

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

Коваль Святослав Віталійович
(прізвище, ім'я, по-батькові)

УДК 621.383.51:004.9:006.9
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розробка інформаційної системи для оперативного вимірювання та діагностики параметрів
сонячних панелей у процесі експлуатації
(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики
(назва освітньої програми)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня Коваль С.В.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник доцент кафедри ІВТ Чупа Володимир Михайлович
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент Цих В.С.
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітня програма Інженерія відновлюваної енергетики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

кандидат технічних наук, доцент

Цих Віталій Сергійович

«__» _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Ковалю Святославу Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи: розробка інформаційної системи для оперативного вимірювання та діагностики параметрів сонячних панелей у процесі експлуатації

керівник роботи доцент кафедри ІВТ Чупа Володимир Михайлович,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ІФНТУНГ від “5” травня 2026 року № 204/7

2. Строк подання студентом роботи 15 червня 2026

3. Вихідні дані до роботи

Технічна документація енергомонітора Smart Maic D103 та лічильника Smart Maic D105, datasheet датчиків DS18B20 та DHT22, стандарт ДСТУ EN IEC 61724-1:2022 щодо моніторингу фотоелектричних систем.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Аналіз існуючих систем моніторингу сонячних електростанцій та обґрунтування вибору апаратної платформи Розроблення архітектури інформаційної системи, вибір апаратного та програмного забезпечення, реалізація методів діагностики параметрів сонячних панелей Метрологічне забезпечення системи, оцінювання похибок вимірювальних каналів та аналіз їх впливу на точність діагностики

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтролер</i>	<i>доцент Яворський А.В</i>		
<i>Перевірка на плагіат</i>	<i>доцент Миндюк В.Д.</i>		
<i>Рецензент</i>	<i>доцент Миндюк В.Д.</i>		

7. Дата видачі завдання 27.01.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	14.03.2026	
2	Розділ 1: Аналіз предметної області	15.04.2026	
3	Розділ 2: Розробка інформаційної системи моніторингу та діагностики сонячних панелей	05.05.2026	
4	Розділ 3: Метрологічне забезпечення інформаційної системи діагностики сонячних панелей	22.05.2026	

Студент

(підпис)

Коваль С.В

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Чупа В.М

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Коваль С.В. «Розробка інформаційної системи для оперативного вимірювання та діагностики параметрів сонячних панелей у процесі експлуатації». Дипломна робота освітнього рівня - бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність - 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». - Івано-Франківськ, 2026.

Бакалаврська робота містить: 64 сторінок, 9 рисунків, 5 таблиць, 26 джерел.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу та контролю параметрів сонячних панелей у процесі експлуатації.

Метою роботи є розробка інформаційної системи оперативного вимірювання та діагностики параметрів сонячних панелей, яка забезпечує автоматизований збір даних, їх обробку та відображення в режимі реального часу.

Під час виконання бакалаврської роботи було проведено аналіз існуючих комерційних рішень моніторингу фотоелектричних установок та виявлено їх обмеження. Розроблено відкриту інформаційну систему на базі платформи Smart-MAIS, яка забезпечує збір електричних параметрів та даних про температуру, вологість і рівень інсоляції в режимі реального часу. Реалізовано три методи автоматичної діагностики стану панелей. Виконано метрологічне забезпечення системи та підтверджено відповідність точності вимірювань вимогам стандарту ДСТУ EN IEC 61724-1:2022.

Результати роботи дозволяють використовувати розроблену систему на реальних фотоелектричних установках для підвищення ефективності їх експлуатації та своєчасного виявлення несправностей.

СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА УСТАНОВКА, ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА, МЕТРОЛОГІЯ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ, SMART-MAIS, ЕНЕРГОМОНІТОР.

ABSTRACT

Koval S.V. "Development of an Information System for Operative Measurement and Diagnostics of Solar Panel Parameters during Operation".

Diploma work of education level - bachelor, in the form of a manuscript.

Speciality - 152 "Metrology and information and measuring equipment". - Ivano-Frankivsk, 2026.

The bachelor's thesis contains: 64 pages, 9 figures, 5 tables, 26 sources.

The object of the research is the process of monitoring and control of solar panel parameters during operation.

The aim of the work is to develop an information system for measuring and diagnosing solar panel parameters, which collects data automatically and shows it in real time.

During the work, existing commercial monitoring solutions for solar installations were analyzed and their main limitations were found. An open information system based on the Smart-MAIC platform was developed. The system collects electrical parameters as well as temperature, humidity and irradiance data in real time. Three diagnostic methods for checking panel condition were implemented. Metrological analysis was performed and measurement accuracy was confirmed to meet the requirements of DSTU EN IEC 61724-1:2022.

The developed system can be used at real solar installations to improve their efficiency and detect faults at an early stage.

SOLAR PANELS, PHOTOVOLTAIC SYSTEM, INFORMATION SYSTEM,
MONITORING, DIAGNOSTICS, METROLOGY, MEASUREMENT
UNCERTAINTY, SMART-MAIC, ENERGY MONITOR.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1: Аналіз предметної області.....	11
1.1 Принцип роботи сонячних панелей.....	11
1.2 Типи сонячних панелей.....	12
1.3 Основні параметри.....	17
1.4 Існуючі системи моніторингу.....	20
1.5 Методи діагностики.....	24
1.6 Проблеми оперативної діагностики.....	27
Висновок до розділу 1.....	30
Розділ 2: Розробка інформаційної системи моніторингу та діагностики сонячних панелей.....	31
2.1 Структура інформаційної системи.....	31
2.2 Вибір та обґрунтування апаратного забезпечення.....	35
2.3 Обґрунтування протоколу передачі даних та організація збору даних.....	37
2.4 Програмна реалізація системи.....	40
2.5 Алгоритм діагностики стану сонячних панелей.....	44
Висновок до розділу 2.....	47
Розділ 3: Метрологічне забезпечення інформаційної системи діагностики сонячних панелей.....	48
3.1 Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки системи.....	48
3.2 Оцінювання похибок вимірювань системи.....	50
3.3 Вплив метрологічних характеристик на точність діагностики.....	52
Висновок до розділу 3.....	54
Висновки.....	55
Список використаних джерел.....	57

ВСТУП

У зв'язку зі зростанням вартості електроенергії та розвитком відновлюваної енергетики сонячні електростанції набувають все більшого поширення. Сонячна енергетика є одним із найбільш перспективних напрямів альтернативної енергетики, оскільки дозволяє отримувати електричну енергію шляхом перетворення сонячного випромінювання за допомогою фотоелектричних панелей. Такі системи активно використовуються як у промисловості, так і в побуті завдяки можливості часткового або повного забезпечення власних потреб в електроенергії, зменшення навантаження на електромережу та зниження витрат на електропостачання.

Разом із поширенням сонячних електростанцій зростає потреба у забезпеченні їх ефективної та стабільної роботи. У процесі експлуатації сонячні панелі піддаються впливу різноманітних зовнішніх факторів, серед яких погодні умови, перепади температури, пил, волога, механічні пошкодження, деградація фотоелементів та електричних з'єднань. Усе це може призводити до зниження ефективності роботи сонячної електростанції, втрати частини виробленої електроенергії та виходу окремих елементів із ладу. Саме тому важливим завданням є своєчасне виявлення відхилень у роботі сонячних панелей та оперативна діагностика їх параметрів.

Моніторинг параметрів сонячних панелей дозволяє контролювати значення напруги, струму, потужності, температури та інших показників у режимі реального часу. Завдяки цьому можна оперативно реагувати на несправності, аналізувати зміни продуктивності системи, прогнозувати можливі відмови обладнання та мінімізувати втрати енергії. Використання сучасних інформаційних систем моніторингу та діагностики дозволяє автоматизувати процес збору, передавання та обробки даних про роботу сонячних панелей. Це забезпечує можливість контролю основних параметрів системи в режимі

реального часу, а також отримання доступу до інформації через вебінтерфейс або інші програмні засоби віддаленого моніторингу.

Використання енергомоніторів, датчиків і контролерів у поєднанні з програмним забезпеченням дозволяє здійснювати безперервний контроль параметрів сонячної електростанції та підвищує ефективність її моніторингу. Застосування інформаційних технологій у сфері сонячної енергетики сприяє підвищенню ефективності експлуатації обладнання, зменшенню витрат на технічне обслуговування та забезпеченню стабільності енергопостачання.

Актуальність теми дипломної роботи полягає у необхідності створення сучасної інформаційної системи, яка забезпечуватиме оперативне вимірювання, збирання, обробку та відображення параметрів сонячних панелей у процесі їх експлуатації. Така система дозволить підвищити ефективність контролю роботи сонячної електростанції, своєчасно виявляти несправності та аналізувати стан обладнання в реальному часі.

Метою дипломної роботи є розробка інформаційної системи оперативного вимірювання та діагностики параметрів сонячних панелей у процесі експлуатації. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати аналіз існуючих засобів моніторингу сонячних електростанцій, обрати оптимальні апаратні та програмні засоби, реалізувати механізм збору та обробки даних, а також створити веборієнтований інтерфейс для відображення інформації та аналізу параметрів системи.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу та контролю параметрів сонячних панелей у процесі експлуатації. Предметом дослідження є методи та засоби побудови інформаційних систем для збору, передавання, обробки та візуалізації даних про роботу сонячних електростанцій. У роботі використано такі методи дослідження: аналіз та узагальнення науково-технічної літератури, порівняльний аналіз існуючих систем моніторингу, метод прототипування при розробці програмного забезпечення, а також експериментальний метод для перевірки працездатності розробленої системи.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої системи для підвищення ефективності експлуатації сонячних електростанцій, забезпечення оперативного контролю технічного стану обладнання та зменшення ризику втрати продуктивності через несвоєчасне виявлення несправностей. Отримані результати можуть бути використані як у навчальних цілях, так і для практичного впровадження у системах моніторингу сонячної енергетики. Дипломна робота складається зі вступу, 3 розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 63 сторінки.

РОЗДІЛ 1: АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1: Принцип роботи сонячних панелей

Принцип роботи сонячних елементів ґрунтується на явищі фотоелектричного ефекту, при якому енергія сонячного випромінювання безпосередньо перетворюється в електричну енергію. Основою сонячного елемента є напівпровідниковий матеріал, найчастіше кремній, у якому формується р-п перехід. Напівпровідники n-типу характеризуються надлишком вільних електронів, тоді як у матеріалах р-типу основними носіями заряду є дірки - квазічастинки з позитивним зарядом. При з'єднанні цих двох шарів на межі розділу утворюється внутрішнє електричне поле. Під дією сонячного випромінювання фотони проникають у структуру сонячного елемента та передають свою енергію атомам напівпровідника, внаслідок чого генеруються електронно-діркові пари. Внутрішнє електричне поле р-п переходу забезпечує просторове розділення цих носіїв заряду: електрони дрейфують в n-область, а дірки - у р-область. Унаслідок цього між контактами сонячного елемента виникає різниця потенціалів, що є рушійною силою для формування електричного струму. Для відведення генерованого струму на поверхню сонячного елемента наносяться металеві струмознімальні контакти. При підключенні зовнішнього навантаження виникає замкнене електричне коло, через яке протікає постійний струм. Ефективність перетворення сонячної енергії визначається інтенсивністю падаючого випромінювання, робочою температурою елемента та електрофізичними характеристиками напівпровідникового матеріалу [1, с. 81].

1.2: Типи сонячних панелей

Існує декілька основних типів сонячних панелей, які застосовуються у сучасних сонячних електростанціях. Найбільш поширеними є монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові панелі. Кожен із цих типів має свої особливості та використовується залежно від умов експлуатації, необхідної ефективності та вимог до енергосистеми.

Монокристалічні сонячні панелі є одним із найефективніших та найбільш поширених типів фотоелектричних перетворювачів, які застосовуються для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію. Основою таких панелей є монокристалічний кремній з впорядкованою кристалічною структурою атомів. Однорідність кристалічної решітки забезпечує високу ефективність роботи фотоелементів та стабільність їхніх електричних характеристик.

Технологія виготовлення монокристалічних панелей є складною та потребує використання високочистого кремнію. Цілісний кристал кремнію вирощується методом Чохральського - шляхом повільного витягування затравки з розплаву за строго контрольованих умов температури та швидкості обертання. Отриманий кристал розрізають на тонкі пластини, з яких формують фотоелементи, що з'єднуються у модулі сонячної панелі. Через складність виробничого процесу монокристалічні панелі мають вищу собівартість у порівнянні з іншими типами сонячних модулів.

Монокристалічні панелі легко відрізнити за характерним зовнішнім виглядом. Зазвичай вони мають темний або чорний колір, а їхні фотоелементи мають форму квадратів зі зрізаними кутами(рис. 1.1) - така форма пояснюється особливостями нарізання пластин із циліндричного кристала. Завдяки однорідній структурі матеріалу забезпечується рівномірне проходження електричного струму та зменшуються втрати енергії.



Рисунок 1.1 - Монокристалічна сонячна панель JASolar JAM72D30-565/LB

Однією з головних переваг монокристалічних панелей є високий коефіцієнт корисної дії. Це особливо важливо в умовах обмеженого простору для встановлення сонячних модулів, наприклад на дахах житлових будинків або промислових споруд, оскільки дозволяє отримувати більшу кількість електроенергії з меншої площі. Ще однією важливою перевагою монокристалічних панелей є тривалий термін експлуатації. Більшість сучасних панелей здатні ефективно працювати понад 25 років зі збереженням значної частини початкової потужності. Крім цього, вони характеризуються високою надійністю та стійкістю до впливу зовнішніх факторів, таких як перепади температур, атмосферні опади та ультрафіолетове випромінювання.

Монокристалічні панелі демонструють хороші показники роботи навіть за низького рівня сонячного освітлення, що дозволяє використовувати їх у різних кліматичних умовах. Водночас ефективність роботи фотоелектричних систем значною мірою залежить від погодних умов, кута нахилу панелей, рівня забруднення поверхні та температури навколишнього середовища.

Попри значні переваги, монокристалічні сонячні панелі мають і певні недоліки. Основним є висока вартість, зумовлена складністю технологічного

процесу та необхідністю використання високоякісного кремнію. Крім того, суттєвим технічним недоліком є залежність ефективності від температури: підвищення температури сонячного елемента на 1°C спричиняє зменшення напруги холостого ходу приблизно на 0,5 В [1, с. 87], що призводить до помітного зниження вихідної потужності в умовах інтенсивного сонячного нагріву.

Альтернативою, позбавленою цього недоліку у вартісному відношенні, є полікристалічні сонячні панелі, кристалічна структура яких складається з великої кількості окремих кристалів кремнію. Зовнішньо такі елементи вирізняються характерним синюватим відтінком і неоднорідною структурою поверхні (рис 1.2).



Рисунок 1.2 Полікристалічна сонячна панель Jinko Solar JKM270PP-60

Основною перевагою полікристалічних панелей є відносно невисока вартість виробництва та стабільна робота в умовах природного освітлення. Вони широко застосовуються у тих сонячних електростанціях, де вартість обладнання є визначальним фактором, а економічність та надійність роботи системи важливіші за максимальну ефективність. Разом із тим коефіцієнт корисної дії таких панелей дещо нижчий, ніж у монокристалічних аналогів, що пояснюється наявністю меж між окремими кристалами кремнію - так званих міжкристалічних границь, які частково знижують ефективність перетворення сонячної енергії в електричну. Полікристалічні фотоелектричні модулі характеризуються

достатньою довговічністю, стійкістю до впливу зовнішніх факторів та придатністю для експлуатації в різних кліматичних умовах [2, с. 21].

Окремим і дедалі перспективнішим напрямом розвитку сонячної енергетики є тонкоплівкові фотовольтажні модулі. На відміну від розглянутих вище кристалічних панелей, вони використовують тонкі шари напівпровідникових матеріалів, нанесені на спеціальну основу, що забезпечує меншу масу конструкції та покращені експлуатаційні характеристики).



Рисунок 1.3 Сонячна тонкоплівкова панель у вигляді черепиці Double glass-black Hanergy

Ключовою перевагою тонкоплівкових панелей над полікристалічними аналогами є здатність ефективно виробляти електричну енергію навіть за умов розсіяного сонячного світла та в умовах похмурої погоди, що забезпечує стабільнішу генерацію при змінних погодних умовах. Водночас суттєвим недоліком є більша потреба у площі: для отримання 1 кВт встановленої потужності необхідно близько 18,3 м² площі.

З електричної точки зору тонкоплівкові модулі характеризуються нижчим робочим струмом, близько 3,6 А та вищою напругою - в районі 70 В, тоді як традиційні кремнієві фотомодулі працюють при струмі ~ 8 А та напрузі ~ 30 В. Така конфігурація зменшує омичні втрати в кабельній мережі та підвищує загальну ефективність системи. Показовим прикладом є модулі компанії ThinFilmTechnology з коефіцієнтом корисної дії близько 25 %. Завдяки промисловій орієнтованості технології такі модулі доцільно застосовувати переважно на об'єктах із встановленою потужністю понад 10 кВт. Додатковою перевагою є менше нагрівання під час роботи, приблизно у чотири рази нижче порівняно з традиційними фотомодулями, що позитивно впливає на стабільність та термін служби обладнання. Тонкоплівкові панелі також відзначаються меншою кількістю металевих з'єднань і приблизно вдвічі меншою масою порівняно зі звичайними фотомодулями. Загалом застосування тонкоплівкових фотовольтажних модулів у складі сонячних електростанцій дозволяє досягати вищих показників питомої продуктивності порівняно з монокристалічними та полікристалічними панелями при відносно помірних капітальних витратах [2, с. 25].

Отже, кожен із розглянутих типів сонячних панелей має характерні переваги і обмеження, а вибір конкретного типу визначається сукупністю факторів: доступною площею, кліматичними умовами, встановленою потужністю та бюджетом проєкту.

1.3 Основні параметри

Для правильного вибору та експлуатації сонячних панелей необхідно розуміти їх основні технічні характеристики. Кожен із параметрів визначає ефективність роботи фотоелектричного модуля та впливає на загальну продуктивність сонячної електростанції.

Одним із ключових показників є номінальна потужність панелі, яка являє собою максимальну електричну потужність, що виробляється за стандартних умов випробування (STC): температура панелі 25 °C, інтенсивність сонячного випромінювання 1000 Вт/м², спектр АМ 1.5. Вимірюється у ватах пік (Вт·п) і є основним показником при виборі обладнання для фотоелектричної системи.

Не менш важливим параметром є напруга холостого ходу, яка являє собою напругу на виводах панелі за відсутності навантаження. Вона відіграє ключову роль при проектуванні рядів панелей, оскільки сумарна напруга не повинна перевищувати максимально допустиму вхідну напругу інвертора.

Струм короткого замикання є максимальним струмом, що протікає через панель при короткому замиканні її виводів. Цей параметр використовується для визначення допустимого струму захисних пристроїв та кабельних з'єднань у фотоелектричній системі.

Робоча напруга та робочий струм відповідають значенням у точці максимальної потужності, при яких панель виробляє найбільшу кількість електроенергії. Відслідковування цієї точки здійснюється інвертором або контролером заряду (рис 1.4).

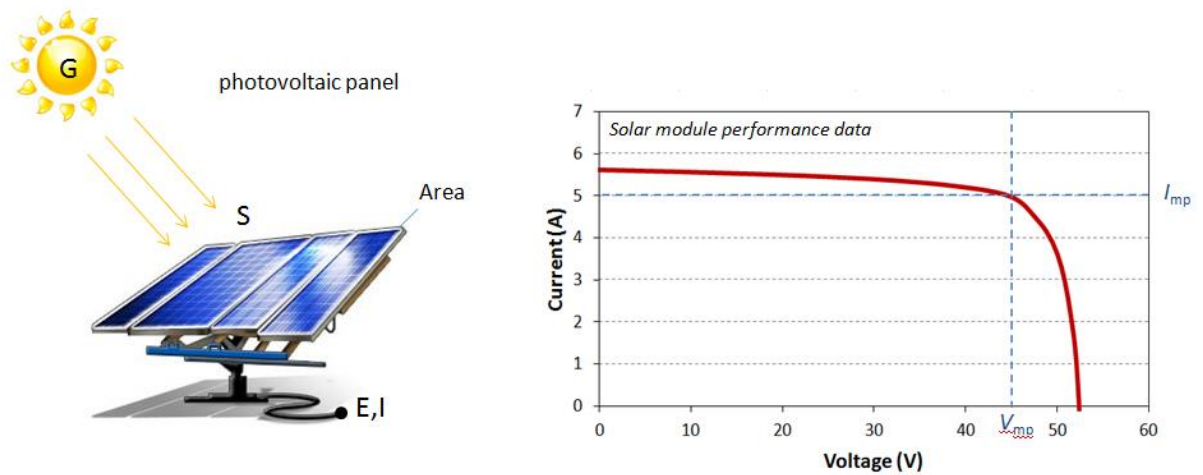


Рисунок 1.4 – Вольт-амперна характеристика фотоелектричного модуля [3]

Коефіцієнт корисної дії панелі (η) показує відношення електричної потужності, що виробляється панеллю, до потужності сонячного випромінювання, що падає на її поверхню. Відповідно до матеріалів навчального курсу EME 812 Університету штату Пенсільванія, ККД фотоелектричного модуля визначається за формулою [3]:

$$\eta = P / (E \cdot A) \cdot 100 \%,$$

де P - номінальна потужність панелі, Вт; E - інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м²; A - площа панелі, м².

Вимірювання ККД проводиться за стандартних умов тестування (STC): температура повітря 25 °C, інтенсивність випромінювання 1000 Вт/м², аеромаса AM 1.5G, панель орієнтована перпендикулярно до світлового потоку. Для сучасних кристалічних панелей ККД становить від 17 до 23 %, тоді як для тонкоплівкових модулів - від 10 до 16 %.

Температурний коефіцієнт потужності показує, на скільки відсотків змінюється потужність панелі при зміні її температури на 1 °C відносно стандартних умов випробування. Для кристалічного кремнію типове значення

становить від $-0,3$ до $-0,5$ $\%/^{\circ}\text{C}$, що означає зниження потужності при нагріванні панелі понад 25°C .

Термін служби сучасних фотоелектричних модулів становить 25–30 років [4]. Протягом цього часу відбувається поступове зниження потужності, так звана деградація, яка зазвичай не перевищує $0,5$ – $0,7$ $\%$ на рік. Виробники гарантують збереження не менше 80 $\%$ від номінальної потужності після 25 років експлуатації.

1.4 Існуючі системи моніторингу

Для контролю роботи сонячних електростанцій використовуються різні системи моніторингу, які забезпечують збір, передачу та аналіз параметрів роботи фотоелектричних модулів і супутнього обладнання. Основними функціями таких систем є вимірювання електричних параметрів, відображення статистики генерації, виявлення несправностей та дистанційний контроль обладнання. Існуючі рішення можна умовно поділити на три групи: комерційні системи моніторингу, універсальні IoT-платформи та відкриті апаратно-програмні комплекси з API-інтеграцією.

До першої групи належать готові програмно-апаратні рішення, що постачаються разом із сонячними інверторами та іншим обладнанням. Система FusionSolar компанії Huawei забезпечує моніторинг генерації електроенергії, контроль роботи інверторів та перегляд статистики в режимі реального часу через веб-інтерфейс або мобільний застосунок [5]. Передача даних здійснюється через фірмовий комунікаційний шлюз із використанням протоколів Modbus та RS485 для зв'язку з інверторами. Доступ до сирих вимірювальних даних через зовнішній API є обмеженим і потребує окремої угоди з виробником [6]. Схожий підхід реалізований у платформі SolarEdge, яка дозволяє контролювати не лише загальні параметри станції, а й стан окремих сонячних панелей завдяки модульній архітектурі з оптимізаторами потужності [7]. Попри наявність REST API, його функціональність орієнтована переважно на читання агрегованих даних, а не на передачу вимірювань у сторонні інформаційні системи в режимі реального часу. Загалом комерційні системи є ефективними для експлуатації готових сонячних електростанцій, проте мають суттєві обмеження: прив'язку до обладнання конкретного виробника, закритість протоколів передачі даних, обмежені можливості підключення сторонніх датчиків та відсутність гнучкого інструментарію для реалізації власних алгоритмів діагностики.

Альтернативою комерційним рішенням є універсальні IoT-платформи, що використовуються для збору та візуалізації даних із датчиків. Прикладом такого рішення є платформа ThingSpeak, яка застосовується для передачі й аналізу даних через мережу Інтернет [8]. Подібні рішення часто використовуються у навчальних та дослідницьких проєктах на базі мікроконтролерів Arduino або ESP32 і дозволяють здійснювати базову візуалізацію, формувати графіки та зберігати результати вимірювань у хмарному середовищі. Проте IoT-платформи не є спеціалізованими для сонячної енергетики, тому реалізація функцій діагностики, обробки аварійних ситуацій та комплексного аналізу параметрів покладається безпосередньо на розробника, що суттєво збільшує обсяг необхідної розробки програмного забезпечення.

З огляду на обмеження обох розглянутих груп, для розробки інформаційної системи діагностики сонячних панелей було обрано платформу Smart-MAIC - українську систему розумних лічильників та енергомоніторів, що розробляється компанією з Києва понад десять років і орієнтована на моніторинг електроенергії, води, газу, тепла та широкого спектру фізичних параметрів навколишнього середовища [9]. Модельний ряд охоплює однофазні та трифазні енергомонітори серії D101/D103(рис. 1.5) з точністю вимірювань $\pm 0,5\%$, а також універсальний лічильник D105, що підтримує підключення імпульсних лічильників, аналогових датчиків тиску, цифрових датчиків температури DS18B20, датчиків вологості DHT22, датчиків швидкості вітру та інших сенсорів. Усі пристрої оснащені бездротовим інтерфейсом Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n) та резервною пам'яттю для збереження даних до 30 діб при відсутності зв'язку з сервером [9].



MEASURE
ANALYZE
CONTROL



Рисунок 1.5 - Енергомонітор Smart-MAIC D101

Ключовою перевагою Smart-MAIC є наявність відкритого REST API та підтримка протоколу MQTT, що дозволяє отримувати вимірювальні дані в режимі реального часу з оновленням кожні 5 секунд і передавати їх до зовнішніх систем зберігання та обробки [9]. Це уможливорює побудову власного програмного стеку: збір даних через API Smart-MAIC, їх зберігання у базі даних MongoDB та подальшу візуалізацію й аналіз через веб-застосунок на основі Next.js. На відміну від комерційних платформ, такий підхід не залежить від обладнання конкретного виробника та дозволяє реалізовувати власні алгоритми діагностики й розширювати функціонал системи відповідно до потреб. Порівняльний аналіз розглянутих систем наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Порівняння систем моніторингу

Показник	FusionSolar	SolarEdge	ThingSpeak	Smart-MAIC
Спеціалізація на СЕС	Так	Так	Ні	Частково
Відкритий API	Обмежено	Обмежено	Так	Так
Підключення сторонніх датчиків	Ні	Ні	Так	Так
Передача до власної БД	Ні	Ні	Так	Так
Незалежність від виробника	Ні	Ні	Так	Так
Оновлення даних в реальному часі	Так	Так	Обмежено	6 сек./Так(в залежності від методу)

1.5 Методи діагностики

Одним із найпоширеніших методів діагностики є електричний контроль фотоелектричних модулів. Він полягає у вимірюванні вольт-амперних характеристик сонячних панелей та їх порівнянні з паспортними значеннями. Відхилення параметрів можуть свідчити про наявність дефектів: мікротріщини, деградацію напівпровідникового шару або пошкодження контактних з'єднань. Основою такої діагностики є постійний моніторинг електричних параметрів системи - напруги, сили струму, потужності, коефіцієнта корисної дії, температури фотомодулів та рівня сонячного випромінювання. Для цього використовуються інформаційно-вимірювальні апаратно-програмні комплекси, які дозволяють аналізувати миттєві значення струмів та напруг, визначати коефіцієнти гармонічних спотворень, контролювати частоту мережі та параметри потужності [10, с. 82].

Важливим методом діагностики є тепловізійний контроль. За допомогою тепловізорів проводиться аналіз температурного поля поверхні сонячних модулів. Наявність локальних перегрівів - так званих «гарячих точок» - свідчить про дефекти фотоелементів, поганий контакт у з'єднаннях або нерівномірне навантаження окремих секцій панелі. Тепловізійна діагностика дозволяє оперативно виявляти проблемні ділянки без демонтажу обладнання і є одним із найбільш ефективних неруйнівних методів контролю.

Для оцінки продуктивності сонячних батарей використовується аналіз генерації електроенергії. Фактичні показники виробітку порівнюються з розрахунковими або прогнозованими значеннями, що враховують інтенсивність сонячного випромінювання, погодні умови та сезонні особливості. Якщо генерація є нижчою за очікувану, це може свідчити про несправність окремих модулів або забруднення поверхні панелей. Накопичення пилу, бруду, листя або снігу призводить до зниження кількості сонячного випромінювання, що

потрапляє на фотоелементи, і, відповідно, до втрати потужності, тому оцінка ступеня забруднення є невід'ємною частиною діагностики [2, с. 60].

Окремої уваги потребує контроль стану інверторів та якості електроенергії. Під час роботи інверторів у формі струму можуть виникати гармонічні складові, які негативно впливають на роботу електротехнічного обладнання. Для оцінки стану системи проводиться аналіз гармонічного складу струмів і напруг, контроль частоти мережі, а також активної та реактивної потужності [10, с. 85]. Оскільки інвертори забезпечують перетворення постійного струму у змінний для живлення електромережі, їх несправність може призводити до значних втрат генерації, тому постійний контроль температури, рівня навантаження та параметрів вихідної напруги є обов'язковим.

Візуальна діагностика передбачає регулярний огляд обладнання з метою виявлення механічних пошкоджень. У процесі експлуатації сонячні панелі можуть зазнавати впливу атмосферних явищ, пилу, вологи, граду або механічних навантажень, що призводить до появи тріщин на поверхні скла, корозії контактів, пошкодження ізоляції кабелів чи деформації конструкцій кріплення. Своєчасний візуальний контроль дозволяє виявити подібні дефекти до того, як вони призведуть до суттєвого погіршення роботи системи [2, с. 60].

Для сучасних СЕС велике значення має автоматизований моніторинг. Спеціалізовані контролери, датчики та програмне забезпечення забезпечують збір інформації про роботу обладнання в режимі реального часу: контролюються параметри генерації, стан акумуляторних батарей, температура інверторів та рівень навантаження. У разі виникнення аварійної ситуації система автоматично формує повідомлення про несправність. Сучасні рішення можуть працювати через локальні мережі або хмарні сервіси, надаючи користувачу доступ до параметрів СЕС через вебінтерфейс або мобільний застосунок.

У великих сонячних електростанціях застосовується також дистанційна діагностика із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Дрони, оснащені тепловізійними камерами, дозволяють швидко обстежувати значні

площі фотоелектричних полів та виявляти несправні модулі без необхідності наземного обходу, що суттєво скорочує час обстеження та підвищує ефективність технічного обслуговування.

З часом ефективність сонячних панелей поступово знижується через деградацію матеріалів під впливом зовнішнього середовища. Основними причинами є ультрафіолетове випромінювання, перепади температур, вологість та механічні навантаження. Більшість виробників гарантують щорічну втрату потужності в межах 0,5 - 1%, а через 20 - 25 років установка зберігає 80 - 85% від початкової номінальної потужності. Для оцінки рівня деградації проводиться порівняння поточних характеристик панелей із початковими паспортними параметрами.

Розглянуті методи діагностики - електричний контроль, тепловізійне обстеження, аналіз генерації та якості електроенергії, візуальний огляд, автоматизований моніторинг, дистанційна діагностика за допомогою БПЛА та оцінювання деградації - у сукупності забезпечують своєчасне виявлення несправностей і підвищують надійність роботи СЕС. Найбільш перспективним підходом є поєднання апаратних засобів збору даних із сучасними програмними рішеннями для їх зберігання та візуалізації, що дозволяє реалізувати повноцінну систему моніторингу в режимі реального часу. Саме такий підхід покладено в основу розробки, що розглядається в наступних розділах роботи.

1.6 Проблеми оперативної діагностики

У процесі експлуатації сонячних панелей виникає необхідність постійного контролю їхніх електричних та експлуатаційних параметрів. Ефективність фотоелектричних модулів залежить від багатьох чинників: температури навколишнього середовища та самого фотоелемента, рівня сонячного випромінювання, часткового або повного затінення, забруднення поверхні, а також технічного стану обладнання. Згідно з даними виробників, температурний коефіцієнт потужності фотомодуля становить $-(0,33 - 0,5) \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, що свідчить про суттєвий вплив теплового режиму на загальну продуктивність сонячної електростанції (СЕС). Крім цього, зростання температури понад $60 - 70 \text{ }^\circ\text{C}$ для кремнієвих модулів призводить до прискореної деградації герметизуючих матеріалів і паяних контактів, що в перспективі зменшує надійність всієї фотоелектричної системи.

Значною проблемою під час тривалої експлуатації є поступова деградація фотомодулів. Більшість виробників закладають щорічну втрату потужності в розмірі $0,8 - 1 \text{ } \%$, тоді як преміум-моделі демонструють коефіцієнт деградації $0,3 - 0,5 \text{ } \%$ на рік [2, с. 59]. Це означає, що через 20 - 25 років експлуатації сонячна установка вироблятиме лише $80 - 85 \text{ } \%$ від початкової номінальної потужності. За відсутності систематичного моніторингу та оперативної діагностики прискорена деградація окремих елементів може залишатися непоміченою тривалий час, що веде до непропорційних втрат виробітку для всього масиву панелей.

Одним із поширених фізичних явищ, що негативно впливає на роботу фотоелектричних масивів, є ефект часткового затінення. Затінення навіть невеликої ділянки поверхні панелі призводить до падіння вихідної напруги всього рядка через паразитне навантаження, яке створює неосвітлена область. Для нейтралізації цього ефекту в якісних промислових модулях застосовуються байпасні діоди Шотки (рис. 1.6), що шунтують затінені елементи та дозволяють зберегти загальну продуктивність ланцюга [2, с. 55]. Проте несправність

байпасного діода є поширеним дефектом, який у край важко ідентифікувати без спеціалізованого діагностичного обладнання в умовах польової експлуатації.



Рисунок 1.6 - Діод Шотки в розподільчій коробці для сонячної панелі

Однією з ключових проблем оперативної діагностики є складність швидкого та точного виявлення несправностей у великих фотоелектричних системах. У більшості випадків традиційні системи контролю забезпечують спостереження лише за загальними параметрами СЕС (сумарна потужність, напруга та струм на інверторі) без детального аналізу стану окремих модулів або рядків. Така архітектура моніторингу суттєво ускладнює локалізацію несправностей і збільшує час їх усунення, що призводить до значних фінансових втрат - адже будь-яка непередбачена зупинка або зниження продуктивності безпосередньо впливає на економічні показники об'єкта [2, с. 61].

Сервісне обслуговування сонячних електростанцій передбачає комплексну діагностику всього встановленого технічного обладнання, зокрема сонячних

модулів, інверторів і трансформаторів, аналіз причин зниження продуктивності, а також оперативний пошук і усунення несправностей [2, с. 61].

Однак проведення такої діагностики вручну або за допомогою традиційних засобів є трудомістким процесом, особливо для промислових СЕС із сотнями і тисячами модулів. Додатковою проблемою є необхідність безперервного збору та обробки даних у реальному часі. Контроль вихідних параметрів сонячної станції є обов'язковою умовою своєчасного виявлення відхилень - зокрема, відповідно до рекомендацій [2, с. 61], у разі якщо інвертор показує помилку або відсутність генерації, необхідно оперативно реагувати та залучати сервісні служби. Для автоматизації цього процесу сучасні системи моніторингу використовують мікроконтролери, датчики фізичних величин (температури, освітленості, струму, напруги) та хмарні технології передачі й зберігання даних, що дозволяє забезпечити безперервний аналіз параметрів роботи фотоелектричних модулів і своєчасне виявлення відхилень від норми.

Висновок до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз предметної області, що охоплює фізичні принципи роботи фотоелектричних перетворювачів, типи сонячних панелей, існуючі рішення для моніторингу та методи діагностики, а також актуальні проблеми оперативного контролю стану обладнання.

Розглянуто три основних типи фотоелектричних модулів - монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові, кожен з яких має характерні переваги та обмеження залежно від умов експлуатації. Встановлено, що систематичний контроль електричних параметрів панелей є необхідною умовою для своєчасного виявлення відхилень у роботі системи.

Порівняльний аналіз існуючих систем моніторингу виявив суттєві обмеження комерційних рішень (FusionSolar, SolarEdge): прив'язку до обладнання конкретного виробника та закритість протоколів обміну даними. Платформа Smart-MAIC поєднує відкритий REST API, підтримку MQTT з оновленням даних кожні 5 секунд і можливість підключення різноманітних датчиків, що робить її оптимальною основою для розробки власної системи діагностики.

Визначено ключові проблеми оперативної діагностики: суттєвий вплив температурного режиму та часткового затінення на продуктивність, складність локалізації несправностей при контролі лише загальних параметрів станції без аналізу окремих модулів, а також необхідність безперервного збору й обробки даних у реальному часі.

Результати проведеного аналізу підтверджують доцільність розробки спеціалізованої інформаційної системи на базі апаратного комплексу Smart-MAIC у поєднанні з власним програмним стеком для зберігання, обробки та візуалізації параметрів сонячних панелей, що є предметом розгляду в наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2: РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

2.1 Структура інформаційної системи

Розроблена інформаційна система призначена для оперативного збору, передачі, зберігання та візуалізації параметрів роботи сонячних панелей у режимі реального часу. За своєю архітектурою система є розподіленою і складається з чотирьох основних рівнів: рівня вимірювання, рівня передачі даних, рівня обробки та зберігання, а також рівня візуалізації. Кожен із зазначених рівнів виконує чітко визначені функції та взаємодіє з іншими рівнями через стандартизовані інтерфейси, що забезпечує масштабованість і надійність системи в цілому.

На фізичному рівні збір даних здійснюється за допомогою двох основних пристроїв, енергомонітора Smart Maїc D103 та лічильника Smart Maїc D105, які працюють у комплексі та доповнюють один одного. Енергомонітор Smart Maїc D103 є центральним вимірювальним пристроєм системи та забезпечує вимірювання основних електричних параметрів фотоелектричної установки: напруги, струму, активної та реактивної потужності, коефіцієнта потужності та спожитої енергії. Пристрій підтримує передачу даних через сучасні інтерфейси зв'язку, що робить його придатним для інтеграції у системи віддаленого моніторингу. Висока частота опитування дозволяє фіксувати короточасні зміни параметрів, що є критично важливим для своєчасного виявлення аномалій у роботі сонячних панелей[9].

Лічильник Smart Maїc D105 підключається до системи з метою розширення переліку вимірюваних параметрів та підвищення точності обліку електроенергії. Зокрема, D105 надає можливість підключення додаткових зовнішніх датчиків - датчиків температури сонячних панелей, температури навколишнього середовища, а також датчика сонячної інсоляції. Наявність цих даних є

принципово важливою для коректної діагностики стану фотоелектричної установки, оскільки ефективність генерації електроенергії безпосередньо залежить від теплового режиму роботи панелей та рівня сонячного випромінювання. Підвищення температури фотоелементів понад номінальне значення призводить до зниження ККД панелей, що може бути виявлено шляхом зіставлення електричних параметрів з температурними показниками в реальному часі. Спільне використання D103 та D105 забезпечує комплексний моніторинг як електричних, так і теплофізичних параметрів установки.

Зібрані вимірювальні дані передаються на хмарний сервер за допомогою одного з двох протоколів зв'язку: MQTT або REST API[11]. Вибір протоколу визначається конфігурацією обладнання, вимогами до затримки передачі даних та умовами мережевого середовища. Протокол MQTT є легким протоколом обміну повідомленнями, побудованим на основі моделі публікації та підписки (publish/subscribe). Його ключовими перевагами є мінімальне навантаження на мережу, стійкість до нестабільного з'єднання та низька затримка при передачі даних, що робить його особливо ефективним для пристроїв з обмеженими обчислювальними ресурсами. У випадку короткочасної втрати зв'язку протокол забезпечує механізм збереження та повторної доставки повідомлень, що унеможливорює втрату вимірювальних даних. REST API застосовується як альтернативний або додатковий канал передачі даних у випадках, коли пріоритетом є простота інтеграції або необхідність виконання разових запитів на отримання чи запис інформації. Обидва протоколи забезпечують передачу даних у форматі JSON, що спрощує їх подальшу обробку та зберігання на серверній стороні.

Серверна частина системи реалізована на базі фреймворку Next.js[12], який поєднує у собі функції бекенд-сервера та механізму серверного рендерингу фронтенду. Це рішення дозволяє уникнути необхідності розгортання окремої серверної інфраструктури, спрощує супровід системи та зменшує кількість потенційних точок відмови. Серверні маршрути Next.js (API Routes) приймають

вхідні дані від вимірювальних пристроїв, виконують їх первинну валідацію та нормалізацію, після чого передають на збереження до бази даних. Архітектура системи допускає винесення серверної логіки в окремий незалежний бекенд, що відкривало б можливість підключення мобільного застосунку як додаткового клієнта. Проте у рамках даної роботи реалізується виключно веб-інтерфейс, оскільки системи подібного класу орієнтовані насамперед на стаціонарне використання, а адаптивний дизайн веб-застосунку повною мірою забезпечує зручну роботу з мобільних пристроїв без необхідності розробки окремого додатку.

Для зберігання вимірювальних даних використовується документоорієнтована NoSQL база даних MongoDB[13]. Вибір MongoDB обумовлений низкою технічних переваг: гнучка схема зберігання документів дозволяє без ускладнень адаптувати структуру даних при зміні переліку вимірюваних параметрів або підключенні нових пристроїв, а висока продуктивність при роботі з великими обсягами часових рядів є критично важливою для систем безперервного моніторингу. Наявність вбудованих інструментів агрегації даних дозволяє ефективно виконувати аналітичні запити безпосередньо на рівні бази даних, не перевантажуючи прикладний сервер[14].

Фронтенд-частина системи реалізована у вигляді веб-застосунку на базі Next.js, що забезпечує наочне відображення зібраних даних у режимі реального часу. Завдяки вбудованому механізму серверного рендерингу початкове завантаження сторінок відбувається значно швидше порівняно з класичними односторінковими застосунками, що є важливим при роботі з великими обсягами вимірювальних даних. Інтерфейс користувача містить інтерактивні графіки динаміки електричних параметрів, температурних показників та рівня інсоляції за обраний часовий проміжок, а також панелі з поточними числовими значеннями вимірюваних величин. Окрім відображення поточного стану установки, система надає можливість аналізу накопичених даних за довільний період, що дозволяє виявляти тенденції до деградації панелей, оцінювати вплив

температурних умов на ефективність генерації та порівнювати фактичні показники виробництва електроенергії з очікуваними. У разі виявлення відхилень параметрів від встановлених порогових значень система формує відповідні діагностичні сповіщення, що забезпечує оперативне реагування на несправності обладнання.

Загальна структура інформаційної системи наведена на рисунку 2.1.

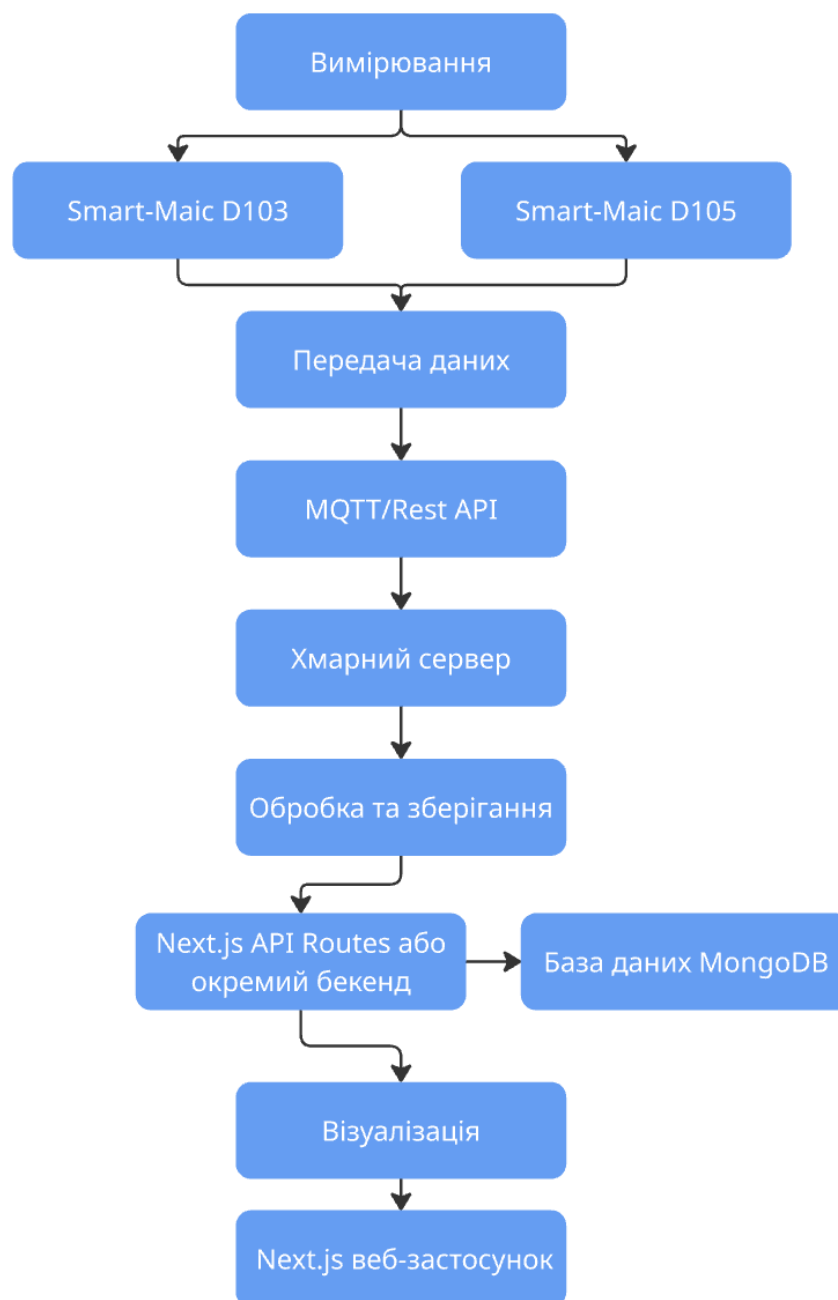


Рисунок 2.1 – Структура інформаційної системи

2.2 Вибір та обґрунтування апаратного забезпечення

Для реалізації системи моніторингу параметрів сонячних панелей в якості апаратного засобу вимірювання обрано енергомонітор Smart Maic — розумний лічильник електроенергії з бездротовим інтерфейсом WiFi, що виробляється українською компанією Smart Maic [9]. Лінійка енергомоніторів Smart Maic представлена двома основними моделями для вимірювання електричних параметрів - D101 та D103. Порівняння моделей наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння моделей Smart Maic D101 та D103

Параметр	D101	D103
Кількість фаз	1	3
Діапазон вимірювання струму	50мА - 100А	50мА - 100А(для моделей D103-300, D103-600 — до 300А та 600А відповідно)
Похибка вимірювань активної енергії	±0,5%	±0,5%
Похибка вимірювань напруги та струму	< 1%	< 1%
Бездротовий протокол зв'язку	2,4 ГГц / IEEE 802.11 (b, g, n)	2,4 ГГц / IEEE 802.11 (b, g, n)
Інтервал оновлення даних	6 сек./Так(в залежності від методу	6 сек./Так(в залежності від методу
Накопичення даних без зв'язку	до 30 діб	до 10 діб
Робочий діапазон температур	-40 — +70 °С	-40 — +70 °С
Габарити (Д×В×Ш)	90×67×52 мм	90×67×52 мм
Маса	0,1 кг	0,1 кг

З таблиці видно що обидві моделі мають ідентичні характеристики точності, інтервалів оновлення та габаритів. Головна відмінність між моделями це кількість фаз. D101 є однофазним пристроєм і підходить для побутових або невеликих однофазних систем. Оскільки розроблювана система орієнтована на промислові сонячні електростанції, які працюють у трифазних електричних мережах, обрано трифазну модель D103.

Моніторинг здійснюється на рівні стрінгів - кожен D103 підключається до окремого рядка послідовно з'єднаних панелей, що є стандартною практикою на промислових СЕС. Для потужніших промислових ліній існують старші моделі лінійки - D103-300 та D103-600, розраховані на струми до 300А і 600А відповідно, що свідчить про масштабованість обраного рішення.

Пристрій випускається у стандартній та розширеній версіях. Для задач даної роботи використовується розширена версія, яка забезпечує окремий облік споживання та виробництва електроенергії, що є обов'язковою умовою для коректного моніторингу сонячних панелей. Стандартну версію пристрою можна оновити до розширеної в будь-який час.

Енергомонітор вимірює такі параметри електромережі: напругу (V), силу струму (A), активну потужність (Вт), зворотну активну потужність (rW), активну енергію (Wh), зворотну активну енергію (rWh) та коефіцієнт потужності (cosF).

Для розширення функціональності системи та отримання теплофізичних параметрів, необхідних для повноцінної діагностики сонячних панелей, до складу апаратного забезпечення включено лічильник Smart Maіc D105 [17]. На відміну від D103, який орієнтований виключно на вимірювання електричних параметрів, D105 є універсальним пристроєм збору даних з підтримкою підключення зовнішніх датчиків різних типів. У рамках даної роботи до D105 підключаються датчики температури Ds18b20 для вимірювання температури панелей та навколишнього середовища, датчик вологості та температури DHT22, а також піранометр або фотодіодний датчик для вимірювання рівня сонячної інсоляції через аналоговий вхід пристрою. D105 монтується на DIN-рейку поряд з D103 і передає зібрані дані на хмарний сервер через ті самі протоколи зв'язку.

Для інтеграції із зовнішніми системами обидва пристрої підтримують два протоколи передачі даних. REST API дозволяє отримувати дані з інтервалом до 6 секунд у форматі JSON. Протокол MQTT забезпечує передачу даних у режимі реального часу за принципом публікації/підписки, при цьому обидва протоколи передають дані у форматі JSON [11]. Детальний розгляд обох протоколів

наведено в підрозділі 2.3. Монтаж обох пристроїв здійснюється на DIN-рейку, що спрощує встановлення в існуючих електроцитах промислових сонячних електростанцій.

2.3 Обґрунтування протоколу передачі даних та організація збору даних

Організація надійної та ефективної передачі вимірювальних даних від пристроїв до серверної частини системи є одним із ключових архітектурних рішень при розробці будь-якої інформаційної системи моніторингу. Від вибору протоколу залежить як затримка надходження даних, так і стійкість системи до нестабільного мережевого з'єднання, що є особливо важливим в умовах реальної експлуатації фотоелектричних установок. Пристрої Smart Maic підтримують два механізми передачі даних - MQTT та REST API [11], кожен з яких має свої технічні особливості, переваги та обмеження. У розробленій системі обидва механізми використовуються як взаємодоповнюючі, виконуючи різні функції залежно від сценарію використання.

Ключова архітектурна відмінність MQTT від REST API полягає в моделі взаємодії між пристроєм і сервером. MQTT передбачає наявність центрального брокера повідомлень, до якого пристрої публікують дані, а клієнти підписуються на потрібні їм топіки та отримують дані в момент їх появи. На відміну від цього, в REST API ініціатором обміну завжди є клієнт, що вимагає постійного опитування пристрою для отримання актуальних даних. Саме тому MQTT є природним вибором для систем реального часу - сервер отримує нові вимірювання одразу після їх появи на пристрої.

MQTT активується через веб-інтерфейс пристрою в розділі "MQTT Клієнт" [15], де вказується адреса брокера, порт та дані авторизації. Після налаштування пристрій самостійно і періодично публікує вимірювальні дані в окремі топіки за схемою <ID пристрою>.<ім'я топіка>. Для енергомонітора D103 публікуються топіки напруги (V1-V3), струму (A1-A3), активної потужності (W1-W3), зворотної активної потужності (rW1-rW3), накопиченої енергії (KWh1-KWh3) та коефіцієнта потужності (PF1-PF3) по кожній фазі окремо. Окрім окремих топіків для кожного параметра, пристрій також публікує зведений топік JSON що містить усі параметри одночасно - це дозволяє серверній частині системи

підписатись на один топік та отримувати повний набір даних єдиним повідомленням, що спрощує логіку обробки та зменшує кількість підписок.

The screenshot shows the 'MQTT КЛІЄНТ' (MQTT Client) configuration page of the Smart Maic web interface. The left sidebar contains navigation links: Статус, Дані, Конфігурація, Лічильник, WiFi та Мережа, Сервер даних, MQTT Клієнт (selected), Умови, Оновлення, and Вихід. The main content area is titled 'MQTT КЛІЄНТ' and includes a descriptive text box at the top. Below this, there are three main configuration sections: 1. 'Налаштування MQTT Сервера' (MQTT Server Settings) with a checkbox for 'Включити MQTT' (checked), and fields for 'Адреса сервера' (mqtt_server), 'Порт' (0), 'Ім'я користувача' (user_name), 'Пароль' (password), 'SSL з'єднання' (checked), and 'Серт. сервера' (Uploaded). 2. 'Налаштування топіка' (Topic Settings) with fields for 'Інтервал [сек]' (60), 'Розділювач' (a dropdown menu with '/' selected), 'Префікс' (empty), and 'Ім'я топіка даних' (1778386867/JSON). 3. 'Керування виходом "сухий контакт"' (Dry Contact Output Management) with a checkbox for 'Підписатися' (checked) and 'Ім'я топіка' (1778386867/SETOUT). A 'Зберегти' (Save) button is located at the bottom of the configuration area.

Рисунок 2.2 - Веб-інтерфейс налаштування MQTT клієнта пристрою Smart Maic

Лічильник D105, до якого підключені додаткові датчики, публікує дані температури сонячних панелей та температури навколишнього середовища через топіки T1-T5 у градусах Цельсія - для цього використовуються датчики DS18B20, які можна підключити до п'яти одночасно [17]. Рівень сонячної інсоляції вимірюється через аналоговий вхід ADC, до якого підключається піранометр або фотодіодний датчик, що повертає значення напруги у діапазоні 0-15В пропорційно до рівня випромінювання. За потреби до D105 може бути підключений датчик DHT22, який додатково вимірює вологість навколишнього середовища - параметр що впливає на тепловий режим роботи панелей. Інтервал оновлення даних складає 5 секунд, що забезпечує достатню частоту для

оперативного моніторингу. Важливою технічною перевагою D105 є здатність зберігати дані локально до 11 днів у разі відсутності зв'язку з сервером - при відновленні з'єднання всі накопичені вимірювання автоматично передаються на хмарний сервер і жодні дані не втрачаються.

REST API хмарного сервера Smart Maic працює за принципово іншим принципом - система сама ініціює HTTP запит до сервера для отримання накопичених даних за вказаний часовий інтервал. Запити надсилаються методом GET або POST на адресу <https://dash.smart-maic.com/api> з обов'язковими параметрами: ідентифікатором пристрою та API ключем користувача, який отримується на сторінці профілю Smart Maic Dashboard [16]. Додатково вказується початок і кінець часового інтервалу у форматі UNIX з точністю до секунд та одиниця вибірки - хвилинна або годинна. Максимальний інтервал для хвилинних даних становить один місяць, тоді як для годинних обмежень не встановлено, що робить REST API зручним інструментом для побудови аналітики за тривалі періоди. У разі відсутності параметрів дати сервер автоматично повертає дані за останню годину. Відповідь сервера представлена у форматі JSON, що забезпечує пряму сумісність з серверною частиною системи без необхідності додаткового перетворення даних. Суттєвим обмеженням є частота запитів - не частіше одного разу на хвилину, що унеможливорює використання REST API як основного каналу для моніторингу в реальному часі, проте для отримання та аналізу накопичених даних це обмеження не є критичним.

У розробленій системі MQTT виступає основним каналом передачі поточних вимірювань, забезпечуючи безперервний потік даних від обох пристроїв до серверної частини з мінімальною затримкою. REST API використовується як резервний та допоміжний механізм - зокрема для первинного наповнення бази даних при першому запуску системи, для відновлення даних за період коли MQTT з'єднання було тимчасово недоступне, а також для побудови аналітичних звітів за довільні історичні періоди. Дані з обох

джерел надходять у форматі JSON, що забезпечує єдиний уніфікований формат на вході серверної частини незалежно від використаного механізму передачі.

2.4 Програмна реалізація системи

Програмна частина інформаційної системи реалізована на базі фреймворку Next.js з використанням архітектури App Router [12]. Next.js побудований поверх бібліотеки React [19] - однієї з найпоширеніших JavaScript бібліотек для побудови користувацьких інтерфейсів, що базується на концепції компонентного підходу, де інтерфейс складається з незалежних перевикористовуваних компонентів. React забезпечує ефективне оновлення DOM через віртуальний DOM, що є важливим при роботі з динамічними даними що постійно змінюються. Next.js розширює можливості React, додаючи серверний рендеринг, файлову систему маршрутизації та вбудовану серверну інфраструктуру, що робить його повноцінним фреймворком для розробки як фронтенду так і бекенду в рамках єдиного проєкту. App Router є сучасним підходом до побудови застосунків на Next.js і базується на серверних компонентах React (React Server Components), що дозволяє виконувати частину логіки безпосередньо на сервері без передачі зайвих даних на клієнт. Така архітектура є особливо доцільною для систем моніторингу, де частина даних є статичною або оновлюється рідко і може бути відрендерена на сервері, тоді як динамічні показники реального часу обробляються окремо на клієнтській стороні.

Серверна частина системи організована через механізм API Routes, який в App Router реалізується у вигляді файлів маршрутів у відповідних директоріях проєкту. Однією з ключових переваг використання Next.js API Routes є відсутність необхідності розгортання окремої серверної інфраструктури - при альтернативному підході серверна логіка могла б бути реалізована у вигляді самостійного бекенду на таких фреймворках як Express, NestJS, Django, FastAPI, Laravel, Ruby on Rails чи інших, що потребувало б окремого розгортання, налаштування та супроводу. Використання API Routes в рамках єдиного Next.js проєкту суттєво спрощує архітектуру та зменшує кількість потенційних точок відмови. Кожен маршрут є окремим HTTP ендпоінтом що обробляє запити від

клієнтської частини або зовнішніх джерел даних. API Routes виконують три основні функції в системі: отримання історичних даних від хмарного сервера Smart Maic через REST API, запис вхідних вимірювань що надходять від MQTT брокера в реальному часі до бази даних MongoDB, а також передача актуальних даних на фронтенд.

Для зберігання вимірювальних даних використовується документоорієнтована база даних MongoDB [13]. В MongoDB дані організовані за ієрархічним принципом: база даних містить колекції, кожна з яких складається з документів - окремих записів довільної структури у форматі JSON. Вибір на користь NoSQL підходу обумовлений насамперед гнучкістю схеми - на відміну від реляційних баз даних, MongoDB не вимагає фіксованої структури документів, що спрощує адаптацію при зміні переліку вимірюваних параметрів або підключенні нових датчиків [14]. В системі передбачено дві основні колекції. Перша це `measurements_raw`, дана колекція містить сирі вимірювання що надходять через MQTT відповідно до налаштованого інтервалу публікації пристрою, де кожен документ відповідає одному часовому зрізу і містить ідентифікатор пристрою, часову мітку та актуальні значення всіх параметрів. Ця колекція використовується для відображення даних у режимі реального часу та зберігається за короткостроковий період. Друга - `measurements_hourly`, що містить агреговані годинні дані що отримуються через REST API хмарного сервера Smart Maic, де кожен документ містить усереднені значення параметрів за годину. Ця колекція призначена для довгострокової аналітики та зберігає дані за рік і більше без надмірного зростання обсягу бази даних. MongoDB є єдиним джерелом даних для фронтенду - незалежно від того через який канал надійшли дані, фронтенд завжди читає виключно з бази даних через API Routes. Для взаємодії з MongoDB з серверної частини Next.js використовується офіційний драйвер або бібліотека Mongoose, яка додатково надає можливість типізації схем документів, що є корисним при роботі з різнорідними даними від D103 та D105.

Отримання даних від пристроїв організовано через два незалежні канали. Перший канал це підписка на MQTT брокер безпосередньо з серверної частини Next.js. API Route підписується на відповідні топіки пристроїв D103 та D105 і в момент надходження нового повідомлення виконує його валідацію та запис до колекції `measurements_raw` в MongoDB. Другий канал це періодичні запити до REST API хмарного сервера Smart Maїc для отримання годинних агрегованих даних, які записуються до колекції `measurements_hourly` та використовуються для заповнення пропусків у випадку тимчасової недоступності MQTT з'єднання. Обидва канали працюють паралельно і забезпечують надійність та повноту збору вимірювальних даних.

Передача актуальних даних з сервера на фронтенд у режимі реального часу реалізована за допомогою механізму Server-Sent Events (SSE) - стандартного веб-протоколу для односторонньої передачі даних від сервера до клієнта через постійне HTTP з'єднання. В Next.js SSE реалізується нативно через API Route що повертає `ReadableStream` з відповідними заголовками, тоді як WebSocket потребує винесення в окремий сервер поза Next.js, що суперечить обраній архітектурі єдиного застосунку [18]. Клієнт встановлює з'єднання один раз через вбудований браузерний `EventSource` і отримує оновлення в момент їх появи без необхідності повторних запитів. Порівняно з `polling` через бібліотеки `React Query` або `SWR`, де фронтенд автоматично запитує нові дані з заданим інтервалом, SSE забезпечує нижчу затримку та менше навантаження на сервер - проте `polling` залишається доцільним резервним підходом у випадках коли постійне з'єднання недоступне або недоцільне.

Фронтенд-частина системи реалізована з використанням серверних та клієнтських компонентів React в рамках архітектури App Router. Статичні елементи інтерфейсу та початкові дані завантажуються через серверні компоненти, що забезпечує швидке початкове відображення сторінки. Динамічні елементи, тобто графіки параметрів у реальному часі, числові індикатори поточних значень та панелі діагностичних сповіщень реалізовані як клієнтські

компоненти що підписуються на SSE з'єднання і оновлюються в момент надходження нових даних. Для візуалізації часових рядів використовуються бібліотеки побудови графіків, що забезпечують інтерактивне відображення динаміки параметрів за обраний часовий проміжок. Окрім графічного відображення параметрів, інтерфейс може містити інтерактивну схему розташування стрінгів фотоелектричної установки, де кожен стрінг відображає поточний стан у вигляді колірної індикації, при взаємодії з ним користувач отримує детальні електричні параметри відповідного D103, а також показники температури та інсоляції з підключених датчиків D105. Додатково інтерфейс може містити спливаюче вікно сповіщень, яке інформує оператора про виявлені відхилення параметрів без необхідності самостійного пошуку проблемного стрінга, детальніше механізм виявлення таких відхилень розглядається в підрозділі 2.5. Інтерфейс реалізований як адаптивний, що забезпечує коректне відображення як на десктопних, так і на мобільних пристроях без необхідності розробки окремого застосунку.

Система також передбачає механізм автентифікації та авторизації для розмежування доступу до даних моніторингу. Реалізація автентифікації в Next.js App Router може бути виконана з використанням бібліотеки NextAuth.js, яка забезпечує підтримку різних провайдерів автентифікації та інтегрується з серверними компонентами і API Routes без додаткових ускладнень архітектури. Підтримка кількох акаунтів дозволяє використовувати систему одночасно для моніторингу кількох об'єктів або операторів - кожен користувач має доступ виключно до своїх пристроїв, налаштувань та історії вимірювань. Це є особливо актуальним для компаній що обслуговують кілька фотоелектричних установок одночасно, оскільки дозволяє централізовано керувати моніторингом без змішування даних різних об'єктів.

2.5 Алгоритм діагностики стану сонячних панелей

Забезпечення надійної та ефективної роботи фотоелектричних установок вимагає не лише безперервного збору вимірювальних даних, але й їх систематичного аналізу з метою виявлення відхилень від нормального режиму роботи. Дослідження показують, що несправності у фотоелектричних системах можуть бути класифіковані як електричні, механічні та екологічні, і кожна з цих категорій може суттєво знижувати ефективність генерації електроенергії або призводити до передчасної деградації обладнання [20]. У розробленій системі діагностика базується на аналізі параметрів що збираються в реальному часі - електричних показників від D103 та теплофізичних і кліматичних параметрів від D105 - і передбачає кілька взаємодоповнюючих методів виявлення несправностей.

Одним із ключових факторів що впливають на ефективність сонячних панелей є температура. Дослідження показують що потужність фотоелектричних модулів зменшується лінійно зі зростанням температури, а кількісною характеристикою цього явища є температурний коефіцієнт потужності [21]. Для найпоширеніших типів панелей середні значення температурного коефіцієнта становлять $-0.446\%/^{\circ}\text{C}$ для монокристалічного кремнію та $-0.387\%/^{\circ}\text{C}$ для полікристалічного кремнію [21].

Графік лінійної залежності вихідної потужності монокристалічного модуля від температури наведено на рисунку 2.4.

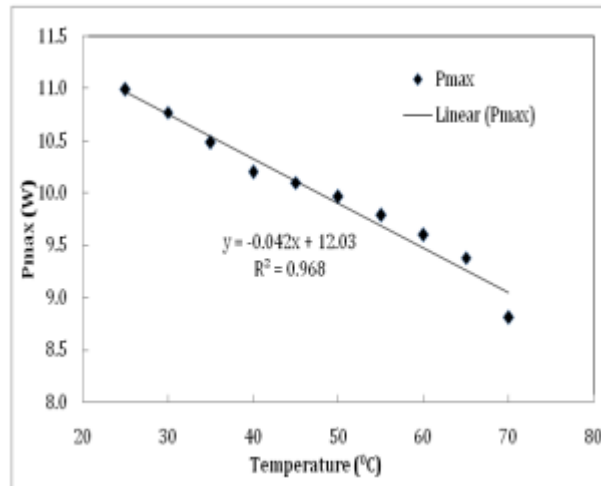


Рисунок 2.3 - Залежність вихідної потужності монокристалічного фотоелектричного модуля від температури [21]

Тонкоплівкові модулі демонструють значно нижчу чутливість до температури, що є їх перевагою в умовах високих температур навколишнього середовища. Стандартні умови тестування панелей (STC) передбачають температуру модуля 25°C та інсоляцію 1000 Вт/м², тому будь-яке відхилення від цих умов призводить до зміни фактичної потужності відносно номінальної. Діагностика температурного стану панелей в системі здійснюється шляхом безперервного моніторингу різниці між температурою поверхні панелі та температурою навколишнього середовища. Аномально висока різниця температур може свідчити про виникнення гарячих точок - локальних зон перегріву що виникають внаслідок часткового затінення, дефектних байпасних діодів або пошкоджень клітин панелі і можуть призводити до теплового руйнування модуля [20]. Порогове значення температури поверхні панелі понад 60°C є індикатором потенційної несправності і потребує додаткової перевірки.

Порівняльна діагностика стрінгів є одним із найефективніших методів виявлення локальних несправностей у фотоелектричній установці. Оскільки кожен стрінг підключений до окремого енергомонітора D103, система має можливість порівнювати електричні параметри всіх стрінгів між собою в реальному часі. За умови однакового рівня інсоляції та температури, стрінги що

перебувають у нормальному стані повинні демонструвати схожі значення напруги, струму та потужності. Відхилення показників окремого стрінга від середніх значень по установці є сигналом про можливе часткове затінення, пошкодження модуля або несправність з'єднань у даному стрінгу. Часткове затінення є особливо поширеною причиною зниження продуктивності, навіть невелика затінена ділянка може непропорційно знижувати вихідну потужність цілого стрінга через послідовне з'єднання модулів [20]. Система фіксує відхилення потужності окремого стрінга від середнього значення по установці, і при перевищенні встановленого порогу формує діагностичне сповіщення із зазначенням ідентифікатора проблемного стрінга.

Діагностика падіння потужності здійснюється за двома підходами. Перший підхід це порівняння фактичної потужності з очікуваною, розрахованою на основі поточного рівня інсоляції що вимірюється датчиком на аналоговому вході D105, та температурного коефіцієнта панелей. Якщо фактична потужність суттєво нижча від розрахункової за поточних кліматичних умов, це свідчить про деградацію панелей або наявність прихованої несправності. Другий підхід це аналіз довгострокових тенденцій за даними з колекції `measurements_hourly` в MongoDB, що дозволяє виявляти поступове зниження ефективності установки з часом, характерне для природної деградації фотоелементів. Дослідження підтверджують що деградація є невід'ємним процесом для всіх типів панелей і може суттєво впливати на довгостроковий енергетичний вихід установки [20]. Порівняння показників за аналогічні періоди різних років дозволяє кількісно оцінити темп деградації конкретної установки.

Всі три методи діагностики реалізовані на рівні серверної логіки Next.js і працюють паралельно в режимі реального часу. При виявленні відхилення будь-яким із методів система записує діагностичну подію до бази даних та формує сповіщення що відображається у спливаючому вікні інтерфейсу користувача, як описано в підрозділі 2.4. Такий підхід забезпечує оперативне інформування

оператора про потенційні несправності без необхідності постійного ручного моніторингу параметрів кожного стрінга окремо.

Висновок до розділу 2

У другому розділі розроблено та обґрунтовано архітектуру інформаційної системи для оперативного вимірювання та діагностики параметрів сонячних панелей у процесі експлуатації.

Визначено чотирирівневу структуру системи що включає рівень вимірювання, рівень передачі даних, рівень обробки та зберігання і рівень візуалізації. Як основне апаратне забезпечення обрано енергомонітор Smart Maic D103 для вимірювання електричних параметрів трифазної мережі та лічильник Smart Maic D105 для підключення датчиків температури, вологості та інсоляції, що забезпечує комплексний моніторинг як електричних так і теплофізичних параметрів установки.

Обґрунтовано вибір протоколів передачі даних - MQTT як основного каналу для передачі вимірювань у режимі реального часу та REST API як резервного механізму для отримання історичних даних. Архітектурна перевага MQTT полягає в моделі публікації та підписки що забезпечує надходження даних на сервер в момент їх появи без необхідності постійного опитування пристроїв.

Програмна частина реалізована на базі Next.js з використанням архітектури App Router що поєднує серверну та клієнтську частини в рамках єдиного проєкту. Для зберігання даних використовується MongoDB з двома колекціями, для короткострокового зберігання сирих вимірювань та для довгострокової аналітики. Передача актуальних даних на фронтенд реалізована через механізм Server-Sent Events.

Розроблено три взаємодоповнюючі методи діагностики: температурна діагностика з урахуванням коефіцієнта потужності панелей ($-0.446\%/^{\circ}\text{C}$ для монокристалічних та $-0.387\%/^{\circ}\text{C}$ для полікристалічних модулів), порівняльна діагностика стрінгів для виявлення затінення та локальних несправностей, а також аналіз відхилення фактичної потужності від очікуваної з урахуванням

рівня інсоляції. Запропонована система забезпечує комплексний моніторинг та автоматичну діагностику фотоелектричної установки в режимі реального часу.

РОЗДІЛ 3: МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

3.1 Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки системи

Метрологічне забезпечення інформаційної системи діагностики сонячних панелей передбачає визначення та аналіз нормованих метрологічних характеристик усіх засобів вимірювальної техніки, що входять до її складу. Відповідно до ДСТУ 2681-94, основними метрологічними характеристиками засобів вимірювальної техніки є похибка вимірювання, роздільна здатність та діапазон вимірювань [22].

У складі розробленої системи використовуються такі засоби вимірювальної техніки: енергомонітор Smart Maic D103, універсальний лічильник Smart Maic D105 з підключеними датчиками температури DS18B20, датчиком температури та вологості DHT22, а також фотодіодним датчиком інсоляції.

Енергомонітор Smart Maic D103 забезпечує вимірювання електричних параметрів трифазної мережі: напруги (V), сили струму (A), активної потужності (Вт), зворотної активної потужності (rW), активної енергії (Вт·год), зворотної активної енергії (rWh) та коефіцієнта потужності ($\cos \phi$). Нормовані метрологічні характеристики приладу наведено в таблиці 3.1 [9].

Таблиця 3.1 - Метрологічні характеристики енергомонітора Smart Maic D103

Параметр	Діапазон вимірювань	Похибка вимірювання	Роздільна здатність
Напруга	0...500 В	$\pm 0,5\%$	0,1 В
Струм	0...100 А	$\pm 0,5\%$	0,01 А
Активна потужність	0...50 кВт	$\pm 1,0\%$	1 Вт
Коефіцієнт потужності	0...1	$\pm 0,01$	0,001
Активна енергія	0...999999 кВт·год	$\pm 0,5\%$	0,01 кВт·год

Примітка: значення похибок наведено відповідно до технічної документації виробника

Для вимірювання температури панелей та навколишнього повітря використовується цифровий датчик DS18B20, що працює за інтерфейсом 1-Wire. Датчик забезпечує вимірювання температури в діапазоні від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$ з основною похибкою $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ у робочому діапазоні від 0°C до $+70^{\circ}\text{C}$ та роздільною здатністю до $0,0625^{\circ}\text{C}$ при 12-бітному режимі перетворення [24].

Вимірювання відносної вологості повітря та дублювання каналу температури забезпечується датчиком DHT22 (AM2302) виробництва Aosong Electronics. Основні метрологічні характеристики датчика наведено в таблиці 3.2 [25].

Таблиця 3.2 - Метрологічні характеристики датчика DHT22

Параметр	Діапазон вимірювань	Похибка вимірювання	Роздільна здатність
Відносна вологість	0...100% RH	$\pm 2\%$ RH	0,1% RH
Температура	$-40...+80^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	0,1 $^{\circ}\text{C}$

Для вимірювання рівня сонячної інсоляції застосовується фотодіодний датчик. Відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN ІЕС 61724-1:2022, для систем моніторингу фотоелектричних установок клас В допускає похибку вимірювання інсоляції до $\pm 5\%$ [23]. Фотодіодні датчики належать саме до цього класу точності, що є прийнятним для задач оперативної діагностики.

Усі засоби вимірювальної техніки системи пройшли заводське калібрування виробника, що підтверджується відповідною технічною документацією. Отримані метрологічні характеристики є вихідними даними для подальшого оцінювання похибок вимірювань та аналізу їх впливу на точність діагностики сонячних панелей.

3.2 Оцінювання похибок вимірювань системи

Похибки вимірювань є невід'ємною характеристикою будь-якої вимірювальної системи. Залежно від характеру поведінки в часі розрізняють систематичні та випадкові похибки [28, с. 75]. Систематичні похибки є сталими або закономірно змінними і можуть бути виявлені та враховані при калібруванні засобів вимірювальної техніки. Випадкові похибки змінюються нерегулярно і непередбачувано, їх майбутні значення можна прогнозувати лише з певною часткою ймовірності [28, с. 76].

У розробленій системі діагностики сонячних панелей похибки вимірювань формуються під впливом двох груп факторів. До першої групи належать інструментальні похибки, зумовлені метрологічними характеристиками самих засобів вимірювальної техніки - вони є систематичними і нормуються виробниками у технічній документації. До другої групи належать похибки, спричинені умовами експлуатації: змінами температури навколишнього середовища, підвищеною вологістю, електромагнітними завадами від силового обладнання фотоелектричної установки. Ці фактори можуть збільшувати випадкову складову похибки вимірювань порівняно з нормованими значеннями.

Оцінювання похибок вимірювань виконується у такій послідовності: визначення виразу похибки, оцінювання характеристик окремих складових похибок вимірювань величин-аргументів, оцінювання характеристик сумарної похибки та записування результату з вказанням його невизначеності [28, с. 109].

Основним джерелом інформації про метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки є технічна документація виробників. Похибки кожного вимірювального каналу системи визначені на основі технічної документації відповідних приладів та датчиків і наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Похибки вимірювальних каналів системи

Канал вимірювання	Прилад	Межа похибки
Напруга	Smart Maic D103	$\pm 0,5\%$
Струм	Smart Maic D103	$\pm 0,5\%$
Активна потужність	Smart Maic D103	$\pm 1\%$
Коефіцієнт потужності	Smart Maic D103	$\pm 0,01$
Температура панелей	DS18B20	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Температура повітря/вологість	DHT22	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ / $\pm 2\% \text{ RH}$
Інсоляція	Фотодіодний датчик	$\pm 5\%$

Особливої уваги заслуговує оцінювання впливу похибки вимірювання температури на точність температурної діагностики, оскільки саме цей канал є ключовим для розрахунку очікуваної потужності панелей. У розробленій системі температурна корекція потужності виконується з використанням температурних коефіцієнтів: $-0,446\%/^{\circ}\text{C}$ для монокристалічних та $-0,387\%/^{\circ}\text{C}$ для полікристалічних модулів.

При похибці вимірювання температури $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ похибка розрахунку температурної корекції потужності становитиме:

для монокристалічних панелей: $0,5 \times 0,446 = 0,223\%$,

для полікристалічних панелей: $0,5 \times 0,387 = 0,194\%$.

Тобто похибка визначення очікуваної потужності внаслідок похибки вимірювання температури не перевищує $0,23\%$, що є незначним порівняно з нормованою похибкою вимірювання потужності енергомонітором D103 ($\pm 1,0\%$) та прийнятним для задач оперативної діагностики.

Похибка вимірювання інсоляції $\pm 5\%$ безпосередньо впливає на точність розрахунку очікуваної потужності, проте навіть при максимальному відхиленні система здатна виявляти деградацію панелей та локальні несправності. Метрологічні характеристики обраних засобів вимірювальної техніки забезпечують достатню точність для виконання задач оперативної діагностики фотоелектричної установки в режимі реального часу.

3.3 Вплив метрологічних характеристик на точність діагностики

Точність діагностики фотоелектричної установки безпосередньо залежить від метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки системи. У розробленій системі реалізовано три взаємодоповнюючі методи діагностики, кожен з яких має різну чутливість до похибок вимірювальних каналів.

Температурна діагностика ґрунтується на порівнянні фактичної потужності панелей з очікуваною, скоригованою на поточну температуру з використанням температурних коефіцієнтів. Як показано в підрозділі 3.2, похибка вимірювання температури датчиком DS18B20 ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) спричиняє похибку розрахунку температурної корекції потужності не більше 0,223% для монокристалічних та 0,194% для полікристалічних модулів. Похибка вимірювання потужності енергомонітором D103 складає $\pm 1,0\%$, тому сумарна похибка температурної діагностики визначається переважно точністю вимірювання потужності, тоді як внесок похибки температурного каналу є незначним. Це підтверджує доцільність використання датчика DS18B20 як достатнього за точністю засобу для даного методу діагностики.

Порівняльна діагностика стрінгів передбачає порівняння параметрів окремих стрінгів між собою з метою виявлення затінення та локальних несправностей. Ключовою перевагою методу з метрологічної точки зору є те, що всі стрінги вимірюються одним і тим же приладом - енергомонітором Smart Maic D103, завдяки чому систематична похибка приладу однаково впливає на результати вимірювань усіх стрінгів і при їх порівнянні взаємно компенсується. Таким чином, точність порівняльної діагностики визначається не абсолютною похибкою вимірювання, а стабільністю показів приладу, що робить даний метод найбільш захищеним від впливу метрологічних характеристик серед усіх трьох реалізованих методів діагностики. Додатково система використовує механізм агрегування даних для формування усереднених показників за певні періоди часу, що дозволяє зменшити вплив випадкової складової похибки на результати

діагностики, оскільки випадкові похибки при достатній кількості вимірювань частково компенсують одна одну [26, с. 76].

Аналіз відхилення фактичної потужності від очікуваної є найбільш вимогливим до точності вимірювань методом, оскільки передбачає розрахунок очікуваної потужності з урахуванням рівня інсоляції. Похибка вимірювання інсоляції фотодіодним датчиком складає $\pm 5\%$, що є найбільшим значенням серед усіх вимірювальних каналів системи та відповідає класу В за ДСТУ EN IEC 61724-1:2022 [23]. Ця похибка безпосередньо переноситься на розрахунок очікуваної потужності, що знижує чутливість методу до незначних відхилень у роботі панелей, проте для виявлення суттєвої деградації модулів та значних несправностей точність фотодіодного датчика є цілком прийнятною.

Порівняльний аналіз впливу метрологічних характеристик на точність трьох діагностичних методів наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Вплив похибок вимірювань на точність діагностичних методів

Метод діагностики	Ключовий вимірювальний канал	Похибка каналу	Вплив на діагностику
Температурна діагностика	Потужність, температура	$\pm 1,0\%$, $\pm 0,5^\circ\text{C}$	Незначний вплив температурного каналу
Порівняльна діагностика стрінгів	Потужність	$\pm 1,0\%$	Мінімальний завдяки компенсації систематичної похибки
Аналіз відхилення від очікуваної потужності	Інсоляція, потужність	$\pm 5\%$, $\pm 1,0\%$	Найбільший вплив через похибку інсоляції

Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки розробленої системи в цілому відповідають вимогам оперативної діагностики фотоелектричної установки.

Найвищу точність забезпечує порівняльна діагностика стрінгів завдяки компенсації систематичних похибок при відносних вимірюваннях, тоді як метод аналізу відхилення від очікуваної потужності є найбільш чутливим до похибок вимірювань, зокрема до точності датчика інсоляції, що слід враховувати при інтерпретації результатів діагностики.

Висновок до розділу 3

У даному розділі виконано метрологічне забезпечення інформаційної системи діагностики сонячних панелей, що охоплює аналіз метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки, оцінювання похибок вимірювань та аналіз їх впливу на точність діагностичних алгоритмів.

Визначено метрологічні характеристики усіх засобів вимірювальної техніки системи. Енергомонітор Smart Maic D103 забезпечує вимірювання електричних параметрів з похибкою $\pm 0,5\%$ для напруги та струму і $\pm 1,0\%$ для активної потужності. Датчик температури DS18B20 має похибку $\pm 0,5^\circ\text{C}$ у робочому діапазоні, датчик DHT22 - похибку температури $\pm 0,5^\circ\text{C}$ та вологості $\pm 2\%$ RH. Фотодіодний датчик інсоляції відповідає класу B за ДСТУ EN IEC 61724-1:2022 з похибкою до $\pm 5\%$.

Встановлено, що похибка вимірювання температури датчиком DS18B20 спричиняє похибку розрахунку температурної корекції потужності не більше $0,223\%$ для монокристалічних та $0,194\%$ для полікристалічних модулів, що є незначним порівняно з похибкою вимірювання потужності.

Аналіз впливу метрологічних характеристик на точність діагностики показав, що найвищу захищеність від похибок вимірювань забезпечує порівняльна діагностика стрінгів, оскільки систематична похибка приладу при відносних вимірюваннях взаємно компенсується. Метод аналізу відхилення від очікуваної потужності є найбільш чутливим до похибок вимірювань через значну похибку датчика інсоляції. Використання механізму агрегування даних додатково зменшує вплив випадкової складової похибки на результати діагностики.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було вирішено актуальне науково-практичне завдання - розроблено інформаційну систему оперативного вимірювання та діагностики параметрів сонячних панелей у процесі експлуатації, яка забезпечує комплексний моніторинг фотоелектричної установки в режимі реального часу.

У першому розділі проведено аналіз предметної області, розглянуто три основних типи фотоелектричних модулів - монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові, визначено їх характерні переваги та обмеження залежно від умов експлуатації. Порівняльний аналіз існуючих комерційних рішень моніторингу, зокрема FusionSolar, SolarEdge та ThingSpeak, виявив їх суттєві обмеження - прив'язку до обладнання конкретного виробника та закритість протоколів обміну даними. Встановлено, що платформа Smart-MAIC з відкритим REST API та підтримкою MQTT є оптимальною основою для розробки власної системи діагностики.

У другому розділі розроблено та обґрунтовано архітектуру інформаційної системи. За своєю архітектурою система є розподіленою і складається з чотирьох основних рівнів: рівня вимірювання, рівня передачі даних, рівня обробки та зберігання, а також рівня візуалізації. Як основне апаратне забезпечення обрано енергомонітор Smart Maic D103 та лічильник Smart Maic D105 з підключеними датчиками температури, вологості та інсоляції. Програмну частину реалізовано на базі Next.js з використанням MongoDB для зберігання даних та механізму Server-Sent Events для передачі актуальних даних на фронтенд. Розроблено три взаємодоповнюючі методи діагностики: температурна діагностика з урахуванням температурних коефіцієнтів панелей, порівняльна діагностика стрінгів для виявлення затінення та локальних несправностей, а також аналіз відхилення фактичної потужності від очікуваної з урахуванням рівня інсоляції.

У третьому розділі виконано метрологічне забезпечення розробленої системи. Визначено метрологічні характеристики усіх засобів вимірювальної

техніки - енергомонітора Smart Maic D103, датчиків температури DS18B20 та DHT22, фотодіодного датчика інсоляції. Встановлено, що похибка вимірювання температури спричиняє похибку розрахунку температурної корекції потужності не більше 0,223%, що є незначним порівняно з похибкою вимірювання потужності $\pm 1,0\%$. Аналіз впливу метрологічних характеристик на точність діагностики показав, що найвищу захищеність від похибок забезпечує порівняльна діагностика стрінгів завдяки взаємній компенсації систематичних похибок, тоді як метод аналізу відхилення від очікуваної потужності є найбільш чутливим до похибки датчика інсоляції.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої системи для підвищення ефективності експлуатації сонячних електростанцій, забезпечення оперативного контролю технічного стану обладнання та зменшення ризику втрати продуктивності через несвоєчасне виявлення несправностей. Розроблена система є функціональним MVP, що містить базовий набір діагностичних методів і може бути розширена шляхом додавання нових алгоритмів діагностики та аналітичних інструментів відповідно до потреб конкретної фотоелектричної установки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Титко Р. В., Калініченко В. М. Відновлювальні джерела енергії (досвід Польщі для України). 2-ге видання. Варшава–Краків–Полтава, 2012. 653 с
2. Колонтаєвський Ю. П. Фотоенергетика : навчальний посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай, С. В. Котелевець; Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 162 с.
3. Федкін М. EME 812: Комунальна сонячна електроенергія та концентрація. Урок 1.2 – Ефективність перетворення / Коледж наук про Землю та мінеральні ресурси Університету штату Пенсільванія. URL: <https://courses.ems.psu.edu/eme812/node/4>
4. Посібник з сонячних фотоелектричних технологій. EU4Business, KfW. Київ, 2023. URL: https://bdf.gov.ua/wp-content/uploads/2023/09/2023-08-01-Solar-PV-technology-manual_UKR-2.pdf
5. Huawei Technologies Co., Ltd. FusionSolar Smart PV Power Plant Management System. URL: <https://solar.huawei.com/en/products/smart-pv-plant-management-system/>
6. Huawei Technologies Co., Ltd. FusionSolar Smart PV Management System. Datasheet. Version 01-202411. URL: <https://solar.huawei.com/download?p=%2F-%2Fmedia%2FSolar%2Fdatasheet%2FSmartPVMS-Plant-DatasheetEN.pdf>
7. SolarEdge Technologies. Monitoring Server API Documentation. URL: https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se_monitoring_api.pdf
8. MathWorks. ThingSpeak Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/help/thingspeak/>
9. smart-MAIC. Моніторинг ресурсів на всі випадки. URL: <https://smart-maic.com/uk/>

10. Бацала Я. В., Гладь І. В., Николин У. М. Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2013. № 4(49). 90 с.
11. Греггерсен К. MQTT проти REST в IoT. Nabto. URL: <https://www.nabto.com/mqtt-vs-rest-iot/>
12. Сайт Next.js: Next.js Documentation. Vercel. URL: <https://nextjs.org/docs>
13. Сайт MongoDB: MongoDB Documentation. MongoDB, Inc. URL: <https://www.mongodb.com/docs/>
14. GeeksforGeeks: Difference Between SQL and NoSQL. GeeksforGeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/sql/difference-between-sql-and-nosql/>
15. MQTT клієнт. smart-MAIC Support. URL: <https://support.smart-maic.com/uk/knowledge-bases/2/articles/175-mqtt-klnt>
16. API для сервера. smart-MAIC Support. URL: <https://support.smart-maic.com/uk/knowledge-bases/2/articles/43-api-dlya-servera>
17. D105 G2 User Manual. smart-MAIC. URL: <https://smart-maic.com/manual/d105.html>
18. Поточкова передача даних у Next.js 15: WebSocket проти Server-Sent Events. HackerNoon. URL: <https://hackernoon.com/streaming-in-nextjs-15-websockets-vs-server-sent-events>
19. Документація React. Meta Open Source. URL: <https://react.dev/>
20. Кулл К., Асад Б., Хан М.А., Насір М.У., Калласт А., Ваїманн Т. Несправності, відмови, надійність та прогностичне технічне обслуговування підключених до мережі сонячних систем: комплексний огляд. Applied Sciences. 2025. Вип. 15. С. 11461
21. Даш П.К., Гупта Н.С. Вплив температури на вихідну потужність різних комерційно доступних фотоелектричних модулів. International Journal of Engineering Research and Applications. 2015. Вип. 5, № 1
22. ДСТУ 2681-94. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994. 68 с.

23. ДСТУ EN ІЕС 61724-1:2022. Ефективність фотоелектричної системи. Частина 1: Моніторинг. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 64 с.
24. DS18B20. Програмований цифровий термометр з роздільною здатністю 1-Wire: технічна документація. Analog Devices, 2019. URL:
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>
25. DHT22 (AM2302). Цифровий датчик відносної вологості та температури: технічна документація. Aosong Electronics Co., Ltd. URL:
<https://cdn.sparkfun.com/assets/f/7/d/9/c/DHT22.pdf>
26. Метрологія та вимірювальна техніка / за ред. Є.С. Поліщука. Львів: Бескид Біт, 2003. 544 с.