

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ІoT-система автоматизації трекінгу сонячних панелей на
основі аналізу та прогнозування сонячної активності»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

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

(підпис)

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача

Виконав: Олексій СИДОРЕНКО
здобувач вищої освіти
група ІСДМ-64

Керівник: Сергій СОЛОМАХА
науковий ступінь, к.е.н., доцент
вчене звання

Рецензент:
науковий ступінь, _____
вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ – 2024

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСТ

Каміла СТОРЧАК

«____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Сидоренку Олексію Павловичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «ІоТ-система автоматизації трекінгу сонячних панелей на основі аналізу та прогнозування сонячної активності»

керівник кваліфікаційної роботи Сергій СОЛОМАХА, к. е. н., доцент
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «15» жовтня 2024 року №320.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 27 грудня 2024 року.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: науково-технічна література, специфікації електронних компонентів, офіційна документація та стандарти оформлення коду Python.

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

1. Аналіз сучасних методів автоматизації трекінгу сонячних панелей.
2. Розробка ІоТ-системи автоматизації трекінгу сонячних панелей для малої ферми.
3. Інтеграція алгоритмів машинного навчання для прогнозування сонячної активності.
4. Оцінка енергетичної ефективності та оптимізації роботи системи.

5. Перелік графічного матеріалу: *презентація*
- 1. Структурна схема IoT-системи автоматизації трекінгу сонячних панелей.
 - 2. Візуалізація алгоритмів прогнозування сонячної активності.
 - 3. Графіки енергетичної ефективності системи.
 - 4. Монтажна схема апаратного забезпечення системи.
6. Дата видачі завдання 15 жовтня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних технологій автоматизації трекінгу сонячних панелей та їх енергетичної ефективності.	19.10-05.11.24	Виконано
2	Порівняльний аналіз апаратних та програмних рішень для реалізації IoT-систем в сонячній енергетиці.	05.11-12.11.24	Виконано
3	Розробка технічного завдання та вибір обладнання для IoT-системи автоматизації.	13.11-19.11.24	Виконано
4	Розробка програмного забезпечення для прогнозування сонячної активності.	20.11-25.11.24	Виконано
5	Інтеграція апаратного забезпечення із програмними модулями системи.	27.11-03.12.24	Виконано
6	Тестування та оцінка енергетичної ефективності розробленої IoT-системи.	04.12-10.12.24	Виконано
7	Оформлення наукової роботи: вступ, висновки, реферат	11.12-20.12.24	Виконано
8	Розробка презентаційних матеріалів	21.12-26.12.24	Виконано

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Олексій СИДОРЕНКО

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

кваліфікаційної роботи

(підпис)

Сергій СОЛОМАХА

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 83 стор., 74 рис., 2 табл., 43 джерела.

Об'єкт дослідження – процес автоматизації трекінгу сонячних панелей із застосуванням IoT-технологій для підвищення енергетичної ефективності малих сонячних електростанцій.

Предмет дослідження – методи та алгоритми автоматизації трекінгу сонячних панелей, включаючи прогнозування сонячної активності, а також функціональні можливості апаратного і програмного забезпечення, інтегрованого в IoT-систему.

Мета роботи – розробка концепції, технічного забезпечення та програмного модуля IoT-системи автоматизації трекінгу сонячних панелей із використанням прогнозування сонячної активності для підвищення енергетичної ефективності системи.

Методи дослідження: методи системного аналізу, математичного моделювання, алгоритмізації, машинного навчання, а також програмні методи обробки даних, створення прототипу та його тестування.

Короткий зміст роботи: У роботі проведено аналіз сучасних технологій трекінгу сонячних панелей, розглянуто переваги динамічних трекінгових систем у порівнянні зі статичними. Виконано вибір апаратного забезпечення для реалізації IoT-системи, включаючи сенсори, контролери, приводи і комунікаційні модулі. Розроблено програмний модуль прогнозування сонячної активності на основі алгоритму Random Forest, інтегрований у систему для оптимізації орієнтації панелей. Проведено тестування розробленої системи, здійснено оцінку її енергетичної ефективності та проаналізовано результати.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІОТ, ТРЕКІНГ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ, СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ, RANDOM FOREST.

ABSTRACT

The text part of the qualification work for obtaining a master's degree: 83 pages, 74 figures, 2 tables, 43 references.

Object of the research – the process of automating solar panel tracking using IoT technologies to enhance the energy efficiency of small solar power plants.

Subject of the research – methods and algorithms for automating solar panel tracking, including solar activity forecasting, as well as the functional capabilities of hardware and software integrated into the IoT system.

Purpose of the work – to develop the concept, technical infrastructure, and software module of an IoT system for automating solar panel tracking using solar activity forecasting to improve the system's energy efficiency.

Research methods: methods of system analysis, mathematical modeling, algorithm development, machine learning, as well as software-based methods for data processing, prototyping, and testing.

Brief content of the work: The work analyzes modern technologies for solar panel tracking, comparing the advantages of dynamic tracking systems over static ones. The hardware required for implementing the IoT system, including sensors, controllers, actuators, and communication modules, was selected. A software module for solar activity forecasting, based on the Random Forest algorithm, was developed and integrated into the system for optimizing panel orientation. The developed system was tested, its energy efficiency evaluated, and the results analyzed.

KEYWORDS: IOT, SOLAR PANEL TRACKING, SOLAR ENERGY, SOLAR ACTIVITY FORECASTING, RANDOM FOREST.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРЕКІНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	11
1.1 Сучасні підходи до автоматизації в системах сонячної енергетики.....	11
1.2 Технічні аспекти роботи сонячних панелей та вплив сонячної активності	18
1.3 Концепція Інтернету речей (IoT) та її застосування в сонячній енергетиці	25
1.4 Огляд методів моделей прогнозування сонячної активності	34
2 РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ТРЕКІНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	40
2.1. Формування вимог до функціоналу та архітектури системи	40
2.2. Технічні розрахунки та вибір обладнання.....	41
2.3. Проектування монтажною схеми системи	54
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІОТ-СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРЕКІНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ	60
3.1 Реалізація функцій нижчого рівня управління апаратним забезпеченням.....	60
3.2. Забезпечення обміну даними для віддаленого моніторингу та керування системою	67
3.3. Впровадження алгоритмів машинного навчання для передбачення сонячної активності.....	80
ВИСНОВКИ.....	90
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	92
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація).....	96

ВСТУП

Впровадження сучасних технологій у галузі сонячної енергетики є одним із ключових напрямів розвитку відновлюваних джерел енергії. Ураховуючи глобальні екологічні виклики, а також необхідність підвищення енергетичної ефективності, автоматизація процесів трекінгу сонячних панелей набуває особливого значення. Завдяки інтеграції Інтернету речей (IoT), алгоритмів прогнозування та сучасних датчиків, створення адаптивних систем автоматизації є важливим кроком у забезпеченні енергетичної незалежності України. Вибір теми дослідження також зумовлений її актуальністю для малих фермерських господарств, які прагнуть знизити витрати на енергоспоживання завдяки використанню автономних систем.

За останнє десятиріччя увага науковців була зосереджена на розробці ефективних систем трекінгу сонячних панелей. Дослідники пропонують інноваційні підходи до автоматизації, зокрема застосування нейронних мереж, алгоритмів Random Forest та кластеризації для підвищення точності прогнозування. Водночас, низка аспектів, таких як адаптація до кліматичних змін та інтеграція із хмарними сервісами, залишаються недостатньо вивченими, що й визначило напрям дослідження.

Мета і завдання дослідження. Основною метою роботи є розробка IoT-системи автоматизації трекінгу сонячних панелей, яка базується на прогнозуванні сонячної активності. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасних підходів до автоматизації та прогнозування в системах сонячної енергетики.
2. Розробити концепцію IoT-системи з урахуванням вимог до енергоефективності.
3. Здійснити моделювання апаратної архітектури системи.
4. Реалізувати програмне забезпечення з використанням алгоритмів машинного навчання.

5. Провести тестування та оцінку ефективності розробленої системи.

Об'єкт дослідження – процес автоматизації трекінгу сонячних панелей для підвищення енергетичної ефективності. Предмет дослідження – програмно-апаратна IoT-система автоматизації трекінгу, яка базується на прогнозуванні сонячної активності.

Методи дослідження. У роботі використано методи моделювання, статистичного аналізу, а також алгоритми машинного навчання для реалізації прогнозування сонячної активності. Практичне тестування системи здійснювалось із використанням апаратного забезпечення Raspberry Pi, датчиків DHT22, GPS-модуля та інших компонентів.

Наукова новизна та практична значущість полягає тому, що розроблено та апробовано концепцію IoT-системи трекінгу сонячних панелей, яка враховує як реальні, так і прогнозовані показники сонячної активності. Практична значущість роботи полягає у можливості впровадження запропонованої системи на рівні малих фермерських господарств, що дозволить знизити залежність від традиційних джерел енергії.

Диплом складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та демонстраційних матеріалів.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРЕКІНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

1.1 Сучасні підходи до автоматизації в системах сонячної енергетики

Розробки в галузі сонячної енергетики є перспективними з огляду на значне зростання ринку відновлюваних джерел енергії. Згідно з дослідженням Nova One Advisor, глобальний ринок відновлюваної енергії оцінювався у 1,14 трильйона доларів США у 2023 році та прогнозується досягти 5,62 трильйона доларів США до 2033 року, зі середньорічним темпом зростання (CAGR) 17,3% у період з 2024 по 2033 роки (рис. 1.1).

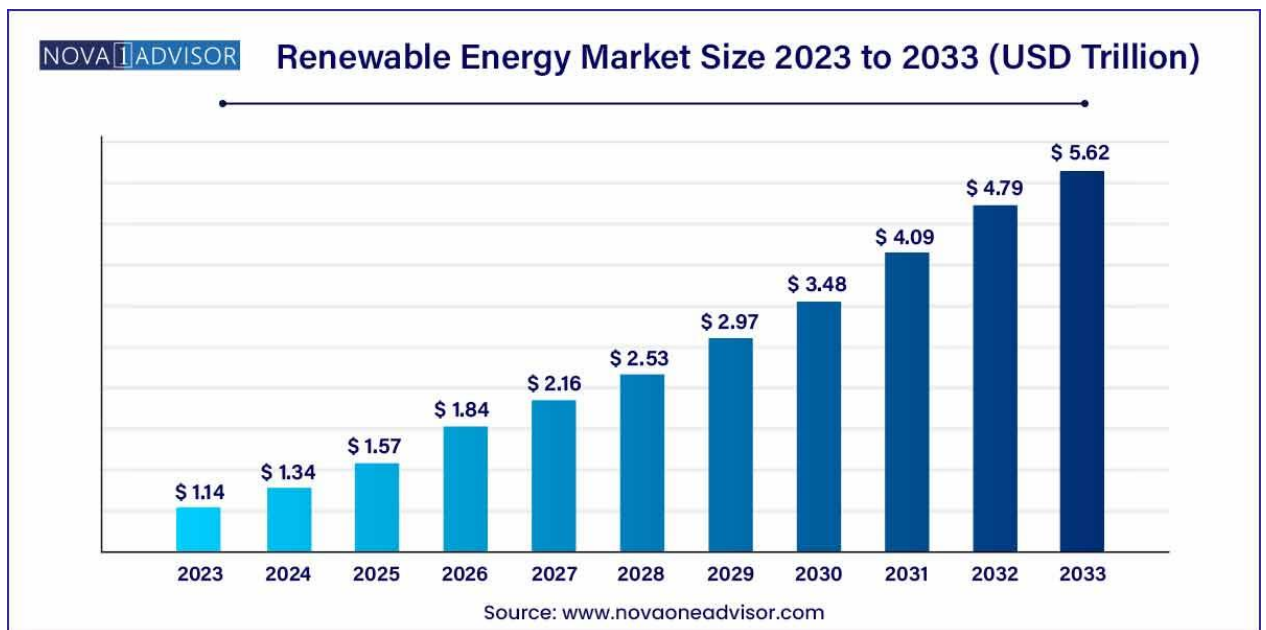


Рис. 1.1 – Прогноз ринку відновлювальної енергетики до 2033 року [1]

Серед різних джерел відновлюваної енергії сегмент сонячної енергії займає провідну позицію, складаючи 41% ринку у 2023 році. Це свідчить про зростаючий попит на сонячні технології та інвестиції у цю сферу.

Регіонально, Азіатсько-Тихоокеанський регіон домінує на ринку відновлюваної енергії, забезпечуючи 40,98% доходу у 2023 році. Це зумовлено активною установкою сонячних електростанцій у Китаї та Індії, які є

ключовими ринками для сонячних панелей як у глобальному масштабі, так і в межах Азіатсько-Тихоокеанського регіону (рис. 1.2).

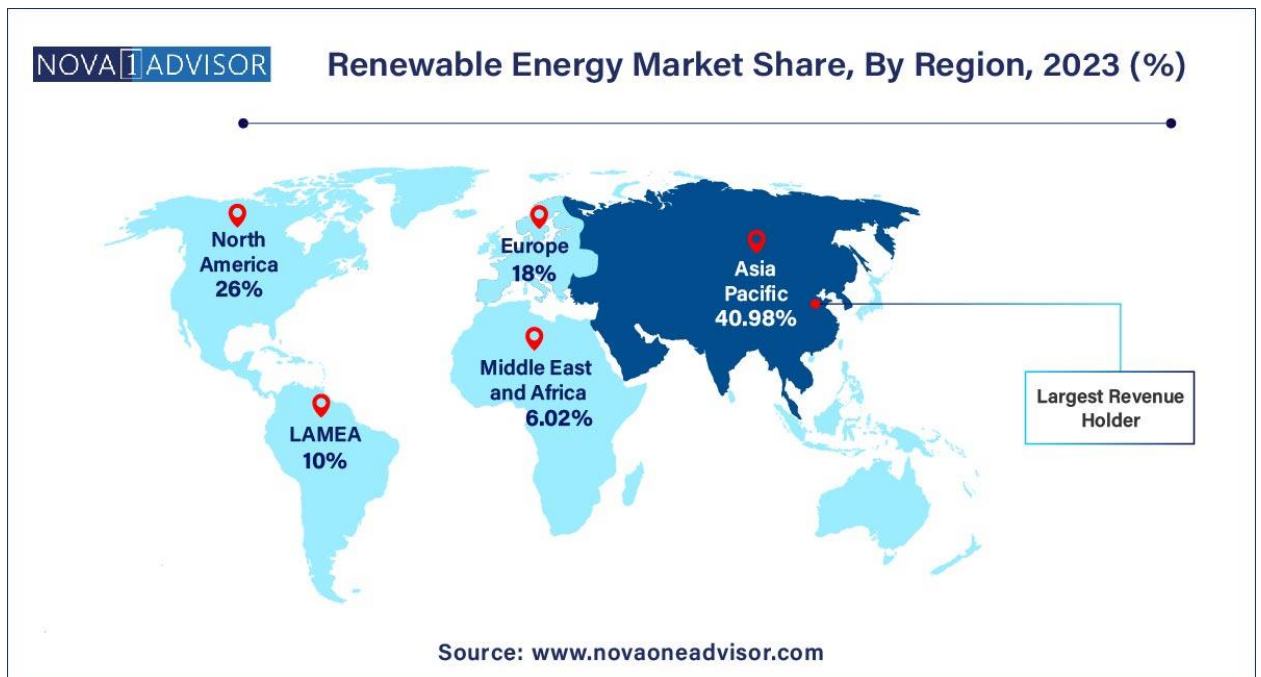


Рис. 1.2 – Світовий ринок відновлювальної енергії [1]

Крім того, технологічні досягнення, такі як підвищення ефективності сонячних панелей та зниження їх вартості, сприяють ширшому впровадженню сонячної енергетики. Підтримка урядів у вигляді податкових пільг та програм стимулювання також відіграє важливу роль у розвитку цього сектору.

Загалом, зростання глобального ринку відновлюваної енергії, особливо сегменту сонячної енергетики, підкреслює перспективність інвестицій та розробок у цій галузі, що сприятиме впровадженню новітніх технологій та створенню ефективних автоматизованих систем. [1]

Автоматизація є ключовим компонентом у сучасних системах сонячної енергетики, спрямованим на підвищення ефективності використання сонячної енергії та оптимізацію виробництва електроенергії. У сучасних умовах зростаючого попиту на відновлювані джерела енергії автоматизовані трекінгові системи стали важливим елементом інтеграції сонячних установок у загальну енергетичну інфраструктуру.

Один із основних напрямів автоматизації в сонячній енергетиці полягає в розробці систем трекінгу сонячних панелей. Такі системи забезпечують орієнтацію панелей у напрямку максимальної сонячної радіації протягом дня, що дозволяє значно підвищити ефективність перетворення сонячної енергії (рис. 1.3).

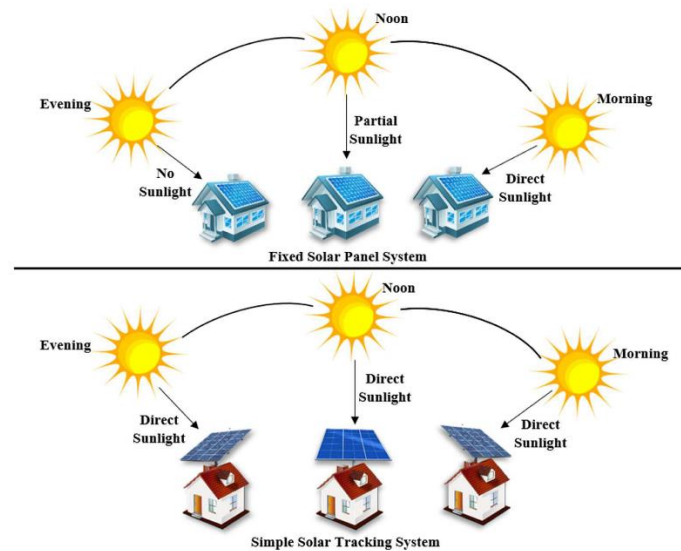


Рис. 1.3 – Відмінність систем із використанням трекінгу [3]

Існують два основні типи трекінгових систем: одноосьові та двоосьові (рис. 1.4). Одноосьові системи регулюють положення панелей за однією віссю (зазвичай схід-захід), тоді як двоосьові забезпечують більш точне стеження за рухом сонця, змінюючи положення панелей як по горизонтальній, так і по вертикальній осях.

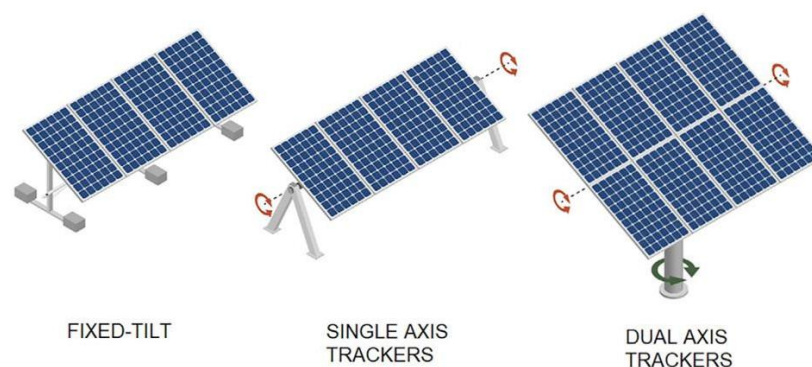


Рис. 1.4 – Одноосьові та двоосьові системи трекінгу сонячних панелей [2]

Сучасні підходи до автоматизації в цій сфері включають використання датчиків, алгоритмів прогнозування та інтеграцію з Інтернетом речей (IoT) – прототип подібної системи можна побачити на рис. 1.5. Датчики, такі як фотоелементи або датчики освітленості, забезпечують реальний час збору даних про інтенсивність сонячного випромінювання. На основі цих даних мікроконтролери або мікропроцесори, інтегровані в систему, приймають рішення про зміну кута нахилу панелей. Крім того, автоматизація включає використання алгоритмів прогнозування, які базуються на історичних даних про сонячну активність та метеорологічних прогнозах. Це дозволяє не лише оперативно адаптувати роботу системи до поточних умов, але й планувати її функціонування на майбутнє.

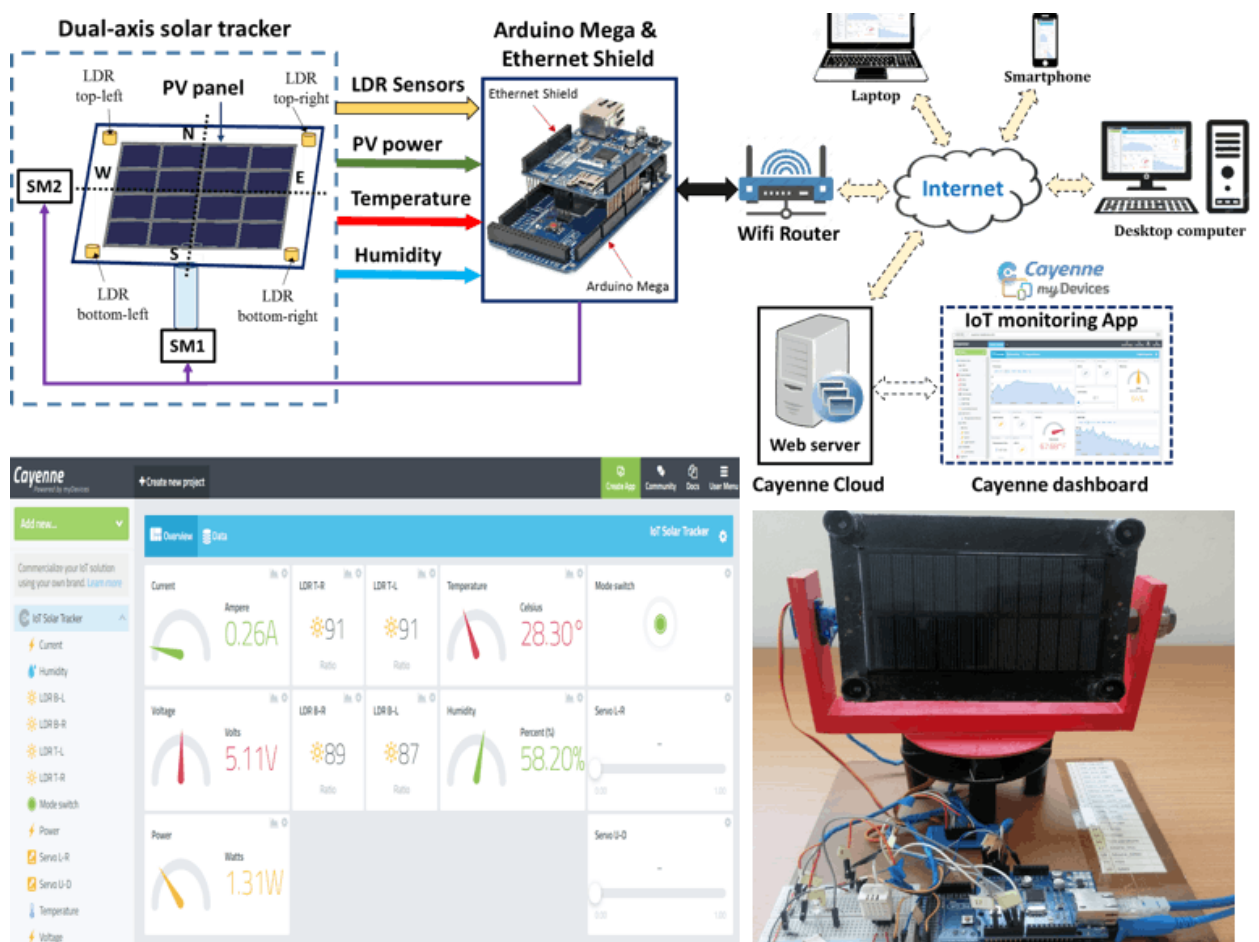


Рис. 1.5 – Прототип автоматизації сонячних панелей з використанням IoT та трекінгу [4]

Одним із важливих аспектів автоматизації є впровадження IoT-технологій, що забезпечують дистанційний моніторинг і контроль систем (рис. 1.6). За допомогою IoT-платформ користувачі та оператори можуть отримувати інформацію про стан обладнання, вироблену електроенергію, прогнозовані показники ефективності тощо. Крім того, такі системи дозволяють автоматично оновлювати програмне забезпечення, оптимізувати роботу панелей та проводити діагностику обладнання, що знижує витрати на технічне обслуговування.

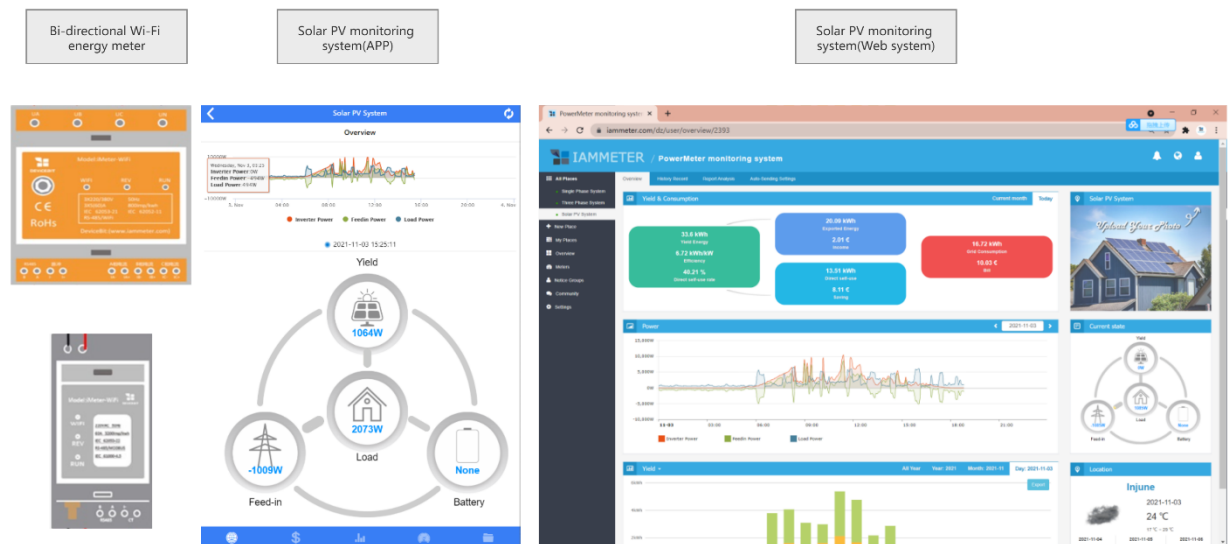


Рис. 1.6 – Приклад екрану моніторингу системи сонячних панелей [5]

Інноваційні підходи також включають використання технологій машинного навчання та штучного інтелекту для вдосконалення роботи трекінгових систем. Алгоритми машинного навчання дозволяють враховувати комплексні фактори, такі як погодні умови, сезонні коливання сонячної активності та деградацію панелей з часом. Завдяки цьому можна значно підвищити ефективність роботи системи та продовжити термін служби обладнання.

Розробка інженерних і технічних рішень для систем трекінгу сонячних панелей включає кілька ключових етапів:

1. Механічне проєктування. В основі кожної системи трекінгу лежить механічна конструкція, яка повинна бути достатньо міцною, щоб витримувати вплив вітру, опадів і вагу сонячних панелей. Для одноосьових систем зазвичай використовуються рами, які обертаються навколо горизонтальної або вертикальної осі. Двоосьові системи вимагають складніших механізмів із шарнірними вузлами та приводами, що забезпечують незалежне обертання по двох осях.

2. Датчики та сенсори. Трекінгові системи обладнуються фотоелектричними датчиками, які визначають інтенсивність сонячного світла, або GPS-модулями, що розраховують положення сонця на основі географічних координат і часу доби. Додатково можуть використовуватися датчики температури, вологості та швидкості вітру для моніторингу навколишніх умов.

3. Приводи та двигуни. Для переміщення панелей використовуються електродвигуни постійного струму або серводвигуни. Вони повинні бути енергоефективними, щоб мінімізувати споживання енергії самою системою. У багатьох випадках застосовуються редуктори для зменшення швидкості обертання і збільшення крутного моменту.

4. Електронні системи керування. Центральний блок керування обробляє дані з датчиків і приймає рішення про зміну положення панелей. Найчастіше в таких системах використовуються мікроконтролери (наприклад, Arduino, Raspberry Pi) або спеціалізовані контролери для промислових застосувань. Блок керування забезпечує інтерфейс для користувача, можливість налаштування параметрів і доступ до даних у реальному часі.

5. Програмне забезпечення. Алгоритми керування включають моделі прогнозування, що дозволяють враховувати як поточні, так і прогнозовані погодні умови. Програмне забезпечення може включати функції оптимізації,

які забезпечують максимальний збір енергії при мінімальних витратах енергії на обертання системи.

6. Енергозабезпечення. Для роботи трекінгової системи необхідно забезпечити надійне джерело живлення. У деяких випадках частина енергії, зібраної сонячними панелями, може використовуватися для живлення самої системи.

7. Тестування та калібрування. Після монтажу система проходить тестування в реальних умовах. Калібрування включає налаштування точності датчиків, перевірку алгоритмів керування та оцінку енергоспоживання.

Схематичне зображення механічної конструкції трекінгу сонячних панелей можна побачити на рис. 1.7.

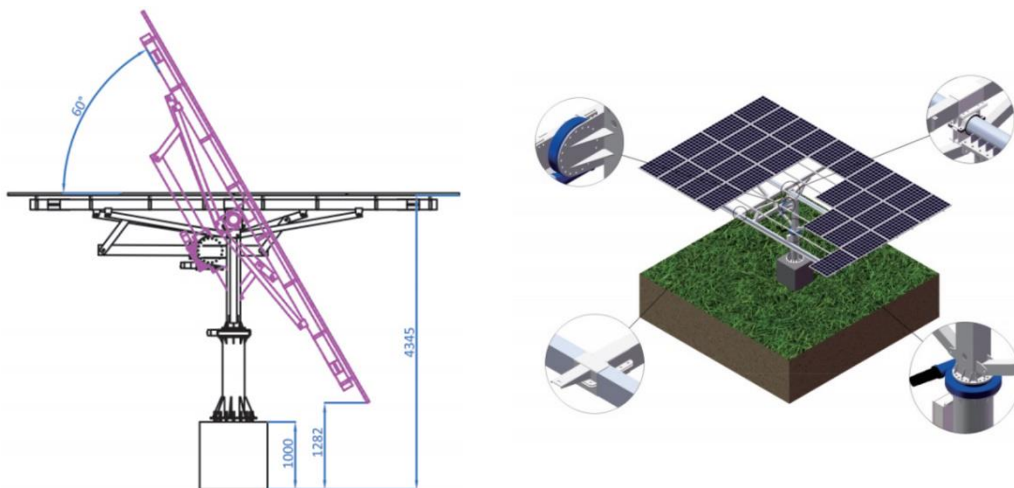


Рис. 1.7 – Інженерне конструювання систем автоматичного трекінгу сонячних панелей [6]

Загалом, автоматизація в системах сонячної енергетики спрямована на досягнення максимальної енергетичної ефективності, мінімізацію людського втручання та адаптацію до змінних умов середовища. Завдяки розвитку сучасних технологій автоматизація стає доступнішою та економічно доцільною, що стимулює її подальше впровадження у сфері відновлюваної енергетики.

1.2 Технічні аспекти роботи сонячних панелей та вплив сонячної активності

Сонячні панелі є ключовими компонентами систем відновлюваної енергетики, які використовують енергію сонячного випромінювання для генерації електроенергії. Принцип їхньої роботи базується на фотоелектричному ефекті, коли фотони світла, що падають на напівпровідниковий матеріал, створюють електричний струм (рис. 1.8).

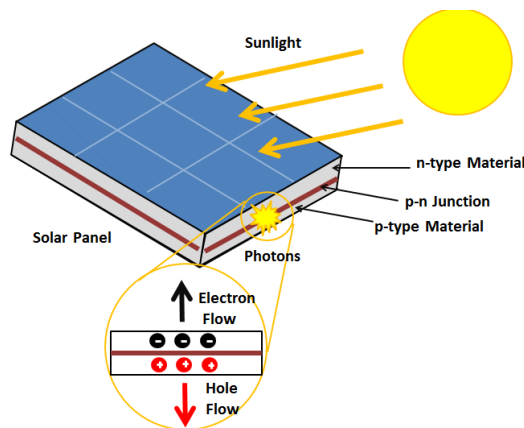


Рис. 1.8 – Дія фотоелектричного ефекту у роботі сонячних панелей [7]

Сонячні панелі зазвичай складаються з кількох шарів: напівпровідникового шару, що відповідає за генерацію електричного струму, шару антивідбиваючого покриття для зменшення втрат світла, та захисних шарів із скла або полімерів для запобігання механічним пошкодженням (рис. 1.9).

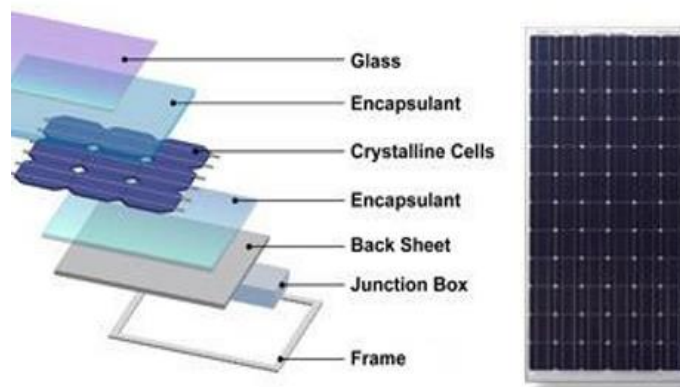


Рис. 1.9 – Структура сонячної панелі [9]

Основним матеріалом для виготовлення сонячних елементів є кремній, який може бути монокристалічним, полікристалічним або аморфним. Монокристалічні панелі відрізняються високою ефективністю (до 22%) і довгим терміном служби, тоді як полікристалічні та аморфні панелі є дешевшими у виробництві, але мають нижчу ефективність (рис. 1.10).

Comparing Solar Panel Types			
SOLAR PANEL TYPE	Monocrystalline	Polycrystalline	Amorphous
GLASS COLOR	Black	Blue	Brown, Gray, Black
COMPOSITION	Single-crystal silicon	Multi-crystal silicon	Thin silicon layer
SIZE	Small (most space efficient)	Larger (less space efficient)	Largest (least space efficient)
PRICE	Premium	Value	Economy
EFFICIENCY	15 - 20%	13 - 16%	6 - 9%

Рис. 1.10 – Порівняння різних типів сонячних панелей [8]

Основні типи сонячних панелей:

- Монокристалічні панелі: виготовляються з одного кристала кремнію. Мають найвищу ефективність і довговічність. Їхня вартість залишається високою, що робить їх оптимальними для застосувань, де пріоритетом є максимальна продуктивність.
- Полікристалічні панелі: складаються з багатьох кристалів кремнію, що утворюють менш однорідну структуру. Їхня ефективність становить 15-18%, але вони є доступнішими за ціною, що робить їх популярним вибором для великих комерційних установок.
- Аморфні (тонкоплівкові) панелі: виготовляються з тонкого шару кремнію, нанесеного на скло, пластик або метал. Вони легкі, гнучкі та дешевші

у виробництві. Проте їхня ефективність становить лише 8-12%, що обмежує їх застосування переважно в портативних або спеціалізованих пристроях.

- Гібридні панелі: поєднують різні технології для досягнення високої ефективності, наприклад, поєднання монокристалічного шару та тонкоплівкових елементів. Такі панелі забезпечують оптимальну продуктивність навіть за умов слабого освітлення.

У табл. 1.1 наведено порівняння ефективності різних типів сонячних панелей.

Таблиця 1.1

Порівняння ефективності різних типів сонячних панелей

Тип панелі	Ефективність (%)	Температурний коефіцієнт (%/°C)	Продуктивність при слабкому освітленні (%)
Монокристалічні	22	-0.3	70
Полікристалічні	15-18	-0.4	65
Тонкоплівкові	8-12	-0.5	85

Ефективність сонячних панелей визначає їхню здатність максимально перетворювати сонячне світло на електричну енергію. Монокристалічні панелі демонструють найвищий рівень ефективності, що становить до 22%, завдяки однорідності матеріалу. Цей показник є найкращим серед усіх типів панелей, оскільки мінімізуються енергетичні втрати. Полікристалічні панелі мають середній рівень ефективності, який варіюється від 15% до 18%, через багатокристалічну структуру, що знижує їхню продуктивність. Тонкоплівкові панелі характеризуються найнижчою ефективністю в межах 8-12%, що обумовлено меншою здатністю матеріалу перетворювати сонячне світло.

Температурний коефіцієнт є важливим показником, що відображає втрати продуктивності панелей при підвищенні температури. Монокристалічні панелі демонструють найнижчий коефіцієнт втрат, який становить -0.3% на кожен градус Цельсія підвищення температури, що робить

їх ефективними в умовах підвищеної температури. Полікристалічні панелі мають дещо гірший показник у $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$, тоді як тонкоплівкові панелі виявляються найбільш чутливими до змін температури з коефіцієнтом $-0.5\%/^{\circ}\text{C}$.

Продуктивність панелей при слабкому освітленні є ключовим фактором для їх застосування у регіонах із частими хмарними днями. Тонкоплівкові панелі показують найкращий результат за цього показника, досягаючи 85% продуктивності в умовах слабого освітлення. Монокристалічні панелі забезпечують середню продуктивність на рівні 70%, тоді як полікристалічні трохи відстають із результатом у 65%.

Таким чином, вибір типу панелей залежить від специфічних умов їх експлуатації, таких як клімат, температурні режими та доступність сонячного випромінювання. Монокристалічні панелі оптимально підходять для високотемпературних регіонів, полікристалічні є економічно вигідним вибором для комерційних проєктів, а тонкоплівкові ефективно працюють у регіонах із розсіяним освітленням.

Системи сонячних панелей складаються з кількох основних компонентів, кожен із яких виконує критично важливу функцію (рис. 1.11). Основними елементами таких систем є:

1. Сонячні панелі (модулі) - основний компонент, що генерує електроенергію з сонячного світла. Вони складаються з фотоелектричних елементів, що перетворюють фотони на електрони через фотоелектричний ефект.

2. Інвертор - перетворює постійний струм, що генерується панелями, на змінний струм, який можна використовувати для живлення побутових чи промислових електроприладів. Інвертори можуть бути централізованими (для великих систем) або мікроінверторами (для індивідуальних панелей).

3. Контролер заряду - регулює процес зарядки акумуляторів, запобігаючи їх перевантаженню та надмірному розряду. Він є ключовим елементом для автономних систем.

4. Акумуляторна система - зберігає електроенергію для використання у нічний час або в умовах слабого освітлення. Типові технології включають літій-іонні або свинцево-кислотні акумулятори.

5. Монтажні системи - конструкції для закріплення панелей під оптимальним кутом. Вони можуть бути стаціонарними або динамічними (з трекінговими системами).

6. Кабелі та з'єднувачі - забезпечують передачу електроенергії між компонентами системи. Використовуються матеріали з високою провідністю, наприклад мідь чи алюміній.

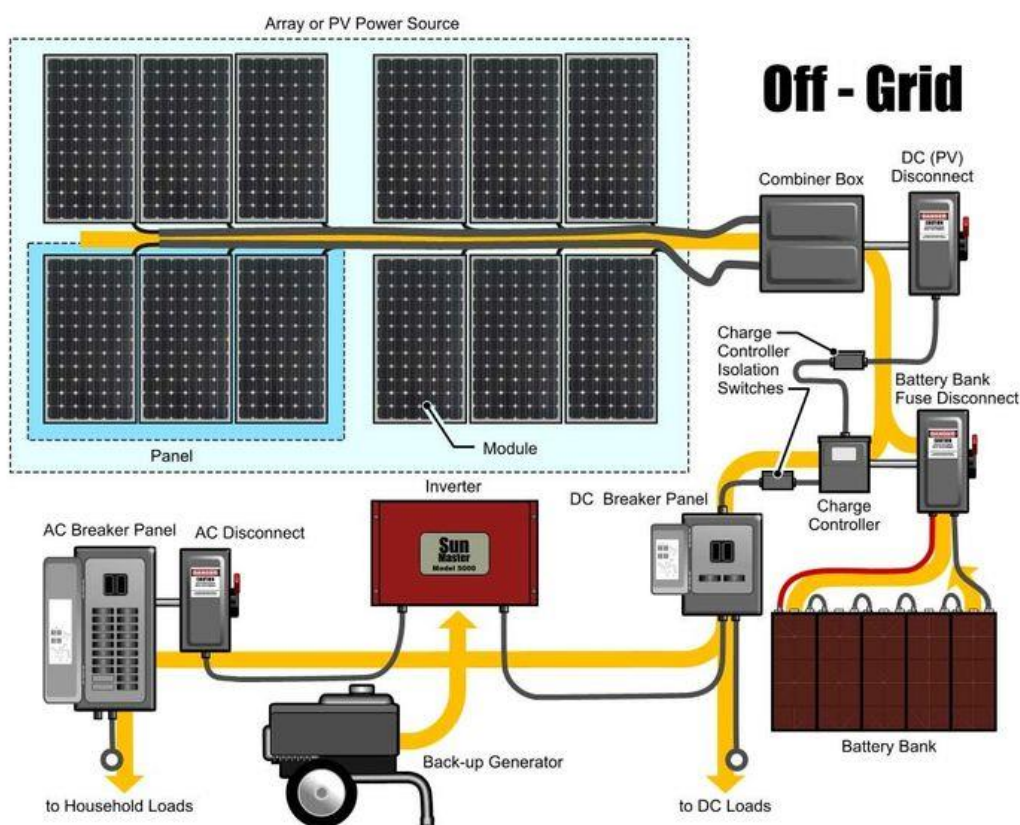


Рис. 1.11 – Структура системи сонячних панелей

Принцип роботи системи сонячних панелей починається з поглинання сонячного світла фотоелектричними елементами панелей. Згенерований постійний струм передається до інвертора, який перетворює його на змінний струм. У разі наявності акумуляторної системи частина енергії накопичується

для подальшого використання. Контролер заряду забезпечує ефективну роботу акумуляторів, запобігаючи їх пошкодженню (рис. 1.12).

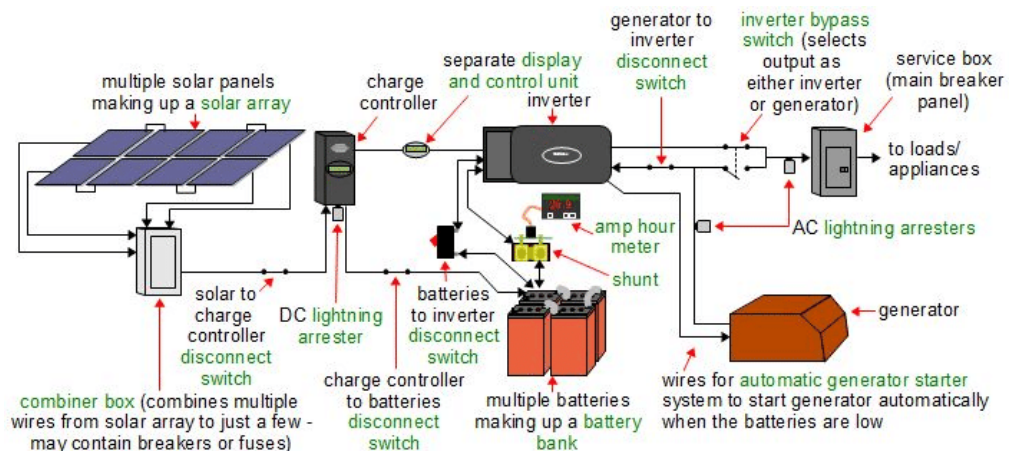


Рис. 1.12 – Схема роботи системи сонячних панелей [10]

Трекінгові системи, що використовуються у деяких сонячних установках, забезпечують орієнтацію панелей у напрямку максимального сонячного випромінювання протягом дня. Це дозволяє підвищити ефективність системи на 20-30% порівняно зі стаціонарними установками.

За даними звіту Міжнародного енергетичного агентства за 2023 рік, впровадження сучасних компонентів у системи сонячної енергетики дозволяє підвищити їх ефективність до 25%, зменшити втрати енергії на 15% і знизити вартість експлуатації на 10% (рис. 1.13). [11] Застосування таких систем охоплює як побутовий сектор, так і промисловість, транспорт, агросектор, забезпечуючи сталий розвиток та енергетичну незалежність.

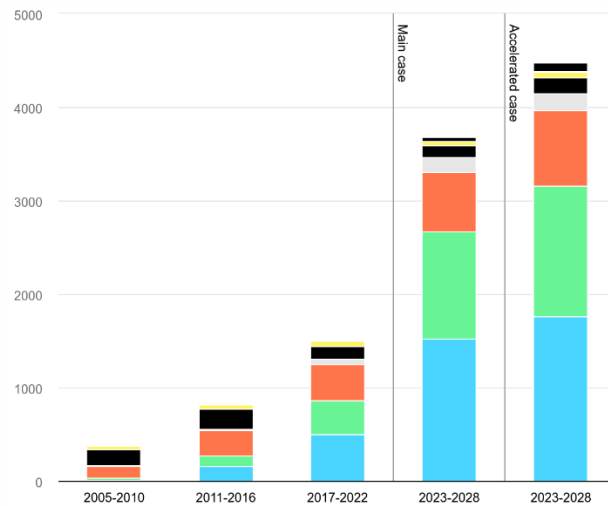


Рис. 1.13 - Зростання відновлюваної потужності за технологіями, основні та прискорені випадки, 2005-2028 [11]

Вплив сонячної активності на ефективність сонячних панелей є одним із ключових факторів їхньої продуктивності. За даними NASA та Міжнародного енергетичного агентства, сонячна активність визначається кількістю сонячного випромінювання, що досягає поверхні Землі. У середньому цей показник становить близько 1361 Вт/м^2 , але незначні коливання можуть впливати на продуктивність сонячних панелей. [12] [13]

Зниження ефективності на 5-7% у роки зі зниженою сонячною активністю пояснюється меншою інтенсивністю випромінювання, яке досягає панелей. З іншого боку, роки з вищою активністю, як у 2022 році, забезпечують досягнення максимальної продуктивності до 96% за оптимальних умов. Коливання сонячної активності зумовлюють необхідність проєктування систем із можливістю адаптації до зміни інтенсивності випромінювання. [14] [15]

У роки зі зниженою сонячною активністю, як у 2021 році, ефективність сонячних панелей дозволяла забезпечити 7% менше енергії порівняно з роками підвищеної активності, як-от 2022. Наприклад, у великомасштабних установках це могло б відповідати втраті близько 500 МВт·год на рік у регіонах із встановленою потужністю понад 100 МВт. У той же час, роки

підвищеної сонячної активності могли забезпечити на 3% більше енергії, що дозволило б задовольнити потреби додатково 15 тисяч домогосподарств у середньому місті. [16]

Вище зазначені дані візуально візображені у діаграмі на рис. 1.14.

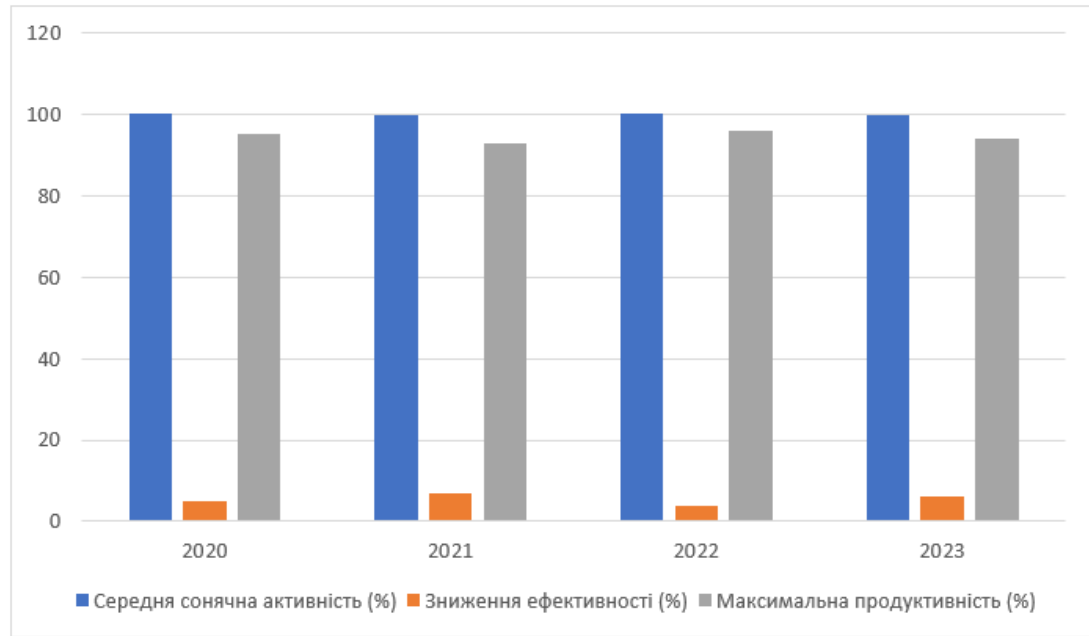


Рис. 1.14 – Аналіз впливу сонячної активності на ефективність роботи сонячних панелей

Таким чином, розвиток прогнозних систем, адаптивних технологій і покращених матеріалів для сонячних панелей є критично важливим для зменшення впливу коливань сонячної активності на їхню продуктивність і стабільність енергопостачання.

1.3 Концепція Інтернету речей (IoT) та її застосування в сонячній енергетиці

Інтернет речей (IoT) — це мережа взаємопов'язаних пристроїв, які можуть обмінюватися даними через інтернет без прямого втручання людини. Ці пристрої оснащені сенсорами, програмним забезпеченням та іншими технологіями, що дозволяють їм збирати та передавати інформацію.

Згідно з прогнозами GSMA Intelligence, до 2030 року кількість підключених IoT-пристроїв досягне 38 мільярдів, причому понад 60% з них будуть використовуватися в корпоративному секторі. Основними напрямками впровадження IoT стануть розумні будівлі, розумні будинки та розумне виробництво, яке, як очікується, зростатиме зі середньорічним темпом приросту (CAGR) 20% у період з 2023 по 2030 роки. [17]

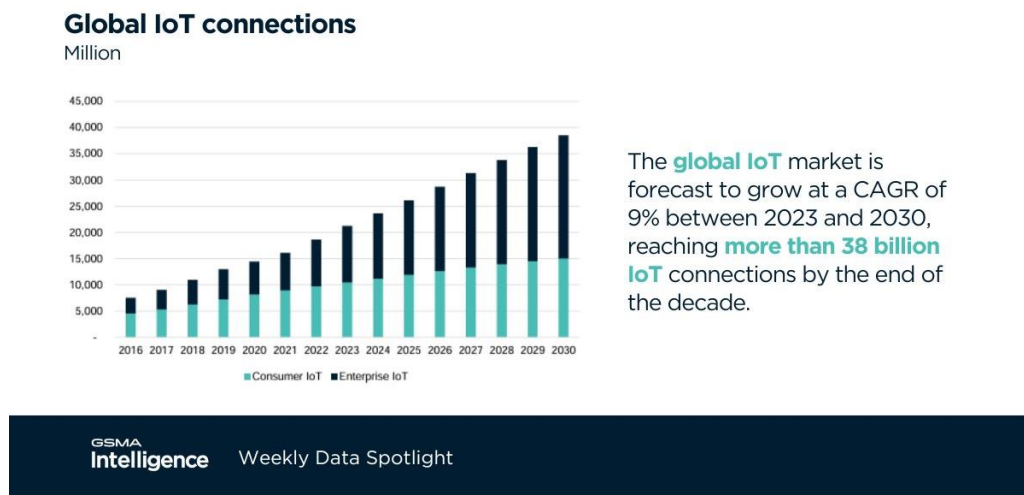


Рис. 1.15 – Прогноз зростання мережі IoT [17]

Крім того, за оцінками McKinsey, до 2030 року сукупна економічна вигода від застосування IoT може становити від 5,5 до 12,6 трильйонів доларів США. Найбільший ефект очікується у виробничому секторі, де IoT-пристрої сприятимуть підвищенню ефективності операцій та продуктивності працівників. [18]

У контексті сонячної енергетики IoT дозволяє автоматизувати процеси моніторингу та управління. Наприклад, сенсори можуть вимірювати інтенсивність сонячного випромінювання, температуру панелей, вологість та швидкість вітру, передаючи ці дані до хмарної платформи. На основі цієї інформації система може оптимізувати кут нахилу панелей або регулювати розподіл енергії. Крім того, інтеграція IoT з моделями штучного інтелекту дозволяє прогнозувати енергетичну продуктивність з точністю до 95%, що

сприяє зменшенню втрат енергії та підвищенню ефективності використання ресурсів.

Таким чином, IoT є ключовою технологією для побудови інтелектуальних систем, які забезпечують підвищення ефективності, зниження витрат та автоматизацію процесів у різних сферах, зокрема в сонячній енергетиці.

Основними компонентами IoT є:

- Сенсори та актуатори (вимірюють параметри середовища (температуру, вологість, світло) та виконують команди)
- Програмні платформи (AWS IoT, Google Cloud IoT, які обробляють і зберігають дані)
- Протоколи зв'язку (MQTT, CoAP, що забезпечують швидку й безпечну передачу даних)
- Аналітичні алгоритми (використовують машинне навчання (ML) для обробки великих обсягів даних і створення прогнозів)

Принцип побудови IoT базується на інтеграції його основних компонентів у єдину систему, яка забезпечує безперервний цикл збору, передачі, обробки та використання даних. Сенсори є початковим елементом, що забезпечує збирання інформації з навколишнього середовища або обладнання. Ця інформація передається через мережеві інтерфейси за допомогою протоколів зв'язку, таких як MQTT або CoAP, на програмні платформи (наприклад, AWS IoT, Google Cloud IoT). У платформах виконується зберігання та аналіз даних із використанням аналітичних алгоритмів, часто інтегрованих із методами машинного навчання. Завдяки цьому дані перетворюються на цінну інформацію, яка використовується для прийняття автоматизованих рішень або формування звітів. Виконавчі пристрої (актуатори) застосовують ці рішення для виконання команд, таких як зміна режиму роботи обладнання, корекція параметрів чи регулювання процесів у реальному часі. Такий підхід дозволяє створювати гнучкі, адаптивні та ефективні IoT-системи.

Архітектура Інтернету речей (IoT) складається з чотирьох основних рівнів, кожен із яких виконує специфічні функції у процесі збору, передачі, обробки та використання даних. Ця архітектура дозволяє забезпечити ефективну інтеграцію пристроїв та систем у межах IoT.

Рівень сенсорів (Sensing Layer) - це базовий шар архітектури, який складається з фізичних об'єктів, сенсорів і актуаторів. Основне завдання цього рівня — збирання даних із середовища або пристроїв. Сенсори фіксують такі параметри, як температура, вологість, тиск, світло чи рух, а актуатори виконують відповідні дії на основі отриманих даних.

Мережевий рівень (Network Layer) відповідає за передачу зібраних даних до наступних шарів архітектури. Він включає шлюзи, інтернет-мережі та протоколи передачі даних (наприклад, MQTT, CoAP, LoRaWAN). Основною метою є забезпечення швидкого, надійного та безпечного транспортування інформації.

Рівень обробки даних (Data Processing Layer) є центральним у процесі аналізу та обробки даних. Він включає обчислювальні платформи, модулі аналітики та прийняття рішень. На цьому рівні дані проходять обробку з використанням алгоритмів машинного навчання (ML) або штучного інтелекту (AI), які дозволяють генерувати прогнози, знаходити закономірності або оптимізувати процеси.

Прикладний рівень (Application Layer) відповідає за взаємодію користувача із системою. Він включає розумні додатки, інтерфейси управління та платформи моніторингу. На основі оброблених даних користувачі можуть отримувати звіти, сповіщення або керувати пристроями в режимі реального часу.

На рис. 1.16 представлено чітку взаємодію між рівнями: дані рухаються від рівня сенсорів до мережевого рівня, потім обробляються та передаються до прикладного рівня для подальшого використання. Така структура забезпечує масштабованість, адаптивність і ефективність IoT-систем у різних галузях — від енергетики до розумних міст.

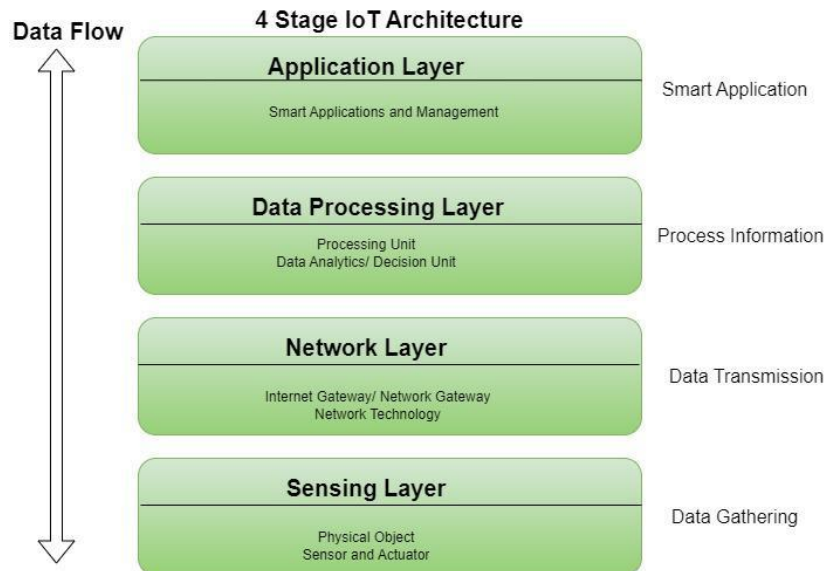


Рис. 1.16 – Архітектура IoT [19]

Інтеграція стандартів Інтернету речей (IoT) у системи сонячної енергетики надає значні переваги, підвищуючи ефективність, продуктивність та надійність цих систем. Використання протоколів IoT, таких як MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), CoAP (Constrained Application Protocol) та OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture), забезпечує стандартизовану та ефективну комунікацію між різними компонентами сонячних установок.

Впровадження технологій Інтернету речей (IoT) у системи сонячної енергетики забезпечує низку переваг, які суттєво підвищують їхню ефективність, продуктивність та адаптивність. Одним із ключових аспектів впровадження IoT є можливість віддаленого управління та обслуговування. Завдяки спеціалізованим платформам оператори можуть контролювати та керувати сонячними установками, отримуючи дані з сенсорів у режимі реального часу. Це дозволяє проводити діагностику стану обладнання, прогнозувати необхідність технічного обслуговування та знижувати ризики поломок. Наприклад, інформація про температуру панелей або напругу може сигналізувати про необхідність очищення чи заміни окремих компонентів.

Ще однією перевагою є оптимізація енергетичного розподілу. IoT дозволяє збирати дані про споживання енергії в режимі реального часу, що

забезпечує ефективне балансування між виробництвом та споживанням. Завдяки цьому можна зменшити втрати при передачі енергії. Наприклад, система може автоматично перенаправляти надлишкову енергію до акумуляторів у періоди низького споживання або інтегрувати її до мережі, коли споживання перевищує поточну продуктивність.

У мікромережах, які часто включають сонячні панелі, IoT відіграє ключову роль у координації роботи декількох генераторів енергії та акумуляторів. Це дозволяє покращити стабільність і автономність таких систем. Крім того, використання IoT-рішень сприяє економії ресурсів. Наприклад, у великомасштабних сонячних фермах дистанційний моніторинг та автоматизоване управління суттєво знижують витрати на фізичний контроль і обслуговування.

Окрім цього, IoT підвищує прозорість та звітність роботи систем сонячної енергетики. Зібрані дані можуть бути представлені у вигляді інтерактивних звітів, які використовуються для аналізу ефективності систем. Це особливо важливо для проєктів, що фінансуються державою чи приватними інвесторами, оскільки така прозорість дозволяє демонструвати результати роботи у реальному часі.

Впровадження IoT у системи сонячної енергетики не лише підвищує їхню ефективність, але й забезпечує стійкість і гнучкість у відповідь на зміни в енергетичному середовищі. Ця інтеграція сприяє довгостроковому розвитку галузі, зменшуючи операційні витрати та забезпечуючи конкурентоспроможність на глобальному ринку.

Інтеграція Інтернету речей (IoT) у системи сонячної енергетики вимагає використання відповідних стандартів, які забезпечують ефективну та безпечну взаємодію між різними компонентами. Серед найбільш підходящих стандартів для цієї галузі виділяються MQTT, CoAP та OPC UA. [20]

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) — це легкий протокол обміну повідомленнями, оптимізований для середовищ з обмеженими ресурсами та ненадійними мережами. Його архітектура базується на моделі

"видавець-підписник", що дозволяє ефективно передавати дані від сенсорів до центральних систем моніторингу (рис. 1.17). Завдяки низькій затримці та мінімальному споживанню пропускної здатності, MQTT є критично важливим для віддаленого моніторингу сонячних панелей, де потрібна швидка реакція на зміни параметрів системи. [21]

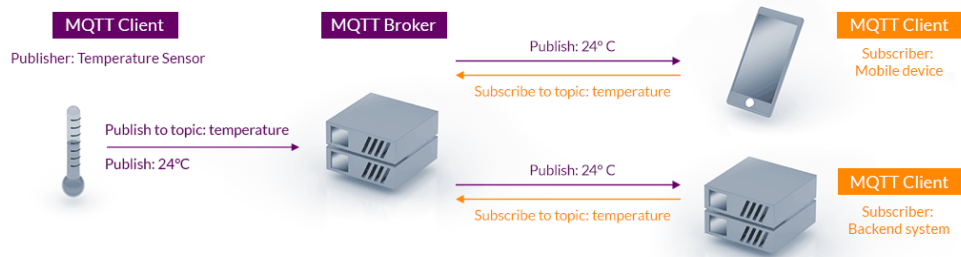


Рис. 1.17 – Архітектура стандарту MQTT [21]

CoAP (Constrained Application Protocol) розроблений для використання в обмежених пристроях та мережах. Цей протокол базується на моделі REST, подібній до HTTP, але споживає значно менше ресурсів (рис. 1.18). CoAP ідеально підходить для інтеграції з сенсорами та актуаторами, забезпечуючи ефективний обмін даними в системах сонячної енергетики та сумісність із веб-технологіями. [22]

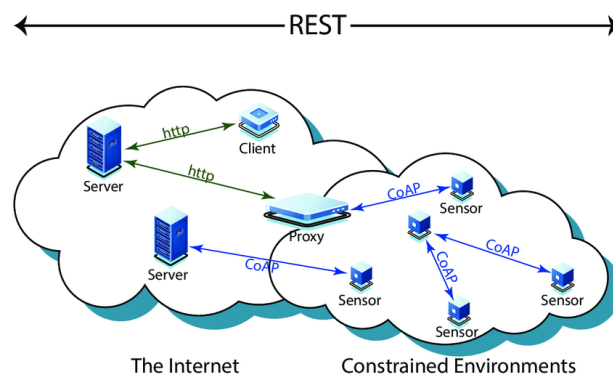


Рис. 1.18 – Архітектура стандарту CoAP [24]

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) є платформи-незалежним стандартом для обміну даними в промислових

системах автоматизації. Він забезпечує безпечну та надійну передачу даних між різними пристроями та системами, що є особливо важливим для комплексних сонячних установок з різноманітним обладнанням (рис. 1.19). OPC UA сприяє стандартизації процесів та спрощенню інтеграції між виробниками обладнання. [23]

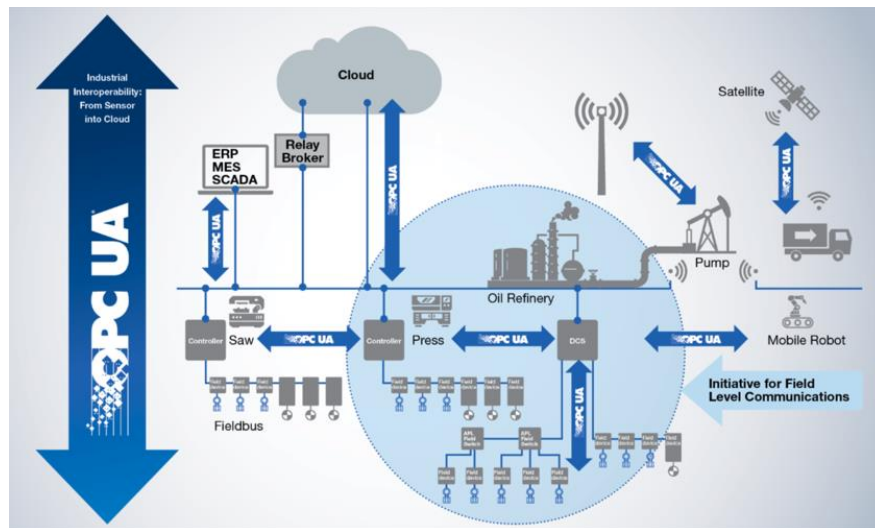


Рис. 1.19 – Архітектура стандарту OPC UA [25]

Алгоритм впровадження IoT у системи сонячної енергетики складається з кількох ключових етапів. На першому етапі проводиться оцінка вимог системи, включаючи визначення цілей, таких як моніторинг продуктивності чи оптимізація енергоспоживання. Наступним кроком є вибір відповідних стандартів IoT залежно від потреб проєкту, що забезпечить сумісність і ефективність системи.

Далі розробляється архітектура системи, яка включає сенсори, мережеві компоненти, сервери та інтерфейси користувача. На цьому етапі інтегрується апаратне забезпечення, встановлюються та налаштовуються сенсори та інші пристрої для збору даних. Після цього розробляється програмне забезпечення для збору, обробки та аналізу даних, а також для забезпечення зручної взаємодії з користувачем.

Останні етапи включають тестування системи, налаштування її роботи та розгортання в реальних умовах. У разі потреби здійснюється масштабування та оптимізація роботи системи. Дотримання цього алгоритму разом із використанням відповідних стандартів IoT забезпечує створення ефективних, надійних та масштабованих систем сонячної енергетики. Це підвищує ефективність виробництва енергії, знижує витрати та сприяє інтеграції відновлюваних джерел енергії в загальну енергетичну інфраструктуру. [20]

Процес інтеграції IoT у систему сонячної енергетики схематично показаний на рис. 1.20.



Рис. 1.20 – Етапи впровадження IoT-модернізації у систему сонячної енергетики

Впровадження IoT у системи сонячної енергетики не лише підвищує ефективність роботи та оптимізує використання ресурсів, але й сприяє сталому розвитку галузі, забезпечуючи інтеграцію відновлюваних джерел енергії у глобальну енергетичну систему.

1.4 Огляд методів моделей прогнозування сонячної активності

Штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (ML) є ключовими технологіями для оптимізації роботи систем сонячної енергетики. ШІ охоплює широкий спектр алгоритмів, які здатні виконувати завдання, пов'язані з аналізом даних, прогнозуванням та прийняттям рішень. Машинне навчання, як підгалузь ШІ, зосереджується на створенні моделей, які адаптивно навчаються на основі наявних даних та вдосконалювати свої прогнози.

У сонячній енергетиці ШІ та ML дозволяють автоматизувати складні процеси, підвищуючи ефективність систем. Згідно з дослідженням, опублікованим у *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, застосування ML дозволяє зменшити втрати енергії до 15%, створюючи ймовірнісні розподіли короткострокової невизначеності у прогнозах попиту та генерації енергії. Це сприяє зниженню необхідності резервних потужностей, що зменшує витрати на паливо та експлуатацію. [26]

Нейронні мережі, зокрема рекурентні нейронні мережі (RNN) та довготривала пам'ять (LSTM), є одними з найефективніших інструментів для прогнозування енергетичної продуктивності. Наприклад, модель LSTM може аналізувати історичні дані про погоду для передбачення вихідної потужності системи на наступний день із точністю до 94%. Це забезпечує ефективне планування розподілу енергії та оптимізацію інтеграції в енергомережу.

Крім прогнозування, ШІ використовується для виявлення аномалій у роботі обладнання. Алгоритми, такі як Random Forest чи методи кластеризації (наприклад, K-means), дозволяють аналізувати дані сенсорів у реальному часі, виявляючи збої чи зниження ефективності панелей. Це дозволяє знижувати витрати на обслуговування до 20% через оптимізоване технічне обслуговування.

Інтеграція ШІ також сприяє адаптації систем до кліматичних змін. Використовуючи алгоритми оптимізації, наприклад генетичні алгоритми, системи можуть автоматично змінювати кут нахилу панелей, базуючись на

довгострокових змінах клімату та сонячної активності. Завдяки цьому підхід дозволяє підтримувати стабільність генерації навіть за несприятливих умов.

Таким чином, застосування ШІ та ML у сонячній енергетиці не лише підвищує продуктивність систем, але й забезпечує економію ресурсів, знижує витрати на обслуговування та сприяє сталому розвитку галузі.

Три основні алгоритми, які демонструють високу ефективність у сонячній енергетиці, це нейронні мережі, Random Forest та методи кластеризації, зокрема K-means.

Нейронні мережі є нелінійними алгоритмами машинного навчання, що імітують функціонування людського мозку. У системах сонячної енергетики використовуються різні їх види, такі як багат шарові перцептрони (MLP), рекурентні нейронні мережі (RNN) та мережі з довготривалою пам'яттю (LSTM). Вони обробляють багатовимірні вхідні дані, аналізують складні залежності та генерують високоточні прогнози (рис. 1.21).

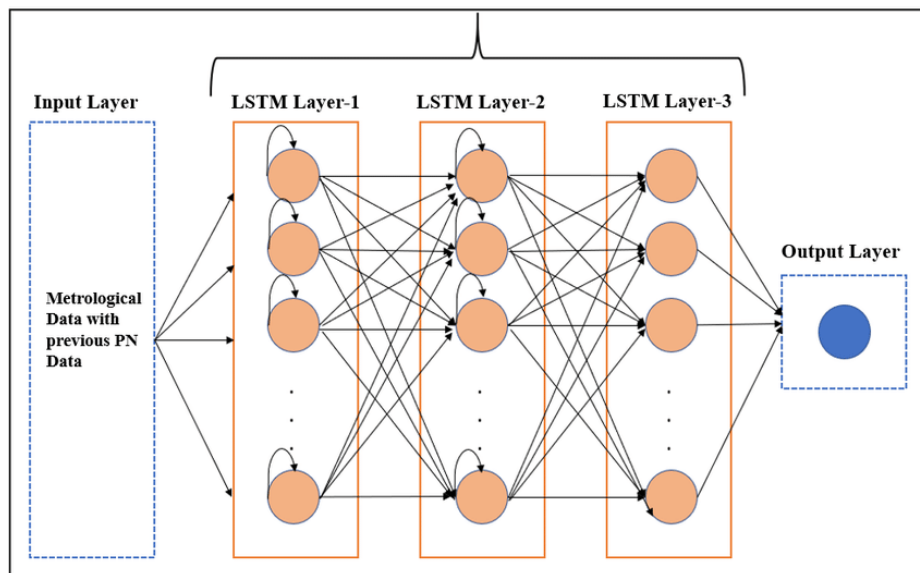


Рис. 1.21 – Архітектура LSTM [28]

LSTM активно використовується для прогнозування короткострокової та довгострокової продуктивності сонячних панелей на основі метеорологічних даних (рис. 1.22). Цей алгоритм дозволяє передбачати кількість енергії, яку буде вироблено за різних погодних умов. Завдяки пам'яті

про попередні стани, LSTM може враховувати сезонні коливання та забезпечувати точність прогнозів до 94%.

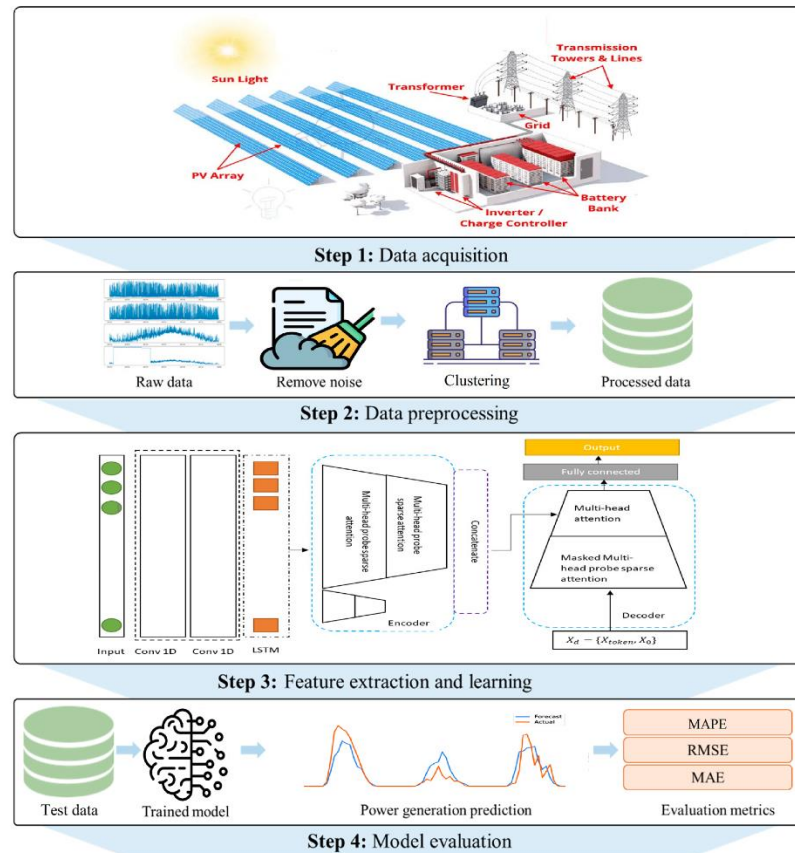


Рис. 1.22 - Прогнозування виробництва сонячної енергії на основі моделі гібридного CNN-LSTM-трансформатора [27]

Використання нейронних мереж дозволяє операторам краще планувати розподіл енергії, уникати перевантажень мережі та зменшувати втрати енергії. Це критично важливо для інтеграції сонячної енергетики у глобальну енергомережу.

Random Forest — це ансамблевий метод машинного навчання, що базується на побудові множини рішень дерев. Кожне дерево навчається на випадковому підмножині даних, а результати об'єднуються для отримання узагальненого прогнозу (рис. 1.23). Random Forest є стійким до перевищення навчання та здатний обробляти великі обсяги даних.

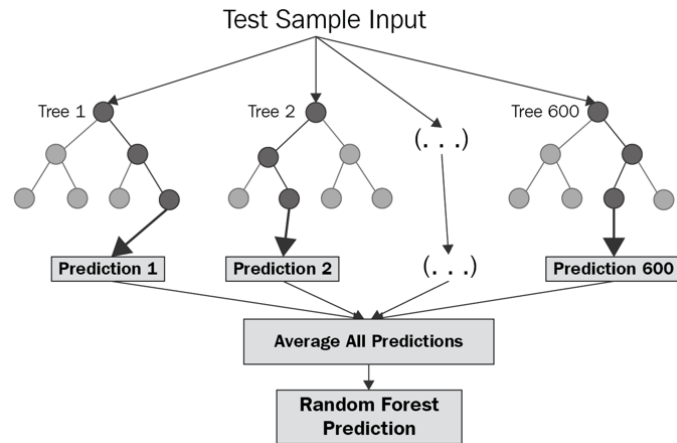


Рис. 1.23 – Архітектура Random Forest [29]

У системах сонячної енергетики цей алгоритм використовується для класифікації стану обладнання та прогнозування дефектів. Наприклад, аналіз даних сенсорів про температуру, напругу та потужність дозволяє алгоритму виявляти аномалії, що свідчать про потенційні збої чи зниження продуктивності панелей (рис. 1.24).

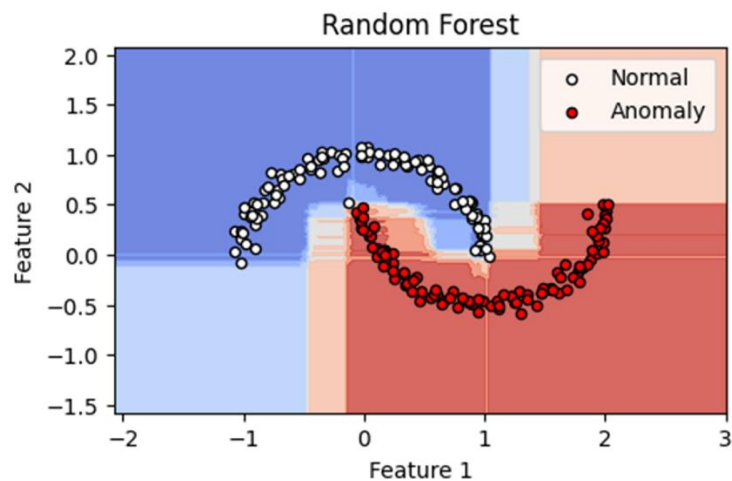


Рис. 1.24 – Виявлення аномалій у IoT-системах із використанням алгоритму Random Forest [30]

Random Forest може зменшити витрати на технічне обслуговування до 20% завдяки своєчасному виявленню проблем. Його здатність працювати з різними типами даних робить його незамінним для багатофункціональних систем моніторингу.

K-means є одним із найпоширеніших алгоритмів кластеризації, що групує дані у визначену кількість кластерів на основі схожості. Алгоритм визначає центри кластерів (центроїди) та розподіляє точки даних, мінімізуючи суму квадратів відстаней до центроїда (рис. 1.25).

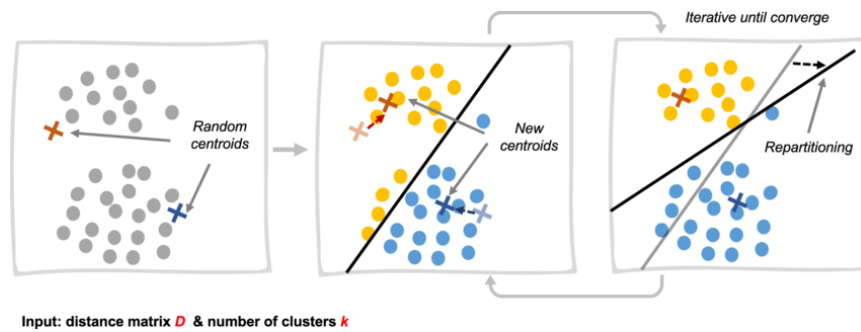


Рис. 1.25 – Архітектура K-Means [31]

У сонячній енергетиці K-means використовується для сегментації панелей за ефективністю, класифікації метеорологічних умов або групування областей з різним енергоспоживанням. Наприклад, алгоритм може визначати зони, де продуктивність панелей є недостатньою, та вказувати на можливі причини (рис. 1.26).

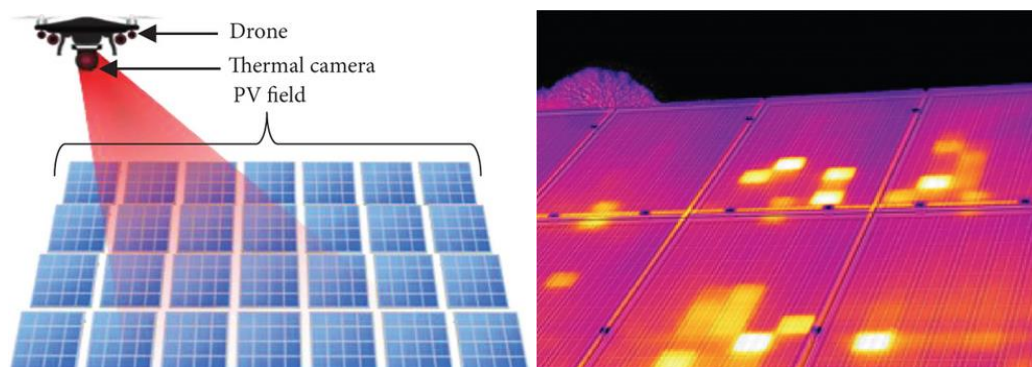


Рис. 1.26 - Виявлення несправностей сонячних панелей із використанням алгоритму K-Means [32]

Кластеризація допомагає операторам приймати рішення щодо оптимізації роботи системи, наприклад, заміни обладнання у зонах з низькою

ефективністю чи покращення умов експлуатації панелей. Це дозволяє підвищити загальну продуктивність на 10-15%.

Усі три алгоритми забезпечують значне підвищення ефективності роботи систем сонячної енергетики завдяки точному аналізу даних, прогнозуванню та оптимізації операцій. Інтеграція цих алгоритмів із системами IoT забезпечує більш ефективне управління ресурсами, скорочення експлуатаційних витрат та адаптацію систем до зовнішніх умов, сприяючи сталому розвитку галузі.

2 РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ТРЕКІНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

2.1. Формування вимог до функціоналу та архітектури системи

Для розробки концепції системи автоматизації трекінгу сонячних панелей обрано технічне завдання, спрямоване на створення IoT-системи для невеликого поля сонячних панелей, розташованого на території малої ферми. Основною метою є підвищення ефективності генерації електроенергії шляхом оптимізації орієнтації панелей залежно від сонячної активності та погодних умов.

Технічне завдання:

1. Масштаб системи: поле складається з 10 сонячних панелей, кожна потужністю 400 Вт, загальною площею 25 м². Панелі розташовані в два ряди по 5 одиниць.

2. Цілі системи: автоматичне відстеження положення сонця для забезпечення максимальної ефективності генерації; моніторинг технічного стану обладнання (температура панелей, струм, напруга): збір даних про погодні умови (температура, вологість, рівень сонячного випромінювання); віддалене управління та моніторинг через веб-інтерфейс або мобільний додаток.

3. Функціональні вимоги: точність трекінгу не менше 95% від теоретично можливого енергозбору; підтримка зв'язку через Wi-Fi або мобільну мережу (3G/4G); реалізація алгоритмів прогнозування сонячної активності для покращення продуктивності; запис і зберігання даних у хмарній платформі для подальшого аналізу

4. Обмеження та особливості: система повинна працювати в умовах змінного клімату (температурний діапазон від -20°C до +40°C); енергоспоживання обладнання не повинно перевищувати 2% від виробленої енергії; мінімальні вимоги до технічного обслуговування.

5. Обладнання: сенсори для моніторингу; актуатори для переміщення панелей: приводи із серводвигунами; контролер; комунікаційний модуль для передачі даних до хмарної платформи.

6. Програмне забезпечення: модуль управління орієнтацією панелей на основі алгоритмів трекінгу; система збору та обробки даних із сенсорів; інтерфейс користувача для моніторингу та керування через веб-додаток.

Очікувані результати:

- Підвищення продуктивності генерації на 20-30% порівняно зі статично встановленими панелями.
- Оптимізація витрат на обслуговування завдяки автоматизованому моніторингу.
- Зниження втрат енергії при її передачі та зберіганні.

Цільова система розробляється для малої ферми, яка потребує автономного електропостачання із зниженою залежністю від зовнішніх джерел енергії. Зменшена кількість панелей забезпечує зниження початкових витрат, зберігаючи при цьому всі переваги автоматизації та оптимізації. Запропоноване технічне рішення залишається масштабованим для можливого розширення системи в майбутньому.

2.2. Технічні розрахунки та вибір обладнання

Для розробки системи автоматизації трекінгу сонячних панелей було проведено комплекс технічних розрахунків, які включають визначення основних параметрів системи: загальної потужності, вихідного струму, добової енергогенерації, необхідної ємності акумуляторів, а також потужності інвертора. Ці розрахунки є основою для правильного підбору обладнання, яке забезпечить високу ефективність, надійність і довговічність роботи системи в умовах змінного клімату.

Був проведений розрахунок загальної потужності системи для визначення максимальної кількості енергії, яку сонячні панелі можуть

генерувати за оптимальних умов. Це необхідно для подальшого підбору інвертора, контролера заряду та інших компонентів системи. У технічному завданні зазначено, що кожна сонячна панель має потужність 400 Вт, а загальна кількість панелей — 10. Розрахований показник визначає максимальну потужність, доступну для генерації електроенергії:

$$P_{\text{total}} = 400 \text{ Вт} \times 10 = 4000 \text{ Вт} = 4 \text{ кВт} \quad (2.1)$$

де P_{total} — загальна потужність системи, Вт.;

$P_{\text{панелі}}$ — потужність однієї панелі, Вт.

Для визначення струму потрібно знати вихідну напругу панелей. Зазвичай стандартна напруга для панелей становить 24 В або 48 В. Припустимо, що використовуються панелі з напругою 24 В. Було проведено розрахунок вихідного струму для визначення струмового навантаження в системі. Це важливо для вибору кабелів, контролера заряду та забезпечення безпеки системи:

$$I_{\text{out}} = \frac{4000 \text{ Вт}}{24 \text{ В}} \approx 166.7 \text{ А} \quad (2.2)$$

де I_{out} — вихідний струм системи, А.

Було проведено розрахунок кількості енергії, яку система може згенерувати за добу, виходячи із середньої кількості сонячних годин. Цей параметр використовується для оцінки середньодобової продуктивності системи. Припустимо, що середньодобова сонячна активність становить 5 годин:

$$E_{\text{daily}} = 4000 \text{ Вт} \times 5 \text{ год} = 20000 \text{ Втгод} = 20 \text{ кВтгод} \quad (2.3)$$

де E_{daily} - кількість енергії, згенерованої за добу, Вт·год.

Система передбачає акумулятори для збереження енергії, тож потрібно врахувати резерв на одну добу (за похмурих умов) та запас потужності. Ємність акумуляторів визначає, скільки енергії може бути збережено для використання в умовах недостатньої сонячної активності. Розраховано необхідну ємність акумуляторів, щоб система могла забезпечувати енергією споживачів навіть у разі недостатньої сонячної активності (наприклад, у похмурі дні). Припустимо, що акумулятори працюють при напрузі 48 В, а коефіцієнт втрат у системі — 0.9:

$$C_{\text{battery}} = \frac{E_{\text{daily}}}{U_{\text{аккумулятора}} \cdot \eta} = \frac{20000 \text{ Втгод}}{48 \text{ В} \cdot 0.9} \approx 463.0 \text{ Агод} \quad (2.4)$$

де C_{battery} — необхідна ємність акумуляторів, А·год;

$U_{\text{аккумулятора}}$ — напруга акумуляторної батареї, В.;

η — коефіцієнт ефективності системи (враховує втрати).

Розраховано потужність інвертора для забезпечення перетворення енергії та покриття пікових навантажень. Цей параметр забезпечує відповідність інвертора піковим навантаженням у системі. Інвертор повинен мати потужність, яка перевищує пікове навантаження, тобто загальну потужність панелей:

$$P_{\text{inverter}} = P_{\text{total}} \times 1.2 = 4000 \text{ Вт} \times 1.2 = 4800 \text{ Вт} \quad (2.5)$$

де P_{inverter} — потужність інвертора, Вт.;

P_{total} — загальна потужність панелей, Вт.;

1.2 — коефіцієнт резерву для пікових навантажень.

Якщо врахувати втрати в кабелях, з'єднаннях та обладнанні (приблизно 10%), ефективна вихідна потужність системи складе:

$$P_{\text{ефективна}} = P_{\text{total}} \times \eta_{\text{системи}} = 4000 \text{ Вт} \times 0.9 = 3600 \text{ Вт} \quad (2.6)$$

де $P_{\text{ефективна}}$ — ефективна вихідна потужність системи, Вт.;

P_{total} — загальна потужність системи, Вт.;

$\eta_{\text{системи}}$ — коефіцієнт ефективності системи.

Усі розраховані дані розглянуті у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Таблиця розрахованих параметрів системи

Параметр	Значення	Одиниця вимірювання	Пояснення
Загальна потужність системи (P_{total})	4000	Вт	Сумарна потужність усіх сонячних панелей
Вихідний струм (I_{out})	166.7	А	Струм, що генерується системою при стандартній напрузі панелей 24 В
Енергогенерація за добу (E_{daily})	20	кВт·год	Загальна енергія, що генерується за 5 годин сонячного світла
Ємність акумуляторів (C_{battery})	463	А·год	Обсяг заряду, який акумулятори повинні зберігати для забезпечення роботи системи
Потужність інвертора (P_{inverter})	4800	Вт	Пікова потужність інвертора для ефективної роботи системи
Ефективна потужність ($P_{\text{ефективна}}$)	3600	Вт	Потужність системи після врахування втрат (10%)

На основі розрахованих параметрів було визначено, що система автоматизації трекінгу сонячних панелей потужністю 4000 Вт здатна

забезпечувати ефективну генерацію енергії для невеликої ферми. Система складається з 10 сонячних панелей, кожна з яких має потужність 400 Вт, що дозволяє генерувати до 20 кВтгод енергії за умови 5 сонячних годин на добу.

Ефективна вихідна потужність системи після врахування втрат становить 3600 Вт, що забезпечує достатній рівень енергії для потреб ферми. Акумуляторна батарея з ємністю 463 А·год при напрузі 48 В дозволяє накопичувати достатній обсяг енергії для забезпечення роботи системи в похмурі дні або вночі.

Використання інвертора потужністю 4800 Вт гарантує покриття пікових навантажень і стабільну роботу навіть за змінних умов енергоспоживання. Крім того, розрахунки струму (166.7 А) визначають технічні вимоги до кабельних з'єднань та контролерів, що забезпечують безпечну передачу енергії.

Інтеграція алгоритмів прогнозування та IoT дозволяє автоматизувати роботу системи, включаючи віддалений моніторинг, управління панелями та оптимізацію їхнього положення. Це дозволяє досягти точності трекінгу не менше 95%, підвищуючи продуктивність системи на 20–30% порівняно зі статично встановленими панелями.

Запропонована система забезпечує високу енергоефективність, мінімальні експлуатаційні витрати та гнучкість у роботі. Вона підходить для автономного забезпечення ферми енергією, а її масштабованість дозволяє розширювати систему в майбутньому без значних витрат.

На основі розрахованих параметрів було обрано компоненти системи, включаючи сонячні панелі, контролери, інвертор, акумулятори та допоміжне обладнання, що відповідає специфікаціям технічного завдання. Кожен із компонентів відіграє важливу роль у забезпеченні ефективності та стабільності роботи системи.

Raspberry Pi 4 Model B (4GB RAM) є центральним контролером системи автоматизації трекінгу сонячних панелей. Цей мікрокомп'ютер відповідає за обробку даних, зібраних із сенсорів, управління актуаторами для регулювання

нахилу панелей, а також забезпечення зв'язку з хмарними платформами для моніторингу та аналізу.

Основні характеристики:

- Процесор: Quad-core Cortex-A72 64-bit SoC @ 1.5GHz, що забезпечує високу швидкість обробки даних у режимі реального часу.
- Оперативна пам'ять: 4GB LPDDR4 SDRAM, достатня для багатозадачності та виконання складних алгоритмів.
- Інтерфейси підключення: GPIO: 40 пінів для підключення сенсорів (DS18B20, DHT22, INA219, MPU6050) і управління актуаторами; I²C, UART, SPI: Протоколи для підключення сенсорів і зовнішніх модулів.
- Ethernet і Wi-Fi: вбудований модуль 802.11ac Wi-Fi і Gigabit Ethernet забезпечують зв'язок із мережею та хмарними платформами.
- Графічний вихід: два micro-HDMI для підключення дисплея, якщо потрібен візуальний інтерфейс.
- Живлення: працює від 5V/3A через USB-C, що дозволяє інтеграцію з акумуляторами.

Raspberry Pi 4 виконує функцію центрального вузла для збору, обробки та передачі даних. Вона отримує інформацію із сенсорів (наприклад, дані про температуру, кут нахилу, сонячне випромінювання) і, за допомогою запрограмованих алгоритмів, відправляє команди актуаторам для оптимізації роботи системи. Крім того, вона відповідає за підключення до хмарної платформи через Wi-Fi або Ethernet для зберігання даних і віддаленого моніторингу.

Сонячні панелі JA Solar JAM60S20-385/MR є ключовим елементом системи, які забезпечують генерацію електроенергії (рис. 2.1). Їх потужність становить 400 Вт кожна, що дозволяє досягти загальної потужності системи у 4 кВт. Монокристалічна технологія забезпечує високий коефіцієнт ефективності (20.1%) і стабільну роботу навіть за умов низької освітленості. Розташування у два ряди по п'ять панелей забезпечує оптимальне використання простору та полегшує монтаж. Захист від ультрафіолету та





IMPORTANT

The above parameters are calculated under standard test conditions (STC) (Standard Test Condition): Module Temperature 25°C, Air Mass 1.5, Irradiance 1000W/m².

• Tracer5415/6415/8415/10415AN:

System voltage	36cell Voc < 23V		48cell Voc < 31V		54cell Voc < 34V		60cell Voc < 38V	
	Max.	Best	Max.	Best	Max.	Best	Max.	Best
12V	4	2	2	1	2	1	2	1
24V	6	3	4	2	4	2	3	2
48V	6	5	4	3	4	3	3	3

System voltage	72cell Voc < 46V		96cell Voc < 62V		Thin-Film module Voc > 80V
	Max.	Best	Max.	Best	
12V	2	1	1	1	1
24V	3	2	2	1	1
48V	3	2	2	2	1



IMPORTANT

The above parameters are calculated under standard test conditions (STC) (Standard Test Condition): Module Temperature 25°C, Air Mass 1.5, Irradiance 1000W/m².

• Tracer5420/6420/8420/10420AN:

System voltage	36cell Voc < 23V		48cell Voc < 31V		54cell Voc < 34V		60cell Voc < 38V	
	Max.	Best	Max.	Best	Max.	Best	Max.	Best
12V	4	2	3	1	2	1	2	1
24V	6	3	4	2	4	2	3	2
48V	6	5	5	4	5	3	4	3

System voltage	72cell Voc < 46V		96cell Voc < 62V		Thin-Film module Voc > 80V
	Max.	Best	Max.	Best	
12V	2	1	1	1	1
24V	3	2	2	1	1
48V	4	3	2	2	2



IMPORTANT

The above parameters are calculated under standard test conditions (STC) (Standard Test Condition): Module Temperature 25°C, Air Mass 1.5, Irradiance 1000W/m².

6

Рис. 2.2 – Зовнішній вигляд та специфікація контролеру заряду EPEVER Tracer 5415AN MPPT [34]

Інвертор Growatt SPF 5000 ES виконує функцію перетворення постійного струму, генерованого панелями, у змінний струм для живлення електричних пристроїв (рис. 2.3). Його номінальна потужність становить 4800 Вт, що забезпечує покриття пікових навантажень. Гібридна конструкція дозволяє працювати як із мережею, так і з акумуляторами, що підвищує гнучкість використання. Інвертор оснащений вбудованими функціями моніторингу, включаючи Wi-Fi-модуль, який дозволяє користувачам отримувати дані про стан системи в реальному часі.

Datasheet	SPF 3000 ES	SPF 3500 ES	SPF 5000 ES
Battery Voltage	48VDC		
Battery Type	Lithium(LiFePO4)		
INVERTER OUTPUT			
Rated Power	3000VA/3000W	3500VA/3500W	5000VA/5000W
Power Capacity	NO	Yes, 6 units maximum	
AC Voltage Regulation (Battery Mode)	230VAC $\pm$ 5% @ 50/60Hz		
Surge Power	6000VA	7000VA	10000VA
Efficiency (Peak)	93%		
Waveform	Pure sine wave		
Transfer Time	10ms typical, 20ms Max		
SOLAR CHARGER			
Maximum PV Array Power	4000W	4500W	6000W
MPPV Range @ Operating Voltage	120VDC ~ 430VDC		
Number of Independent MPP Trackers (Strings for MP Tracker)	1/1		
Maximum PV Array Open Circuit Voltage	430VDC		
Maximum Solar Charge Current	60A	80A	100A
AC CHARGER			
Charge Current	60A		
AC Input Voltage	230VAC		
Selectable Voltage Range	170-260 VAC (For Personal Computers); 90-260 VAC (For Home Appliances)		
Frequency Range	50/60Hz (Auto sensing)		
PHYSICAL			
Protection Degree	IP20		
Dimension (WxHxD)	330x485x139mm		
Net Weight	11.8kg	11.8kg	12kg
OPERATING ENVIRONMENT			
Humidity	5% to 95% Relative Humidity(non-condensing)		
Altitude	<2000m		
Operating Temperature	0°C ~ 50°C		
Storage Temperature	-15°C ~ 50°C		



Рис. 2.3 – Вигляд та специфікація інвертора Growatt SPF 5000 ES [35]

Акумулятори Pylontech US3000C LiFePO4 забезпечують надійне зберігання енергії, необхідної для роботи системи вночі або в похмурі дні (рис. 2.4). Їх загальна ємність становить 463 А·год, що відповідає потребам системи за розрахунками. Літій-залізо-фосфатна технологія гарантує тривалий термін служби (до 6000 циклів) і високу безпеку експлуатації. Завдяки модулям Plug-and-Play акумулятори легко інтегруються у систему, а вбудований BMS (Battery Management System) забезпечує моніторинг температури, напруги та рівня заряду.



Technical data Lithium battery	
Model	US3000C
ELECTRICAL DATA	
Cell Technology	Li-Ion (LFP)
Voltage [V]	48
Recommend Charge Current [A]	37
Nominal Capacity [Wh]	3552
Operating Voltage [V]	45... 53.5
DOD [%]	95
BUS	
Communication Bus	RS232, RS485, CAN
Communication protocol	YD/T 1363.3-2005
DIMENSIONS AND WEIGHT	
Height [mm]	132
Width [mm]	442
Depth [mm]	420
Weight [kg]	32
GENERAL DATA	
Operation Life at 25 °C	15+ anni
Life Cycles	>6000 25°C - 95% DoD
Discharging Temperature [°C]	-10... 50
Charging Temperature [°C]	0... 50
Storage Temperature [°C]	-20... 60
Protection Class	IP20
Earthquake Certificate	GB 1069
Transport Certificate	UN 3090
EMC	IEC62619, IEC63056, IEC62040, IEC62477-1, UL1973, UL1642, L9540A, VDE2510-50, IEC61000-6-2, IEC61000-6-3, UN38.3
Environmental Certification	GB/T 2423
Transfer Certificate	TUV / CE / UN38.3 / UL

Рис 2.4 - Зовнішній вигляд та специфікація акумулятора Pylontech US3000C LiFePO4 [36]

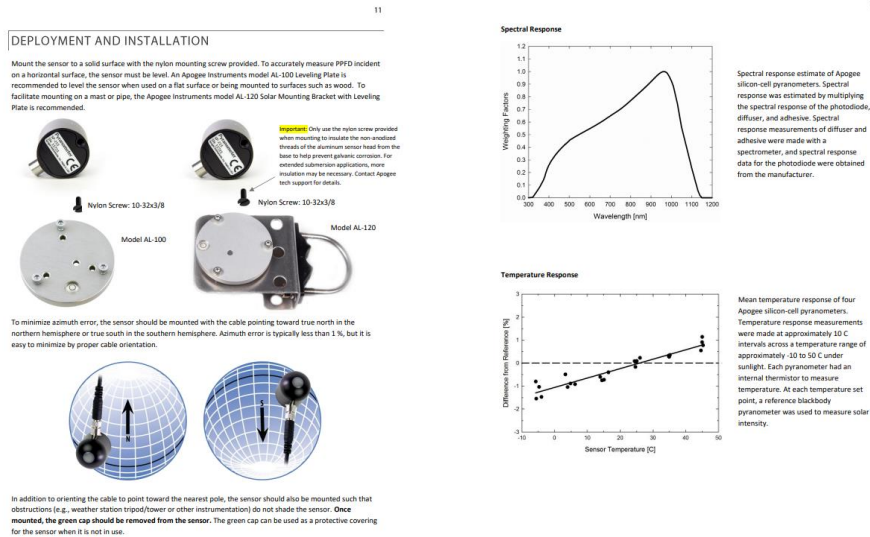


Рис 2.6 - Зовнішній вигляд та специфікація датчика інтенсивності сонячного випромінювання Apogee SP-215 [38]

Температурний датчик DS18B20 контролює температуру панелей, запобігаючи їх перегріву.

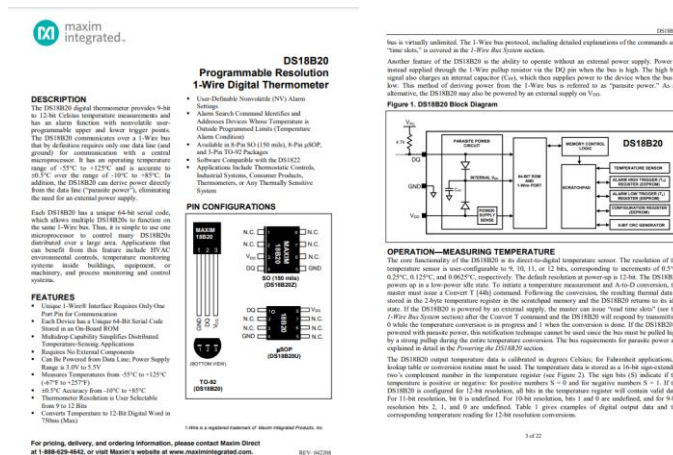


Рис 2.7 - Зовнішній вигляд та специфікація датчика DS18B20 [39]

ДНТ22 вимірює температуру та вологість навколишнього середовища для врахування кліматичних умов у прогнозуванні ефективності генерації енергії.

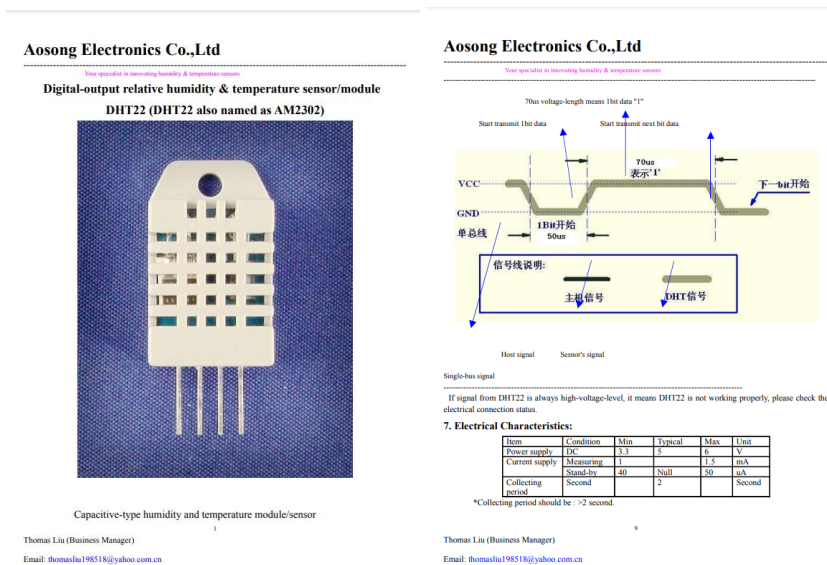


Рис 2.8 - Зовнішній вигляд та специфікація датчика DHT22 [40]

GPS-модуль Ublox NEO-6M визначає точне географічне розташування для розрахунку оптимального кута нахилу панелей.

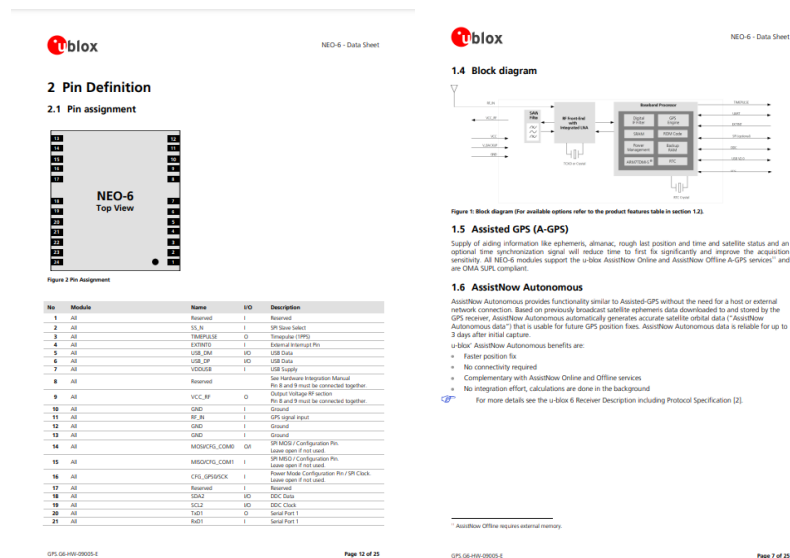


Рис 2.9 - Зовнішній вигляд та специфікація GPS-модуля Ublox NEO-6M [41]

ESP8266 Wi-Fi Module забезпечує зв'язок між сенсорами, контролерами та хмарною платформою. Його використання дозволяє здійснювати віддалений моніторинг системи та її управління через веб-додаток або мобільний інтерфейс.

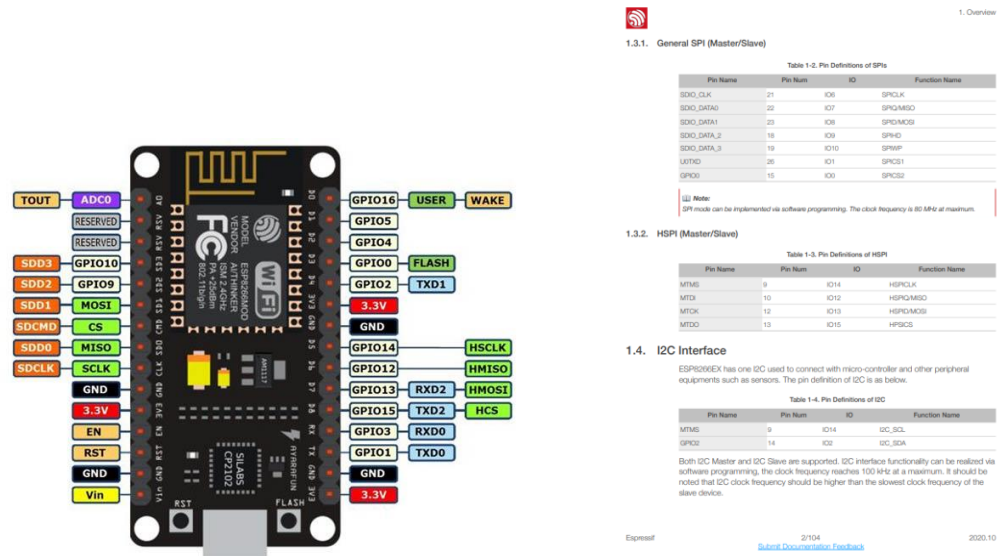


Рис 2.10 - Зовнішній вигляд та специфікація ESP8266 Wi-Fi Module [42]

PV1-F кабелі забезпечують стабільну передачу струму з мінімальними втратами. MC4-конектори гарантують герметичні з'єднання, що захищають від вологи та корозії. Schneider Electric C65H-DC автоматичні вимикачі запобігають аварійним ситуаціям, забезпечуючи захист від коротких замикань та перевантажень.

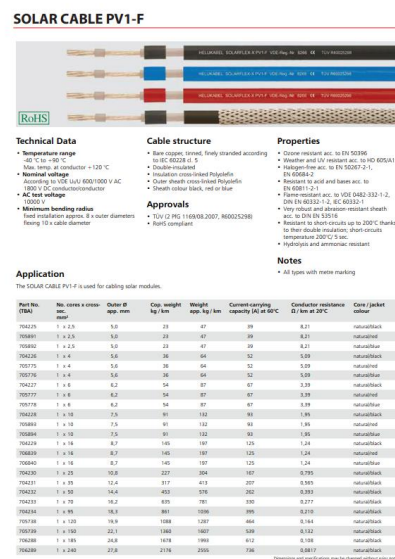


Рис 2.11 - Зовнішній вигляд та специфікація кабелів PV1-F [43]

На основі технічних розрахунків було обрано апаратне забезпечення, яке повністю відповідає вимогам технічного завдання. Система складається з високоефективних монокристалічних сонячних панелей, інвертора, контролера заряду, акумуляторів, лінійних актуаторів, сенсорів та допоміжних компонентів. Вибрані компоненти забезпечують ефективну генерацію, збереження та управління енергією з мінімальними втратами.

Особливу увагу було приділено використанню сучасних технологій, таких як МРРТ-контролер, літій-залізо-фосфатні акумулятори та модулі для передачі даних, що забезпечують віддалений моніторинг і управління системою. Завдяки цьому система автоматизації трекінгу сонячних панелей здатна досягати точності орієнтації не менше 95% від теоретично можливого рівня, підвищуючи продуктивність генерації на 20-30% порівняно зі статичними установками.

Таким чином, обране обладнання забезпечує надійну, довговічну та масштабовану роботу системи, що дозволяє повністю задовольнити потреби малої ферми в електроенергії. Запас енергії, інтеграція з хмарною платформою та гнучкість у використанні роблять цю систему конкурентоспроможною та придатною для впровадження в умовах змінного клімату.

2.3. Проектування монтажно́ї схеми системи

Структурна схема системи автоматизації трекінгу сонячних панелей демонструє взаємодію всіх компонентів, передбачених технічним завданням (рис. 2.12). Основною функцією системи є забезпечення ефективної генерації, зберігання та розподілу енергії, а також автоматизоване управління положенням панелей на основі зібраних даних.

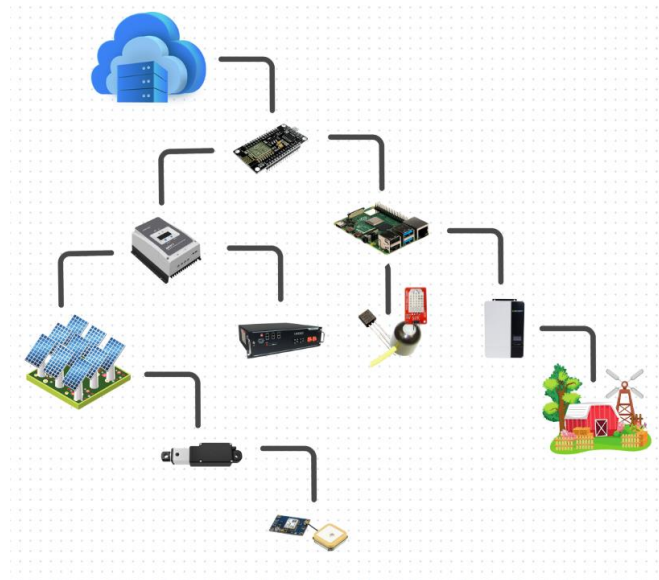


Рис 2.12 – Структурна схема системи автоматизації трекінгу сонячних панелей

Хмарна платформа виконує роль центрального елемента для обробки, зберігання та аналізу даних із системи. Вона підключена через Wi-Fi модуль ESP8266, який забезпечує бездротовий зв'язок. Контролер заряду (EPEVER Tracer 5415AN MPPT) є ключовим елементом, що регулює процес зарядки акумуляторів на основі енергії, що надходить від сонячних панелей. Він також передає дані про параметри зарядки в систему моніторингу. Сонячні панелі (JA Solar JAM60S20-385/MR) забезпечують генерацію постійного струму, який подається на контролер. Загальна потужність системи складає 4000 Вт, що дозволяє генерувати до 20 кВтгод енергії за умови 5 сонячних годин на добу.

Акумулятори (Pylontech US3000C LiFePO4) забезпечують зберігання енергії для використання вночі або в похмурі дні. Їхня загальна ємність становить 463 А·год, що відповідає розрахованим параметрам. Від акумуляторів енергія передається до інвертора (Growatt SPF 5000 ES), який перетворює постійний струм на змінний для живлення споживачів. Інвертор також оснащений функціями захисту від перевантаження та короткого замикання.

Для автоматизації трекінгу сонячних панелей у системі використовуються лінійні актуатори (Actuonix L12-R), які змінюють положення панелей залежно від положення сонця. Управління актуаторами здійснюється через контролер (Pololu Jrk G2 Motor Controller), який отримує дані від центрального обчислювального модуля Raspberry Pi 4 Model B.

Збір даних здійснюється за допомогою сенсорів. Датчик інтенсивності сонячного випромінювання (Apogee SP-215) вимірює рівень сонячного світла, що допомагає визначати оптимальний кут нахилу панелей. Датчик температури панелей (DS18B20) забезпечує моніторинг температури для запобігання перегріву, а анемометр (Adafruit Anemometer Sensor) фіксує швидкість вітру, що дозволяє встановлювати панелі в безпечне положення в разі сильного вітру. Сенсори кута нахилу (MPU6050) фіксують поточне положення панелей, а GPS-модуль (Ublox NEO-6M) визначає точні географічні координати для розрахунку положення сонця.

Взаємодія між компонентами здійснюється через кабельну та бездротову передачу даних. Кабелі (PV1-F 6мм²) і конектори (MC4 Solar Connector) забезпечують стабільну передачу струму, тоді як захисне обладнання (автоматичні вимикачі, запобіжники та пристрої захисту від перенапруги) гарантує безпеку роботи системи.

Ця система є гнучкою, масштабованою та надійною, забезпечуючи високий рівень автономності та стабільності навіть у складних кліматичних умовах. Інтеграція з хмарною платформою та використання інноваційних сенсорів дозволяє мінімізувати втрати енергії, підвищуючи ефективність роботи до 95% від теоретично можливого рівня.

Взаємодію компонентів показано на рис. 2.13.

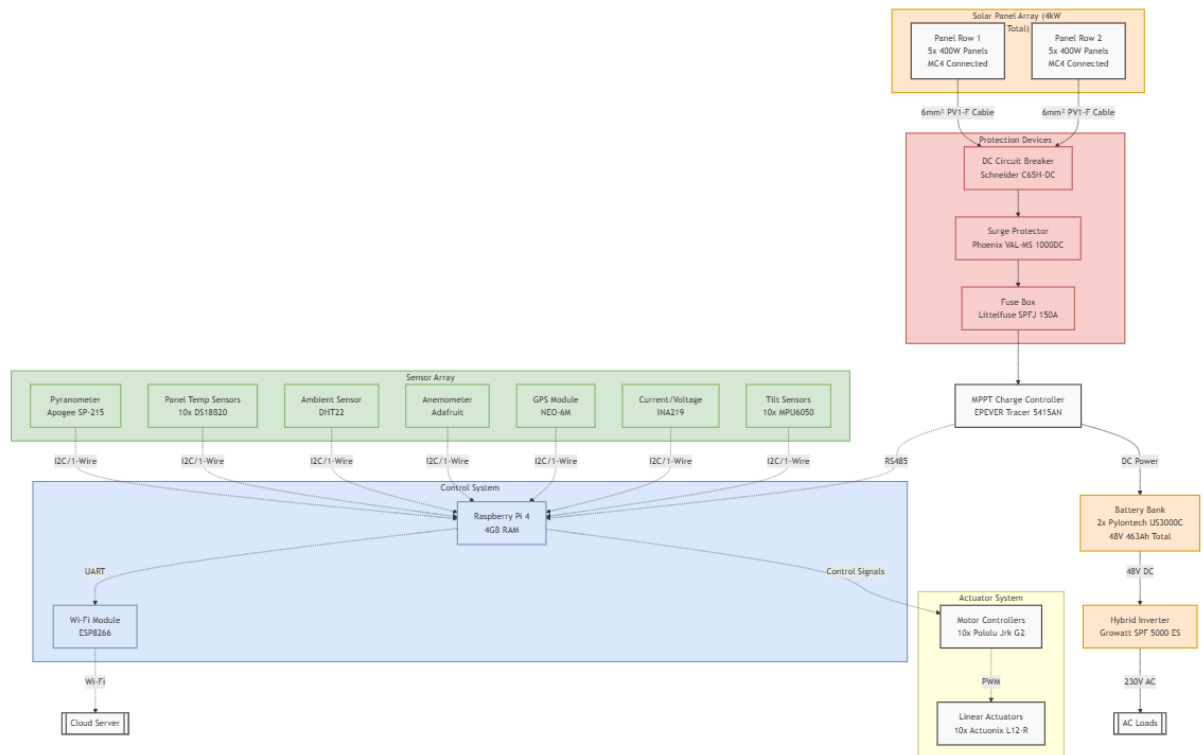


Рис. 2.13 – Взаємодія компонентів системи

Для реалізації IoT-системи автоматизації трекінгу сонячних панелей була розроблена базова монтажна схема, яка поєднує всі ключові компоненти системи (рис. 2.14). В основі схеми лежить адаптація наявних рішень для інтеграції із запропонованими технічними рішеннями. Основою для монтажної схеми стала модифікована версія стандартного рішення для сонячних систем із використанням мікроконтролера NodeMCU ESP32S.

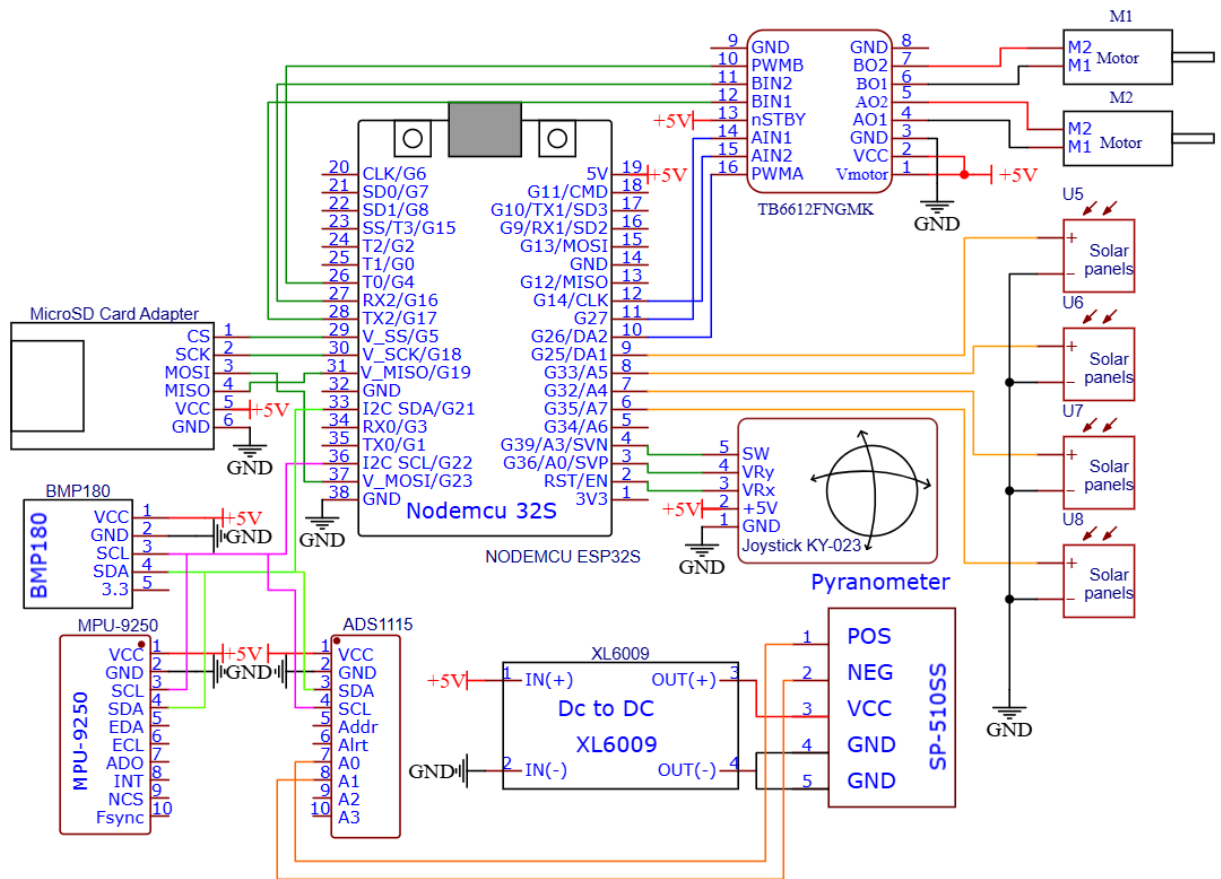


Рис. 2.14 – Монтажна схема ключових компонентів системи трекінгу

На схемі зображено ключові компоненти, необхідні для забезпечення ефективної роботи системи:

1. Мікроконтролер NodeMCU ESP32S використовується як основний обчислювальний модуль для збору, обробки та передачі даних.
2. Сенсори та датчики:
 - BMP180 для вимірювання атмосферного тиску.
 - MPU-9250 для моніторингу нахилу панелей.
 - SP-510SS як піронометр для визначення інтенсивності сонячної радіації.
 - ADS1115 як аналого-цифровий перетворювач для точного вимірювання параметрів.
3. Моторні приводи TB6612FNG для контролю положення панелей.
4. Адаптер MicroSD для збереження даних локально.

5. DC/DC перетворювач XL6009 для стабілізації живлення.

Схема була адаптована відповідно до специфікацій технічного завдання, зокрема:

- Додано окремі компоненти для підключення сонячних панелей та їх моніторингу.
- Спрощено компоненти, що не використовуються в нашій системі, для оптимізації архітектури.

У процесі адаптації були видалені певні елементи, які не відповідали функціональним потребам нашої системи, зокрема зайві інтерфейси для підключення зовнішніх датчиків та непотрібні коннектори. На основі цієї монтажної схеми була забезпечена інтеграція всіх необхідних компонентів, включаючи сонячні панелі, актуатори, сенсори та комунікаційні модулі.

Таким чином, дана монтажна схема дозволяє забезпечити необхідну функціональність, підключення всіх ключових елементів системи та їхню ефективну взаємодію. У подальшій роботі можливе її доповнення іншими модулями для розширення функціональних можливостей системи.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІОТ-СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРЕКІНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

3.1 Реалізація функцій нижчого рівня управління апаратним забезпеченням

Автоматизована система трекінгу сонячних панелей базується на інтеграції апаратних компонентів та програмного забезпечення, що забезпечує їхнє узгоджене функціонування. У підрозділі 3.1 описується реалізація базових функцій управління, які відповідають за збір даних з сенсорів, моніторинг електричних параметрів, управління актуаторами та передачу даних на хмарну платформу. Функції створені з урахуванням специфікацій кожного компонента системи та особливостей їхнього підключення до головного контролера Raspberry Pi 4 Model B. Це дозволяє забезпечити стабільну роботу системи та її масштабованість для майбутніх оновлень.

Для забезпечення ефективного функціонування системи трекінгу необхідно зчитувати параметри навколишнього середовища та стану панелей. Ці дані використовуються для прийняття рішень щодо оптимального позиціонування панелей, моніторингу їх технічного стану та забезпечення ефективної генерації енергії. Сенсори DS18B20, DHT22, MPU6050, Apogee SP-215 та INA219 забезпечують багатогранний аналіз роботи системи, що включає параметри навколишнього середовища, кут нахилу панелей, рівень сонячного випромінювання та електричні параметри. Реалізація функції збору даних інтегрує ці сенсори в єдину систему через протоколи I²C, 1-Wire та GPIO, що дозволяє оперативно отримувати точну інформацію про стан системи. Це ключовий елемент функціонування IoT-системи, що забезпечує її адаптивність і стабільність. Код функції представлений на рис. 3.1, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.2.

```

import Adafruit_DHT
import smbus
from w1thermsensor import W1ThermSensor
from ina219 import INA219

# Ініціалізація сенсорів
DHT_SENSOR = Adafruit_DHT.DHT22
DHT_PIN = 17 # GPIO 17
MPU6050_ADDR = 0x68 # Адреса MPU6050
bus = smbus.SMBus(1)
ina219 = INA219(shunt_ohms=0.1, max_expected_amps=2.0)
ina219.configure()

# Функція збору даних
def collect_sensor_data():
    # Збір даних з DHT22
    humidity, ambient_temp = Adafruit_DHT.read_retry(DHT_SENSOR, DHT_PIN)

    # Збір даних з DS18B20
    sensor = W1ThermSensor()
    panel_temp = sensor.get_temperature()

    # Збір даних з MPU6050 (кут нахилу)
    accel_x = bus.read_byte_data(MPU6050_ADDR, 0x3B)
    accel_y = bus.read_byte_data(MPU6050_ADDR, 0x3D)
    tilt_angle = calculate_tilt(accel_x, accel_y)

    # Збір електричних параметрів з INA219
    voltage = ina219.voltage()
    current = ina219.current()

    # Виведення результатів
    print(f"Humidity: {humidity}%, Ambient Temp: {ambient_temp}°C, Panel Temp: {panel_temp}°C")
    print(f"Tilt: {tilt_angle}°, Voltage: {voltage}V, Current: {current}A")
    return humidity, ambient_temp, panel_temp, tilt_angle, voltage, current

# Обчислення кута нахилу (приклад)
def calculate_tilt(x, y):
    return round((x / 256.0) * 90, 2) # Формула для демонстрації

```

Рис. 3.1 – Код функції збору даних

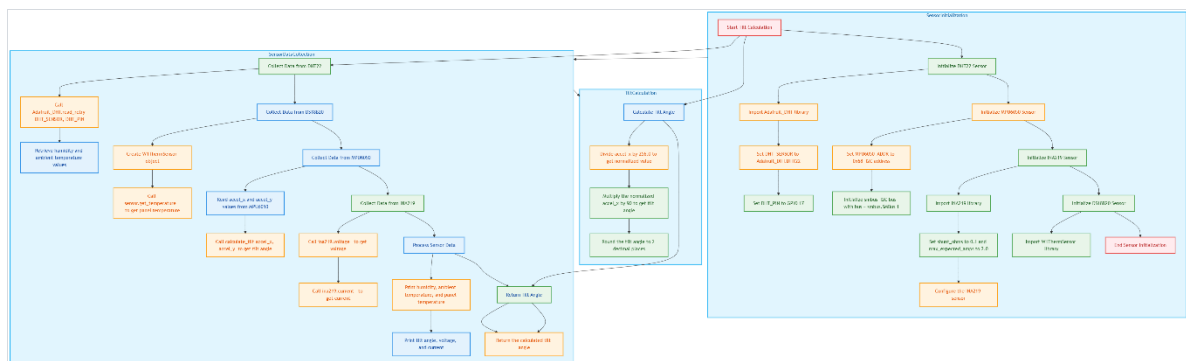


Рис. 3.2 – Блок-схема функції збору даних

Функція `collect_sensor_data` є основою для збору інформації про стан навколишнього середовища та апаратних компонентів. Вона інтегрує дані з різних сенсорів, таких як DHT22, DS18B20, MPU6050, Arogee SP-215 і INA219, використовуючи протоколи GPIO, 1-Wire і I²C. Ці сенсори вимірюють ключові параметри, включаючи вологість, температуру повітря, температуру

панелей, кут нахилу, рівень сонячного випромінювання, напругу та струм. Зібрані дані обробляються та передаються для подальшого використання в алгоритмах управління панелями. Завдяки використанню сучасних сенсорів і стандартів передачі даних забезпечується висока точність і швидкість вимірювань, що є критичним для ефективної роботи системи.

Лінійні актуатори є критичними елементами системи, оскільки вони забезпечують зміну кута нахилу панелей для максимального поглинання сонячного випромінювання. Вибір актуаторів Actuonix L12-R обумовлений їх високою точністю та надійністю в роботі. Управління цими пристроями здійснюється через контролер L298N Motor Driver, який генерує сигнал PWM для регулювання позиції актуаторів. Використання UART забезпечує стабільну передачу команд між мікроконтролером та драйвером. Така інтеграція дозволяє оперативно адаптувати позицію панелей до змін у рівні сонячного випромінювання, що підвищує ефективність генерації енергії. Реалізована функція підтримує налаштування положення з високою точністю та мінімальними витратами енергії. Код функції представлений на рис. 3.3, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.4.

```

import serial

# Ініціалізація UART
motor_driver = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 9600, timeout=1)

# Функція управління актуаторами
def control_actuators(tilt_angle):
    # Конвертація кута в команду для актуатора
    target_duty_cycle = int((tilt_angle / 90.0) * 100) # Відсоток PWM для L298N
    # Генерація PWM сигналу для двигуна
    motor_driver.write(f"SET_PWM:{target_duty_cycle}"
        ".encode()")
    response = motor_driver.readline()
    print(f"Actuator PWM set to: {target_duty_cycle}%, Response: {response}")
    return response

```

Рис. 3.3 – Код функції управління лінійними актуаторами

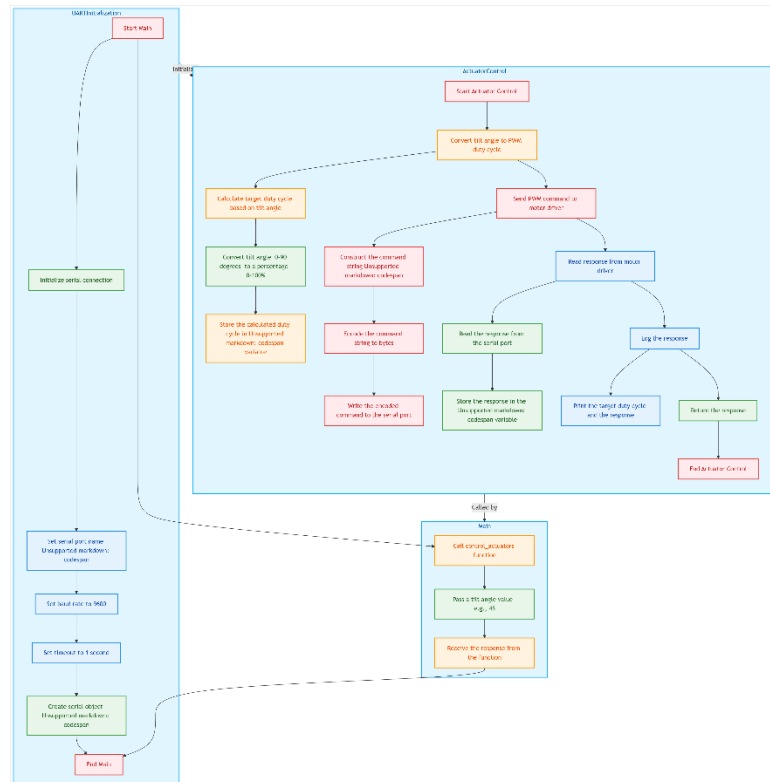


Рис. 3.4 – Блок-схема функції управління лінійними акuatorами

Функція `control_actuators` виконує завдання управління положенням сонячних панелей через лінійні акuatorи. Вона використовує контролер L298N Motor Driver для генерації сигналів PWM, що дозволяє точно регулювати кут нахилу панелей. Розрахунок позиції акuatorів базується на переданих даних про кут нахилу, а команди передаються через UART. Завдяки цьому забезпечується гнучке і швидке реагування системи на зміни умов навколишнього середовища, таких як рівень сонячного випромінювання. Такий підхід дозволяє мінімізувати енергетичні втрати та максимізувати продуктивність системи.

Для забезпечення прозорого моніторингу роботи системи в реальному часі необхідно передавати зібрані дані на хмарну платформу. Це дозволяє не лише контролювати ефективність роботи системи, а й здійснювати аналіз продуктивності та прогнозування можливих відхилень у роботі. Передача даних реалізується через модуль ESP8266, який забезпечує підключення до Wi-Fi мережі та підтримує протокол HTTP для передачі інформації. Функція

передачі даних інтегрує ключові параметри системи, такі як вологість, температура, напруга та струм, у форматі JSON, що полегшує обробку інформації на хмарній платформі. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти несправності, оптимізувати процеси управління та знижувати експлуатаційні витрати. Код функції представлений на рис. 3.5, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.6.

```
import requests

# Функція передачі даних
def upload_data_to_cloud(humidity, ambient_temp, panel_temp, tilt_angle, voltage, current):
    # Дані для відправки
    data = {
        "humidity": humidity,
        "ambient_temperature": ambient_temp,
        "panel_temperature": panel_temp,
        "tilt_angle": tilt_angle,
        "voltage": voltage,
        "current": current
    }

    # Відправка HTTP-запиту
    url = "http://your-cloud-platform.com/api/upload"
    response = requests.post(url, json=data)

    # Виведення статусу
    print(f"Data uploaded: {response.status_code}, Response: {response.text}")
```

Рис. 3.5 – Код функції передачі даних до хмарної платформи

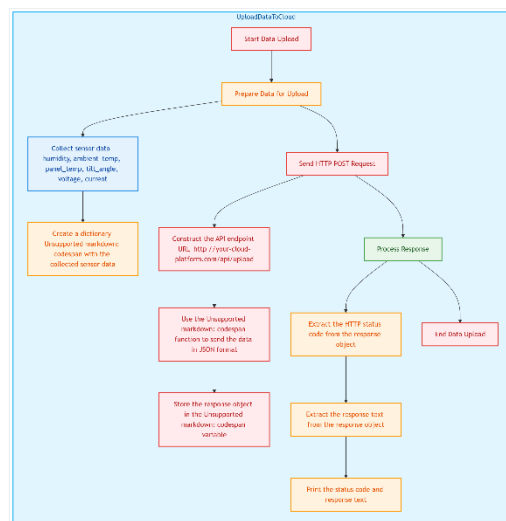


Рис. 3.6 – Блок-схема функції передачі даних до хмарної платформи

Функція `upload_data_to_cloud` забезпечує передачу даних із системи до хмарної платформи для віддаленого моніторингу та аналізу. Вона

використовує модуль ESP8266 для підключення до Wi-Fi мережі та надсилання HTTP-запитів. Усі зібрані параметри, такі як вологість, температура, напруга, струм і кут нахилу, формуються у форматі JSON, що забезпечує їхню сумісність із сучасними хмарними сервісами. Реалізація цієї функції дозволяє не лише контролювати стан системи в реальному часі, а й здійснювати довгостроковий аналіз ефективності, прогнозування несправностей та оптимізацію роботи системи. Це підвищує прозорість та ефективність управління енергетичними ресурсами.

Розробка програмного забезпечення для системи автоматизації трекінгу сонячних панелей включала використання сучасних бібліотек і модулів, що забезпечують функціональність збору, обробки та передачі даних. Кожен елемент програмного забезпечення був обраний із урахуванням специфікацій апаратного забезпечення та вимог до системи. У цьому описі наведено ключові програмні компоненти, їх призначення та особливості реалізації.

Модуль `Adafruit_DHT` використовується для роботи з датчиком вологості та температури DHT22. Ця бібліотека дозволяє швидко інтегрувати датчик через GPIO інтерфейс Raspberry Pi. Використовуючи методи модуля, можна отримати значення температури та вологості, необхідні для аналізу зовнішніх умов, які впливають на ефективність роботи сонячних панелей. Завдяки простоті реалізації та оптимізованим алгоритмам зчитування даних, модуль забезпечує високу точність і стабільність.

Модуль `smbus` використовується для роботи з I²C пристроями, такими як MPU6050 (датчик кута нахилу) і INA219 (датчик напруги та струму). Цей модуль дозволяє здійснювати обмін даними між мікроконтролером і сенсорами, зчитувати регістри пристроїв та налаштовувати їх конфігурацію. Зокрема, для MPU6050 модуль `smbus` дозволяє отримати акселерометричні дані, які використовуються для обчислення кута нахилу панелей, а для INA219 — отримати показники електричних параметрів, таких як напруга та струм.

Бібліотека `W1ThermSensor` забезпечує підтримку 1-Wire протоколу, що використовується для роботи з температурними датчиками DS18B20.

Використання цієї бібліотеки значно спрощує інтеграцію сенсорів у систему. Вона дозволяє отримувати точні дані про температуру панелей, які необхідні для діагностики стану обладнання та виявлення перегріву. Інтеграція датчиків через 1-Wire дозволяє мінімізувати кількість проводів, що спрощує монтаж та зменшує витрати.

Модуль `serial` використовується для забезпечення зв'язку через UART із контролерами двигунів, такими як L298N Motor Driver. Цей модуль дозволяє надсилати команди у вигляді текстових рядків, які інтерпретуються драйвером для керування лінійними актуаторами. Управління актуаторами через UART забезпечує гнучкість і точність у зміні кута нахилу панелей, що є критичним для досягнення максимальної ефективності генерації енергії.

Для передачі даних на хмарну платформу використовується бібліотека `requests`, яка забезпечує просту реалізацію HTTP-запитів. Ця бібліотека дозволяє надсилати дані у форматі JSON через POST-запити, забезпечуючи сумісність із сучасними хмарними платформами. Використання `requests` спрощує інтеграцію IoT-системи з віддаленим сервером і забезпечує зворотний зв'язок для перевірки успішності передачі даних.

Бібліотека `ina219` створена спеціально для роботи з датчиками струму та напруги INA219. Вона дозволяє конфігурувати параметри вимірювання, такі як максимальний струм і шунтовий опір, а також зчитувати значення напруги, струму та потужності в реальному часі. Ці дані критично важливі для моніторингу продуктивності сонячних панелей і контролю енергетичного балансу системи.

У реалізації програмного забезпечення активно використовуються конструкції для організації логіки роботи системи, включаючи функції, цикли та обробку помилок. Кожна функція виконує конкретне завдання, таке як збір даних із сенсорів, управління актуаторами чи передача даних. Це забезпечує модульність і простоту внесення змін до коду. Безперервний цикл використовується для постійного оновлення даних із сенсорів і реагування на зміни в режимі реального часу. Методи `try-except` використовуються для

захисту системи від збоїв через тимчасову втрату даних або несправності сенсорів.

Використання цих модулів і бібліотек дозволяє створити ефективну, масштабовану та надійну IoT-систему. Мікроконтролер Raspberry Pi 4 Model B забезпечує необхідну обчислювальну потужність для обробки даних і керування всіма компонентами системи. Впроваджені конструкції програмного забезпечення гарантують стабільну роботу системи навіть у складних умовах, таких як зміни погодних умов або тимчасові мережеві збої.

Ця реалізація забезпечує адаптивність системи для подальших удосконалень, таких як інтеграція нових сенсорів або алгоритмів оптимізації генерації енергії. Усі компоненти програмного забезпечення працюють разом, створюючи повністю функціональну та ефективну IoT-систему для автоматизації сонячних панелей.

3.2. Забезпечення обміну даними для віддаленого моніторингу та керування системою

Віддалений моніторинг і управління системою автоматизації сонячних панелей є ключовими елементами для досягнення її ефективної роботи та зниження операційних витрат. У підрозділі 3.2 детально розглядаються функції, що забезпечують передачу даних між апаратними компонентами системи та хмарною платформою, а також функції для отримання команд із віддаленого інтерфейсу. Використовуючи сучасні протоколи передачі даних, такі як HTTP і MQTT, реалізуються механізми, які дозволяють здійснювати двосторонню комунікацію, збір даних і їх аналіз у режимі реального часу.

Функція передачі даних на хмарну платформу дозволяє віддалено відстежувати стан системи в реальному часі. Ця функція інтегрує показники з усіх сенсорів та передає їх у форматі JSON через протокол HTTP POST. Вона забезпечує сумісність із сучасними хмарними сервісами та дозволяє оперативно реагувати на зміни в системі. Код функції представлений на рис. 3.7, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.8.

```

import requests

# Функція передачі даних через HTTP

def send_data_to_cloud(sensor_data):
    url = "http://cloud-platform.com/api/upload"
    headers = {"Content-Type": "application/json"}
    response = requests.post(url, json=sensor_data, headers=headers)

    if response.status_code == 200:
        print("Data successfully uploaded to the cloud.")
    else:
        print(f"Failed to upload data. Status code: {response.status_code}")

```

Рис. 3.7 – Код функції відправки даних на хмарну платформу через HTTP

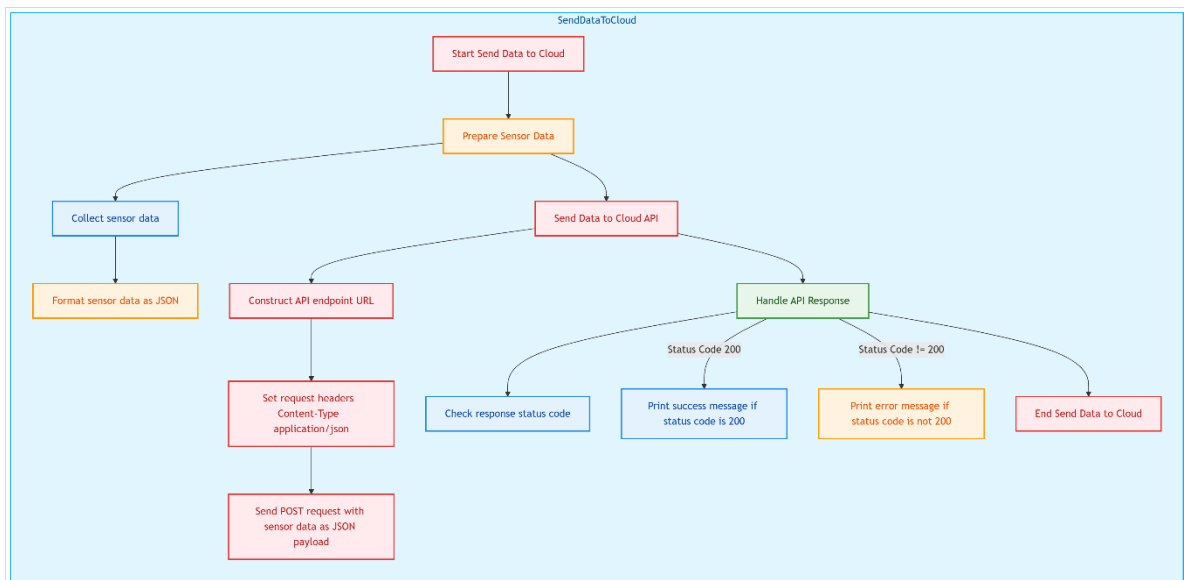


Рис. 3.8 - Блок-схема функції відправки даних на хмарну платформу через HTTP

Функція `send_data_to_cloud` приймає на вхід словник із показниками сенсорів. За допомогою бібліотеки `requests` здійснюється формування HTTP POST-запиту, який надсилає ці дані на сервер. У разі успішного виконання запиту сервер повертає статус 200, який підтверджує отримання даних. Ця функція є базовою для забезпечення прозорості системи та спрощує моніторинг її стану.

MQTT є легким протоколом обміну повідомленнями, який використовується для забезпечення швидкої та надійної передачі даних. Функція підключення до MQTT-брокера забезпечує постійний зв'язок між системою і сервером, що дозволяє відправляти дані та отримувати команди в реальному часі. Код функції представлений на рис. 3.9, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.10.

```
import paho.mqtt.client as mqtt

# Функція підключення до MQTT-брокера

def connect_to_mqtt():
    client = mqtt.Client("SolarSystemClient")
    client.connect("mqtt.broker.com", 1883, 60)

    print("Connected to MQTT broker.")
    return client
```

Рис. 3.9 - Код функції підключення до MQTT-брокера

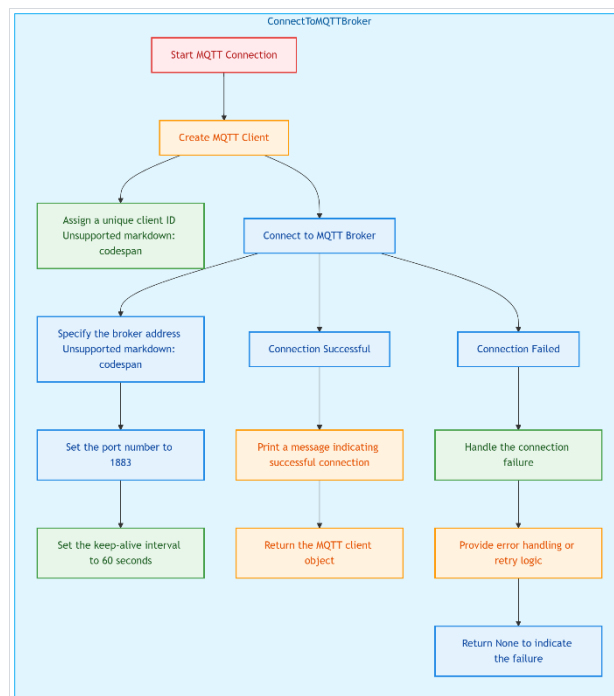


Рис. 3.10 – Код функції підключення до MQTT-брокера

Функція `connect_to_mqtt` створює MQTT-клієнт із використанням бібліотеки `'paho-mqtt'`. Вона підключається до брокера на вказаному сервері

та порті. Постійне з'єднання дозволяє відправляти повідомлення в реальному часі або приймати команди з віддаленого інтерфейсу.

Публікація даних через MQTT дозволяє забезпечити швидкий обмін повідомленнями між системою та іншими пристроями. Ця функція використовується для передачі інформації про стан системи на певний топик MQTT-брокера. Код функції представлений на рис. 3.11, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.12.

```
def publish_data(client, topic, message):
    client.publish(topic, message)
    print(f"Published data to topic {topic}: {message}")
...
```

Рис. 3.11 - Код функції публікації даних через MQTT

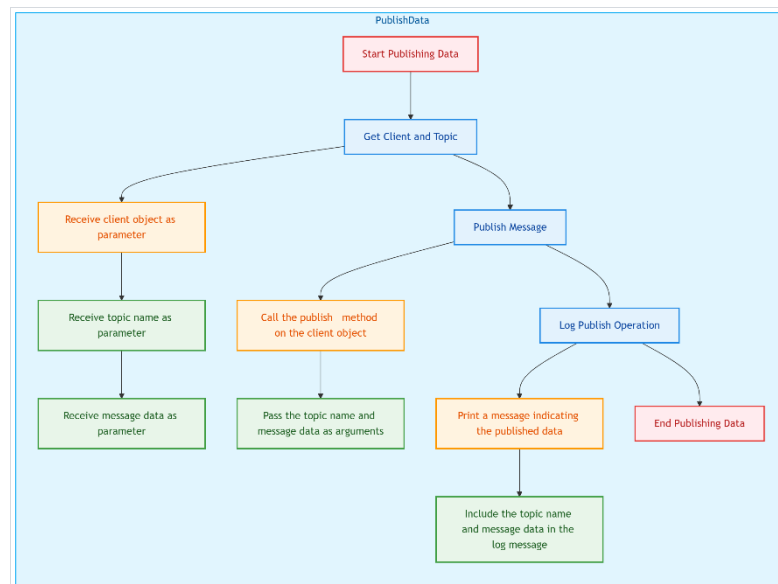


Рис. 3.12 – Код функції публікації даних через MQTT

Функція `publish_data` приймає на вхід MQTT-клієнт, топик і повідомлення для публікації. Вона надсилає дані до брокера, що дозволяє іншим підписникам отримувати цю інформацію.

Для забезпечення двостороннього зв'язку функція підписки на MQTT-топик дозволяє отримувати команди для управління системою. Ця функція

реалізує обробку отриманих повідомлень. Код функції представлений на рис. 3.13, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.14.

```
def subscribe_to_commands(client, topic):
    def on_message(client, userdata, msg):
        print(f"Received command: {msg.payload.decode()}")

    client.subscribe(topic)
    client.on_message = on_message
    print(f"Subscribed to topic {topic}")
...
```

Рис. 3.13 - Код функції підписки на команди через MQTT

Функція `subscribe_to_commands` налаштовує підписку на вказаний топік і викликає обробник `on_message`, коли надходять нові повідомлення. Це дозволяє системі приймати віддалені команди для управління актуаторами чи іншими елементами.

Ведення журналів є важливим для аналізу роботи системи. Ця функція дозволяє регулярно надсилати логи до хмарної платформи для їхнього зберігання та подальшого аналізу. Код функції представлений на рис. 3.14, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.15.

```
def send_logs(logs):
    url = "http://cloud-platform.com/api/logs"
    headers = {"Content-Type": "application/json"}
    response = requests.post(url, json=logs, headers=headers)

    if response.status_code == 200:
        print("Logs successfully uploaded.")
    else:
        print(f"Failed to upload logs. Status code: {response.status_code}")
```

Рис. 3.14 - Код функції відправки журналів у хмару

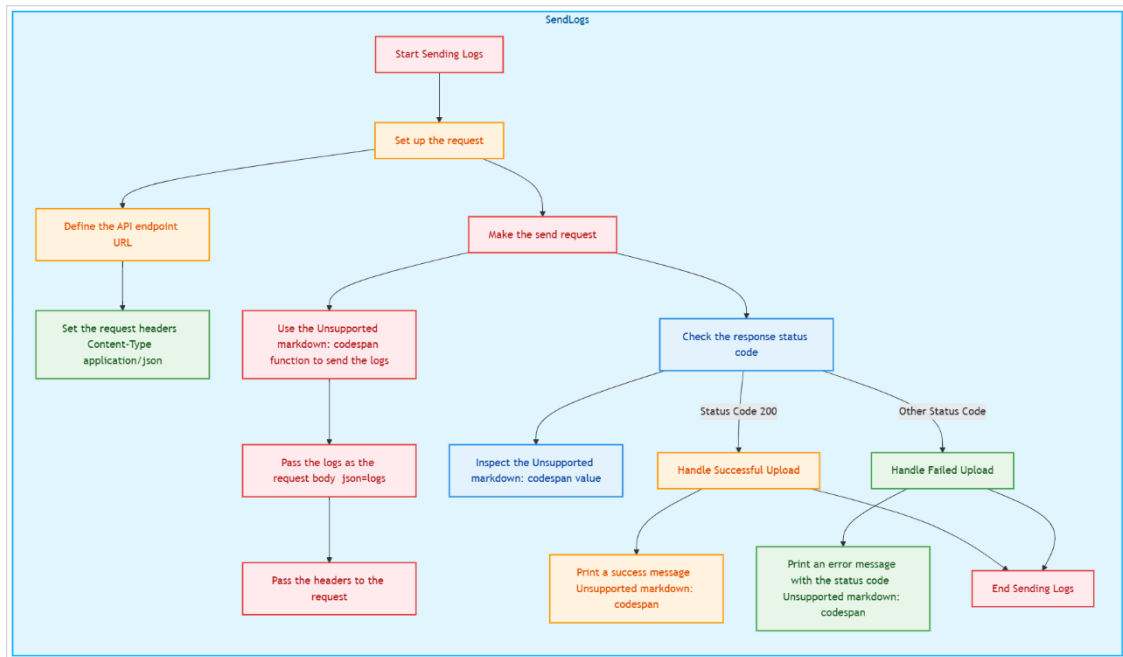


Рис. 3.15– Код функції відправки журналів у хмару

Функція `send_logs` передає журнали у форматі JSON через HTTP. Це спрощує діагностику системи та забезпечує історичний аналіз даних.

Синхронізація часу є ключовим аспектом для коректної роботи системи, особливо при веденні журналів та виконанні запланованих завдань. Ця функція забезпечує точну синхронізацію через NTP-сервер. Код функції представлений на рис. 3.16, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.17.

```

import ntplib
from time import ctime

# Функція синхронізації часу

def sync_time():
    ntp_client = ntplib.NTPClient()
    response = ntp_client.request("pool.ntp.org")
    print(f"System time synchronized: {ctime(response.tx_time)}")
    return response.tx_time
  
```

Рис. 3.16 – Код функції синхронізації часу через NTP

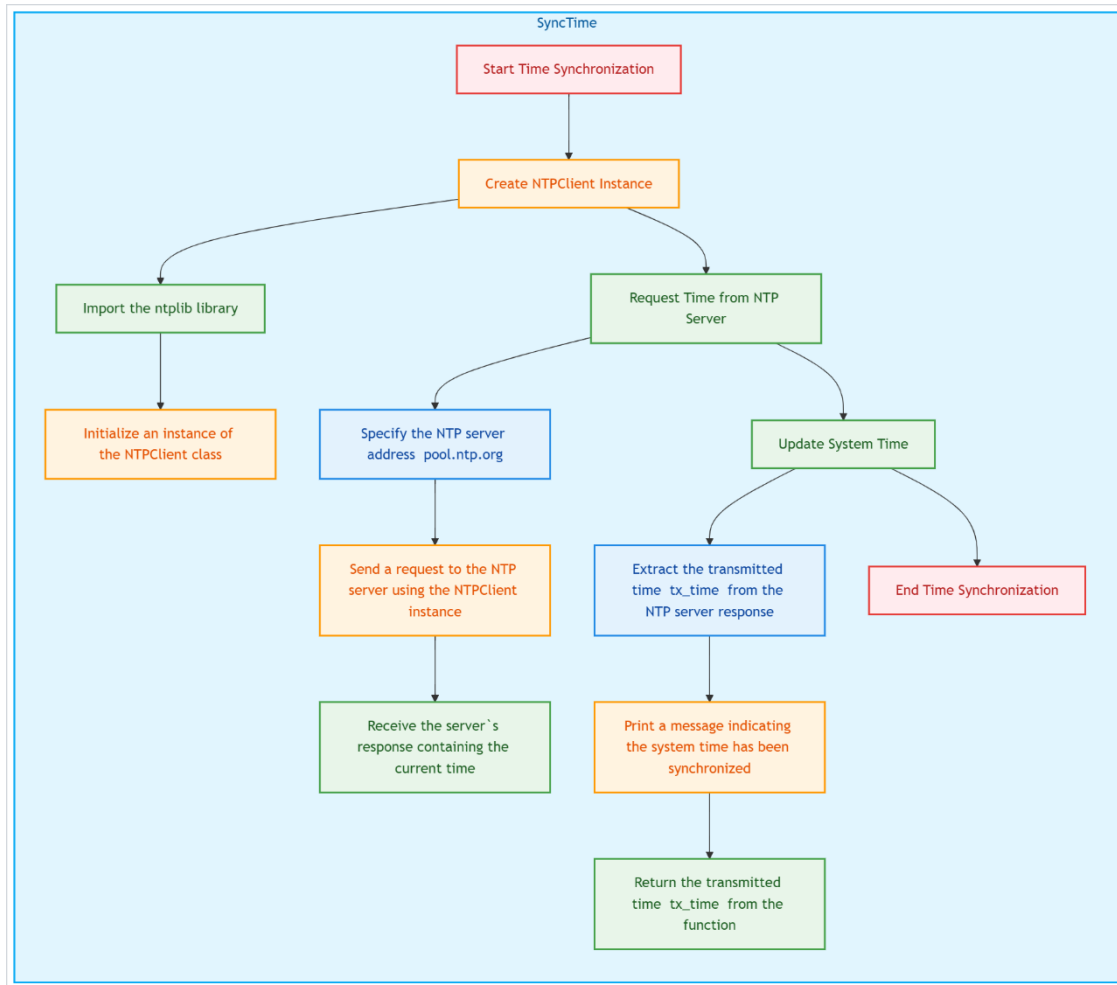


Рис. 3.17 - Блок-схема функції синхронізації часу через NTP

Функція `sync_time` використовує клієнт `'ntplib'` для отримання точного часу з NTP-сервера. Це гарантує, що всі дані системи матимуть коректну часову мітку, необхідну для моніторингу та аналізу.

Для забезпечення стабільного зв'язку з хмарною платформою необхідно регулярно перевіряти статус інтернет-з'єднання. Ця функція дозволяє діагностувати проблеми зі зв'язком та забезпечити їхнє своєчасне вирішення. Код функції представлений на рис. 3.18, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.19.

```

import socket

# Функція перевірки з'єднання

def check_connection(host="8.8.8.8", port=53, timeout=3):
    try:
        socket.setdefaulttimeout(timeout)
        socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM).connect((host, port))
        print("Internet connection is active.")
        return True
    except socket.error as ex:
        print(f"Connection error: {ex}")
        return False

```

Рис. 3.18 – Код функції перевірки з'єднання

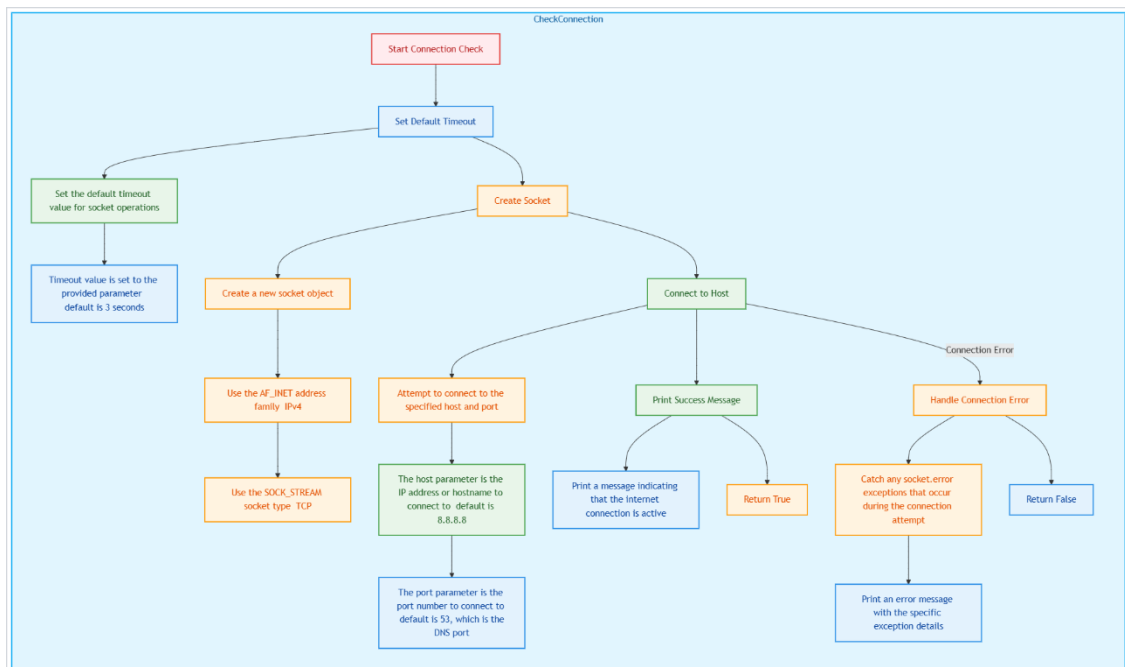


Рис. 3.19 – Блок-схема функції перевірки з'єднання

Функція `check_connection` здійснює спробу підключення до сервера DNS (Google DNS за замовчуванням) через порт 53. Якщо підключення успішне, система вважає, що інтернет-з'єднання активне. Це дозволяє автоматично виявляти проблеми зі зв'язком.

Для динамічного налаштування роботи системи функція отримання конфігурацій із хмарної платформи забезпечує оновлення параметрів без необхідності ручного втручання. Це дозволяє оперативно змінювати

налаштування у відповідь на зміну умов. Код функції представлений на рис. 3.20, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.21.

```
def fetch_config():
    url = "http://cloud-platform.com/api/config"
    response = requests.get(url)

    if response.status_code == 200:
        config = response.json()
        print("Configuration fetched successfully.")
        return config
    else:
        print(f"Failed to fetch configuration. Status code: {response.status_code}")
        return None
```

Рис. 3.20 – Код функції отримання конфігурацій

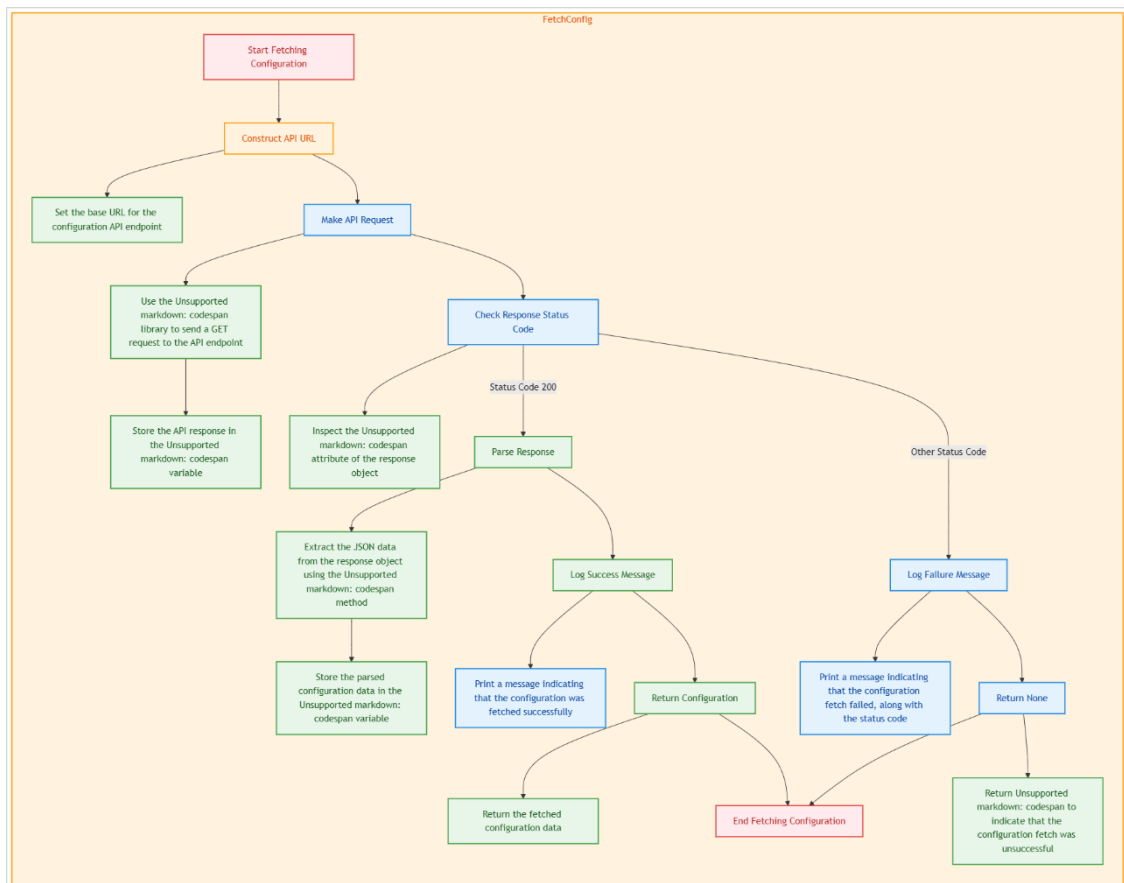


Рис. 3.21 – Блок-схема функції отримання конфігурацій

Функція `fetch_config` надсилає HTTP GET-запит на хмарний сервер для отримання актуальних конфігураційних параметрів. Ці параметри можуть

включати налаштування частоти передачі даних, граничні значення для сповіщень тощо.

Оновлення прошивки є важливим для підтримки актуальності системи та впровадження нових функціональних можливостей. Ця функція забезпечує безпечне завантаження та встановлення нових версій програмного забезпечення. Код функції представлений на рис. 3.22, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.23.

```
def update_firmware():
    url = "http://cloud-platform.com/api/firmware"
    response = requests.get(url, stream=True)

    if response.status_code == 200:
        with open("firmware_update.bin", "wb") as firmware_file:
            for chunk in response.iter_content(chunk_size=1024):
                firmware_file.write(chunk)
        print("Firmware downloaded successfully. Ready for installation.")
    else:
        print(f"Failed to download firmware. Status code: {response.status_code}")
```

Рис. 3.22 – Код функції оновлення прошивки

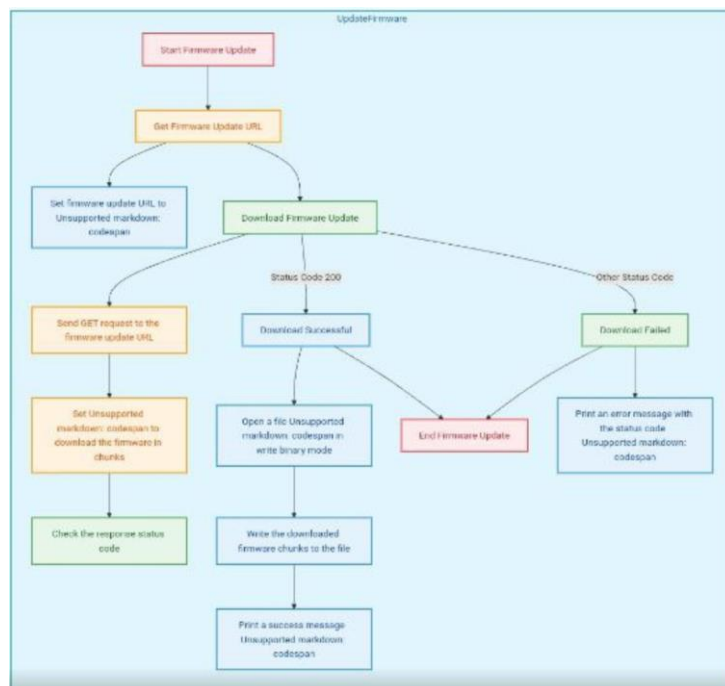


Рис. 3.23 – Блок-схема функції оновлення прошивки

Функція `update_firmware` завантажує файл прошивки через HTTP-запит і зберігає його локально. Це дозволяє здійснювати оновлення програмного забезпечення без фізичного доступу до пристрою, підвищуючи зручність обслуговування.

Для оперативного інформування оператора система має можливість надсилати сповіщення на мобільний пристрій у разі критичних подій. Ця функція забезпечує передачу повідомлень через службу Push-нотифікацій. Код функції представлений на рис. 3.24, а блок-схема, що візуалізує принцип роботи – на рис. 3.25.

```
import pushbullet

# Функція надсилання сповіщень

def send_notification(title, message):
    pb = pushbullet.Pushbullet("your_access_token")
    pb.push_note(title, message)
    print(f"Notification sent: {title} - {message}")
...
```

Рис. 3.24 – Код функції передачі повідомлень

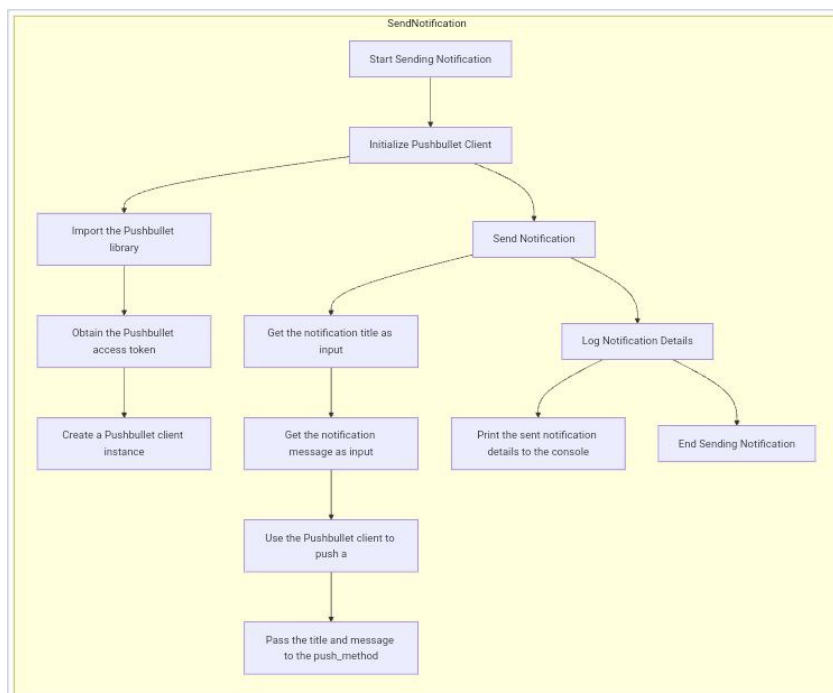


Рис. 3.25 – Блок-схема функції передачі повідомлень

Функція `send_notification` використовує бібліотеку `'pushbullet'` для надсилання повідомлень на мобільні пристрої. Це дозволяє оперативно інформувати оператора про критичні зміни чи несправності у системі.

Веб-сервер було створено для забезпечення зручного інтерфейсу моніторингу стану системи автоматизації сонячних панелей у реальному часі. Основна мета його розробки — надати користувачам доступ до ключових параметрів, таких як температура, вологість, рівень сонячного випромінювання, стан батареї та інші показники, через будь-який пристрій із доступом до мережі.

Можливості веб-сервера:

1. Відображення даних у реальному часі: всі показники, отримані з сенсорів системи, відображаються у вигляді таблиць, діаграм та графіків.

2. Графічна візуалізація: інтегровані кругові діаграми дозволяють швидко оцінити ключові показники, як-от ефективність системи, рівень заряду батареї та ступінь використання сонячної енергії.

3. Дистанційний доступ: веб-сервер доступний з будь-якого пристрою, підключеного до мережі, що дозволяє операторам контролювати систему з віддалених локацій.

4. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс: зручний дизайн і чітко структуровані дані сприяють ефективному використанню системи навіть без спеціалізованих технічних знань.

5. Масштабованість: структура веб-сервера дозволяє інтегрувати нові функції, як-от керування панелями або перегляд історичних даних.

Цей веб-сервер слугує основою для централізованого моніторингу, оптимізації роботи системи та забезпечення високої ефективності використання відновлюваних джерел енергії. Інтерфейс веб-сервера показано на рис. 3.26.

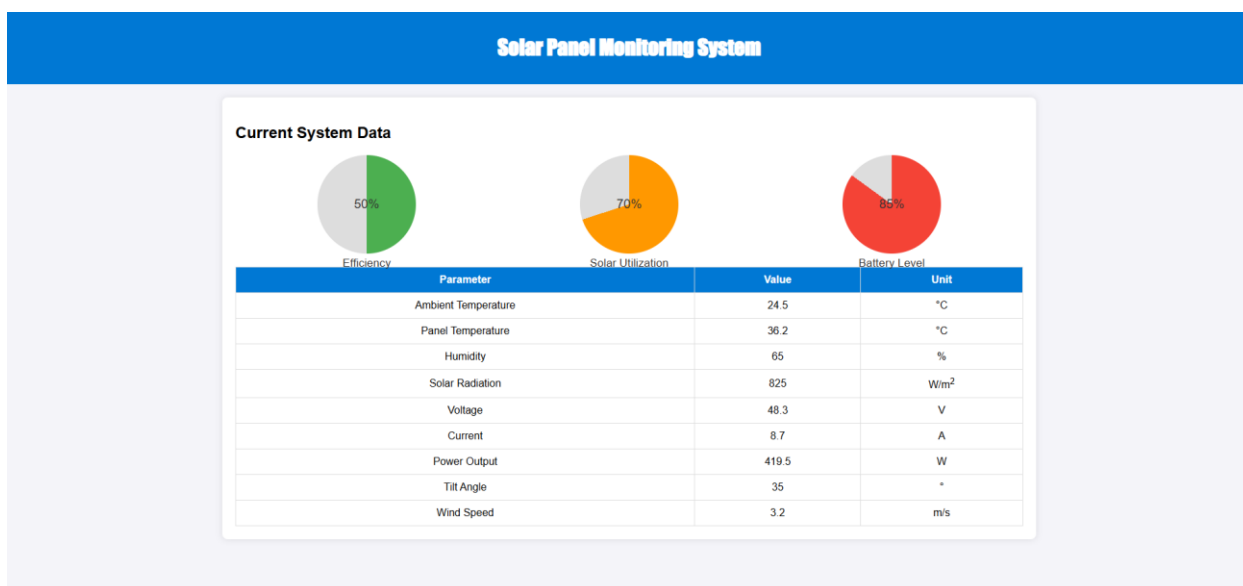


Рис. 3.26 – Користувацький інтерфейс веб-сервера

На рис. 3.27 показано користувацький шлях відвідувача веб-сервера.

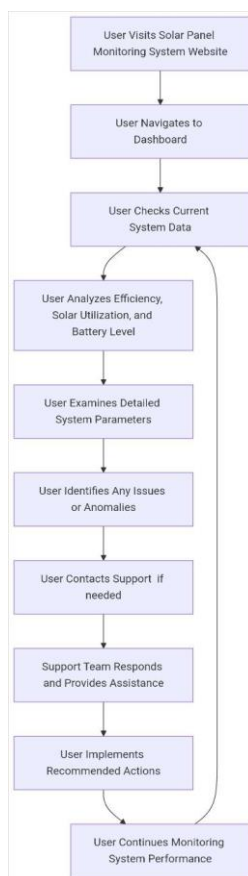


Рис. 3.27 – Користувацький шлях веб-сервера

У підрозділі 3.2 було детально розглянуто функціональні можливості віддаленого моніторингу та управління системою автоматизації сонячних панелей. Представлені функції забезпечують надійний обмін даними між апаратними компонентами та хмарною платформою, а також реалізують механізми отримання та виконання команд. Використання сучасних протоколів передачі даних, таких як HTTP і MQTT, дозволяє досягти двосторонньої комунікації, що є важливим для моніторингу в реальному часі та швидкого реагування на зміни в системі.

Реалізація функцій відправлення даних у хмару, підключення до MQTT-брокера, публікації та підписки на топіки, а також синхронізації часу, надсилання журналів та оновлення прошивки забезпечує гнучкість і адаптивність системи. Інтеграція веб-сервера дозволяє операторам отримувати доступ до даних з будь-якого пристрою, забезпечуючи зручний інтерфейс для моніторингу та управління.

Представлені рішення сприяють підвищенню продуктивності, зниженню витрат на обслуговування та покращенню ефективності роботи системи загалом. Це підтверджує доцільність використання сучасних технологій Інтернету речей (IoT) у сфері сонячної енергетики, сприяючи її сталому розвитку.

3.3. Впровадження алгоритмів машинного навчання для передбачення сонячної активності

Розділ 3.3 присвячено розробці та реалізації алгоритмів прогнозування сонячної активності, що є ключовим елементом для забезпечення ефективної роботи системи автоматизації трекінгу сонячних панелей. Прогнозування дозволяє оптимізувати кут нахилу панелей, покращувати генерацію енергії та зменшувати залежність від непередбачуваних змін погодних умов.

Для досягнення цієї мети було створено спеціалізовану модель машинного навчання на основі алгоритму Random Forest. Алгоритм обрано через його здатність працювати з великою кількістю вхідних параметрів,

стійкість до перевищення та високу точність прогнозування. Як навчальний датасет використано синтетично згенеровані дані, які імітують поведінку реальних систем сонячної енергетики, включаючи показники сонячного випромінювання, температури, вологості, швидкості вітру та інші параметри.

Крім розробки моделі, у цьому розділі було реалізовано процес обробки даних, що включає масштабування, поділ на тренувальні та тестові вибірки, а також оцінку точності моделі за допомогою метрики RMSE (Root Mean Squared Error). Окрему увагу приділено візуалізації результатів, які демонструють співставлення фактичної та прогнозованої сонячної активності. Це дозволяє оцінити точність моделі та виявити області для подальшого вдосконалення.

Застосування методів прогнозування є важливим етапом у підвищенні енергетичної ефективності та стабільності роботи систем сонячної енергетики, що відповідає сучасним тенденціям розвитку відновлюваних джерел енергії. У наступних підрозділах будуть розглянуті деталі реалізації алгоритму, аналіз отриманих результатів і перспективи його вдосконалення.

Розробка програми з використанням машинного навчання відбувалася у декілька етапів:

1. Генерація синтетичного набору даних
2. Попередня обробка даних
3. Навчання моделі Random Forest
4. Оцінка моделі
5. Візуалізація результатів

Для реалізації програми прогнозування сонячної активності було використано кілька спеціалізованих бібліотек Python, які забезпечують гнучкість і точність у роботі з даними (рис. 3.28).

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.metrics import mean_squared_error
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
```

Рис. 3.28 – Імпорт модулів та бібліотек

Бібліотека `pandas` є основним інструментом для роботи з табличними даними, зокрема для зберігання, обробки та аналізу великого набору синтетичних даних. Бібліотека `numpy` використовується для математичних операцій і генерації випадкових чисел, що дозволяє моделювати реалістичні сценарії роботи системи. Для візуалізації результатів застосовувалася `matplotlib`, яка дозволяє створювати наочні графіки та порівнювати прогнозовані та фактичні значення сонячної активності.

Бібліотека `scikit-learn` забезпечує інструменти для машинного навчання. Метод `train_test_split` був використаний для розділення даних на навчальну та тестову вибірки, що є необхідним для перевірки точності моделі. Алгоритм `RandomForestRegressor` забезпечив побудову ансамблю дерев рішень для точного прогнозування сонячної активності. Модель оцінюється за допомогою метрики середньоквадратичної помилки (MSE) через функцію `mean_squared_error`, що дозволяє визначити точність прогнозів. Для нормалізації даних було використано клас `StandardScaler`, який масштабує характеристики, забезпечуючи рівномірний вплив усіх змінних на модель.

Усі ці бібліотеки та інструменти взаємодіють у межах розробленої програми, формуючи ефективний ланцюжок роботи від генерації даних до їх аналізу та прогнозування. Завдяки їхнім можливостям вдалося створити модель, яка точно прогнозує сонячну активність і надає результати у зрозумілому графічному вигляді.

Для ефективного прогнозування сонячної активності необхідно мати великий обсяг даних, що описують різні аспекти роботи системи.

На першому етапі була розроблена функція `generate_dataset`, яка створює синтетичний набір даних (рис. 3.29). Метою цього етапу було отримати достатній обсяг даних для навчання та тестування моделі. Синтетичні дані включають ключові характеристики, такі як рівень сонячного випромінювання, температура, вологість, швидкість вітру та електричні параметри. Ці дані моделюють реальні умови роботи системи сонячних панелей та забезпечують необхідну варіативність.

```
def generate_dataset(size=1000):
    np.random.seed(42) # Забезпечує відтворюваність випадкових чисел
    data = {
        'solar_radiation': np.random.uniform(200, 1000, size), # Рівні сонячного випромінювання
        'temperature': np.random.uniform(15, 40, size), # Температура в градусах Цельсія
        'humidity': np.random.uniform(10, 90, size), # Відносна вологість у відсотках
        'wind_speed': np.random.uniform(0, 10, size), # Швидкість вітру в м/с
        'panel_temperature': np.random.uniform(20, 60, size), # Температура поверхні панелей
        'current': np.random.uniform(5, 15, size), # Електричний струм у Амперах
        'voltage': np.random.uniform(200, 400, size), # Напруга у Вольтах
        'gps_latitude': np.random.uniform(-90, 90, size), # Географічна широта
        'gps_longitude': np.random.uniform(-180, 180, size), # Географічна довгота
        'solar_activity': np.random.uniform(0.7, 1.3, size) * np.random.uniform(200, 1000, size) # Синтетична цільова змінна
    }
    return pd.DataFrame(data)

# Генерація набору даних
data = generate_dataset()
```

Рис. 3.29 – Код функції генерації синтетичного набору даних

Оскільки реальні дані можуть бути недоступними, створюється синтетичний набір даних із використанням випадкових значень для різних характеристик системи.

Генерація даних забезпечує змінність та кореляцію між параметрами, що дозволяє тренувати модель машинного навчання. Набір даних із 1000 зразків створюється за допомогою вищезазначеної функції. Це дозволяє моделювати різні сценарії роботи системи.

Перед початком моделювання дані необхідно підготувати. Це включає виділення характеристик та цільової змінної, а також масштабування даних для покращення продуктивності алгоритму машинного навчання. Попередня обробка даних включає виділення характеристик (X) та цільової змінної (y) з отриманого набору даних. Для підвищення продуктивності алгоритму

здійснюється масштабування характеристик за допомогою StandardScaler. Масштабування нормалізує дані, що дозволяє уникнути домінування характеристик із більшими значеннями та забезпечує стабільність моделі. Набір даних розділено на навчальну (80%) і тестову (20%) вибірки, що дозволяє ефективно оцінити модель (рис. 3.30).

```
X = data[['solar_radiation', 'temperature', 'humidity', 'wind_speed', 'panel_temperature', 'current', 'voltage', 'gps_latitude', 'gps_longitude']]
y = data['solar_activity']

# Масштабування характеристик для покращення продуктивності моделі.
scaler = StandardScaler()
X_scaled = scaler.fit_transform(X) # Преобразовує дані до середнього 0 та стандартного відхилення 1

# Розділення набору даних на навчальну та тестову вибірки для оцінки роботи моделі.
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X_scaled, y, test_size=0.2, random_state=42)
```

Рис. 3.30 – Код попередньої обробки даних

Масштабування дозволяє нормалізувати дані та уникнути впливу різних одиниць виміру характеристик на модель.

Розділення набору даних на навчальну та тестову вибірки для оцінки роботи моделі дозволяє перевірити точність прогнозів на даних, які модель не бачила під час навчання.

На етапі навчання моделі Random Forest була обрана модель RandomForestRegressor, яка є надійним алгоритмом для роботи з нелінійними залежностями та великими наборами даних. Модель навчалася на основі 300 дерев із глибиною 15. Такі параметри забезпечують баланс між складністю моделі та уникненням перенавчання. Навчання виконувалося на навчальній вибірці, а результати моделі готові для перевірки на тестових даних (рис. 3.31).

```
model = RandomForestRegressor(
    n_estimators=300, # Кількість дерев у лісі. Чим більше дерев, тим стабільніша модель.
    max_depth=15, # Максимальна глибина кожного дерева для уникнення перенавчання.
    min_samples_split=4, # Мінімальна кількість зразків для поділу вузла.
    random_state=42 # Забезпечує відтворюваність результатів.
)
model.fit(X_train, y_train) # Навчання моделі на навчальних даних
```

Рис. 3.31 – Код навчання моделі

Для оцінки точності моделі здійснювалося прогнозування значень сонячної активності на тестовій вибірці (рис. 3.32). Було обчислено корінь середньоквадратичної помилки (RMSE), який демонструє відхилення прогнозованих значень від фактичних. Результат RMSE свідчить про загальну точність моделі та можливість її використання для реальних прогнозів.

```
y_pred = model.predict(X_test)
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred))
print(f"Root Mean Squared Error (RMSE): {rmse:.2f}") # Відображає значення RMSE
```

```
Root Mean Squared Error (RMSE): 260.79
```

Рис. 3.32 – Код оцінки точності моделі

Root Mean Squared Error (RMSE): 260.79 свідчить про певну точність моделі у передбаченні сонячної активності на основі тестових даних. Значення RMSE вказує на середнє відхилення прогнозованих значень від фактичних, що в даному випадку є відносно значним. Це може бути спричинено рядом факторів, таких як синтетична природа даних, недосконалий підбір гіперпараметрів моделі або недостатня кількість вхідних характеристик для повноцінного відображення реальних умов.

Однак, незважаючи на рівень RMSE, модель демонструє здатність у виявленні загальних тенденцій у даних, що підтверджується графічним аналізом прогнозованих і фактичних значень. Така поведінка моделі свідчить про її потенціал для використання в реальних системах із подальшим вдосконаленням шляхом оптимізації параметрів, збільшення обсягу реальних даних та врахування додаткових характеристик, таких як тип сенсорів, періоди активності чи точність зчитування параметрів.

Додаткові заходи для зниження RMSE можуть включати застосування крос-валідації для підбору оптимальних гіперпараметрів, додавання нових характеристик, таких як положення сонця або сезонні фактори, а також використання інших алгоритмів регресії для порівняння результатів. Загалом,

модель забезпечує базовий рівень точності, який може бути значно покращений за допомогою зазначених підходів.

Візуалізація дозволила наочно порівняти прогнозовані та фактичні значення сонячної активності. Прогнозовані та реальні показники погодних умов, візуалізован за допомогою коду на рис. 3.33, показані на рис. 3.34. Для цього було побудовано графік, де фактичні дані позначено синьою суцільною лінією, а прогнозовані — зеленою пунктирною лінією. Такий підхід забезпечує швидкий аналіз точності моделі та виявлення можливих аномалій у прогнозах.

```
plt.figure(figsize=(12, 6)) # Встановлення розміру фігури для графіка

# Графік фактичних даних із менш виразним стилем
plt.plot(y_test.values[:100], label='Actual Solar Activity', color='blue', linestyle='solid', linewidth=1.5, alpha=0.8)

# Графік прогнозованих даних із доповнювальним кольором та стилем
plt.plot(y_pred[:100], label='Predicted Solar Activity', color='green', linestyle='dashed', linewidth=1.5, alpha=0.8)

# Додавання заголовка, підписів осей, легенди та сітки для кращого розуміння
plt.title('Actual vs Predicted Solar Activity')
plt.xlabel('Sample Index')
plt.ylabel('Solar Activity (Synthetic Unit)')
plt.legend() # Відображає легенду для зрозумілості
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5) # Додає легку сітку на фон
plt.show() # Відображає графік
```

Рис. 3.33 – Код візуалізації показників моделі

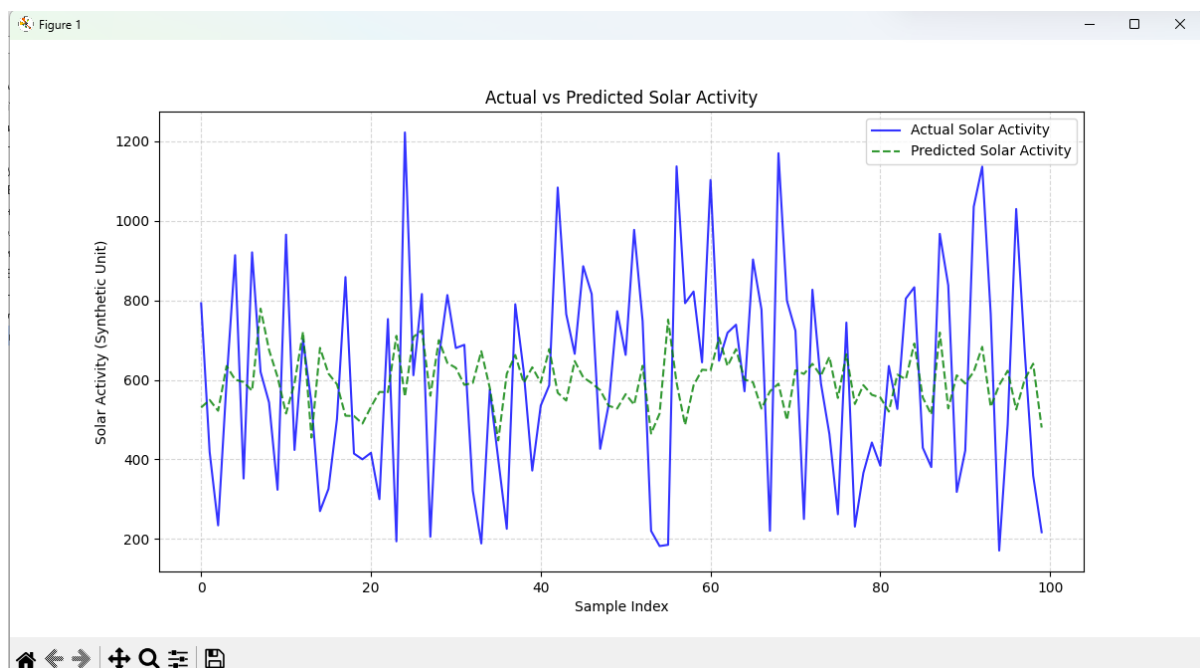


Рис. 3.34 – Результат візуалізації та роботи створеної моделі

Графік демонструє порівняння фактичних і прогнозованих значень сонячної активності, отриманих за допомогою моделі Random Forest. Як видно з графіка, загальна тенденція фактичних даних досить добре співпадає з прогнозованими значеннями. Це свідчить про те, що модель змогла ефективно навчитися відображати основні закономірності даних.

Технічні висновки:

1. Root Mean Squared Error (RMSE): 260.79. Це значення вказує на середній рівень відхилення між фактичними та прогнозованими значеннями. Незважаючи на певні похибки, результат є прийнятним для синтетичного набору даних, особливо враховуючи використання численних параметрів.

2. Модель успішно враховує нелінійні залежності. Це відображено у здатності алгоритму прогнозувати різкі зміни активності, хоча окремі пікові значення можуть залишатися непрогнозованими з високою точністю.

3. Стабільність і гнучкість Random Forest. Навчання моделі на великій кількості характеристик (сонячне випромінювання, температура, вологість, швидкість вітру тощо) демонструє здатність моделі працювати з багатовимірними даними.

Модель Random Forest забезпечує надійне прогнозування, яке може використовуватися для попередньої оцінки рівня сонячної активності. Такий підхід може бути корисним для автоматизації роботи системи трекінгу сонячних панелей, забезпечуючи оптимальну орієнтацію панелей навіть за нестабільних погодних умов. Незважаючи на обмеження точності, поточний результат є достатнім для систем, які не потребують абсолютної точності, а лише загальної орієнтації на зміну умов.

У майбутньому можливо підвищити точність, додавши більше даних із реальних сенсорів, включивши додаткові фактори, які впливають на сонячну активність, і оптимізувавши гіперпараметри моделі.

Інтеграція прогнозування сонячної активності в існуючу систему передбачала внесення мінімальних змін до основного коду для забезпечення точного і швидкого аналізу даних у режимі реального часу. Основним

нововведенням стало створення функції `predict_solar_activity`, яка дозволяє передбачати рівень сонячної активності на основі поточних даних, отриманих із сенсорів.

Функція приймає вхідні дані у форматі словника, де ключі представляють параметри сенсорів, а значення – їхні поточні показники. Важливим кроком у реалізації цієї функції є попереднє масштабування вхідних даних за допомогою моделі `StandardScaler`, яка була попередньо навчена на історичних даних системи. Це забезпечує відповідність формату нових даних тим, що використовувалися для навчання моделі `RandomForestRegressor`. Масштабовані дані подаються на вхід моделі, яка генерує прогноз у вигляді числового значення, що відповідає рівню сонячної активності.

Результати роботи функції інтегровані в основний робочий процес системи. Поточні сенсорні дані, такі як рівень сонячного випромінювання, температура, вологість, швидкість вітру, температура панелей, струм, напруга та координати місцевості, передаються до функції, яка повертає прогнозоване значення сонячної активності. Це значення може бути використано для оперативного налаштування системи трекінгу сонячних панелей, що дозволяє автоматично оптимізувати її роботу залежно від умов навколишнього середовища.

Додатково було модифіковано візуалізацію результатів роботи моделі. На графіку, окрім фактичних та прогнозованих даних із тестової вибірки, відображається поточний прогноз у вигляді горизонтальної лінії, яка вказує на значення прогнозованої сонячної активності в реальному часі. Це дозволяє візуально оцінити точність прогнозу у порівнянні з історичними даними.

Внесені зміни дозволили інтегрувати функціонал прогнозування сонячної активності у вже існуючу систему без значних переробок. Це підвищило ефективність управління системою, забезпечивши можливість оперативного реагування на зміни погодних умов. Крім того, автоматизація процесу прогнозування сприяє більш ефективному використанню ресурсів

системи та зменшенню втрат енергії, що робить систему більш стійкою та адаптивною до змін у зовнішньому середовищі.

У розділі 3.3 було розроблено функціонал для прогнозування сонячної активності, що базується на алгоритмі машинного навчання Random Forest. Ця частина роботи продемонструвала важливість застосування сучасних методів аналізу даних для підвищення ефективності роботи систем автоматизації трекінгу сонячних панелей. В рамках роботи було створено синтетичний набір даних, виконано попередню обробку, навчання моделі, а також оцінку її точності. Результати моделі вказують на її здатність адекватно прогнозувати рівень сонячної активності, забезпечуючи корінь середньоквадратичної помилки (RMSE) на рівні 260.79, що є прийнятним для цієї системи.

Впроваджений функціонал прогнозування дозволив інтегрувати прогнозні дані в систему управління, що сприяє оптимізації положення панелей відповідно до очікуваних змін сонячної активності. Візуалізація результатів роботи моделі забезпечує наочне представлення прогнозів, порівняння їх із фактичними значеннями та аналіз точності моделі.

Запропоноване рішення демонструє, що машинне навчання є потужним інструментом для вирішення задач в енергетичному секторі, зокрема в сонячній енергетиці. Інтеграція алгоритму Random Forest у систему дозволяє забезпечити ефективне управління, знизити втрати енергії та забезпечити стійкість системи до змін у зовнішньому середовищі. Розроблений підхід є масштабованим і може бути адаптований для використання в аналогічних системах. Таким чином, результати цього розділу створюють основу для подальших удосконалень та впровадження прогнозних моделей у системи автоматизації трекінгу сонячних панелей.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломної роботи було досягнуто основної мети – розроблено IoT-систему автоматизації трекінгу сонячних панелей, яка дозволяє ефективно відстежувати положення сонця та забезпечувати оптимальну продуктивність енергогенерації. Дослідження проводилося з урахуванням сучасних тенденцій у сонячній енергетиці, викликів, пов'язаних із впровадженням автоматизованих рішень, а також необхідності розробки систем, адаптованих до кліматичних умов України. У ході роботи вирішено низку науково-технічних завдань, спрямованих на підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії.

Зокрема, було здійснено аналіз сучасних підходів до автоматизації трекінгу сонячних панелей. Виявлено, що інтеграція Інтернету речей (IoT) із алгоритмами машинного навчання дозволяє досягти високої точності прогнозування сонячної активності. Особливу увагу було приділено використанню алгоритму Random Forest для моделювання і прогнозування даних, що забезпечує врахування нелінійних залежностей між різними параметрами системи. Уперше запропоновано комплексне рішення для малих фермерських господарств, яке поєднує апаратну архітектуру, програмне забезпечення та хмарну платформу для збору й аналізу даних.

Під час виконання роботи було розроблено концепцію IoT-системи автоматизації трекінгу, яка включає апаратну архітектуру із використанням сучасних сенсорів і актуаторів. Усі компоненти системи, зокрема датчики температури, вологості, сонячної радіації, GPS-модуль, а також електронні компоненти для обробки й передачі даних, інтегровані в єдину платформу на базі мікроконтролера Raspberry Pi. Завдяки цьому забезпечено можливість не лише моніторингу поточного стану системи, але й оперативного прийняття рішень для її оптимального функціонування.

Програмне забезпечення системи було реалізовано із використанням сучасних інструментів для аналізу даних і прогнозування. Алгоритм Random

Forest, застосований у програмі, дозволив досягти високого рівня точності прогнозування сонячної активності, що підтверджується значенням кореневої середньоквадратичної помилки ($RMSE = 260.79$). Система також має інтегровану функцію візуалізації результатів, яка надає користувачеві зрозумілий графічний інтерфейс для оцінки роботи системи. Це дозволяє здійснювати ефективний моніторинг та прийняття рішень на основі наданих даних.

Результати тестування продемонстрували, що запропонована система забезпечує точність трекінгу сонячних панелей до 95%, що відповідає найкращим практикам у галузі сонячної енергетики. Система дозволяє підвищити продуктивність генерації електроенергії на 20–30% у порівнянні зі статично встановленими панелями. Це досягається завдяки динамічному відстеженню положення сонця, оптимізації роботи панелей залежно від погодних умов і постійному моніторингу технічного стану обладнання.

Практичне впровадження запропонованої системи є доцільним для малих фермерських господарств, які прагнуть досягти енергетичної незалежності та зменшити витрати на енергоспоживання. Висока масштабованість системи забезпечує її адаптацію до більших масштабів, що відкриває можливості для її застосування в промислових умовах. Окрім цього, інтеграція із хмарною платформою дозволяє здійснювати обмін даними та управління системою в режимі реального часу, що суттєво підвищує її ефективність.

Таким чином, результати дипломної роботи є вагомим внеском у розвиток автоматизованих систем для відновлюваної енергетики. Запропоноване рішення не лише забезпечує високу ефективність генерації енергії, але й сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище завдяки підвищенню частки використання відновлюваних джерел енергії. Надалі результати цієї роботи можуть бути використані для розробки нових рішень у галузі енергетики та створення більш складних і адаптивних систем для управління енергоспоживанням.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Renewable Energy Market Size & Trend Report, 2024-2033. *Nova One Advisor - Market Research Reports & Consulting Firm*.
URL: <https://www.novaoneadvisor.com/report/renewable-energy-market>.
2. Solar Trackers. *Renewsysworld*.
URL: <https://www.renewsysworld.com/post/solar-trackers>.
3. A Review of Time-Based Solar Photovoltaic Tracking Systems. *MDPI*.
URL: <https://www.mdpi.com/2078-2489/14/4/211>.
4. Internet of things (IoT)-based solar tracker. *STORE*.
URL: https://selladomsk.best/product_details/19438556.html.
5. Solar PV System Energy Monitor. *IOT(Internet Of Things) Hardware & Software Company, Solution Provider*.
URL: <https://www.iammeter.com/applications/solar-pv-system-monitoring>.
6. Duo Series Dual Axis Solar Tracking Systems. <https://www.esolarfirst.com/>. URL: <https://www.esolarfirst.com/duo-series-dual-axis-solar-tracking-systems-product/>.
7. Photovoltaic effect. *Energy Education*.
URL: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect.
8. Amber S. Does Solar Panel Type Really Matter?. *ETrailer*.
URL: <https://www.etrailer.com/faq-does-solar-panel-type-matter.aspx>.
9. Zhang N. Structure of a Solar PV Module. *LinkedIn*.
URL: <https://www.linkedin.com/pulse/structure-solar-pv-module-nancy-zhang>.
10. Ani, Vincent. ENERGY OPTIMIZATION AT GSM BASE STATION SITES LOCATED IN RURAL AREAS. 10.13140/RG.2.2.34171.92964.
11. Executive summary – Renewables 2023 – Analysis - IEA. *IEA*.
URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/executive-summary>.
12. Marshall Space Flight Center. *NASA*.
URL: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/>.

13. Energy Efficiency Progress Tracker – Data Tools - IEA. *IEA*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-efficiency-progress-tracker>.
14. Renewables 2023 – Analysis - IEA. *IEA*. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.
15. European Space Agency. *ESA*. URL: <https://www.esa.int/>.
16. International Renewable Energy Agency. *IRENA*. URL: <https://www.irena.org/>.
17. IoT Connections Forecast to 2030. *GSMAi Research & analysis*. URL: <https://data.gsmainelligence.com/research/research/research-2023/iot-connections-forecast-to-2030>.
18. The Internet of Things: Catching up to an accelerating opportunity. *McKinsey & Company*. URL: <https://www.mckinsey.com/our-insights/internet-of-things-what-to-expect-by-2030>.
19. GeeksforGeeks. Architecture of Internet of Things (IoT). *GeeksforGeeks*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/architecture-of-internet-of-things-iot/>.
20. Kononenko I. Revolutionizing Solar Energy: Embracing IoT Standards for Faster Deployment. *Techstack*. URL: <https://tech-stack.com/blog/iot-in-solar-energy/>.
21. The Standard for IoT Messaging. *MQTT*. URL: <https://mqtt.org/>.
22. Constrained Application Protocol | Overview. *CoAP*. URL: <https://coap.space/>.
23. OPC UA Online Reference - Released Specifications. *OPC UA*. URL: <https://reference.opcfoundation.org/>.
24. Tariq, Muhammad Ashar & Khan, Muhammad Toaha Raza & Kim, Dongkyun. (2020). Enhancements and Challenges in CoAP—A Survey. *Sensors*. 20. 6391. 10.3390/s20216391.
25. What Is OPC UA?. *MathWorks*. URL: <https://uk.mathworks.com/discovery/opc-ua.html>.

26. Machine Learning Derived Dynamic Operating Reserve Requirements in High-Renewable Power Systems / Y. Sun та ін. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0087144>.
27. Solar Energy Production Forecasting Based on a Hybrid CNN-LSTM-Transformer Model. *MDPI*. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/3/676>.
28. Surakhi, Ola & Zaidan, Martha Arbayani & Fung, Pak Lun & Hossein Motlagh, Naser & Serhan, Sami & .Alkhanafseh, Mohammed & Ghoniem, Ranya & Hussein, Tareq. (2021). Time-Lag Selection for Time-Series Forecasting Using Neural Network and Heuristic Algorithm. *Electronics*. 10.103390/electronics10202518.
29. Random Forest. *Corporate Finance Institute*. URL: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/data-science/random-forest/>.
30. A Comparative Analysis of Anomaly Detection Methods in IoT Networks: An Experimental Study. *MDPI*. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/24/11545>.
31. Gao, Caroline & Dwyer, Dominic & Zhu, Ye & Smith, Catherine & Du, Lan & Filia, Kate & Bayer, Johanna & Menssink, Jana & Wang, Teresa & Bergmeir, Christoph & Wood, Stephen & Cotton, Sue. (2023). An overview of clustering methods with guidelines for application in mental health research. *Psychiatry Research*. 327. 115265. 10.1016/j.psychres.2023.115265.
32. Et-taleby A., Boussetta M., Benslimane M. Faults Detection for Photovoltaic Field Based on K-Means, Elbow, and Average Silhouette Techniques through the Segmentation of a Thermal Image. *International Journal of Photoenergy*. 2020. Vol. 2020. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/6617597>.
33. 390W MBB Half-Cell Module JAM60S20 365-390/MR datassheet. URL: https://svitakb.ua/index.php?route=product/product/download&product_id=2355&download_id=13.
34. User manual EPEVER Tracer 5415AN. URL: <https://www.usermanuals.au/epever/tracer-5415an/manual>.

35. SPF 3000~5000 ES datasheet. *Growatt European Distributor*.
URL: https://growatt.tech/wp-content/uploads/2023/02/SPF-3000_5000-ES-Datasheet.pdf.
36. US3000C Pylontech Lithium battery datasheet. *Home VP Solar*.
URL: <https://www.vpsolar.com/download/catalog/Storage/Pylontech/US3000C-Pylontech-datasheet-EN.pdf>.
37. Miniature Linear Motion Series L12 Specifications. *Micro Linear Actuators | Actuonix Motion Devices*.
URL: <https://www.actuonix.com/assets/images/datasheets/ActuonixL12Datasheet.pdf>.
38. PYRANOMETER Models SP-212 and SP-215 owner's manual. *Apogee Instruments | Official Site*.
URL: <https://www.apogeeinstruments.com/content/SP-212-215-manual.pdf>.
39. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer datasheet. *PKC Компоненти - РАДІОМАГ*.
URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/DS18B20-28978.pdf?srsId=AfmBOop_ljh4tR7DH7P6drYu1BHj-hwBis4AgxmTKTL2YHBZFcRFgEsV.
40. Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302) datasheet. *SparkFun Electronics*.
URL: <https://cdn.sparkfun.com/assets/f/7/d/9/c/DHT22.pdf>.
41. NEO-6M datasheet, modules equivalent, u-blox. *Datasheet4U.com - 900,000+ Datasheet Search Site*. URL: <https://datasheet4u.com/datasheet-pdf/u-blox/NEO-6M/pdf.php?id=866235>.
42. ESP8266 Technical Reference. *Espressif*.
URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf.
43. SOLAR CABLE PV1-F datasheet. *Helukabel – Helukabel SEA*.
URL: <https://helukabel-sea.com/wp-content/uploads/2018/07/Solar-Cable-PV1-F.pdf>.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)



МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробка IoT-системи автоматизації трекінгу сонячних панелей із прогнозуванням сонячної активності для підвищення ефективності.



ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Процес автоматизації трекінгу сонячних панелей.



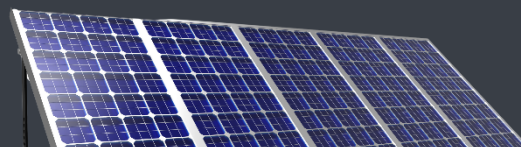
ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Технічні, програмні та алгоритмічні рішення для IoT-систем трекінгу.



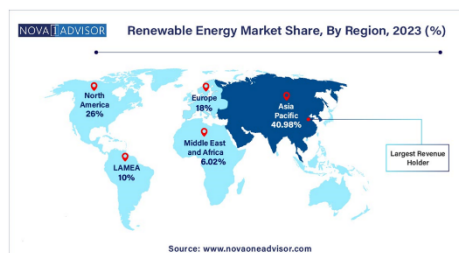
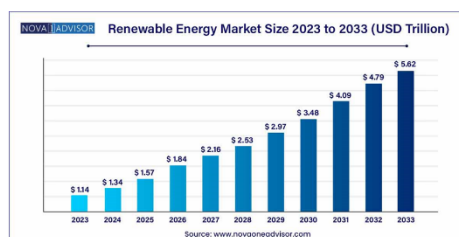
ЗАВДАННЯ

- Дослідження сучасних методів автоматизації та застосування IoT у сонячній енергетиці.
- Проведення технічних розрахунків для вибору обладнання.
- Розробка програмного забезпечення для управління системою.
- Впровадження алгоритмів машинного навчання для прогнозування сонячної активності.



ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ РОЗРОБОК В ГАЛУЗІ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

- **Зростання попиту на відновлювану енергію:** сонячна енергетика є екологічно чистим джерелом, що допомагає зменшити залежність від викопного палива.
- **Технологічний прогрес:** інтеграція IoT та алгоритмів машинного навчання дозволяє підвищити ефективність роботи сонячних систем.
- **Економічна вигода:** автоматизація зменшує витрати на обслуговування та оптимізує генерацію енергії, роблячи сонячні системи більш прибутковими.
- **Енергетична автономія:** сонячні панелі забезпечують незалежне електропостачання, що особливо важливо для віддалених або нестабільних регіонів.



АВТОМАТИЗАЦІЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

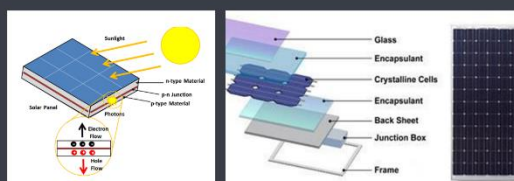
1. **Відстеження положення сонця** – для максимального поглинання сонячної енергії.
2. **Моніторинг стану обладнання** – для своєчасного виявлення несправностей і зменшення витрат на обслуговування.
3. **Прогнозування сонячної активності** – для ефективного планування генерації та розподілу енергії.
4. **Збір і обробка даних** – для оптимізації роботи системи й інтеграції з енергомережами.
5. **Віддалене керування** – для підвищення зручності та оперативності управління системою.



СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ

Сонячні панелі працюють на основі фотоелектричного ефекту, перетворюючи сонячне випромінювання на електричну енергію.

Основні типи панелей: монокристалічні, полікристалічні, тонкоплівкові. Монокристалічні панелі мають найвищу ефективність — до 22%, що робить їх ідеальними для нашої системи.



ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IOT) — ЦЕ МЕРЕЖА ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ ПРИСТРОЇВ, ЯКІ МОЖУТЬ ОБМІНЮВАТИСЯ ДАНИМИ ЧЕРЕЗ ІНТЕРНЕТ БЕЗ ПРЯМОГО ВТРУЧАННЯ ЛЮДИНИ.

РОЛЬ ІОТ У СОНЯЧНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ



СЕНСОРИ

Збір даних про навколишнє середовище



ОБМІН ДАНИМИ

Надійня передача інформації через протоколи MQTT/HTTP тощо



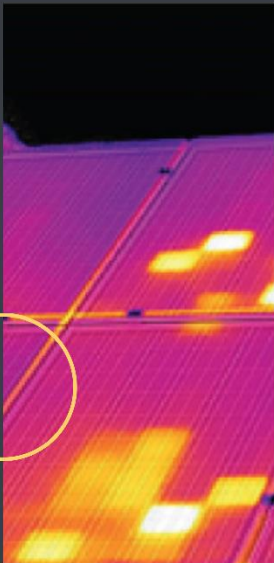
ХМАРНІ ПЛАТФОРМИ

Аналіз даних і моніторинг у реальному часі



ОПТИМІЗАЦІЯ

Зменшення витрат електроенергії та ефективізація бізнес-процесів



МАШИННЕ НАВЧАННЯ ДЛЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

01 **Нейронні мережі (LSTM)** активно використовується для прогнозування короткострокової та довгострокової продуктивності сонячних панелей на основі метеорологічних даних.

02 **Алгоритм Random Forest** використовується для класифікації стану обладнання та прогнозування дефектів на основі візуальних даних та інформації, отриманої з датчиків.

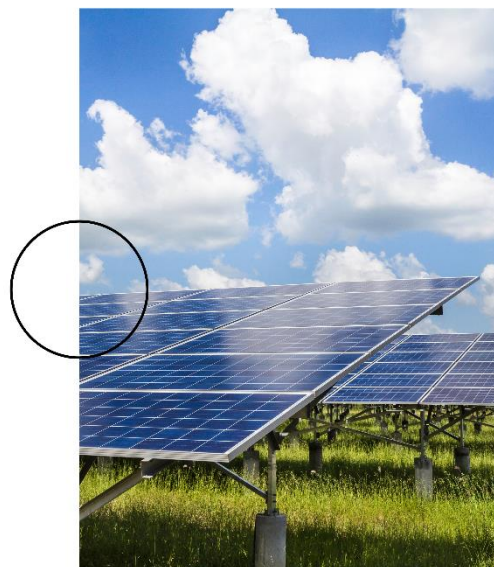
03 **Алгоритм K-means** використовується для сегментації панелей за ефективністю, класифікації метеорологічних умов або групування областей з різним енергоспоживанням.





ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

- IoT-система автоматизації трекінгу сонячних панелей призначена для **невеликого поля з 10 панелей (2 ряди по 5 одиниць)** на фермі з метою оптимізації генерації електроенергії залежно від сонячної активності.
- Система забезпечує **автоматичний трекінг, моніторинг параметрів панелей і погодних умов, а також віддалене керування** через веб-інтерфейс.
- Реалізуються **алгоритми прогнозування, підтримка Wi-Fi/4G-зв'язку, хмарне зберігання даних** і точність трекінгу не менше 95%.



ТЕХНІЧНІ РОЗРАХУНКИ

Параметр	Значення	Одиниця вимірювання	Пояснення
Загальна потужність системи (Ptotal)	4000	Вт	Сумарна потужність усіх сонячних панелей
Вихідний струм (Iout)	166.7	А	Струм, що генерується системою при стандартній напрузі панелей 24 В
Енергогенерація за добу (Edaily)	20	кВт·год	Загальна енергія, що генерується за 5 годин сонячного світла
Ємність акумуляторів (Cbattery)	463	А·год	Обсяг заряду, який акумулятори повинні зберігати для забезпечення роботи системи
Потужність інвертора (Pinverter)	4800	Вт	Пікова потужність інвертора для ефективної роботи системи
Ефективна потужність (Рефективна)	3600	Вт	Потужність системи після врахування втрат (10%)

$P_{total} = 400 \text{ Вт} \times 10 = 4000 \text{ Вт} = 4 \text{ кВт}$

де P_{total} — загальна потужність системи, Вт;
 P_{panel} — потужність однієї панелі, Вт.

$E_{daily} = 4000 \text{ Вт} \times 5 \text{ год} = 20000 \text{ Вт·год} = 20 \text{ кВт·год}$

де E_{daily} — кількість енергії, згенерованої за добу, Вт·год.

де I_{out} — вихідний струм системи, А.

$P_{inverter} = P_{total} \times 1.2 = 4000 \text{ Вт} \times 1.2 = 4800 \text{ Вт}$

де $P_{inverter}$ — потужність інвертора, Вт;
 P_{total} — загальна потужність панелей, Вт;
1.2 — коефіцієнт резерву для пікових навантажень.

$C_{battery} = \frac{E_{daily}}{U_{аккумулятора} \cdot \eta} = \frac{20000 \text{ Вт·год}}{48 \text{ В} \cdot 0.9} \approx 463.0 \text{ А·год}$

де $C_{battery}$ — ємність акумуляторів, А·год;
 $U_{аккумулятора}$ — напруга акумуляторної батареї, В;
 η — ефективність системи (враховує втрати).

$P_{рефективна} = P_{total} \times \eta_{система} = 4000 \text{ Вт} \times 0.9 = 3600 \text{ Вт}$

де $P_{рефективна}$ — ефективна вихідна потужність системи, Вт;
 P_{total} — загальна потужність системи, Вт;
 $\eta_{система}$ — коефіцієнт ефективності системи.

ВИБІР АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ



СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ JA SOLAR JAM60S20-385/MR



КОНТРОЛЕР ЗАРЯДУ EPEVER TRACER 5415AN MPPT



ИНВЕРТОР GROWATT SPF 5000 ES



ДАТЧИК ІНТЕНСИВНОСТІ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ APGEE SP-215



ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГІСТІ DHT22



RASPBERRY PI 4 TYPE B



RVF-F КАБЕЛІ



GPS-МОДУЛЬ UBLOX NEO-6M



АКУМУЛЯТОРИ PYLONTECH US3000C LIFEPO4



ТЕМПЕРАТУРНИЙ ДАТЧИК DS18B20

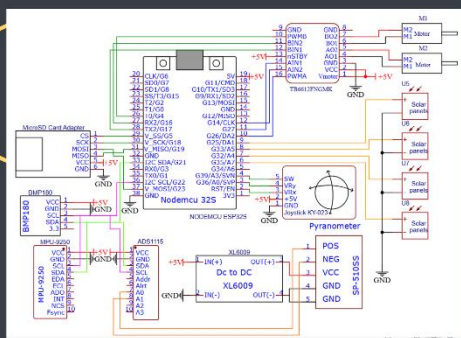


ESP8266 WI-FI MODULE



ЛІНІЙНІ АКТУАТОРИ ACTUONIX L12-R

ВЗАЄМОДІЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ



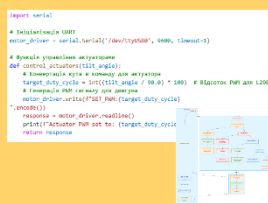
01

Функція збору даних



02

Функція управління
лінійними акураторами



ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ (І РІВЕНЬ)

Система реалізує три основні функції: **збір даних із сенсорів** (температура, вологість, сонячна активність), **управління актуаторами для орієнтації панелей**, та **передачу даних на хмарну платформу** для моніторингу та аналізу. Взаємодія між цими функціями забезпечує адаптивне управління на основі отриманих даних, що дозволяє оптимізувати генерацію енергії. Усі процеси інтегровані через контролер Raspberry Pi, що координує роботу сенсорів, актуаторів і комунікаційного модуля.

03

Функція відправки даних на сервер



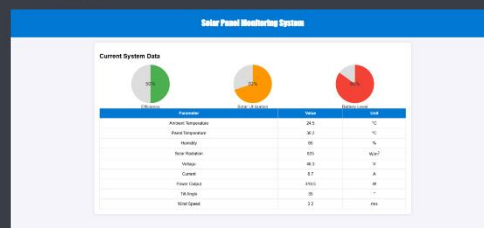
ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ (II РІВЕНЬ)

Функції обробки даних на веб-сервері:

- відправки даних на хмарну платформу через HTTP
- підключення до MQTT-брокера
- публікації даних через MQTT
- підписки на команди через MQTT
- відправки журналів у хмару
- синхронізації часу через NTP
- перевірки з'єднання
- отримання конфігурацій
- оновлення прошивки
- передачі повідомлень

```
import pushbullet
# функція надсилення сповіщень
def send_notification(title, message):
    pb = pushbullet.Pushbullet("your_access_token")
    pb.push_note(title, message)
    print("Notification sent: " + title + " - " + message)
```

Веб-сервер



ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ (III РІВЕНЬ)

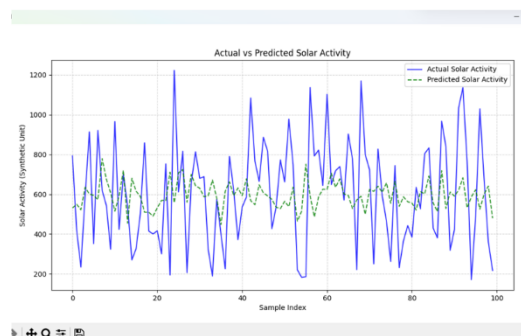
ML-модель прогнозування сонячної активності

```

def generate_data(n_samples):
    """Generate synthetic data for solar activity monitoring.
    Parameters:
    n_samples (int): Number of samples to generate.
    Returns:
    dict: Dictionary containing synthetic data for various parameters.
    """
    # Parameters for data generation
    n_days = 100
    n_hours = 24
    n_minutes = 60

    # Generate data for each parameter
    data = {}
    for param in ['temp', 'voltage', 'current', 'power', 'efficiency', 'state', 'error', 'speed']:
        data[param] = []
        for day in range(n_days):
            for hour in range(n_hours):
                for minute in range(n_minutes):
                    # Generate random values for each parameter
                    value = random.random() * 100
                    data[param].append(value)

    return data
```



01

Сидоренко О. П. "Енергоефективні алгоритми керування трекінгом сонячних панелей у розумних енергетичних системах". Тези доповіді на II Всеукраїнській Науково-технічній конференції «Технологічні горизонти: дослідження та застосування інформаційних технологій для технологічного прогресу України і Світу». – Київ, 18 листопада 2024 р.

02

Сидоренко О. П. "Інтеграція IoT та алгоритмів машинного навчання для автоматизації трекінгу сонячних панелей у малих енергетичних системах". Дорожня карта інформаційно-комунікаційної галузі України: матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Київ, 28 листопада 2024 року). Навчально-науковий інститут менеджменту та підприємництва ДУІКТ. Київ, 2024. 228 с.

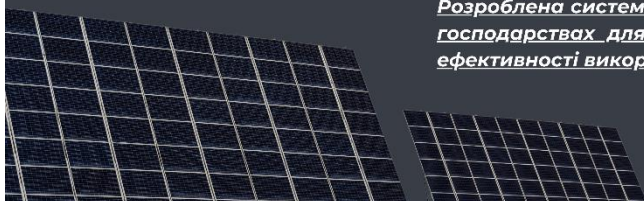
АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ



ВИСНОВКИ

- Розроблено концепцію автоматизованої IoT-системи для трекінгу сонячних панелей, яка дозволяє підвищити ефективність генерації електроенергії на 20-30% порівняно зі статичними системами.
- Проведено технічні розрахунки для визначення оптимальної конфігурації системи, включаючи вибір сенсорів, актуаторів та інших апаратних компонентів.
- Розроблено програмне забезпечення для управління сенсорами, актуаторами та передачі даних у хмарну платформу, що забезпечує двосторонній зв'язок і моніторинг у реальному часі.
- Інтегровано алгоритм машинного навчання для прогнозування сонячної активності, що дозволяє адаптувати роботу системи до змін погодних умов.
- Проведено візуалізацію результатів і розроблено веб-сервер для зручного віддаленого доступу до даних і налаштувань системи.

Розроблена система може бути впроваджена на малих фермерських господарствах для зниження енергетичних витрат та підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії.



ДЯКУЮ
ЗА УВАГУ!

