;

Алгоритм керування кондиціонером з урахуванням температури та SOC для підвищення енергоефективності;

Етапний алгоритм керування живленням, який реалізує циклічну перевірку параметрів та передає команди через MQTT-протокол;

Узагальнений алгоритм оптимального керування ГЕС, що поєднує логіку перемикання між PV, АКБ та генератором.

Візуалізація алгоритмів здійснена за допомогою платформи MyLens.ai, що дозволило чітко представити логіку прийняття рішень та забезпечити наочність для подальшого аналізу та впровадження.

Результатом роботи алгоритму є адаптивне керування енергетичними потоками, яке дозволяє уникнути перевантаження генератора, запобігти повному розряду АКБ та забезпечити стабільне живлення навіть у разі відсутності зовнішнього енергопостачання.

3.3. Моделювання системи у середовищах MATLAB/Simulink, PVsyst, Python

Для перевірки працездатності IoT-моделі оптимізації гібридної енергетичної системи було проведено моделювання у трьох середовищах: MATLAB/Simulink, PVsyst та Python. Кожне з них дозволяє реалізувати окремі аспекти системи — від енергетичного балансу до логіки керування та прогнозування.

У середовищі MATLAB/Simulink побудовано структурну модель енергетичної системи, яка включає блоки генерації, накопичення, навантаження та керування. Модель дозволяє візуалізувати потоки енергії, оцінити динаміку заряду АКБ, а також протестувати алгоритми перемикавання режимів у реальному часі. Для моделювання використано стандартні бібліотеки Simscape Power Systems, а також власні логічні блоки, що відповідають за прийняття рішень.

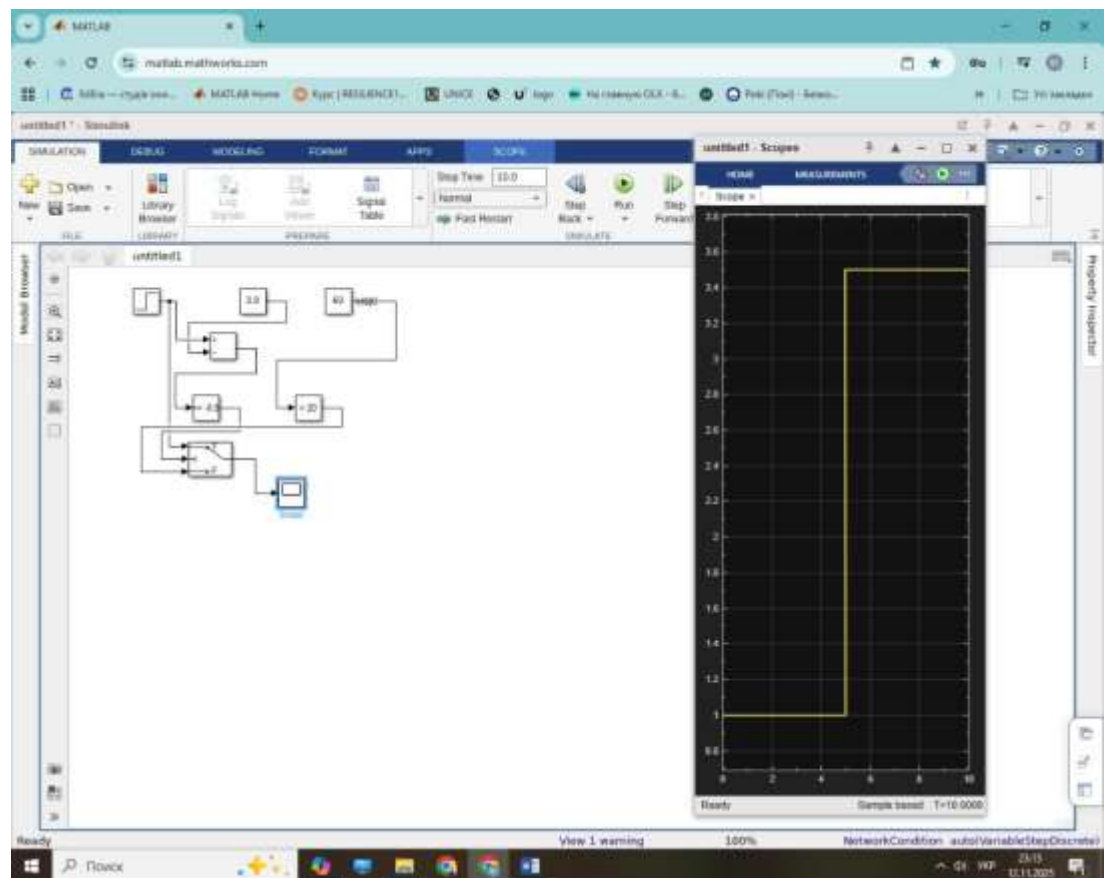


Рис. 3.3. Графік перемикавання джерел живлення у моделі Simulink

На графіку показано зміну активного джерела живлення залежно від умов генерації та заряду акумуляторної батареї. Стрибок сигналу свідчить про перемикання логіки керування.

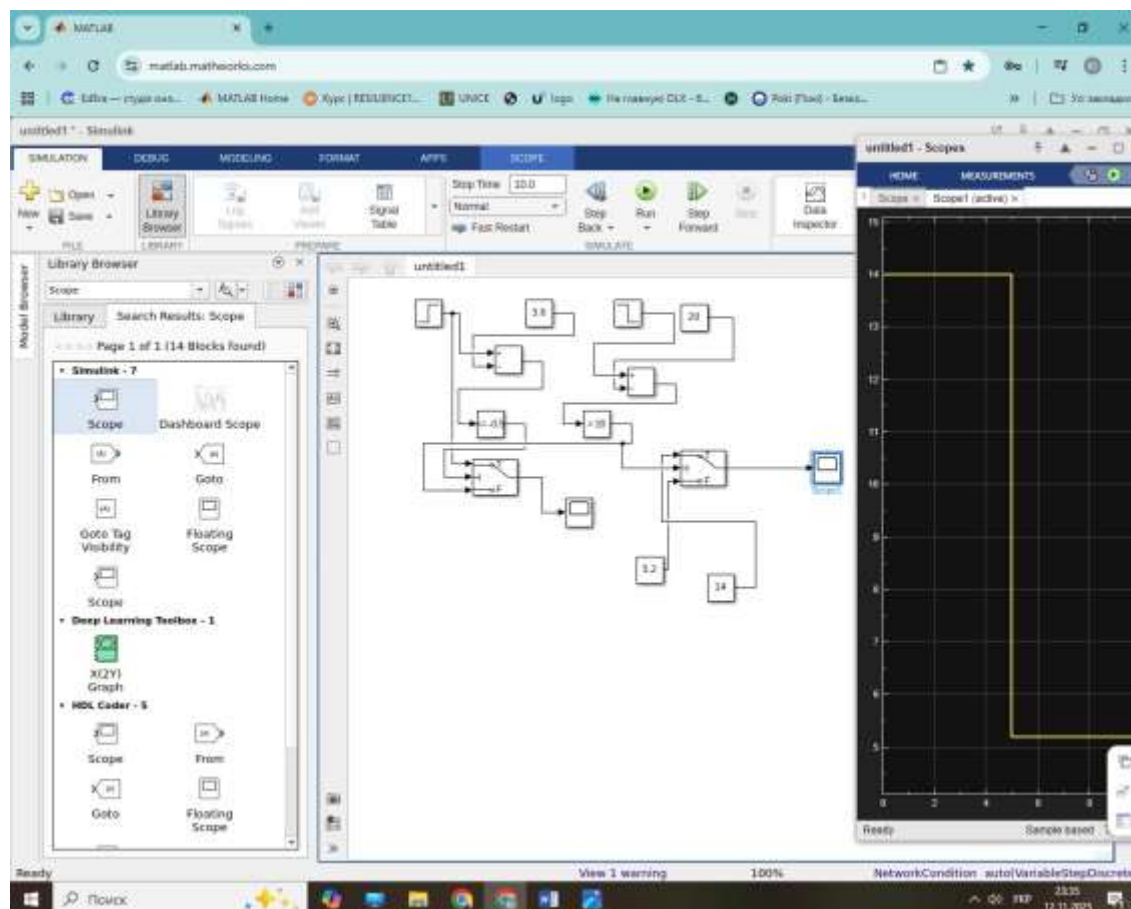


Рис. 3.4. Графік перемикання між АКБ та генератором у моделі Simulink

На рисунку 3.4 показано результат моделювання логіки перемикання джерел живлення залежно від рівня заряду акумуляторної батареї. У моделі використано реальні значення потужності АКБ та генератора, що відповідають технічним характеристикам обраного обладнання.

У PVsyst здійснено оцінку генерації фотоелектричних модулів на основі кліматичних даних для регіону розташування навчального закладу. Було враховано

орієнтацію панелей, кут нахилу, тип інвертора та втрати на кабелях. Результати моделювання підтвердили, що в умовах середньої інсоляції система здатна забезпечити до 60–70 % добового навантаження без залучення генератора.

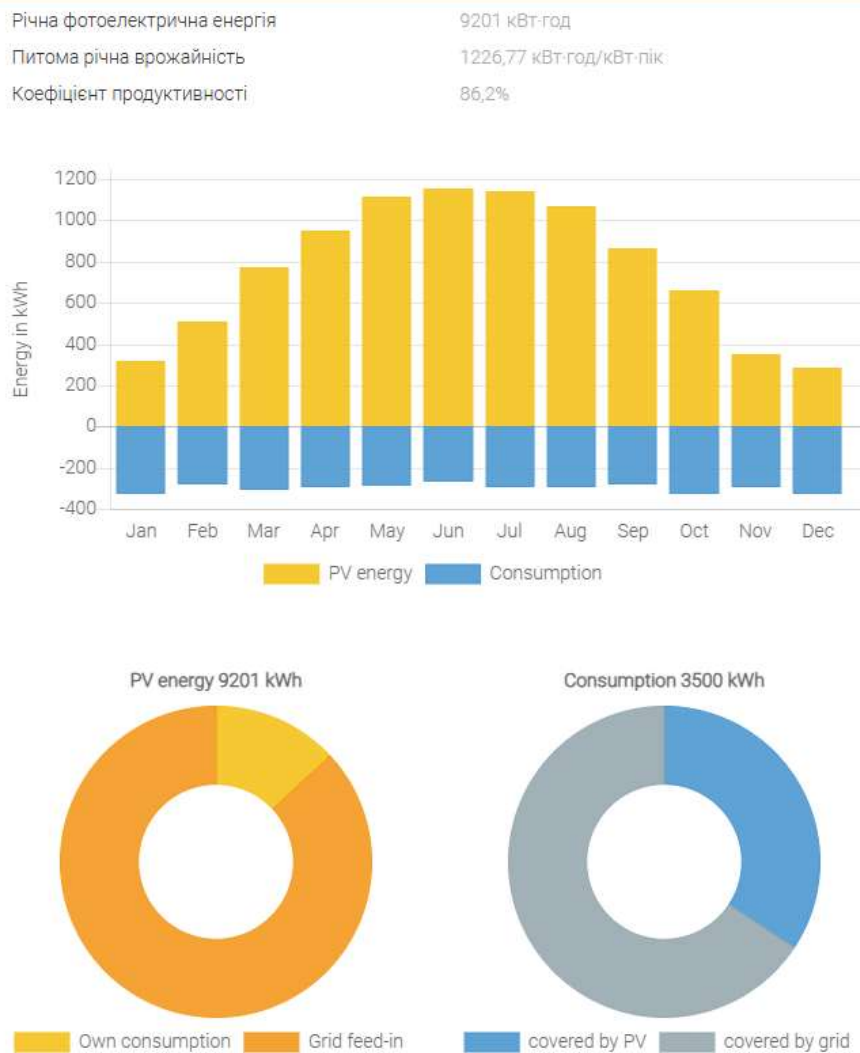


Рис. 3.5. Щомісячна генерація фотоелектричної системи та порівняння зі споживанням електроенергії

Рисунок 3.5 демонструє щомісячну генерацію фотоелектричної системи у порівнянні з енергоспоживанням навчального закладу. Жовті стовпчики відображають обсяг виробленої електроенергії від сонячних панелей, а сині — відповідне споживання. Максимальна генерація спостерігається в літні місяці (червень–серпень),

коли вироблення перевищує потреби, тоді як у зимовий період (грудень–лютий) частка покриття зменшується. Загальна річна генерація становить 9201 кВт·год, що значно перевищує річне споживання (3500 кВт·год), з питомою врожайністю 1226,77 кВт·год/кВт-пік та коефіцієнтом продуктивності 86,2%.

Річна фотоелектрична енергія	9201 кВт·год
з яких власне споживання	1201 кВт·год
з них живлення від мережі	8000 кВт·год
Власне споживання енергії	13,1%
Споживання	3500 кВт·год
покрито фотоелектричним обладнанням	1201 кВт·год
покритий сіткою	2344 кВт·год
Сонячна частка	34,3%
Уникнення викидів CO ₂	4923 кг/рік

Рис. 3.6. Розподіл фотоелектричної енергії та джерел покриття споживання

Рисунок 3.6 ілюструє розподіл енергії між власним споживанням, живленням від мережі та надлишковим виробленням. З отриманої фотоелектричної енергії лише 1201 кВт·год використовується безпосередньо, решта (8000 кВт·год) передається до мережі. Водночас, із загального споживання 3500 кВт·год, лише 34,3% покривається сонячною енергією, а 2344 кВт·год надходить з мережі. Це свідчить про необхідність оптимізації системи накопичення або керування навантаженням. Додатково, щорічне уникнення викидів CO₂ становить 4923 кг, що підтверджує екологічну доцільність впровадження системи.

У Python реалізовано алгоритми логіки керування, які враховують рівень заряду АКБ, поточне навантаження, генерацію PV та температурні умови. Модель

дозволяє здійснювати симуляцію добового балансу, прогнозувати навантаження на основі історичних даних, а також візуалізувати результати у вигляді графіків.

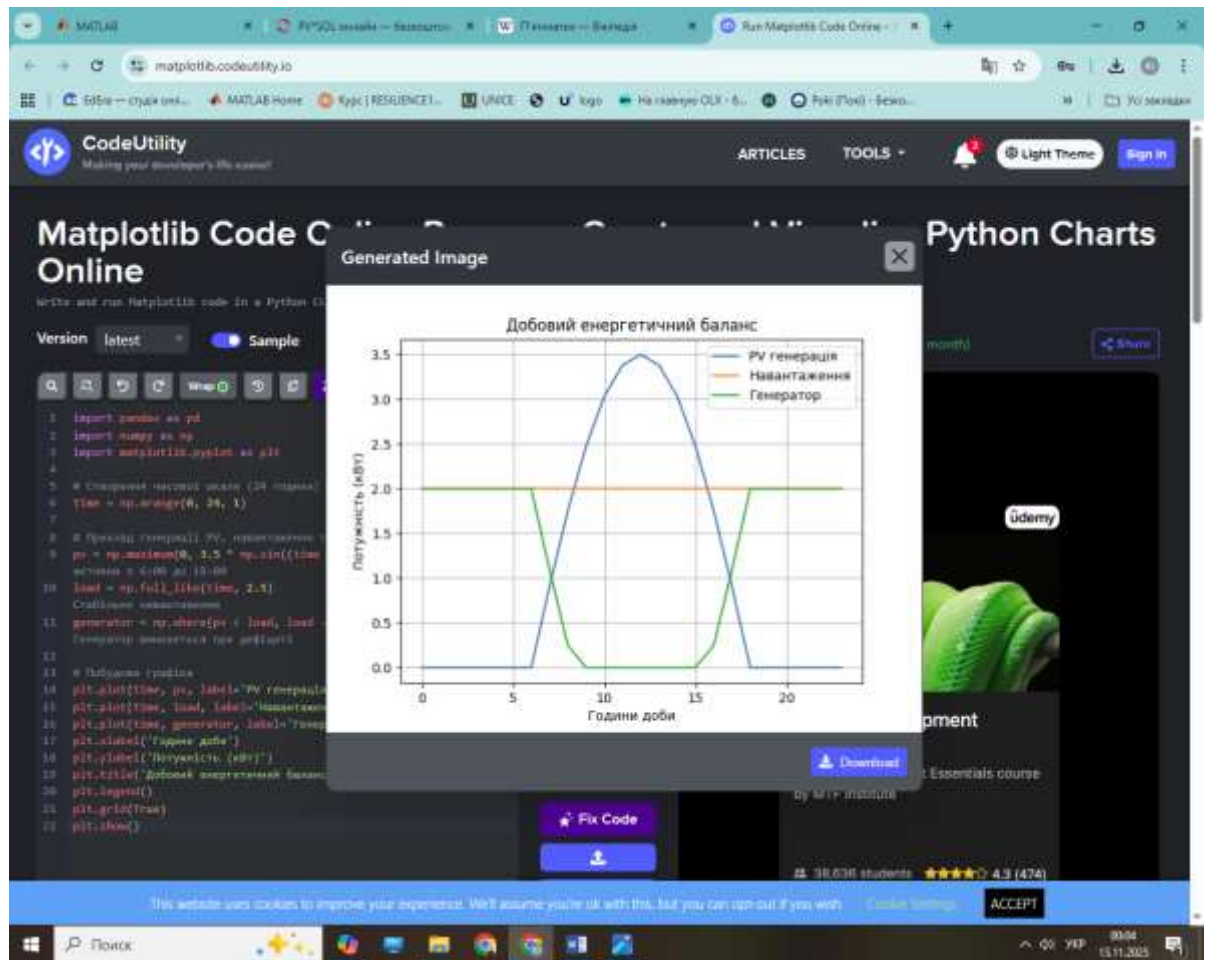


Рис. 3.7. Добовий енергетичний баланс, сформований у Python

Графік демонструє генерацію фотоелектричної системи, стабільне навантаження та роботу резервного генератора протягом доби. Побудовано з використанням бібліотек `matplotlib` та `numpy`.

Моделювання у трьох середовищах дозволило комплексно оцінити ефективність запропонованої IoT-моделі, виявити критичні точки системи та підтвердити доцільність впровадження алгоритмів оптимального керування. Отримані результати стали основою для формування технічних вимог до обладнання та логіки програмного забезпечення.

Висновки до розділу 3

У межах розділу було розроблено IoT-модель оптимізації гібридної енергетичної системи навчального закладу, що виконує функції укриття. Обрано апаратно-програмну платформу, яка забезпечує збір, обробку та передачу даних між компонентами системи, а також реалізацію алгоритмів адаптивного керування.

Розроблені алгоритми дозволяють автоматично перемикаєти режими живлення залежно від рівня генерації, навантаження, заряду акумуляторної батареї та температурних умов. Реалізація логіки керування у середовищах Python, Node-RED та MATLAB/Simulink забезпечує гнучкість, масштабованість та можливість інтеграції з реальним обладнанням.

Моделювання у PVsyst підтвердило здатність системи забезпечувати до 70 % добового навантаження за рахунок фотоелектричної генерації, що свідчить про високу енергоефективність запропонованого рішення. Впровадження IoT-моделі дозволяє зменшити витрати пального, продовжити ресурс обладнання та забезпечити безперервне живлення критичних зон навчального закладу.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕНОГО РІШЕННЯ

4.1. Порівняльний аналіз системи до та після впровадження IoT

Ефективність енергетичної системи значною мірою залежить від здатності адаптуватися до змін навантаження, погодних умов та стану обладнання. Впровадження IoT-компонентів дозволяє перейти від статичної моделі керування до динамічної, що реагує на реальні параметри системи в режимі реального часу.

Таблиця 4.1

Порівняння до впровадження IoT і після впровадження

Критерій	До впровадження IoT	Після впровадження IoT
Тип керування	Система працювала за фіксованим сценарієм, без урахування змін навантаження, погодних умов або стану АКБ. Це призвело до нераціонального використання джерел живлення.	Завдяки реалізації алгоритмів у Python та Simulink, система реагує на зміну параметрів у реальному часі, забезпечуючи оптимальне перемикання між PV, АКБ та генератором.
Врахування SOC АКБ	Рівень заряду акумуляторної батареї не контролювався в реальному часі, що унеможливило оптимальне перемикання між джерелами енергії.	Встановлені датчики дозволяють контролювати рівень заряду АКБ та температурні умови, що підвищує точність прийняття рішень.
Робота генератора	Генератор вмикався навіть у випадках, коли PV могла частково або повністю покрити навантаження. Це спричиняло перевитрати палива та зношення обладнання.	Генератор вмикається лише при дефіциті енергії, що дозволяє зменшити витрати на паливо та продовжити термін служби обладнання.
Температурні умови	Температурні коливання, які впливають на ефективність PV, не враховувалися, що знижувало загальну продуктивність системи.	Враховуються при прогнозі PV

Продовження таблиці 4.1

Економічна ефективність	Низька	Висока, за рахунок зменшення витрат
Екологічний вплив	Високі викиди CO ₂	Зменшення до 4923 кг/рік

До інтеграції IoT система працювала за принципом «все або нічого» — генератор вмикався незалежно від реального стану АКБ чи PV. Це призводило до перевитрат палива, зносу обладнання та нераціонального використання ресурсів. Після впровадження датчиків, контролерів та алгоритмів керування (реалізованих у Python та Simulink), система стала адаптивною: вона реагує на рівень заряду, прогнозує навантаження, враховує температуру та оптимізує джерела живлення.

4.2. Техніко-економічна оцінка

У цьому підпункті розглядається економічна доцільність впровадження фотоелектричної системи з елементами IoT для умов навчального закладу. Оцінка базується на результатах моделювання у PV*SOL online, Python та Simulink, а також на типових тарифах на електроенергію, вартості палива та витратах на обслуговування дизельного генератора. Метою є не лише визначити, наскільки система дозволяє зменшити витрати, а й оцінити її потенціал для довгострокового використання, масштабування та інтеграції в інфраструктуру закладу.

Згідно з результатами моделювання, річна генерація фотоелектричної системи становить 9201 кВт·год, тоді як річне споживання електроенергії — 3500 кВт·год. Це означає, що система виробляє майже втричі більше енергії, ніж потрібно для покриття базового навантаження. Частина цієї енергії — 1201 кВт·год — використовується безпосередньо, решта або передається до мережі, або може бути накопичена в акумуляторній батареї. Поточна частка покриття навантаження з PV становить 34,3%, однак за умови впровадження системи накопичення ця

частка може зрости до 60–70%, що суттєво зменшить потребу в зовнішньому живленні.

Окрему увагу варто приділити дизельному генератору, який до впровадження системи працював щодня, незалежно від реального стану навантаження чи рівня заряду АКБ. Якщо припустити, що середнє добове навантаження становить 10 кВт·год, а витрата палива генератора — 0,3 л/кВт·год, то щоденне споживання дизелю складало б 3 літри. За рік це приблизно 1000 літрів пального. При середній вартості дизелю 55 грн/л, річні витрати на паливо становили б близько 55 000 грн. Після впровадження системи з адаптивною логікою керування, генератор вмикається лише в разі реального дефіциту енергії, що дозволяє зменшити витрати на паливо до 15–20 тис. грн на рік. Це означає, що лише за рахунок оптимізації роботи генератора можна заощадити до 35–40 тис. грн щороку.

Щодо вартості самої фотоелектричної системи, для потужності близько 7,5 кВт-пік (що відповідає питомій врожайності 1226,77 кВт·год/кВт-пік) можна орієнтуватися на суму в межах 150–180 тис. грн, залежно від конфігурації, типу інвертора, монтажу та наявності акумуляторів. Якщо врахувати щорічну економію на паливі, можливість компенсації за передачу надлишкової енергії до мережі, а також потенційну грантову підтримку, термін окупності системи становить приблизно 4–6 років. У разі подальшого зростання тарифів на електроенергію або пального цей термін може бути ще коротшим.

Крім прямої економії, система має низку непрямих переваг. По-перше, зменшується навантаження на персонал, оскільки система працює автоматично, без потреби в постійному втручанні. По-друге, знижується ризик аварійних ситуацій, пов'язаних із перевантаженням або нестачею енергії. По-третє, система може бути використана як навчальний стенд для студентів енергетичних спеціальностей, що підвищує її освітню цінність. Вона дозволяє проводити лабораторні заняття, демонстрації, а також використовувати реальні дані для курсових і дипломних проєктів.

Таким чином, впроваджене рішення є не лише економічно виправданим, а й стратегічно вигідним для навчального закладу. Воно дозволяє зменшити витрати, підвищити енергонезалежність, створити умови для практичного навчання та забезпечити стабільну роботу в умовах нестабільного енергопостачання.

4.3. Екологічна доцільність і стійкість рішення

Одним із ключових аргументів на користь впровадження фотоелектричної системи з елементами IoT є її екологічна ефективність. У сучасних умовах, коли питання зміни клімату, енергетичної безпеки та сталого розвитку набувають все більшої актуальності, перехід на відновлювані джерела енергії стає не лише технічним чи економічним рішенням, а й етичним вибором. Навчальні заклади, як осередки формування світогляду молоді, мають особливу відповідальність у цьому процесі. Саме тому оцінка екологічної доцільності є невід'ємною частиною загальної ефективності системи [14].

За результатами моделювання у PV*SOL online, щорічне уникнення викидів CO₂ становить 4923 кг. Це означає, що завдяки переходу на сонячну енергію навчальний заклад щороку зменшує свій вуглецевий слід майже на 5 тонн. Для порівняння, така кількість викидів еквівалентна спалюванню понад 2000 літрів дизельного пального або приблизно 20 тис. км пробігу легкового автомобіля. У масштабах одного об'єкта це може здатися незначним, але якщо подібні рішення будуть впроваджені в десятках або сотнях закладів освіти, ефект буде відчутним на рівні регіону або навіть країни.

Зменшення викидів досягається насамперед за рахунок скорочення роботи дизельного генератора. У традиційних автономних системах генератор є основним джерелом енергії, особливо в умовах нестабільного електропостачання. Проте його робота супроводжується значними викидами шкідливих речовин, зокрема оксидів

азоту, сірки, вуглецю, а також твердих частинок. Крім того, генератори створюють шумове забруднення, вібрації та потребують регулярного технічного обслуговування, що також має екологічну вартість. Після впровадження логіки керування, яка враховує рівень заряду АКБ, генерацію PV та поточне навантаження, генератор вмикається лише у випадках реального дефіциту енергії. Це дозволяє уникнути щоденного спалювання пального, зменшити кількість запусків двигуна та продовжити термін його служби [15].

Окрім безпосереднього зменшення викидів, система має ще один важливий екологічний ефект — вона формує культуру відповідального енергоспоживання. Студенти, викладачі та технічний персонал мають змогу спостерігати за роботою системи, аналізувати графіки, бачити, як змінюється генерація залежно від погоди, і розуміти, як працює сучасна енергетика. Це сприяє формуванню екологічної свідомості, яка з часом може впливати на поведінку не лише в межах закладу, а й у повсякденному житті. Таким чином, система виконує не лише енергетичну, а й освітню функцію, що особливо важливо для навчального середовища.

Ще одним важливим аспектом є стійкість рішення. У контексті кліматичних змін, енергетичних криз або надзвичайних ситуацій (зокрема, в умовах війни або перебоїв з електропостачанням), наявність автономного джерела енергії стає критично важливою перевагою. Фотоелектрична система дозволяє забезпечити базове енергоживлення навіть у разі повного відключення зовнішньої мережі. Це особливо актуально для об'єктів, які виконують функції укриттів або пунктів незламності, де необхідно підтримувати освітлення, вентиляцію, зв'язок та інші критично важливі системи [16].

Система також є масштабованою та гнучкою. У разі зростання навантаження або зміни кліматичних умов її можна доповнити новими панелями, акумуляторами або інтелектуальними модулями. Це дозволяє адаптувати її до нових викликів без

необхідності повної заміни обладнання. Така гнучкість робить систему не лише екологічно доцільною, а й стратегічно вигідною у довгостроковій перспективі.

Загалом, впроваджене рішення відповідає ключовим принципам екологічної стійкості: воно зменшує викиди парникових газів, скорочує споживання невідновлюваних ресурсів, знижує рівень локального забруднення та сприяє формуванню екологічної культури. У поєднанні з технічною ефективністю та економічною доцільністю це робить систему комплексним рішенням, яке враховує не лише потреби сьогодення, а й виклики майбутнього.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі було проведено комплексну оцінку ефективності впровадженого рішення з урахуванням технічних, економічних та екологічних аспектів. Порівняльний аналіз показав, що після інтеграції IoT-компонентів система енергозабезпечення навчального закладу перейшла від статичної моделі до адаптивної, здатної реагувати на зміну навантаження, рівень заряду АКБ, погодні умови та інші параметри в реальному часі. Це дозволило оптимізувати роботу генератора, зменшити витрати на паливо та підвищити надійність енергопостачання.

Техніко-економічна оцінка підтвердила, що фотоелектрична система генерує енергії більше, ніж потрібно для покриття річного навантаження. За умови впровадження накопичувачів частка покриття може сягати 60–70%, що суттєво знижує потребу в зовнішньому живленні. Орієнтовна економія на паливі становить до 35–40 тис. грн на рік, а термін окупності — 4–6 років, залежно від конфігурації системи та тарифів. Крім того, система може бути використана як навчальний стенд, що додає їй освітньої цінності.

Екологічна оцінка показала, що щорічне уникнення викидів CO₂ становить близько 5 тонн, що є суттєвим внеском у зменшення вуглецевого сліду закладу. Система сприяє формуванню екологічної свідомості, знижує рівень локального забруднення та відповідає принципам сталого розвитку.

Впроваджене рішення є ефективним з усіх точок зору: технічної, економічної, екологічної та освітньої. Воно забезпечує стабільну роботу, зменшує витрати, підвищує енергонезалежність і створює умови для практичного навчання. Такий підхід може бути рекомендований для впровадження в інших навчальних закладах, особливо в умовах нестабільного енергопостачання.

РОЗДІЛ 5

БЕЗПЕКА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІОТ-СИСТЕМ

5.1. Аналіз ризиків і загроз під час роботи енергоустаткування

Експлуатація енергоустаткування, особливо в умовах автономної роботи та інтеграції IoT-компонентів, супроводжується широким спектром потенційних ризиків. Ці ризики охоплюють як традиційні техногенні загрози, пов'язані з електробезпекою, так і нові виклики, пов'язані з цифровізацією, автоматизацією та віддаленим керуванням. У контексті навчального закладу, де система виконує не лише енергетичну, а й освітню функцію, питання безпеки набуває особливої ваги.

Насамперед слід виділити класичні ризики, притаманні будь-якому електротехнічному обладнанню. До них належать ураження електричним струмом, короткі замикання, перевантаження мережі, перегрів елементів, іскріння, а також пожежо-небезпечні ситуації. Наприклад, при неправильному монтажі або зношенні ізоляції можливе виникнення дугового пробою, що може призвести до займання. Особливо небезпечними є ситуації, коли обладнання експлуатується у вологих або запилених приміщеннях без належного ступеня захисту оболонки (IP). Навіть незначне відхилення від вимог ПУЕ може призвести до аварійної ситуації з тяжкими наслідками для здоров'я персоналу [17].

Окрему групу ризиків становлять акумуляторні батареї, які є невід'ємною частиною автономної енергосистеми. У разі порушення температурного режиму, механічного пошкодження або неправильного заряду можливе виділення вибухонебезпечних газів, перегрів, витік електроліту або навіть займання. Особливо небезпечними є літій-іонні батареї, які мають високу енергетичну щільність, але потребують точного контролю параметрів. У навчальному середовищі, де можливий кон-

такт з необізнаними особами, ці ризики потребують особливої уваги. Для таких систем необхідно передбачати вентиляцію, термозахист, а також ізоляцію від зон перебування людей [18].

Інтеграція IoT-компонентів створює новий клас загроз, які не завжди очевидні з точки зору традиційної охорони праці. Наприклад, у разі втрати зв'язку між сенсорами та контролером можливе некоректне перемикання джерел живлення, що може призвести до перевантаження або зупинки системи. Якщо система не має резервного сценарію або ручного режиму, це може спричинити повну втрату енергопостачання. Особливо небезпечними є ситуації, коли персонал не має доступу до аварійного відключення або не розуміє логіки роботи системи [19].

Ще одним важливим аспектом є людський фактор. У випадках, коли система обслуговується персоналом без належної підготовки, можливі помилки при підключенні, обслуговуванні або оновленні програмного забезпечення. Наприклад, неправильне підключення фаз або нульового провідника може призвести до зворотної полярності, що виведе з ладу інвертор або АКБ. Також слід враховувати ризики, пов'язані з втручанням сторонніх осіб, особливо у відкритих або напівпублічних просторах, де розміщене обладнання.

Не менш важливими є ризики, пов'язані з впливом зовнішнього середовища. Перепади температур, вологість, пил, грозові розряди, вібрації — усе це може впливати на стабільність роботи як силових, так і цифрових компонентів. Наприклад, при відсутності захисту від перенапруги можливе пошкодження контролера або інвертора під час грози. У разі відсутності вентиляції — перегрів АКБ або інвертора. Усі ці фактори мають бути враховані ще на етапі проєктування системи [17].

Таким чином, аналіз ризиків при експлуатації енергоустановки з IoT-компонентами дозволяє виділити кілька ключових напрямів: електробезпека, пожежна безпека, надійність логіки керування, захист від зовнішніх впливів та підготовка персоналу. Кожен із цих напрямів потребує окремого опрацювання, впровадження

технічних засобів захисту та організаційних заходів. У наступному підпункті буде розглянуто, як саме ці ризики можна мінімізувати на практиці.

5.2. Технічні засоби захисту та організаційні заходи безпеки

Забезпечення безпеки при експлуатації енергоустановки з інтегрованими IoT-компонентами вимагає комплексного підходу, який охоплює як технічні засоби захисту, так і організаційні заходи. Враховуючи специфіку автономної системи, що працює на основі фотоелектричних панелей, акумуляторів, інверторів та сенсорних модулів, необхідно передбачити захист від електричних, термічних, механічних та інформаційних загроз.

До основних технічних засобів захисту належать автоматичні вимикачі, пристрої захисту від перенапруги, реле контролю заряду та розряду АКБ, термодатчики, системи аварійного відключення, а також заземлення всіх елементів системи. Конструкція електроустановок повинна забезпечувати захист персоналу від випадкового контакту з струмоведучими частинами, а також мати засоби для швидкого відключення у разі аварії [20]. Наприклад, використання диференціальних автоматів дозволяє виявити витік струму та миттєво знеструмити систему, що особливо важливо у приміщеннях з підвищеною вологістю.

Окрему увагу слід приділити захисту акумуляторних батарей. У разі перегріву або перевантаження вони можуть стати джерелом пожежі або вибуху. Тому необхідно встановлювати термодатчики, контролери заряду з функцією балансування, а також забезпечити вентиляцію приміщення, де вони розміщені. Для літій-іонних АКБ рекомендовано використовувати системи активного охолодження та ізоляції, особливо у випадках, коли батареї розміщені в навчальних або адміністративних приміщеннях [21].

Організаційні заходи безпеки є не менш важливими. Вони включають розробку інструкцій з експлуатації, проведення регулярного інструктажу персоналу, ведення журналів технічного обслуговування, а також призначення відповідальних осіб за безпеку. Будь-які роботи в електроустановках повинні проводитися лише після виконання певних організаційних процедур: оформлення наряду-допуску, перевірки наявності засобів захисту, визначення меж робочої зони та надання дозволу на початок робіт [22].

У навчальному закладі доцільно проводити навчання студентів з основ електробезпеки, поводження з АКБ, принципів роботи фотоелектричних систем та алгоритмів аварійного реагування. Це не лише підвищує рівень безпеки, а й формує відповідальне ставлення до енергетичних технологій. Крім того, слід забезпечити обмежений доступ до технічних приміщень, де розміщене обладнання, а також встановити попереджувальні знаки, інструкції та схеми евакуації.

Загалом, поєднання технічних засобів захисту з чітко регламентованими організаційними заходами дозволяє забезпечити стабільну та безпечну роботу енергоустановки. Це особливо важливо в умовах навчального середовища, де система виконує не лише енергетичну, а й освітню функцію, і має бути прикладом відповідального ставлення до безпеки.

5.3. Кіберзахист і шифрування даних

Інтеграція IoT-компонентів у енергетичну систему навчального закладу створює новий клас загроз, пов'язаних із кібербезпекою. На відміну від традиційних електротехнічних ризиків, ці загрози мають цифрову природу і можуть проявлятися не лише у вигляді технічних збоїв, а й у формі несанкціонованого доступу, втрати даних, порушення конфіденційності або цілісності системи. У сучасних умовах,

коли енергетична інфраструктура дедалі більше залежить від цифрових технологій, питання кіберзахисту стає критично важливим [23].

Основними загрозами для IoT-систем в енергетиці є атаки типу Man-in-the-Middle, DoS-атаки, експлуатація вразливостей прошивки, підміна даних сенсорів, а також спроби проникнення через незахищені канали зв'язку. У разі успішної атаки зловмисник може змінити логіку керування, заблокувати доступ до системи або викликати неконтрольоване перемикання джерел живлення. Це може призвести не лише до технічних проблем, а й до порушення навчального процесу, втрати критичних даних або навіть фізичних пошкоджень обладнання [24].

Для запобігання таким загрозам необхідно впровадити комплексну систему кіберзахисту, яка включає автентифікацію пристроїв, шифрування даних, моніторинг мережевого трафіку, резервне копіювання конфігурацій та оновлення програмного забезпечення. Автентифікація дозволяє переконатися, що кожен пристрій у системі є легітимним і має право на доступ до даних. Шифрування забезпечує конфіденційність переданої інформації, навіть у разі її перехоплення. Моніторинг трафіку дозволяє виявляти аномалії, які можуть свідчити про спробу атаки або збої в роботі системи [25].

Особливу увагу слід приділити вибору криптографічних алгоритмів. Для IoT-систем доцільно використовувати легкі симетричні алгоритми, які не навантажують процесор, але забезпечують достатній рівень захисту. Наприклад, алгоритми AES-128 або ChaCha20 є рекомендованими для пристроїв з обмеженими ресурсами. У разі потреби в асиметричному шифруванні можна застосовувати алгоритми на основі еліптичних кривих, які мають високу криптографічну стійкість при невеликій довжині ключа [26].

У контексті навчального закладу важливо забезпечити ізоляцію внутрішньої мережі, де працює система, від відкритих каналів зв'язку. Це дозволяє мінімізувати ризики зовнішніх атак, зберегти стабільність роботи та уникнути втрати критичних

даних. Крім того, слід обмежити доступ до системи лише авторизованим користувачам, впровадити багатофакторну автентифікацію для адміністраторів та регулярно проводити аудит безпеки.

Кіберзахист має бути інтегрованим елементом загальної системи безпеки, а не додатковим компонентом. Його ефективність залежить не лише від технічних засобів, а й від рівня підготовки персоналу, наявності чітких процедур реагування на інциденти та постійного оновлення знань. У навчальному середовищі доцільно проводити семінари, тренінги та практичні заняття з основ кібербезпеки, що дозволить сформувати культуру цифрової відповідальності.

Впровадження кіберзахисту та шифрування даних у IoT-системі навчального закладу є необхідною умовою її стабільної, безпечної та довготривалої роботи. Це дозволяє не лише захистити технічну інфраструктуру, а й забезпечити довіру до системи з боку користувачів, адміністрації та потенційних грантодавців.

Висновки до розділу 5

Розгляд питань безпеки та охорони праці при експлуатації IoT-систем у складі енергоустаткування показав, що ефективність технічного рішення неможлива без належного рівня захисту — як фізичного, так і цифрового. Система, яка поєднує фотоелектричні джерела, акумулятори, інвертори та сенсорні модулі, створює нові виклики, що потребують системного підходу до управління ризиками.

Було встановлено, що основними загрозами залишаються електричні ураження, короткі замикання, перегрів елементів, збої в логіці керування, а також кіберзагрози, пов'язані з передачею та обробкою даних. Для їх мінімізації необхідно впроваджувати технічні засоби захисту, зокрема автоматичні вимикачі, реле контролю, термозахист, системи аварійного відключення, а також забезпечити належну вентиляцію, заземлення та захист від перенапруги.

Організаційні заходи, такі як інструктаж персоналу, обмеження доступу, ведення документації та навчання студентів, є критично важливими для підтримання безпечного середовища. Водночас цифрова складова системи вимагає впровадження кіберзахисту: автентифікації пристроїв, шифрування даних, моніторингу трафіку та ізоляції внутрішньої мережі. Безпека в таких системах — це не окремий елемент, а інтегрована частина загальної архітектури.

Таким чином, впроваджене рішення відповідає сучасним вимогам безпеки, охорони праці та кіберзахисту. Воно забезпечує не лише стабільну роботу енергетичної системи, а й захист персоналу, студентів і обладнання, що особливо важливо в умовах навчального середовища та підвищених вимог до надійності.

ВИСНОВКИ

Магістерська робота присвячена розробці та оптимізації гібридної енергетичної системи з використанням технологій Інтернету речей (IoT), що поєднує фотоелектричні панелі, акумуляторні накопичувачі, дизельний генератор та інтелектуальні алгоритми керування. У межах дослідження було реалізовано повний цикл — від теоретичного обґрунтування до практичного моделювання, оцінки ефективності та аналізу безпеки.

На основі аналізу сучасних типів гібридних систем та архітектур IoT було сформовано структурну модель, яка враховує реальні умови експлуатації, обмеження апаратної частини та специфіку об'єкта енергоспоживання. Розроблений алгоритм керування дозволяє адаптивно перемикати джерела живлення залежно від рівня заряду АКБ, потужності навантаження та інтенсивності сонячної генерації. Це забезпечує гнучкість, надійність та економічну доцільність роботи системи.

Моделювання у середовищах MATLAB/Simulink, PVsyst та Python підтвердило, що впровадження IoT-компонентів дозволяє зменшити кількість запусків генератора, оптимізувати витрати пального, підвищити енергоефективність та забезпечити стабільне живлення об'єкта. Економічна оцінка показала, що система має потенціал окупності протягом 4–6 років, а щорічна економія на паливі може становити до 40%. Екологічна ефективність підтверджується уникненням викидів CO₂ на рівні близько 5 тонн на рік, що є суттєвим внеском у зменшення вуглецевого сліду навчального закладу.

Окремо було розглянуто питання безпеки та охорони праці. Проаналізовано ризики, пов'язані з електробезпекою, пожежною небезпекою, збоєм логіки керування та кіберзагрозами. Запропоновано технічні засоби захисту (автоматичні вимикачі, термодатчики, реле контролю, системи аварійного відключення), ор-

ганізаційні заходи (інструктаж, обмеження доступу, навчання персоналу) та елементи кіберзахисту (автентифікація пристроїв, шифрування даних, моніторинг трафіку, ізоляція мережі). Це забезпечує стабільну та безпечну експлуатацію системи в умовах навчального середовища.

Наукова новизна роботи полягає у створенні адаптивної IoT-моделі оптимізації, яка враховує як технічні, так і інформаційні параметри системи, дозволяючи підвищити її ефективність, надійність та стійкість до зовнішніх впливів. Практичне значення полягає у можливості впровадження розробленої моделі в реальні об'єкти — автономні енергетичні комплекси, критичну інфраструктуру, а також у навчальний процес для підготовки фахівців з енергетики, автоматизації та цифрових технологій.

Поставлену мету магістерської роботи досягнуто повністю. Розроблена система є технічно обґрунтованою, економічно доцільною, екологічно відповідальною та безпечною. Вона може бути рекомендована для впровадження в освітніх установах, об'єктах з підвищеними вимогами до енергетичної автономності, а також як навчальний стенд для формування компетентностей у сфері сучасної енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кудрявцев І.І., Козлов С.М. Комбіновані енергетичні системи: принципи побудови та ефективність. К.: Наукова думка, 2020. 312 с.
2. Коваленко В.П. Відновлювана енергетика: сучасні виклики та рішення. — Харків: ХНУРЕ, 2021. 198 с.
3. Gungor V.C., Sahin D., Kocak T. et al. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. Vol. 7(4). P. 529–539.
4. Farhangi H. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2010. Vol. 8(1). P. 18–28.
5. Rehman S., Al-Hadhrami L.M., Alam M.M. Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 44. P. 586–598.
6. Bansal R.C., Kothari D.P., Saha H. Design and optimization of hybrid renewable energy systems. Springer, 2014. 240 p.
7. Gungor V.C., Sahin D., Kocak T. et al. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. Vol. 7(4). P. 529–539.
8. Farhangi H. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2010. Vol. 8(1). P. 18–28.
9. Ковальчук О.В., Гончаренко І.М. ІоТ-технології в енергетиці: архітектура та протоколи. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 156 с.
10. Cisco Systems. Internet of Things Reference Model. Cisco White Paper, 2014. 24 p.

11. Лежнюк П., Повстянко К. Застосування гібридних відновлюваних енергетичних систем із метою оперативного керування балансом потужності та електроенергії в електроенергетичній системі. *Вісник КРНУ*. 2024. №6. С. 195–202.
12. Суходоля О.М. Новітні енергетичні технології та їх вплив на функціонування систем енергопостачання: аналіт. доп. Київ: НІСД, 2022. 36 с.
13. НЕК «Укренерго». Діючі нормативні документи. URL: https://ua.energy/uchasnikam_rinku/dokumenty/
14. Хотян А. А., Розен В. П., Чермалих О. В. Аналіз ефективності використання фотоелектричних модулів. *Електротехніка і електроенергетика*. – 2018. № 4. С. 9–14.
15. Катенін В. Д. Підвищення екологічної безпеки операцій поводження з відходами фотоелектричних панелей: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01. Харків: НТУ «ХП», 2021. 180 с.
16. Скібінський О. І. Дослідження ефективності впровадження фотоелектричних станцій на комунальному підприємстві «Міськвітло»: магістерська робота / О. І. Скібінський. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. 78 с.
17. Бондаренко Є. А. Основи охорони праці: навч. посіб. / Є. А. Бондаренко. Вінниця: ВНТУ, 2022. 138 с.
18. Ковальчук О. В. Безпека експлуатації акумуляторних батарей у системах автономного енергозабезпечення. *Енергетика та автоматика*. 2021. № 2. – С. 45–52.
19. Ризики при роботі з електричним обладнанням на підприємстві. *Про охорону праці*. 2023. № 6. С. 12–15.
20. Вимоги щодо безпеки під час експлуатації електроустановок: затв. наказом Міністерства економіки України. Київ: Держпраці, 2024. 48 с.
21. Системи засобів і заходів безпечної експлуатації електроустановок. Основи охорони праці: підручник. URL:

https://pidru4niki.com/1875050838326/bzhd/sistemi_zasobiv_zahodiv_bezpechnoyi_eksploatatsiyi_elektroustanovok

22. Організаційні і технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках. Безпека життєдіяльності. Охорона праці. Т.2: підручник / URL:https://stud.com.ua/32703/bzhd/organizatsiynih_tehnichnih_zahodiv_zabezpechuyut_bezpeku_robit_elektroustanovkah

23. Буняк В. М., Лукічов В. В. Аналіз вразливостей IoT-пристроїв в енергетичному секторі: методи ризик-менеджменту та захисту даних. Вінницький національний технічний університет. 2023. 18 с.

24. Чебурахін М. І., Балагура Д. С. Аналіз уразливостей та загроз у системах управління кіберфізичними об'єктами на прикладі розумної електромережі. Харківський національний університет радіоелектроніки. 2024. 22 с.

25. Євсєєв С. П., Мілов О. В., Остапов С. Е., Сєверінов О. В. Кібербезпека: основи кодування та криптографії: навч. посіб. Львів: Новий Світ-2000, 2025. 658 с.

26. Орлов В. В. Електронна система шифрування даних в інфокомунікаційних мережах електроенергетики: магістерська кваліфікаційна робота. Суми: СумДУ, 2024. 92 с.

27. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Danylchenko D. Synergy of Blockchain and Artificial Intelligence for Decentralized Smart Energy Management // Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. Lecture Notes in Networks and Systems. 2025. Vol. 1480. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6_18

28. Shvedchykova I., Trykhlieb A., Trykhlieb S., Demishonkova S., Pavlenko V. Determining the efficiency of restored photovoltaic modules under natural lighting conditions // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 6(8). P. 16–24. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317829>

29. Shavolkin O., Shvedchykova I., Demishonkova S., Pavlenko V. Increasing the efficiency of hybrid photoelectric system equipped with a storage battery // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97, № 11.
30. Павленко В.М., Волянник О.Ю. Дослідження технічних рішень для кіберзахисту енергосистем з інтегрованими ВДЕ // *Технічна творчість*. 2024. № 8. С. 93–94.
31. Кушнір Д.В., Павленко В.М. Підвищення надійності та ефективності управління енергоспоживанням підприємства на основі технологій IoT // *Матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів*. Київ: КНУТД, 2025. С. 169.
32. Яворський В.І., Павленко В.М. Вплив уніфікації інверторного обладнання на продуктивність мікромережі // *Матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів*. Київ: КНУТД, 2025. С. 46–47.
33. Колос Д.М., Павленко В.М. Інтелектуальна гібридна система зберігання енергії з функцією резервного живлення для критичних споживачів // *Матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів*. Київ: КНУТД, 2025. С. 34–35.
34. Нікітін Є.С., Павленко В.М. Оптимізація мікро-когенераційних систем з використанням двигуна Стірлінга // *Технічна творчість*. 2024. № 8. С. 89–91.
35. Nikitin Y., Pavlenko V., Volianyk O. The role of smart technologies in improving the reliability and efficiency of power grids // *Технічна творчість*. 2024. № 8. С. 91–92.
36. Pavlenko V., Kurliak P., Volianyk O. Computer-integrated system of automatic balance control in centrifuge rotors with variable imbalance // *2023 IEEE 5th Int. Conf. on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. IEEE, 2023. P. 1–5.
37. Pavlenko V., Ponomarenko I., Fedorchenko A., Onofriichuk V., Chorna O., Pylypenko V. Development and Marketing Promotion of the Educational Program Mobile

Application in the Field of Electrical Engineering // 2022 IEEE 4th Int. Conf. on Modern Electrical and Energy System (MEES). IEEE, 2022. P. 1–5.

38. Pavlenko V., Volianyk O. Efficiency of window recuperator in residential premises // Мехатронні системи: інновації та інжиніринг. Київ: КНУТД, 2023.

39. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Osadchyi V., Ponomarenko D., Hrygorevska O. Using Artificial Intelligence to Control Drones // 2023 IEEE 7th Int. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). IEEE, 2023. P. 182–185.

40. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Fedorchenko A., Chorna O., Pylypenko V. Creating Educational Products With Using Data Science and Digital Marketing // 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). IEEE, 2023. P. 1–4.

41. Pavlenko V., Kurliak P., Horiashchenko S., Volianyk O., Batsala Y., Nikitchuk T. Computer-integrated system of automatic control in rotors with variable imbalance // 2023 IEEE 5th Int. Conf. on Modern Electrical and Energy System (MEES). IEEE, 2023. P. 1–5.

42. Pavlenko V., Ponomarenko I., Turan A. Innovative technologies in distance education // Мехатронні системи: інновації та інжиніринг. Київ: КНУТД, 2021.

43. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Ponomarenko D.V., Ukhna N.M. Application of artificial intelligence in digital marketing // CS&SE@SW 2023. CEUR-WS. Vol. 3662. P. 155–166. <https://ceur-ws.org/Vol-3662/paper22.pdf>

44. Pavlenko V., Volianyk O. Computer-integrated system of automatic control in rotors with variable imbalance // Educational and scientific activity in a new time: realities and challenges. Mingachevir: Mingachevir State University, 2022.

45. Pavlenko V., Volianyk O. Investigation of recuperator efficiency using in residential premises // Вісник КНУТД. Серія: Технічні науки. 2019. № 4. С. 77–85.

46. Pavlenko V., Ponomarenko I. Mobile apps for tourism market // Інтеграція науки і освіти: розвиток культурних і креативних індустрій. Київ: КНУТД, 2022.
47. Pavlenko V., Bunda N. IT industry development trends in Ukraine // Мехатронні системи: інновації та інжиніринг. Київ: КНУТД, 2022.
48. Pavlenko V., Ponomarenko I. Monitoring educational programs using IT // Дис. ... канд. техн. наук. Українська інженерно-педагогічна академія, 2022.
49. Pavlenko V., Volivach A. ICT in technical education // Інтеграція науки і освіти: розвиток культурних і креативних індустрій. Київ: КНУТД, 2022.
50. Pavlenko V., Volianyk O. Smart energy systems with distributed databases // Енергетика і автоматика. 2024. № 5. С. 66–76. [https://doi.org/10.31548/energiya5\(75\).2024.066](https://doi.org/10.31548/energiya5(75).2024.066)

ДОДАТКИ

Додаток А

Специфікація на сонячні модулі [JA Solar](#) JAM60S20-375/MR

Preliminary

Harvest the Sunshine



Mono

390W MBB Half-Cell Module

JAM60S20 365-390/MR Series



Higher output power



Lower LCOE



Less shading and lower resistive loss



Better mechanical loading tolerance

Superior Warranty

- 12-year product warranty
- 25-year linear power output warranty



■ JA Linear Power Warranty ■ Industry Warranty

Comprehensive Certificates

- IEC 61215, IEC 61730, UL 61215, UL 61730
- ISO 9001: 2015 Quality management systems
- ISO 14001: 2015 Environmental management systems
- OHSAS 18001: 2007 Occupational health and safety management systems
- IEC TS 62941: 2015 Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Guidelines for increased confidence in PV module design qualification and type approval





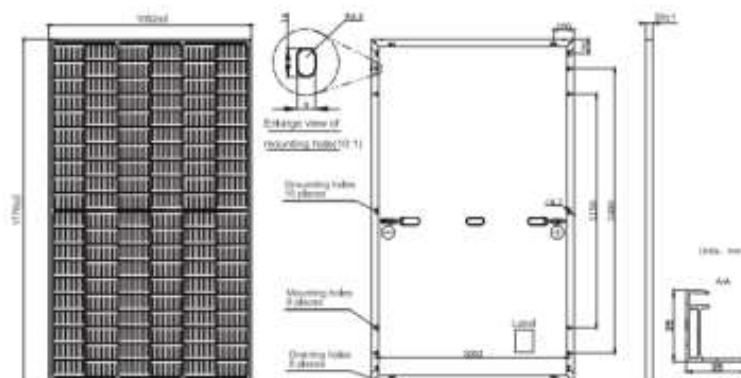
JA SOLAR

www.jasolar.com

Specifications subject to technical changes and tests. JA Solar reserves the right of final interpretation.



MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	20,7kg±3%
Dimensions	1776±2mm×1052±2mm×35±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC) / 12 AWG(UL)
No. of cells	120(6×20)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	QC 4, 10(1000V) QC 4, 10-35(1500V)
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 300mm(+)+400mm(-) Landscape: 1000mm(+)+1000mm(-)
Packaging Configuration	31pcs/Pallet 744pcs/40ft Container

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM60S20 -365/MR	JAM60S20 -370/MR	JAM60S20 -375/MR	JAM60S20 -380/MR	JAM60S20 -385/MR	JAM60S20 -390/MR
Rated Maximum Power(P _{max}) [W]	365	370	375	380	385	390
Open Circuit Voltage(V _{oc}) [V]	41,13	41,30	41,45	41,62	41,78	41,94
Maximum Power Voltage(V _{mp}) [V]	33,96	34,23	34,50	34,77	35,04	35,33
Short Circuit Current(I _{sc}) [A]	11,30	11,35	11,41	11,47	11,53	11,58
Maximum Power Current(I _{mp}) [A]	10,75	10,81	10,87	10,93	10,99	11,04
Module Efficiency [%]	19,5	19,8	20,1	20,3	20,6	20,9
Power Tolerance	0→+5W					
Temperature Coefficient of I _{sc} (α _{I_{sc}})	+0,044%/°C					
Temperature Coefficient of V _{oc} (β _{V_{oc}})	-0,272%/°C					
Temperature Coefficient of P _{max} (γ _{P_{mp}})	-0,350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1,5G					

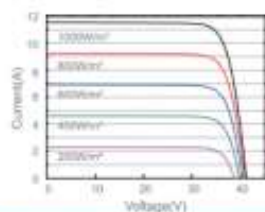
Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

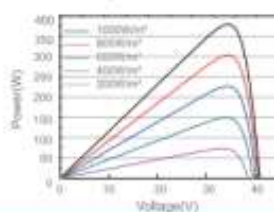
TYPE	JAM60S20 -365/MR	JAM60S20 -370/MR	JAM60S20 -375/MR	JAM60S20 -380/MR	JAM60S20 -385/MR	JAM60S20 -390/MR	OPERATING CONDITIONS
Rated Max. Power(P _{max}) [W]	276	280	284	287	291	296	Maximum System Voltage
Open Circuit Voltage(V _{oc}) [V]	38,41	38,65	38,89	39,14	39,38	39,63	1000V/1500V DC
Max Power Voltage(V _{mp}) [V]	32,05	32,30	32,55	32,72	32,96	33,20	Operating Temperature
Short Circuit Current(I _{sc}) [A]	9,15	9,20	9,25	9,30	9,35	9,40	-40°C→+85°C
Max Power Current(I _{mp}) [A]	8,61	8,66	8,71	8,76	8,83	8,88	Maximum Series Fuse
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1,5G						20A
							Maximum Static Load, Front
							5400Pa (112 lb/ft ²)
							Maximum Static Load, Back
							2400Pa (50 lb/ft ²)
							NOCT
							45±2°C
							Safety Class
							Class II
							Fire Performance
							UL Type 1

CHARACTERISTICS

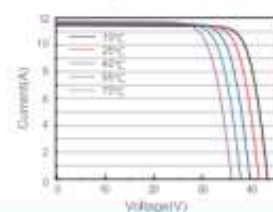
Current-Voltage Curve JAM60S20-380/MR



Power-Voltage Curve JAM60S20-380/MR



Current-Voltage Curve JAM60S20-380/MR



Специфікація на контролер заряду Victron SmartSolar MPPT 150/70



SmartSolar Charge Controllers with screw- or MC4 PV connection MPPT 150/45 up to MPPT 150/100



SmartSolar Charge Controller
MPPT 150/100-Tr
with optional pluggable display



SmartSolar Charge Controller
MPPT 150/100-MC4
without display



Bluetooth sensing:
Smart Battery Sense



Bluetooth sensing:
BMV-712 Smart Battery Monitor

Bluetooth Smart built-in

The wireless solution to set-up, monitor, update and synchronise SmartSolar Charge Controllers.

Ultra-fast Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Especially in case of a clouded sky, when light intensity is changing continuously, an ultra-fast MPPT controller will improve energy harvest by up to 30% compared to PWM charge controllers and by up to 10% compared to slower MPPT controllers.

Advanced Maximum Power Point Detection in case of partial shading conditions

If partial shading occurs, two or more maximum power points (MPP) may be present on the power-voltage curve. Conventional MPPTs tend to lock to a local MPP, which may not be the optimum MPP. The innovative SmartSolar algorithm will always maximize energy harvest by locking to the optimum MPP.

Outstanding conversion efficiency

No cooling fan. Maximum efficiency exceeds 98%.

Flexible charge algorithm

Fully programmable charge algorithm (see the software page on our website), and eight pre-programmed algorithms, selectable with a rotary switch (see manual for details).

Extensive electronic protection

Over-temperature protection and power derating when temperature is high.
PV short circuit and PV reverse polarity protection.
PV reverse current protection.

Internal temperature sensor

Compensates absorption and float charge voltage for temperature.

Optional external battery voltage and temperature sensing via Bluetooth

A Smart Battery Sense or a BMV-712 Smart Battery Monitor can be used to communicate battery voltage and temperature to one or more SmartSolar Charge Controllers.

VE.Direct

For a wired data connection to a Color Control GX, other GX products, PC or other devices.

Remote on-off

To connect for example to a VE.BUS BMS.

Programmable relay

Can be programmed to trip on an alarm, or other events.

Optional: SmartSolar pluggable LCD display

Simply remove the rubber seal that protects the plug on the front of the controller, and plug-in the display.



SmartSolar pluggable display



SmartSolar Charge Controller	150/45	150/60	150/70	150/85	150/100
Battery voltage	12 / 24 / 48V Auto Select (software tool needed to select 36V)				
Rated charge current	45A	60A	70A	85A	100A
Nominal PV power, 12V 1a,b)	650W	860W	1000W	1200W	1450W
Nominal PV power, 24V 1a,b)	1300W	1720W	2000W	2400W	2900W
Nominal PV power, 36V 1a,b)	1950W	2580W	3000W	3600W	4350W
Nominal PV power, 48V 1a,b)	2600W	3440W	4000W	4900W	5800W
Max. PV short circuit current 2)	50A (max 30A per MC4 conn.)		70A (max 30A per MC4 conn.)		
Maximum PV open circuit voltage	150V absolute maximum coldest conditions 145V start-up and operating maximum				
Maximum efficiency	98%				
Self-consumption	Less than 35mA @ 12V / 20mA @ 48V				
Charge voltage 'absorption'	Default setting: 14,4 / 28,8 / 43,2 / 57,6V (adjustable with: rotary switch, display, VE.Direct or Bluetooth)				
Charge voltage 'float'	Default setting: 13,8 / 27,6 / 41,4 / 55,2V (adjustable: rotary switch, display, VE.Direct or Bluetooth)				
Charge voltage 'equalization'	Default setting: 16,2V / 32,4V / 48,6V / 64,8V (adjustable)				
Charge algorithm	multi-stage adaptive (eight preprogrammed algorithms) or user defined algorithm				
Temperature compensation	-16 mV / -32 mV / -64 mV / °C				
Protection	Battery reverse polarity (fuse, not user accessible) PV reverse polarity / Output short circuit / Over temperature				
Operating temperature	-30 to +60°C (full rated output up to 40°C)				
Humidity	95%, non-condensing				
Maximum altitude	5000m (full rated output up to 2000m)				
Environmental condition	indoor, unconditioned				
Pollution degree	PD3				
Data communication port	VE.Direct or Bluetooth				
Remote on/off	Yes (2 pole connector)				
Programmable relay	DPST AC rating: 240VAC / 4A DC rating: 4A up to 35VDC, 1A up to 60VDC				
Parallel operation	Yes (not synchronized)				
ENCLOSURE					
Colour	Blue (RAL 5012)				
PV terminals 3)	35 mm ² / AWG2 (Tr models) Two pairs of MC4 connectors (MC4 models)			35 mm ² / AWG2 (Tr models) Three pairs of MC4 connectors (MC4 models)	
Battery terminals	35mm ² / AWG2				
Protection category	IP43 (electronic components), IP22 (connection area)				
Weight	3 kg			4,5kg	
Dimensions (h x w x d) in mm	Tr models: 185 x 250 x 95 mm MC4 models: 215 x 250 x 95 mm			Tr models: 216 x 295 x 103 MC4 models: 246 x 295 x 103	
STANDARDS					
Safety	EN/IEC 62109-1, UL 1741, CSA C22.2				
1a) If more PV power is connected, the controller will limit input power.					
1b) The PV voltage must exceed Vbat + 5V for the controller to start. Thereafter the minimum PV voltage is Vbat + 1V.					
2) A PV array with a higher short circuit current may damage the controller.					
3) MC4 models: several splitter pairs may be needed to parallel the strings of solar panels					
Maximum current per MC4 connector: 30A (the MC4 connectors are parallel connected to one MPPT tracker)					

Специфікація інвертора Victron Multiplus-II 48/3000/35-32



MultiPlus-II Inverter/Charger

230 V

[▶ Victron online product page](#)

<https://victron.nl>



Connection Area
MultiPlus-II 3k

A MultiPlus, plus ESS (Energy Storage System) functionality

The MultiPlus-II is a multifunctional inverter/charger with all the features of the MultiPlus, plus an external current sensor option which extends the PowerControl and PowerAssist function to 50 A resp. 100 A. The MultiPlus-II is ideally suited for professional marine, yachting, vehicle and land based off-grid applications. It also has built-in anti-islanding functionality, and an increasingly long list of country approvals for ESS application. Several system configurations are possible. For more detailed information see the ESS Design and configuration manual.



PowerControl and PowerAssist - Boosting the capacity of the grid or a generator

A maximum grid or generator current can be set. The MultiPlus-II will then take account of other AC loads and use whatever is extra for battery charging, thus preventing the generator or grid from being overloaded (PowerControl function).

PowerAssist takes the principle of PowerControl to a further dimension. Where peak power is so often required only for a limited period, the MultiPlus-II will compensate insufficient generator, shore or grid power with power from the battery. When the load reduces, the spare power is used to recharge the battery.

Solar energy: AC power available even during a grid failure

The MultiPlus-II can be used in off grid as well as grid connected PV and other alternative energy systems. It is compatible with both solar charge controllers and grid-tie inverters.

Two AC Outputs

The main output has no break functionality. The MultiPlus-II takes over the supply to the connected loads in the event of a grid failure or when shore/generator power is disconnected. This happens so fast (less than 20 milliseconds) that computers and other electronic equipment will continue to operate without disruption.

The second output is live only when AC is available on the input of the MultiPlus-II. Loads that should not discharge the battery, like a water heater for example, can be connected to this output.

Virtually unlimited power thanks to parallel and three phase operation

Up to 6 Multis can operate in parallel to achieve higher power output. Six 48/5000/70 units, for example, will provide 25 kW / 30 kVA output power with 420 Amps charging capacity.

In addition to parallel connection, three units of the same model can be configured for three phase output. But that's not all: up to 6 sets of three units can be parallel connected for a 75 kW / 90 kVA inverter and more than 1200 Amps charging capacity.

The MultiPlus-II 8k, 10k, and 15k models can only be connected in parallel if an external AC transfer switch is used. For more information see the [MultiPlus-II External Transfer Switch application manual](#).

On-site system configuring, monitoring and control

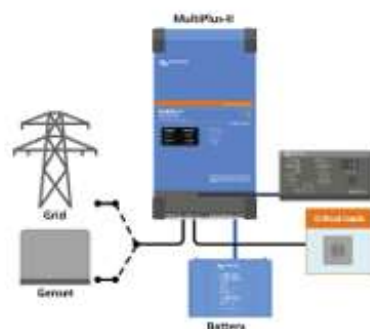
Settings can be changed in a matter of minutes with VEConfigure software (computer or laptop and MK3-USB interface needed).

Several monitoring and control options are available: Cerbo GX, Color Control GX, Venus GX, Octo GX, CANvu GX, laptop, computer, Bluetooth (with the optional VE.Bus Smart dongle), Battery Monitor, Digital Multi Control Panel.

Remote configuring and monitoring

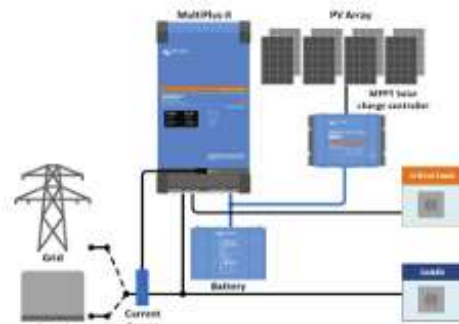
Install a Cerbo GX or other GX product to connect to the internet.

Operational data can be stored and displayed on our VRM (Victron Remote Management) website, free of charge. When connected to the internet, systems can be accessed remotely, and settings can be changed.



Standard marine, mobile or off-grid application

Loads that should shut down when AC input power is not available can be connected to a second output (not shown). These loads will be taken into account by the PowerControl and PowerAssist function in order to limit AC input current to a safe value when AC power is available.



Grid parallel topology with MPPT solar charge controller

The MultiPlus-II will use data from the external AC current sensor (must be ordered separately) or power meter to optimise self-consumption and, if required, to prevent grid feed. In case of a power outage, the MultiPlus-II will continue to supply the critical loads.



Ekrano GX or Cerbo GX

Provides intuitive system control and monitoring and enables access to our free remote monitoring website: the VRM Online Portal.



VRM Portal

Our free remote monitoring website (VRM) will display all system data in a comprehensive graphical format. System settings can be changed remotely via the portal. Alarms can be received by e-mail or push notification.



VRM app

Monitor and manage your Victron Energy system from your smart phone and tablet. Available for both iOS and Android.

MultiPlus 3 230V	12/3000/120-32 24/3000/70-32 48/3000/35-32	12/5000/230-50 24/5000/130-50 48/5000/70-50	48/9000 ¹⁾ 110-100	48/10000 ¹⁾ 140-100	48/15000 ¹⁾ 200-100
PowerControl & PowerAssist	Yes				
Transfer switch	32 A	50 A	100 A	100 A	100 A
Maximum AC input current	32 A	50 A	100 A	100 A	100 A
INVERTER					
DC input voltage range	12 V - 9.5-17 V		24 V - 19-33 V		48 V - 38-66 V
Output	Output voltage: 230 VAC ± 2% Frequency: 50 Hz ± 0,1% (1)				
Cont. output power at 25 °C (3)	3000 VA	5000 VA	8000 VA	10000 VA	15000 VA
Cont. output power at 25 °C	2400 W	4000 W	6400 W	8000 W	12000 W
Cont. output power at 40 °C	2200 W	3700 W	5500 W	7000 W	10000 W
Cont. output power at 65 °C	1700 W	3000 W	4000 W	6000 W	7000 W
Max apparent feed-in power	3000 VA	5000 VA	8000 VA	10000 VA	15000 VA
Peak power	5500 W	9000 W	15000 W	18000 W	27000 W
Maximum efficiency	93%/94%/95%	93%/96%/96%	95%	96%	95%
Zero load power	13/13/11 W	15/18/18 W	29 W	38 W	55 W
Zero load power in AES mode	9/9/7 W	11/12/12 W	19 W	27 W	39 W
Zero load power in Search mode	3/3/2 W	3/3/2 W	3 W	4 W	6 W
CHARGER					
AC Input	Input voltage range: 187-265 VAC Input frequency: 45 - 65 Hz				
Charge voltage 'absorption'	14,4 / 28,8 / 57,6 V				
Charge voltage 'float'	13,8 / 27,6 / 55,2 V				
Storage mode	13,2 / 26,4 / 52,8 V				
Max. battery charge current (4)	120/70/35 A	220/120/70 A	110 A	140 A	200 A
Battery temperature sensor	Yes				
GENERAL					
Auxiliary output	Yes (32 A)		Yes (50 A)		
External AC current sensor (optional)	50 A or 100 A				
Programmable relay (5)	Yes				
Protection (2)	a - g				
VE Bus communication port	For parallel and three phase operation, remote monitoring and system integration				
General purpose com. port	Yes, 2x				
Remote on-off	Yes				
Operating temperature range	-40 to +65 °C (fan assisted cooling)				
Humidity (non-condensing)	max 95 %				
ENCLOSURE					
Material & Colour	Steel, blue RAL 5012				
Protection category	IP22				
Battery-connection	M8 bolts		Four M8 bolts (2 plus and 2 minus connections)		
230 VAC-connection	Screw terminals 13 mm ⁶⁾ (6 AWG)		Bolts M6	Bolts M6	Bolts M6
Weight (kg)	19 kg	33/ 30/ 30 kg	42 kg	49 kg	80 kg
Dimensions (h/w/d) mm	546 x 275 x 147	702 x 345 x 152	642 x 365 x 206	677 x 363 x 206	818 x 405 x 217
	499 x 268 x 141	607 x 330 x 149			
	499 x 268 x 141	565 x 320 x 149			
STANDARDS					
Safety	EN-IEC 60335-1, EN-IEC 60335-2-29, EN-IEC 62109-1, EN-IEC 62109-2				
Emission, Immunity	EN 55014-1, EN 55014-2 EN-IEC 61000-3-2, EN-IEC 61000-3-3 IEC 61000-6-1, IEC 61000-6-2, IEC 61000-6-3				
Uninterruptible power supply	Please consult the certificates on our website.				
Anti-islanding	Please consult the certificates on our website.				
1) Can be adjusted to 60 Hz 2) Protection key: a) output short circuit b) overload c) battery voltage too high d) battery voltage too low e) temperature too high f) 230 VAC on inverter output g) input voltage ripple too high 3) Non-linear load, time factor 3:1 4) Up to 25 °C ambient 5) Programmable relay which can be set for general alarm, DC under voltage or genset start/stop function. AC rating: 230V / 4 A, DC rating: 4 A up to 35VDC and 1 A up to 60 VDC					



Digital Multi Control Panel

A convenient and low-cost solution for monitoring and control. With an on/off charger-only switch, full LED readout and a rotary knob to set PowerControl and PowerAssist levels.



VE Bus Smart Dongle

For monitoring and control via Bluetooth together with the VictronConnect app. It also measures battery voltage and temperature.



Interface MK3-USB

Needed to configure the MultiPlus. Can be used with the VictronConnect app or VEConfigure software. The interface connects to the MultiPlus via an RJ45 UTP cable and plugs into a USB port.



VictronConnect app
Use to monitor or configure MultiPlus using your phone or tablet or PC.



Current sensor 100A-50mA

To implement PowerControl and PowerAssist and to optimize self-consumption with external current sensing. Maximum current: 100 A

Специфікація на акумуляторну батарею Pylontech US3000C типу LiFePO₄

СПЕЦИФІКАЦІЯ (48 В)

Модель



US2000C



US3000C



US5000

Основні параметри				
Номинальна напруга (В)		48	48	48
Номинальна ємність (Вт·год)		2400	3552	4800
Корисна ємність (Вт·год)		2280	3374	4560
Розмір (мм)		442*410*89	442*420*132	442*420*161
Вага (кг)		24	32	39,7
Струм заряду/ розряду (А)	(Рекомендований)	25	37	80
	(Максимальний)	89@1хв	89@1хв	89@1хв
	(Піковий)	200@15сек	200@15сек	200@15сек
Комунікаційний порт		RS485, CAN		
Кількість окремих стрінгів (шт.)		16	16	16
Робоча температура/С		0-50		
Температура зберігання/С		-20 до 60		
Життєвий цикл		>6000, 25 С	>6000, 25 С	>6000, 25 С
Рівень аутентифікації		IEC62619/CE UN38.3	VDE2510-50 IEC62619/UL1973 UL9540A/CE/UN38.3	IEC62619/UL1973 /UL9540A/CE /UN38.3
Гарантійний термін		10 років (за умови реєстрації проекту на офіційному сайті Pylontech) 7 років (без реєстрації)		

Специфікація на інверторний генератор Hyundai DHY6000SE потужністю 5,2 кВт



Характеристики

Виробник двигуна	Hyundai D400
Витрати палива	180 г/кВт·год
Кількість циліндрів	1
Лічильник мотогодин	€
Тип генератора	дизельний генератор
Тип двигуна	4-х тактний
Тип розеток	1x16A (220V), 1x32A (220V)
Тип установок	пересувні (на колесах)
Номінальна потужність, кВт	5.0 кВт

Специфікація мікроконтролера ESP32 DevKit V1

ESP32-C3-DevKitM-1 – це плата розробки початкового рівня на основі модулів ESP32-C3-MINI-1 або ESP32-C3-MINI-1U, які отримали свою назву завдяки своїм компактним розмірам. Ця плата об'єднує повний спектр функцій Wi-Fi та Bluetooth® Low Energy.

Більшість контактів вводу/виводу на модулі виведені на роз'єми з обох боків плати для зручного підключення. Розробники можуть підключати периферійні пристрої за допомогою перемичок або монтувати ESP32-C3-DevKitM-1 на наплетну плату.



ESP32-C3-DevKitM-1

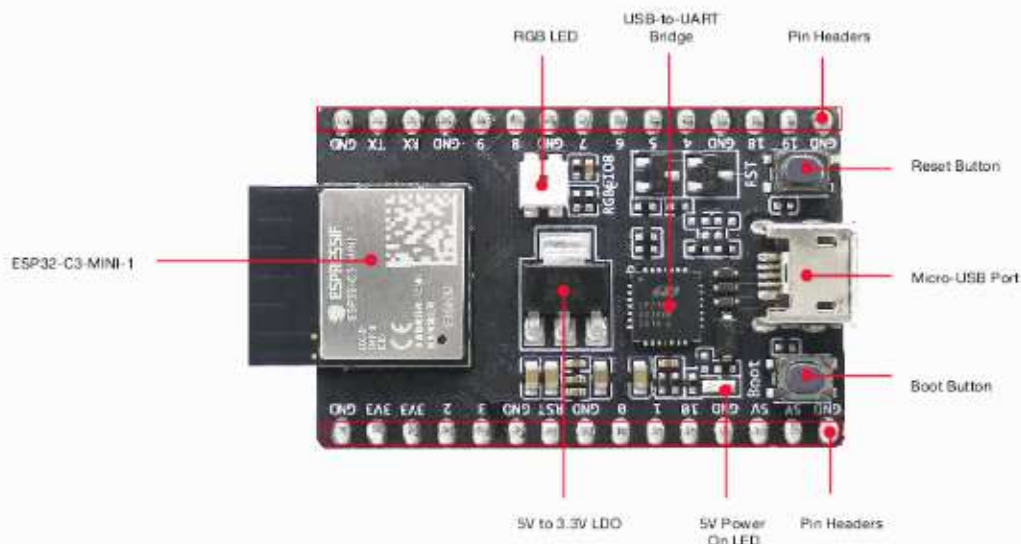
Документ складається з таких основних розділів:

- Початок роботи : Огляд ESP32-C3-DevKitM-1 та інструкції з налаштування апаратного/ програмного забезпечення для початку роботи.
- Довідка з апаратного забезпечення : Більш детальна інформація про апаратне забезпечення ESP32-C3-DevKitM-1.
- Відомості про версії обладнання : Історія версій, відомі проблеми та посилання на посібники користувача для попередніх версій (якщо такі є) ESP32-C3-DevKitM-1.
- Пов'язані документи : Посилання на пов'язану документацію.

Початок роботи

У цьому розділі наведено короткий огляд ESP32-C3-DevKitM-1, інструкції щодо початкового налаштування обладнання та встановлення на нього прошивки.

Опис компонентів



ESP32-C3-DevKitM-1 (з модулем ESP32-C3-MINI-1) - передня панель

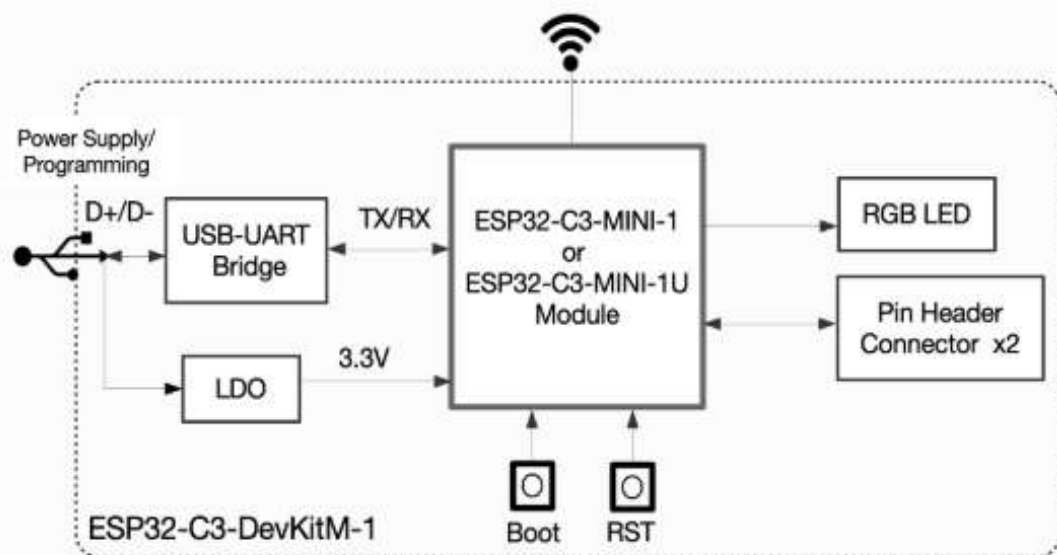
Ключові компоненти плати описані проти годинникової стрілки.

Ключовий компонент	Опис
ESP32-C3-MINI-1 або ESP32-C3-MINI-1U	ESP32-C3-MINI-1 та ESP32-C3-MINI-1U - це комбіновані модулі загального призначення Wi-Fi та Bluetooth Low Energy. ESP32-C3-MINI-1 постачається з вбудованою антеною на друкованій платі, тоді як ESP32-C3-MINI-1U має роз'єм для зовнішньої антени. Обидва мають флеш-пам'ять обсягом 4 МБ, інтегровану в корпус мікросхеми.
LDO від 5 В до 3,3 В	Регулятор потужності, який перетворює напругу живлення 5 В на вихідну напругу 3,3 В.
Світлодіод живлення 5 В	Вмикається, коли до плати підключено живлення USB.
Заголовки PIN-коду	Усі доступні контакти GPIO (крім шини SPI для флеш-пам'яті) підключені до роз'ємів на платі. Докладніше див. у розділі "Блок роз'ємів".
Кнопка завантаження	Кнопка завантаження. Утримування кнопки Boot , а потім натискання кнопки Reset запускає режим завантаження прошивки через послідовний порт.
Порт Micro-USB	USB-інтерфейс. Джерело живлення для плати, а також інтерфейс зв'язку між комп'ютером та мікросхемами серії ESP32-C3.
Кнопка скидання	Натисніть цю кнопку, щоб перезапустити систему.
Міст USB-UART	Один міст USB-UART забезпечує швидкість передачі даних до 3 Мбіт/с.
RGB-світлодіод	Адресований RGB-світлодіод, керований GPIO8.

Блок-схема



На блок-схемі нижче показано компоненти ESP32-C3-DevKitM-1 та їх взаємозв'язки.



ESP32-C3-DevKitM-1 (натисніть для збільшення)

Варіанти блоків живлення

Існує три взаємовиключні способи живлення плати:

- Порт Micro-USB, блок живлення за замовчуванням
- Роз'єми для контактів 5V та GND
- Роз'єми для контактів 3V3 та GND

Рекомендується використовувати перший варіант: порт Micro-USB.

Блок заголовка

У двох таблицях нижче наведено **назви** та **функції** роз'ємів з обох боків плати (J1 та J3).

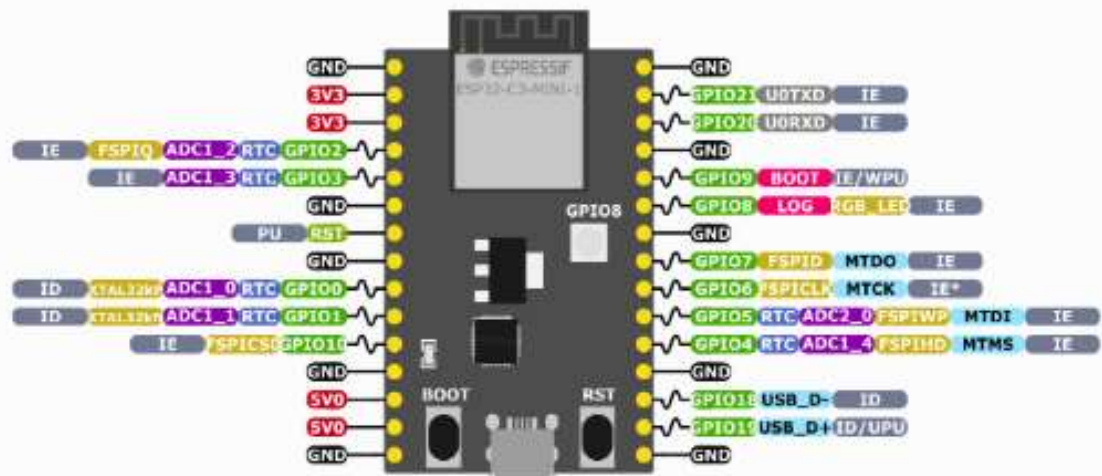
Назви роз'ємів показано на **передній панелі ESP32-C3-DevKitM-1** (з модулем ESP32-C3-MINI-1). Нумерація така ж, як і на **схемі ESP32-C3-DevKitM-1 (PDF)**.

J1

Ні.	Ім'я	Тип ¹	Функція
1	ЗЕМЛЯ	Г	Земля
2	3V3	П	Блок живлення 3,3 В
3	3V3	П	Блок живлення 3,3 В

Макет закріплення

ESP32-C3-DevKitM-1



ESP32-C3 Specs
 32-bit RISC-V single-core @160MHz
 Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n 2.4GHz
 Bluetooth LE 5
 400 KB SRAM (16 KB for cache)
 384 KB ROM
 22 GPIOs, 3x SPI, 2x UART, 12C,
 12S, RMT, LED PWM, USB Serial/JTAG,
 GDMA, TWAI®, 12-bit ADC

- PWM Capable Pin
- GPIO: Input and Output
- JTAG/USB: JTAG for Debugging and USB
- FLASH: External Flash Memory (SPI)
- ADC: Analog-to-Digital Converter
- Other: Other Related Functions
- SERIAL: Serial for Debug/Programming
- STRAP: Strapping Pin Functions

- RTC: RTC Power Domain (VDD3P3_RTC)
- GND: Ground
- PWR: Power Rails (3V3 and 5V)

- GPIO: Input Enable (After Reset)
- WPU: Weak Pull-up (Internal)
- WPD: Weak Pull-down (Internal)
- PU: Pull-up (External)
- ID: Input Disabled (After Reset)
- OE: Output Disabled (After Reset)
- OD: Output Disabled (After Reset)

Розташування контактів ESP32-C3-DevKitM-1 (з модулем ESP32-C3-MINI-1, натисніть для збільшення)

Додаток Б

Годинний енергетичний баланс системи

Го- дини	Навантаження, кВт	Генерація PV, кВт	Заряд/Розряд АКБ, кВт. год	Генератор, кВт
00:00	0,8	0	-0,8	0
01:00	0,8	0	-0,8	0
02:00	0,8	0	-0,8	0
03:00	0,8	0	-0,8	0
04:00	0,8	0	-0,8	0
05:00	0,8	0	-0,8	0
06:00	3,5	0,5	-3	0
07:00	3,5	0,8	-2,7	0
08:00	3,5	1,2	-2,3	0
09:00	4,5	2	-2,5	0
10:00	4,5	2,8	-1,7	0
11:00	4,5	3,5	1	0
12:00	5,5	4	0,5	0
13:00	5,5	4,5	0,3	0
14:00	5,5	4	0,5	0
15:00	4	2,5	1	0
16:00	4	1,8	0,5	0
17:00	4	1	-3	0,5
18:00	2,5	0,5	-2	2,5
19:00	2,5	0	-2,5	2,5
20:00	2,5	0	-2,5	1
21:00	1	0	-1	0
22:00	1	0	-1	0
23:00	1	0	-1	0

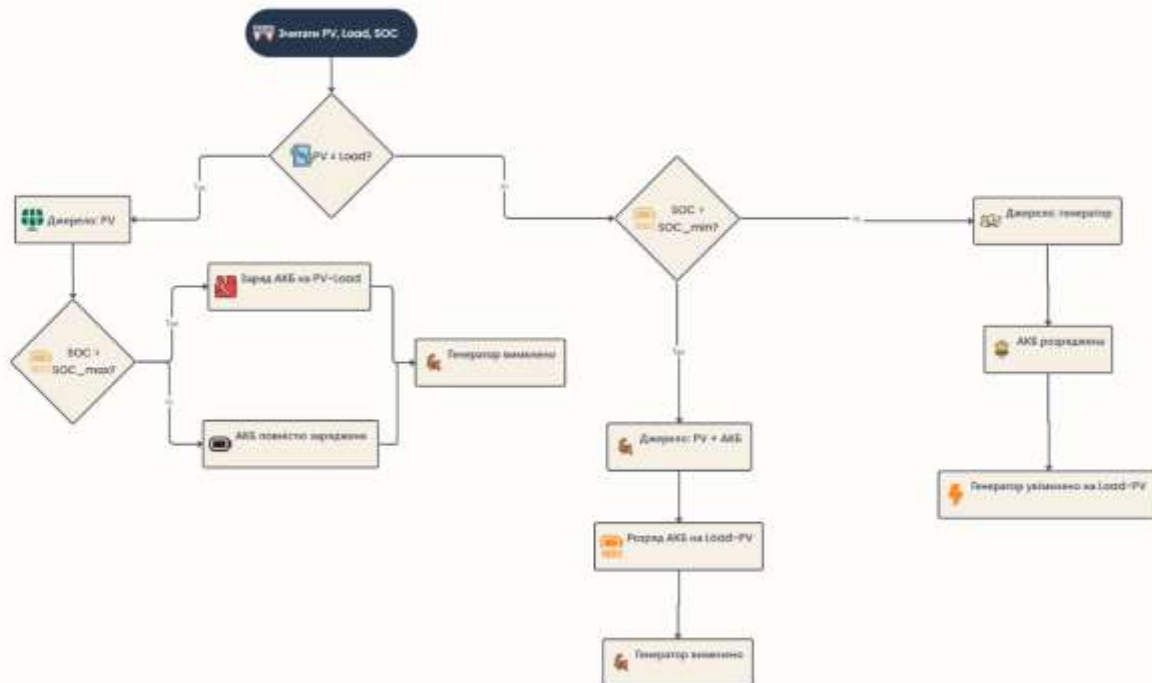
Додаток В

Алгоритми оптимального керування енергетичною системою



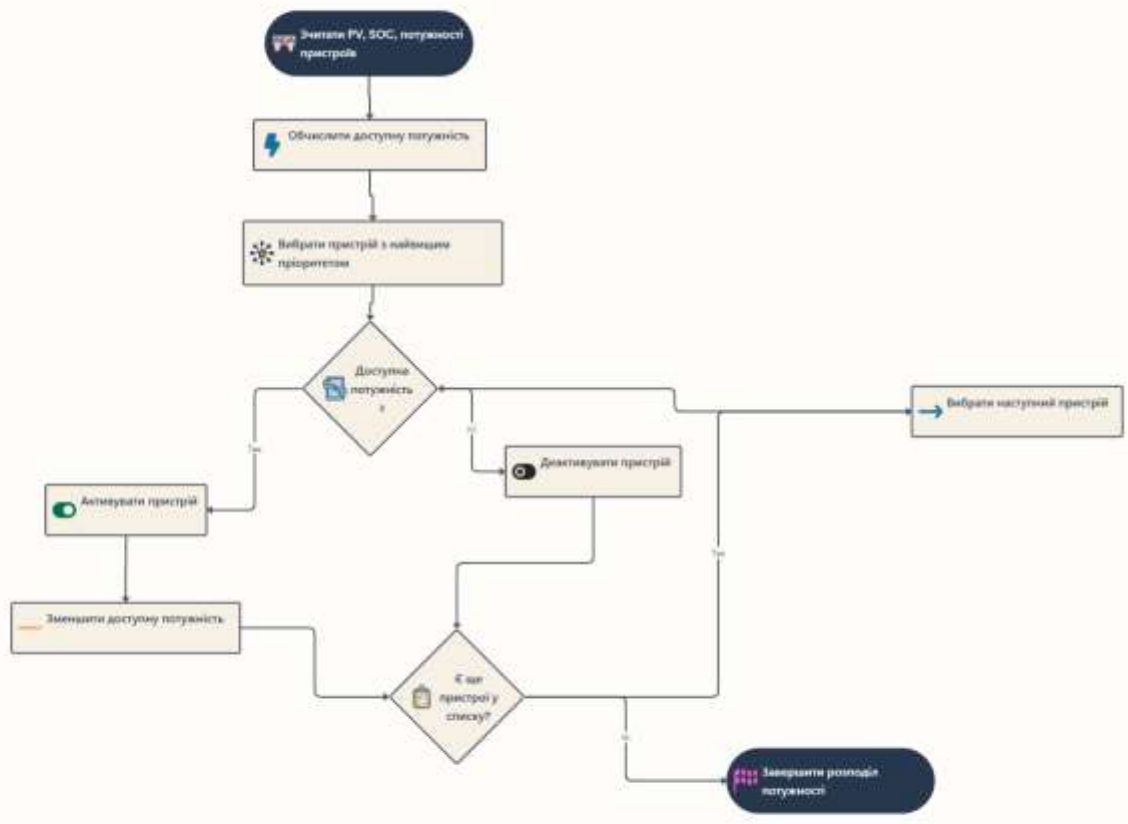
Алгоритм оптимального керування ГЕС

Оптимальне керування ГЕС базується на порівнянні PV, Load та SOC для вибору джерела живлення.



Розподіл потужності за пріоритетом

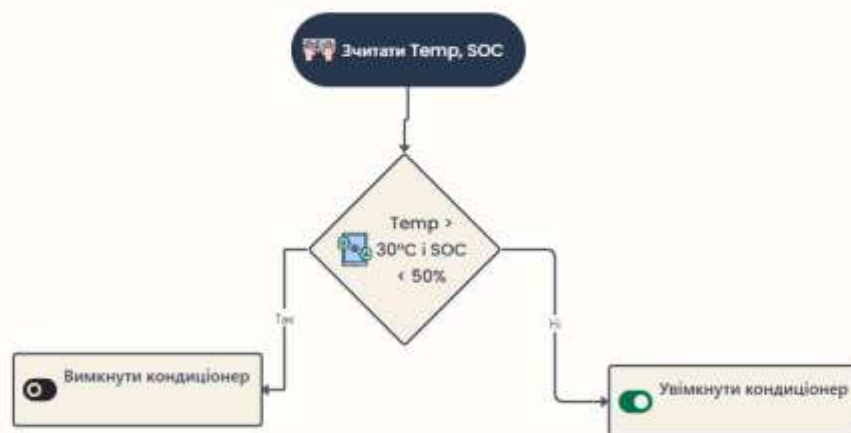
Розподіл потужності забезпечує живлення пристроїв згідно з їх пріоритетом та доступною енергією.



1. PV - потужність сонця
2. SOC - рівень заряду BTP

Логіка керування кондиціонером

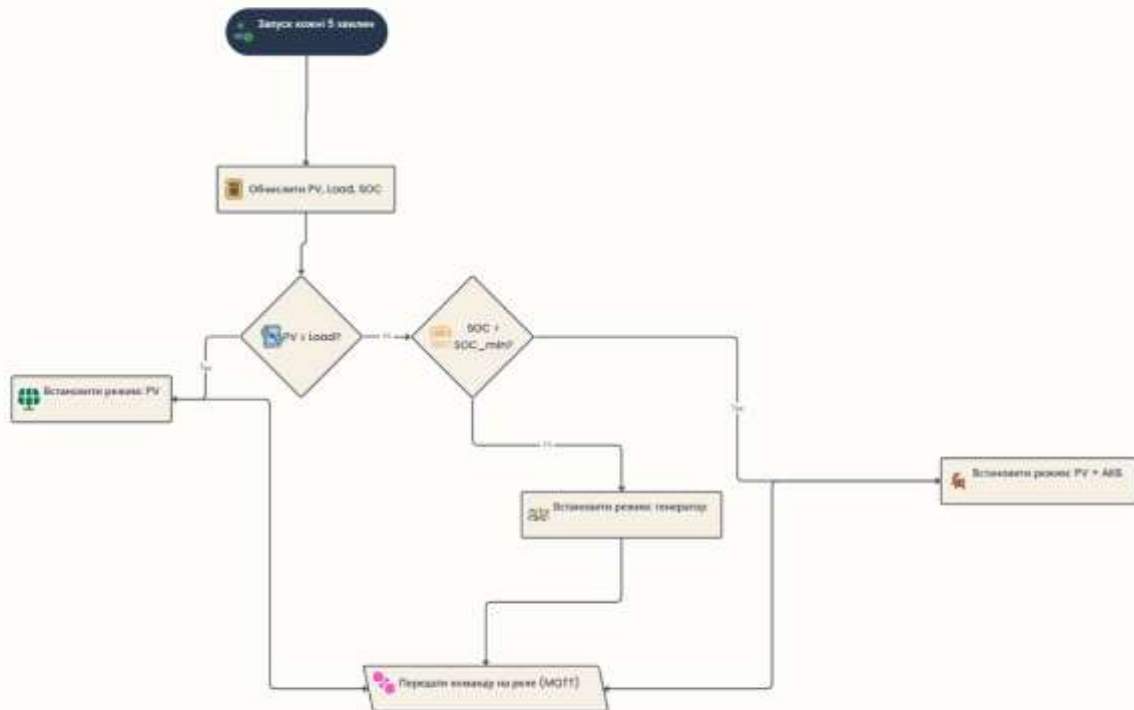
Керування кондиціонером залежить від температури та SOC для економії енергії.



1. Temp - середня температура.
2. SOC - рівень заряду АКБ.

Логіка керування живленням (етапи)

Керування живленням виконується послідовно: запуск, об'єкти, параметри, вибір режиму, передача команди.



1. PV > Load?
 2. SOC > SOC_min?

built with Myrall