

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інформаційних електронних систем

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА
МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОГЕНЕРАЦІЇ»**

Виконав: студент 2-го курсу, групи КІВТ-24м
спеціальності 175 – Інформаційно -
вимірювальні технології

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Черешнюк І.Д.

(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н доц. каф. ІРТС

Дудатьєв І.А.

(прізвище та ініціали)

« 15 » 12 2025 р.

Опонент: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ,

Сальченко О.В.

(прізвище та ініціали)

« 16 » 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« 17 » 12 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність – 175 Інформаційно - вимірювальні технології
Освітньо-професійна програма – Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС

Д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Черешнюку Іван Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Інформаційно-вимірювальна система моніторингу параметрів сонячних панелей для підвищення ефективності енергогенерації»

керівник роботи к.т.н., доц. кафедри ІРТС Дудатьєв І.А.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 24.09.2025 р. №313.

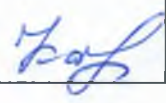
2. Строк подання студентом роботи 15.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: Електрична напруга сонячної панелі. Сила струму, що генерується панеллю. Температурна поверхня сонячної панелі. Рівень сонячної інсоляції.

4. Зміст текстової частини: Теоретичні основи функціонування сонячних панелей та методи їх моніторингу. Теоретичні основи побудови ІВС для моніторингу сонячних панелей. Розробка програмного та алгоритмічного забезпечення ІВС моніторингу параметрів сонячних панелей. Метрологічне забезпечення ІВС моніторингу сонячних панелей. Економічна частина. Висновки. Список використання джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Приклад роботи сонячної панелі. Монокристалічна сонячна панель. Полікристалічна сонячна панель. Тонкоплівкова (аморфна) сонячна панель. Вольт-амперна характеристика сонячних панелей. Залежність напруги сонячної панелі від температури. Сенсор напруги (ZMPT101B). Сенсор струму (ACS712). Сенсор освітленості та інсоляції (GY-114). Серверна частина та візуалізація.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	Дудатьєв І.А. к.т.н. доцент каф. ІРТС		
Економічна частина	Кавецький В.В. доцент каф. ЕПВМ, доцент, к.е.н.,		

7. Дата видачі завдання 16.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

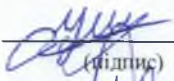
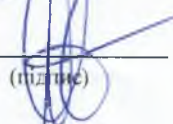
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2025-05.09.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	07.09.2025-14.09.2025	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	15.09.2025-28.09.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	30.09.2025-20.10.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	21.10.2025-03.11.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини МКР.	28.10.2025-01.11.2025	
7.	Економічна частина.	02.11.2025-12.11.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	13.11.2025-17.11.2025	
9.	Нормоконтроль.	29.11.2025-03.12.2025	
10.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	04.12.2025-17.12.2025	
11.	Захист МКР ЕК.	18.12.2025-19.12.2025	

Студент

Черешнюк І.Д.

Керівник роботи

Дудатьєв І.А.


(підпис)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311

Черешнюк І.Д. Інформаційно-вимірювальна система моніторингу параметрів сонячних панелей для підвищення ефективності енергогенерації. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 175 – інформаційно-вимірювальні технології, освітня програма – комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 112 с. На українській мові. Бібліогр.: 21 назв; Табл. 13; Рис. 10.

У магістерській кваліфікаційній роботі представлено результати розробки інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів сонячних панелей, спрямованої на підвищення ефективності виробництва електроенергії. Проведено аналіз принципів роботи фотогальванічних панелей, алгоритмів максимального відбору потужності (MPPT) та основних факторів, що впливають на продуктивність СЕС, зокрема невідповідності між модулями, часткового затінення та забруднення поверхні панелей, а також оцінено втрати енергії, зумовлені несвоєчасним очищенням.

Запропоновано архітектуру інформаційно-вимірювальної системи на основі мікроконтролерів із датчиками струму, напруги, температури та сонячної освітленості, що забезпечує збір і аналіз даних у реальному часі. Визначено метрологічні характеристики сенсорів, оцінено похибки вимірювань із використанням методики GUM і методу Монте-Карло, а також виконано економічну оцінку доцільності впровадження системи, яка показала можливість підвищення річного виробітку СЕС на 3–5% та оптимізації обслуговування обладнання.

Ключові слова: сонячна панель, фотогальванічна станція, моніторинг, MPPT, невідповідність модулів, забруднення панелей, ефективність, метрологія, невизначеність, калібрування

ABSTRACT

Chereshniuk I.D. Information-measuring system for monitoring solar panel parameters to improve energy generation efficiency. Master's qualification thesis in specialty 175 – Information and Measurement Technologies, educational program – Computerized Information and Measurement Technologies. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 112 p. In Ukrainian. Bibliography: 21 titles; Tables: 13; Figures: 10.

The master's thesis presents the results of the development of an information and measurement system for monitoring solar panel parameters, aimed at increasing the efficiency of electricity production. An analysis of the principles of photovoltaic panels, maximum power point tracking (MPPT) algorithms, and the main factors affecting the performance of solar power plants, in particular, mismatches between modules, partial shading, and contamination of panel surfaces, was conducted, and energy losses due to untimely cleaning were assessed.

An architecture for an information and measurement system based on microcontrollers with current, voltage, temperature, and solar irradiance sensors is proposed, which provides real-time data collection and analysis. The metrological characteristics of the sensors are determined, measurement errors are estimated using the GUM methodology and the Monte Carlo method, and an economic assessment of the feasibility of implementing the system is performed, which showed the possibility of increasing the annual output of the solar power plant by 3–5% and optimizing equipment maintenance.

Keywords: solar panel, photovoltaic station, monitoring, MPPT, module mismatch, panel contamination, efficiency, metrology, uncertainty, calibration

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА МЕТОДИ ЇХ МОНІТОРИНГУ	12
1.1 Сучасний стан сонячної енергетики та актуальність моніторингу	12
1.2 Фізичні принципи перетворення сонячної енергії	13
1.3 Типи сонячних панелей та їх характеристики	17
1.4 Електричні характеристики фотоелектричних модулів	22
1.5 Вплив зовнішніх факторів на продуктивність сонячних панелей	25
1.6 Моделі деградації фотоелектричних модулів	27
1.7 Методи моніторингу фотоелектричних систем	28
1.8 Вимоги до сучасних інформаційно-вимірювальних систем	29
1.9 Висновки до розділу	30
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ	31
2.1 Основні вимірювальні параметри сонячної панелі	31
2.2 Сенсорні елементи для вимірювання параметрів	35
2.3 Обробка та фільтрація виміряних даних	45
2.4 Оцінка ефективності роботи панелі	46
2.5 Алгоритмічні підходи до виявлення аномалій	46
2.6 Технології передавання даних у ІВС	47
2.7 Висновки до розділу	49
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ТА АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІВС МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ	50
3.1 Концептуальні засади побудови програмного забезпечення ІВС	50
3.2 Структура програмно-алгоритмічного комплексу	51
3.3 Програмне забезпечення інформаційно-вимірювальної системи	53

3.4 Алгоритмічні аспекти збору вимірювальної інформації	60
3.5 Цифрова обробка та фільтрація сенсорних даних.....	62
3.6 Аналітичні методи розрахунку параметрів роботи сонячної панелі	64
3.7 Модуль передачі даних та мережевої взаємодії.....	65
3.8 Висновки до розділу.....	66
4 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	
МОНІТОРИНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ	67
4.1 Загальні принципи та завдання метрологічного забезпечення ІВС	67
4.2 Вимірювані параметри та вимоги до їх точності	68
4.3 Засоби вимірювання та їх метрологічні властивості	69
4.4 Похибки вимірювань, їх природа та методи компенсації.....	71
4.5 Калібрування та верифікація вимірювальних каналів ІВС	72
4.6 Підвищення ефективності енергогенерації через метрологічне забезпечення ІВС	74
4.7 Висновки до розділу.....	75
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	77
5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково- Технічної розробки.....	77
5.2 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	79
5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором.....	91
5.4 Висновки до розділу.....	96
ВИСНОВКИ	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	99
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал	101
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи	106
Додаток В (довідниковий). Фрагмент лістингу програмного забезпечення ...	109

ВСТУП

Актуальність

Шалене нарощування частки енергії з відновлюваних ресурсів, а особливо сонячних електростанцій (СЕС), вимагає вдосконалення процесів перетворення сонячного світла на електрику. Якість функціонування сонячних модулів на пряму корелює зі ступенем контролю їхніх електричних і фізичних властивостей, які, власне, формують реальний обсяг виробітку, швидкість занепаду характеристик та загальний стан обладнання. У повсякденній діяльності власники малих, середніх та великих сонячних установок часто не мають змоги забезпечити належний контроль поточних робочих показників системи, що призводить до суттєвих втрат згенерованої енергії, запізненого виявлення поломок і прискореного зносу елементів.

Наявні рішення для нагляду, як правило, обмежуються лише елементарним моніторингом видатної потужності, ігноруючи при цьому вплив температурних умов, рівня освітлення, струмових режимів, а також не надаючи засобів для оцінки ККД та передбачення майбутнього виробітку. Проте, інтеграція сучасних систем збору та обробки даних, що поєднують сенсори струму, напруги, температури та інсоляції в єдиний комплекс з аналітичними потужностями, відкриває шлях до оптимізації роботи СЕС, збільшення їхньої фінансової віддачі та ефективнішого сервісного обслуговування.

Створення комплексної системи для обліку та контролю параметрів сонячних батарей є завданням першочергової важливості, адже це гарантує точне відстеження енергетичних показників, виявлення будь-яких відхилень, швидку діагностику та розуміння причин падіння продуктивності. Це вкрай критично в контексті розвитку енергетичної незалежності, поширення індивідуальних фотоелектричних установок та підвищення вимог до надійності й довговічності апаратури.

Мета роботи

Основою цієї магістерської роботи є розробка вимірювально-інформаційної системи, призначеної для нагляду за роботою сонячних батарей. Систему планується наділити здатністю вимірювати, обробляти та прогнозувати головні робочі показники фотоелектричної установки, досягаючи при цьому високої точності та надаючи можливість оцінювати продуктивність безпосередньо у процесі функціонування.

Для досягнення окресленої цілі передбачається виконати низку конкретних кроків:

- Провести ґрунтовний аналіз актуальних підходів до контролю та нагляду за робочими параметрами сонячних модулів.
- Детально вивчити функціонал ключових датчиків (які фіксують напругу, електричний струм, температуру та рівень сонячної інсоляції) та аргументувати вибір конкретних моделей.
- Сформулювати математичні описи для розрахунку вихідної потужності, коефіцієнта корисної дії та темпів старіння (деградації) панелей.
- Спроекувати загальну архітектуру інформаційно-вимірювальної системи та чітко визначити всі шляхи надходження вимірюваних даних.
- Розробити послідовності дій (алгоритми) для збору, очищення від шумів та подальшої обробки отриманих вимірювань.
- Створити програмне забезпечення для надійного зберігання, візуалізації та детального аналізу зафіксованих робочих показників.
- Здійснити метрологічну експертизу розробленої системи задля визначення кумулятивної похибки, притаманної вимірювальним процесам.
- Проводити практичні дослідження функціонування системи у реальних умовах та підтвердити її відповідність встановленим технічним критеріям.
- Обґрунтувати економічну доцільність впровадження цієї розробки та оцінити її потенційну ринкову привабливість.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес вимірювання та контролю електричних і фізичних параметрів сонячних панелей у складі фотоелектричної системи.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби побудови інформаційно-вимірювальної системи для підвищення ефективності роботи сонячних панелей.

Методи дослідження У роботі застосовано: методи теорії вимірювань та метрології електричних величин; математичне моделювання режимів роботи фотоелектричних панелей; методи аналізу похибок; засоби цифрової обробки сигналів; алгоритми прогнозування на основі статистичних та емпіричних моделей; схемотехнічні методи побудови малопотужних вимірювальних модулів; експериментальні методи перевірки точності та стабільності вимірювань; інструменти комп'ютерного моделювання процесів генерації електроенергії.

Наукова новизна роботи

Вперше запропоновано єдину інформаційно-вимірювальну систему, що поєднує багатоканальне зчитування параметрів сонячних модулів, розрахункову модель оцінювання ефективності та методики ідентифікації зносу панелей на основі синхронізованих вимірювань інсоляції, температури, напруги й струму, що забезпечує підвищення точності оцінки поточного стану фотоелектричних установок і своєчасне виявлення відхилень у їх роботі.

Практичне значення магістерської роботи

У ході роботи:

1. Було розроблено комплекс апаратно-програмних засобів для збору та аналізу даних із сонячних батарей за низкою параметрів.
2. Сформовано концептуальну будову системи, а також детально описано апаратуру та програмне забезпечення, задіяні у процесі вимірювання.

3. Втілено у життя математичні моделі, призначені для аналізу поточної продуктивності фотоелектричних установок та прогнозування їхньої майбутньої роботи.

4. Напрацьовані дані та висновки є корисними під час створення систем контролю для сонячних електростанцій малої, середньої та великої потужності.

5. Сформульовані підходи можуть бути впроваджені сервісними службами з метою визначення стану обладнання та оцінки темпів його старіння.

6. Проведений фінансовий аналіз доводить економічну вигоду від інтеграції цієї інформаційно-вимірювальної системи у типові умови експлуатації.

Особистий внесок автора

Основні положення, результати дослідження, побудова моделей, схем та алгоритмів, а також аналіз експериментальних даних отримано здобувачем самостійно.

Структура і обсяг роботи

Магістерська кваліфікаційна робота складається з 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить текстовий матеріал, графічні матеріали, таблиці, схеми та ілюстрації, що відображають результати дослідження та розроблення ІВС.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА МЕТОДИ ЇХ МОНІТОРИНГУ

1.1 Сучасний стан сонячної енергетики та актуальність моніторингу

Енергетика, що базується на використанні сонячного світла, посідає одне з найбільш динамічних місць у світовому секторі відновлюваних джерел електроенергії. Бурхливе нарощування кількості фотоелектричних установок, спрощення процесу їх виготовлення, здешевлення панелей та покращення їхньої надійності задали новий вектор для застосування фотоелектричних технологій як у великому промисловому масштабі, так і на побутовому рівні. Торговельні об'єкти, приватні домогосподарства, комунальні служби, агропідприємства та промислові зони активно інтегрують сонячні генераційні потужності з метою зниження залежності від зовнішніх енергоносіїв та посилення фінансової стабільності [1].

Значним імпульсом для поширення фотоелектричних рішень стало вражаюче падіння вартості встановлення одного кіловата потужності сонячної генерації — вона скоротилася майже в три рази протягом останніх 10–15 років. Проте, паралельно з цим активним розвитком галузі, постає нагальне питання щодо сталості та ефективності функціонування сонячних модулів у реальних експлуатаційних умовах. Фотоелектричні системи виявляються значно більш чутливими до зовнішніх чинників, ніж традиційні генератори, оскільки їхня виробіток безпосередньо залежить від метеорологічних умов, температури довкілля, ступеня забруднення, якості виконання монтажних робіт та специфічних електричних параметрів [1].

Аналізи демонструють, що ефективність фотоелектричних установок може знижуватися з низки причин:

1. Забруднення робочої поверхні панелей може призводити до втрат потужності у межах 20–30 %;

2. Неоптимальний кут нахилу та орієнтація конструкції спричиняють зниження на 5–15 %;
3. Затінення навіть невеликої ділянки може викликати втрати до 50–60 %;
4. Теплове перевантаження модулів призводить до зниження на 10–15 %;
5. Природна деградація матеріалів зменшує продуктивність на 0,5–2 % щороку.

Безперервний моніторинг дає змогу ідентифікувати подібні проблеми на початкових етапах, що значно підвищує сукупну продуктивність станції та продовжує термін служби обладнання.

Для великих комерційних сонячних об'єктів постійний моніторинг є невід'ємною складовою інфраструктури, проте для малих та середніх систем він часто відсутній або зводиться до обмежених журналів інвертора, які не дають змоги провести глибокий аналіз. Це актуалізує потребу у створенні загальнодоступної, високоточної системи збору та аналізу даних, яка здатна функціонувати автономно, забезпечуючи передачу інформації в режимі реального часу з високою частотою оновлення показників [2].

Контроль даних також критично важливий для обґрунтування інвестиційних рішень: власникам електростанцій необхідні достовірні відомості про фактичний обсяг виробництва, прогнозовані показники та вплив кліматичних умов. Особливої ваги набуває функціонал автоматичного виявлення нетипових режимів роботи, що дає можливість оперативно усувати аварії та попереджати фінансові збитки. У цьому контексті розробка сучасних систем моніторингу перетворюється не просто на технічне завдання, а на ключовий елемент для досягнення оптимальної експлуатації сонячних енергетичних об'єктів [3].

1.2 Фізичні принципи перетворення сонячної енергії

Принцип роботи сонячних модулів виходить із фотоелектричного явища, коли поглинання частинок світла напівпровідником спричиняє генерацію

заряджених носіїв і, як наслідок, появу електричного струму. Кремній досі залишається найпоширенішою сировиною для виготовлення фотоелементів, оскільки він демонструє оптимальне співвідношення вартості виробництва та робочих характеристик [3].

Робота інтелектуальних систем моніторингу (ICM) побудована на засадах замкненого циклу обробки даних, який охоплює збір показників, їх очищення, аналітичний розгляд, формування висновків та подальше транслявання інформації. Іншими словами, ICM не лише збирає потоки даних, а й виконує складний інтелектуальний аналіз, що дає змогу оцінити продуктивність фотомодуля, спрогнозувати його стан і завчасно попередити про потенційні збої [3].

Однією з найважливіших вимог, що висуваються до подібних комплексів, є їхня стійкість до зовнішніх шумів, значних температурних варіацій та змін інтенсивності освітлення. З огляду на це, апаратна та програмна архітектура ICM повинна мати вбудовані механізми для компенсації відхилень, корекції помилок та адаптації робочих алгоритмів до фактичних умов експлуатації.

Ще один критичний аспект – це можливість розширення системи: вона має функціонувати з однаковою ефективністю як для одного фотоелемента, так і для об'єднання сотень чи тисяч модулів. Це досягається завдяки модульному дизайну, де кожен компонент відповідає за певну частину завдань, а додаткові елементи можуть бути інтегровані без необхідності повної реструктуризації.

Сонячні панелі слугують для захоплення чистої, відновлюваної енергії від сонця, трансформації її у електрику та подачі у мережу. Кожен сонячний модуль складається з окремих сонячних комірок, які, у свою чергу, містять шари кремнію, фосфору (який забезпечує негативний заряд) та бору (який надає позитивного заряду). Поглинаючи світлові частинки, сонячна панель одночасно виробляє електричний струм. Енергія фотонів, що потрапляють на поверхню панелі, змушує електрони залишати свої атомні орбіти та рухатися у електричному полі, створеному самою сонячною коміркою. Цей процес відомий як фотоелектричний ефект.

У збалансованій мережевій схемі сонячні батареї накопичують денну енергію, яка потім використовується у нічний час. Програмне забезпечення для обліку електроенергії дає змогу власникам сонячних установок отримати відшкодування, якщо їхні системи генерують більше енергії, ніж фактично споживається домогосподарством. В автономних сонячних системах головними компонентами є акумуляторні блоки, пристрої контролю заряду і, як правило, інвертори.

Сонячна комірка подає постійний електричний струм до акумулятора через контролер заряду. Згодом, живлення з акумулятора надходить до інвертора, який перетворює постійний струм на змінний, що потрібен для живлення побутових приладів. Завдяки інверторам, масив сонячних панелей може бути розрахований на задоволення найвищих потреб в електроживленні.

Зважаючи на принцип роботи сонячних комірок, слід відзначити, що конструкція модуля забезпечує наявність двох типів напівпровідників при подачі змінного струму для живлення побутових споживачів, комерційних будівель, транспортних засобів для відпочинку та човнів, віддалених складів, дач чи будинків, систем дистанційного керування, телекомунікаційного обладнання, контролю руху нафто- та газопроводів та багатьох інших об'єктів:

- N-шар – з надлишком електронів;
- P-шар – з дефіцитом електронів.

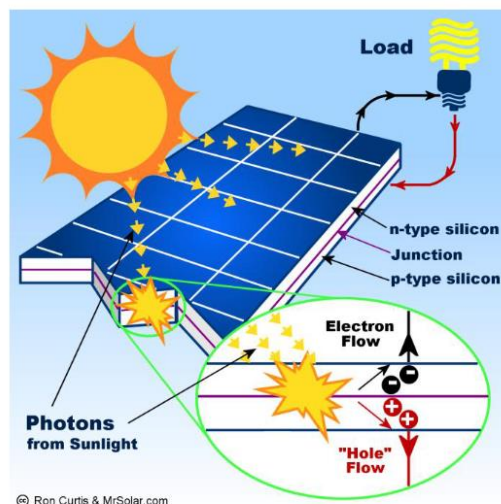


Рисунок 1.1 – Приклад роботи сонячної панелі

Коли сонячні промені потрапляють в перший шар, електрони залишають атом, і там, де є порожнє місце 2. він переходить в шар. Це дозволяє електронам рухатися по замкнутому колу, утвореному сонячними елементами та батареями. Поки цей процес триває, акумулятор заряджається.

Коли напівпровідник поглинає фотон, енергія якого дорівнює або перевищує величину його забороненої зони, відбувається перехід електронів до зони провідності. Це спричиняє формування зв'язаних пар «електрон–дірка». Електричне поле, сформоване р-n переходом, організовує рух цих носіїв заряду таким чином, що генерується електрорушійна сила, яка, у свою чергу, забезпечує протікання струму у зовнішньому колі.

Ключові параметри, що визначають ефективність цього перетворення:

- Спектр сонячного світла, що надходить;
- Температурний режим напівпровідникового середовища;
- Ступінь чистоти матеріалу та якість поверхневої обробки;
- Присутність дефектів, що сприяють рекомбінації;
- Конфігураційні рішення, застосовані у складових частинах фотоелемента.

Із підвищенням температури фотоелектричного елемента його ефективність у перетворенні енергії погіршується, а напруга, що фіксується у стані холостого ходу, починає спадати. У підґрунті цього явища лежить зміна ширини його забороненої зони, зумовлена температурним впливом. Зазвичай, кожне перевищення температури на один градус вище за 25 °C спричиняє зниження робочих характеристик сонячної панелі приблизно на 0,3–0,5 відсотка.

Незважаючи на те, що фотоелектричний ефект є фундаментальним принципом отримання енергії, інновації у цій сфері невпинно тривають, постійно вдосконалюючи конструкцію фотоелементів. Цього досягають шляхом інтеграції багатошарових структур, нанесення захисних шарів на зовнішню поверхню, створення мікрорельєфу (текстурування), застосування світловідбиваючих покриттів, а також впровадження високотехнологічних рішень типу PERC, TOPCon або гетероперехідних технологій. Усі ці дії націлені

на збільшення показника корисної дії та забезпечення кращої працездатності модулів за умов слабого освітлення.

1.3 Типи сонячних панелей та їх характеристики

У сучасній практиці використовуються три основні типи фотоелектричних модулів:

1. Монокристалічні панелі
2. Полікристалічні панелі
3. Тонкоплівкові панелі

Панель монокристалічного типу сформована з елементів, зроблених з єдиного кристала кремнію. Їхня відмінність – високий ступінь перетворення енергії (ККД), що коливається в межах 17%–25%, та тривалий ресурс роботи – 20–25 років. Упізнати такі панелі можна за їхнім виглядом: елементи мають форму чотирикутника з обрізаними вершинами та рівномірний відтінок – від глибокого синього до чорного. Сонячні модулі монокристалічної основи є найбільш витратними, проте вони забезпечують найкращу продуктивність у плані генерації кіловат на певний обсяг площі. Висока ціна зумовлена технологічною складністю вирівнювання кристалічних структур в одному векторі. Максимальну віддачу монокристалічні зразки демонструють, коли сонячне випромінювання потрапляє на них перпендикулярно, звідси й рекомендація монтувати їх на високих конструкціях чи відкритих територіях. У північних широтах доцільніше звернути увагу на інші моделі, проте зі зміщенням до екватора ефективність монокристалічних рішень зростає. На рисунку 1.2 наведено креслення монокристалічної сонячної панелі.



Рисунок 1.2 – Монокристалічна сонячна панель

Виробництво сонячних елементів полікристалічного типу базується на використанні кремнію, доповненого відповідними домішками. Форма цих модулів стандартна – прямокутна, а їхній відтінок зазвичай виглядає неоднорідним. Ефективність перетворення енергії в таких пристроях коливається у межах 15-18 відсотків. Вони вимагають суттєво більшої займаної території, якщо порівнювати їх із монокристалічними аналогами. Завдяки наявності кристалів, орієнтованих у різних напрямках, висока продуктивність зберігається навіть тоді, коли освітлення є розсіяним.

Хоча полікристалічні зразки поступаються в ефективності своїм монокристалічним "побратимам", саме в умовах похмурої погоди вони здатні генерувати більшу кількість енергії. Водночас, їхня ціна є нижчою порівняно з монокристалічними еквівалентами, оскільки процес їхнього створення є простішим та менш витратним. Через варіативність сировини та особливості технологічного процесу загальна кошторисна вартість конструкції значно зменшується. На відміну від виробництва монопанелей, де критично важливим є вирівнювання кристалів в одному векторі, у полікристалічних панелях орієнтація кристалів не контролюється, і лише після остигання блок підлягає різанню та фінальній обробці. Завдяки своїй привабливій ціні, полікристалічні панелі широко використовуються для монтажу на дахах як громадських, так і приватних споруд, що зумовлює їх високий попит на ринку. Ілюстративне зображення будови полікристалічної сонячної панелі представлено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Полікристалічна сонячна панель

Плівкові (аморфні) панелі. Цей різновид панелей є найбільш бюджетним, проте й віддача від них невелика: ККД сягає лише 9-13 відсотків, а тривалість експлуатації помітно гірша, ніж у двох інших видів. Вони мають найменшу вагу, бо складаються з тонкого шару кремнію, нанесеного на основу зі скла чи фольги. Через невисоку ефективність вимагається значна площа для монтажу, що тягне за собою збільшення витрат на супутні елементи, зокрема кріпильні системи. Саме завдяки технології тонких плівок виготовляються сонячні батареї за зниженою вартістю. Плівкові модулі знаходять своє активне застосування на великих сонячних електростанціях, особливо коли бюджет на придбання значних територій для панелей та накопичувачів обмежений. Монтувати прилади на тонкоплівкових сонячних елементах можна як на землі, так і на покрівлях чи навіть вертикальних поверхнях будівель. Тонкоплівкові панелі ефективні у схемах, що подають вироблений струм безпосередньо до загальномережевої системи. До складу обладнання такої станції бажано додати високовольтні контролери та інвертори, особливо якщо батареї не інтегровані у внутрішню електромережу будинку. Принцип будови тонкоплівкової (аморфної) сонячної панелі проілюстровано на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Тонкоплівкова (аморфна) сонячна панель

Ключові аспекти сонячної енергетики:

1. Серед усіх аргументів на користь сонячних панелей, найсуттєвішим є той факт, що сонячна енергія належить до відновлюваних джерел.
2. Зменшення рахунків за комунальні послуги. Ваші витрати на електрику знизяться, оскільки певна частина потреб в енергії буде задовольнятися електрикою, згенерованою вашою власною сонячною установкою. Обсяг економії безпосередньо залежить від потужності сонячної системи та рівня вашого енергоспоживання.
3. Існує опція продажу надлишків виробленої електроенергії державі за "зеленими" тарифами, що може приносити дохід близько 7000 доларів щорічно.
4. Витрати на експлуатацію є мінімальними.
5. Сфера сонячної енергетики постійно зазнає технологічного прогресу, і очікується подальше її вдосконалення найближчим часом. Сучасні розробки можуть значно підвищити ККД панелей, потенційно подвоюючи чи потроюючи виробничу спроможність сонячних енергетичних установок.

Щодо мінусів, слід зазначити кілька основних:

1. Первісна інвестиція у придбання сонячної системи є досить значною. Сюди входить вартість самих панелей, інвертора, систем накопичення енергії,

кабельної розводки та монтажних робіт. Однак, з огляду на постійний розвиток сонячних технологій, можна прогнозувати, що ціни з часом знижуватимуться.

2. Залежність від погодних умов. Ефективність функціонування сонячної електростанції прямо корелює з інтенсивністю сонячного випромінювання. Чим яскравіше освітлення, тим більше енергії виробнича система генерує. Таким чином, кліматичні та погодні умови суттєво впливають на загальну продуктивність.

3. Висока ціна на акумуляторні батареї та потреба у їх майбутній заміні. Якщо не використовувати "зелений тариф", надлишок енергії можна зберігати у спеціальних акумуляторах. Ці пристрої заряджаються вдень для живлення вночі. Це ефективний спосіб забезпечити себе сонячною енергією цілодобово, але він є доволі витратним. У більшості випадків раціональніше використовувати сонячну енергію протягом дня, а вночі користуватися мережевою електрикою.

4. Необхідність у значній площі. Чим більше енергії ви прагнете отримати, тим більшу кількість панелей потрібно встановити. Сонячні фотоелектричні модулі потребують значного простору, і не кожен дах має достатню площу для розміщення бажаної кількості елементів.

Окрім того, я планую скрупульозно проаналізувати та додати конкретні плюси та мінуси, притаманні кожному різновиду сонячних панелей.

Сильні сторони монокристалічних сонячних батарей:

1. Високий показник ефективності перетворення енергії.
2. Компактні габарити. Завдяки високій потужності цих пристроїв, їх можна монтувати на невеликих ділянках.

3. Надійність та тривалий експлуатаційний ресурс. Монокристалічні модулі здатні продуктивно трансформувати сонячну енергію в електрику протягом двох з половиною десятиліть.

Полікристалічні сонячні панелі можуть похвалитися такими перевагами:

1. Здатність ефективно виробляти енергію навіть у умовах розсіяного сонячного світла.
2. Добре підходять для інсталяції на покрівлях будівель.

3. Вони мають більш привабливу вартість, якщо порівнювати з монокристалічними аналогами.

4. Тривала служба. Протягом перших двадцяти років експлуатації панель демонструє пікову продуктивність, після чого її показники можуть дещо знизитися (на 15-20%), проте вона продовжує генерувати електроенергію.

Тонкоплівкові (аморфні) панелі виділяються такими позитивними аспектами:

1. Ефективна робота при низькій інтенсивності освітлення (розсіяне випромінювання).

2. Економічна вигода у регіонах, де часто буває туманно та похмуро, або в умовах промислових зон із несприятливою екологією (задимленість, запиленість).

Негативні аспекти, характерні для різних типів сонячних панелей: При виборі відповідних сонячних модулів, обов'язково слід зважати і на їхні слабкі місця.

Монокристалічні панелі: є найбільш дорогими і дуже чутливими до забруднення повітря. Навіть шар пилу на поверхні призводить до розсіювання світла навіть у ясну погоду, що неминуче знижує коефіцієнт корисної дії усього обладнання.

Полікристалічні панелі: вирізняються меншим ККД, якщо порівнювати з монокристалічними. Вони займають більше простору, тому для їхнього монтажу потребується суттєво більша площа.

Тонкоплівкові панелі: коштують дешевше, проте мають нижчий коефіцієнт корисної дії, що також вимагає виділення більшої площі для їхнього розміщення, ніж у випадку з іншими типами.

Аморфні кремнієві панелі: вимагають відчутних площ для коректного встановлення необхідного обладнання.

Кожен вид панелей є оптимальним вибором лише для певного набору експлуатаційних умов. Критично важливо детально визначити, для яких саме

умов потрібні ці панелі, який термін служби ви плануєте досягти та який обсяг фінансів готові інвестувати у цей проєкт.

1.4. Електричні характеристики фотоелектричних модулів

Ключові характеристики функціонування сонячної батареї, котрі застосовуються з метою нагляду, складаються з таких показників:

- Струм, що виникає при повному короткому замиканні (I_{sc});
- Напруження за умови відсутності навантаження (V_{oc});
- Робочі значення вольтажу та амперажу у точці генерації максимальної енергії (V_{mp} , I_{mp});
- Співвідношення «ампер–вольт» (ВАХ);
- Залежність виробленої потужності від напруги;
- Термічний коефіцієнт зміни параметрів;
- Фактор заповнення (FF).

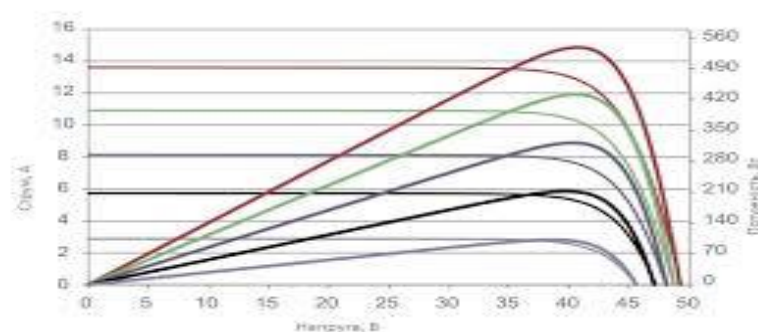


Рисунок 1.5 – Вольт-амперна характеристика сонячних панелей

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) фотоелектричного модуля є кривою, що не піддається лінійному опису, і саме вона зумовлює обсяг енергії, який здатний генерувати даний прилад за певних умов. Моніторинг змін у цій залежності дозволяє оцінити ступінь деградації фотоелементів, ідентифікувати можливі дефекти або присутність затемнення. Дуже чутливим показником слугує зміщення точки максимальної потужності – його фіксація сигналізує про

модифікацію умов експлуатації або виникнення певних експлуатаційних проблем.

У більш широкому сенсі, вольт-амперна характеристика (ВАХ) – це відображення взаємозв'язку між електричним струмом, що циркулює у колі, та напругою, прикладеною до цього кола. Щодо сонячної панелі, ця залежність аналізується з урахуванням низки умов, які були уніфіковані на міжнародному рівні та використовуються у процесі розробки всіх аналогічних установок. Згідно з цими регламентами, ВАХ сонячних компонентів визначається за умов освітленості у 1000 ват на квадратний метр. При цьому температура елементів має бути зафіксована на рівні $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, а самі вимірювання повинні бути виконані на паралелі 45 градусів широти.

На представлений діаграмі зазначені ключові точки вольт-амперної характеристики напівпровідникового фотоперетворювача – напруга холостого ходу (U_{xx}) та струм короткого замикання (I_{kz}). Для визначення робочих характеристик елементів на тому ж графіку нанесена лінія, яка демонструє потужність досліджуваного фотоелектричного модуля. Цей графічний вираз – це залежність потужності осередку від його опору навантаження.

З графіка видно, що номінальна потужність елемента визначається як максимальна можлива потужність при стандартних вихідних параметрах. Напруга, при якій досягається максимальна потужність, є робочою напругою і позначається U_p .

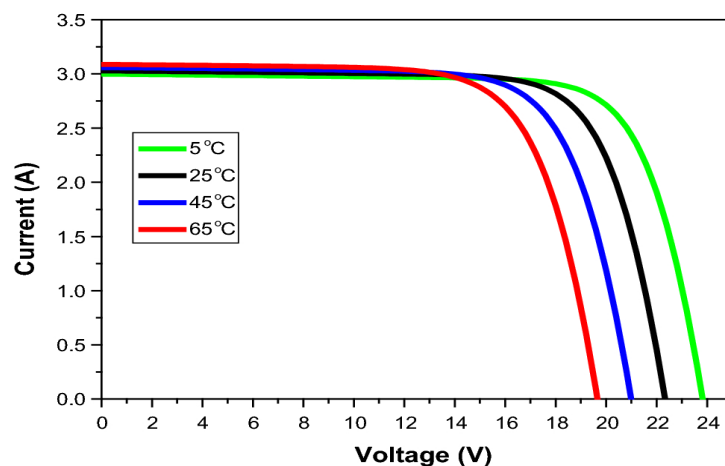


Рисунок 1.6 – Залежність напруги сонячної панелі від температури

Відповідно, струм, який відповідає максимальній потужності, є робочим і позначається I_p . Для отримання робочої напруги 12 вольт підбирається така кількість елементів, щоб на виході модуля досягати напруги 16-17 вольт. Це необхідно для компенсації падіння робочої напруги через нагрівання елемента під впливом сонячних променів. Справа в тому, що у кремнієвих напівпровідників напруга холостого ходу зменшується на 0,4% при підвищенні температури осередку на 1°C. Водночас, значення струму короткого замикання збільшується на 0,07% при збільшенні температури на 1°C. Якщо змінюється освітленість осередку, то прямо пропорційно ступеню освітленості змінюється і значення струму короткого замикання. Водночас зміна освітленості практично не впливає на величину напруги холостого ходу. Ефективність сонячної комірки обчислюється як відношення значення максимальної потужності до загальної потужності випромінювання сонця, визначеної за міжнародними стандартами (STC) [3].

1.5 Вплив зовнішніх факторів на продуктивність сонячних панелей

Працездатність сонячних батарей тісно пов'язана з умовами, у яких вони розміщені. Навіть при невинному прогресі у технологічному виконанні, матеріальні властивості, що мають свої фізичні обмеження, та зовнішні чинники відчутно впливають на обсяг згенерованої енергії. Через це системи управління мусять здійснювати моніторинг не лише електричних характеристик, а й погодних умов, а також режиму роботи обладнання.

Ключовим елементом тут виступає інсоляція, яка описує енергетичний потік, що припадає на одиницю поверхні залежно від часу. Зміна яскравості світла протягом доби – це закономірність, проте коливання, спричинені заміанненням чи наявністю сторонніх домішок в атмосфері, здатні викликати несподівані й суттєві піки у випуску енергії. Без належного нагляду вкрай складно відрізнити звичайну мінливість від несправностей обладнання.

Інший значущий момент – це тепловий стан самих панелей. Хоча інтенсивне сонячне світло зазвичай асоціюється з високою температурою, ця остання, як не парадоксально, спричиняє зменшення робочої напруги і, відповідно, зниження загальної віддачі. Розрахункові дані свідчать: коли температура кремнієвих елементів зростає на кожні 10 градусів за Цельсієм, номінальна потужність може зменшитися на 3–6 відсотків. Отже, нагляд за робочою температурою модуля є критично важливим для коректної оцінки. Ще один елемент впливу – це кут, під яким сонячні промені потрапляють на поверхню. Якщо інсталяція панелі виконана неточно або ж її позиція зсунулася під дією вітрового тиску, віддача може знизитися на 10–15 %. Моніторинг дозволяє ідентифікувати цей ефект, особливо у випадках, коли станції оснащені датчиками освітленості чи нахиломірами.

Не останню роль відіграє забруднення зовнішньої поверхні. Пил, органічні залишки, кіптява чи екскременти птахів створюють зони затінення, що призводить до дисбалансу струму у контурі фотоелементів. Навіть мінімальне затінення одного елемента може активувати роботу обхідних (байпасних) діодів, спричиняючи багаторазове зменшення загальної потужності. Оскільки бруд накопичується поступово, моніторинг стає ефективним інструментом для виявлення таких поступових змін.

Істотний вплив мають і атмосферні явища: туман, висока вологість або наявність аерозолів здатні поглинути частину сонячного потоку, знижуючи його фактичну інтенсивність. У місцевостях, схильних до частих туманів чи пилових бур, ця залежність стає особливо очевидною.

Контрольні системи дають змогу враховувати сукупність цих чинників, проводячи кореляційний аналіз зв'язків між умовами довкілля та електричними характеристиками фотоелементів. Впровадження таких систем забезпечує оперативне виявлення аномалій, можливість прогнозування генерації та загальну оптимізацію функціонування фотоелектричних установок [4].

1.6 Моделі деградації фотоелектричних модулів

Під час експлуатації сонячні модулі неминуче піддаються поступовому зниженню своїх характеристик, що є закономірним явищем старіння складових елементів. Це згасання може бути спровоковане перебудовою напівпровідникової решітки, пошкодженням з'єднань, дією ультрафіолету, перепадами температур та механічною напругою. У наукових працях зазвичай описують такі ключові механізми деградації:

Прямолінійне зниження потужності. Це найпоширеніша схема, згідно з якою модуль щороку втрачає від 0,5 до 1,2 % своєї вихідної потужності. Цей процес переважно корелює зі змінами у внутрішньому кристалічному порядку, природним старінням матеріалів та температурним впливом.

Деградація, індукована освітленням (LID). Проявляється у перші тижні роботи системи, коли елементи починають працювати під сонцем. Вона зумовлена внутрішніми недосконаlostями структури, які активуються лише під дією світла. Внаслідок LID потужність може зменшитися на 2–6 відсотків.

Деградація, викликана потенціалом (PID). Виникає через протікання струмів між самими фотоелементами та металевим каркасом, що стає можливим за умови високої напруги у середовищі з підвищеною вологістю. У складних ситуаціях втрати потужності можуть сягати третини від початкової.

Ушкодження, спричинені температурою та механікою. Сюди відносять виникнення мікроскопічних тріщин, розшарування захисних плівок або контактних частин, а також корозійні процеси. Фіксуються такі проблеми за допомогою тепловізійних камер або аналізу електролюмінесценції.

Для своєчасного виявлення зниження робочих характеристик потрібне постійне спостереження за параметрами роботи модуля протягом тривалого часу. Системи диспетчеризації дають змогу фіксувати незначні зміни, будувати графіки зміни продуктивності та визначати той момент, коли зниження ефективності стає суттєвим.

1.7 Методи моніторингу фотоелектричних систем

Методи моніторингу стану обладнання, які використовуються на сьогодні, поділяються на апаратні, програмні та гібридні (ті, що їх поєднують).

Апаратний підхід зосереджений на зборі показників як електричних, так і неелектричних параметрів, зокрема: рівня напруги, сили струму, температурного режиму, інтенсивності освітлення (інсоляції), електричного опору, особливостей енергоспоживання та аналогічних величин. Цей спосіб гарантує пряму відповідність між отриманими вимірами та фактичними умовами експлуатації фотоелектричної установки [5].

Програмні ж засоби базуються на аналізі даних, що надходять від інвертора або інших компонентів системи. Вони впроваджують алгоритми, засновані на машинному навчанні, прогностичному моделюванні та методах виявлення аномалій. Хоча програмні методи можуть мати обмеження у точності без залучення фізичних замірів, їхня перевага полягає у здатності розкривати складні взаємозв'язки у функціонуванні системи загалом [5].

Найкращі результати демонструють методи, що є поєднанням цих двох попередніх підходів. Вони комбінують використання фізичних сенсорів із застосуванням складних аналітичних моделей. Наприклад, система порівнює заміряний рівень сонячної інсоляції з обчисленим вихідним струмом панелі; якщо їхнє співвідношення виходить за межі допустимого діапазону, реєструється сигнал про відхилення.

Серед поширених технік контролю можна виділити такі:

- Пряме вимірювання ключових параметрів панелей;
- Моніторинг роботи інверторних пристроїв;
- Використання супутникових даних про рівень сонячного випромінювання;
- Застосування термографічних приладів для локалізації зон підвищеного нагріву;

- Спостереження за системою за допомогою безпілотних літальних апаратів (дронів);
- Формування математичних моделей та прогнозів на основі накопиченого масиву даних.

Для забезпечення всебічного та об'єктивного оцінювання роботи сонячної електростанції, стандартизовані системи моніторингу мали б інтегрувати в собі низку перелічених методів [5].

1.8 Вимоги до сучасних інформаційно-вимірювальних систем

Система моніторингу має відповідати широкому набору вимог, серед яких ключові:

- Точність. Похибка вимірювання електричних параметрів має бути мінімальною, щоб зміни були достовірними.
- Швидкодія. Дані повинні надходити з високою частотою для оперативного аналізу.
- Стійкість до зовнішніх умов. Пристрій повинен працювати при значних перепадах температур, вологості та впливі сонячного випромінювання.
- Енергоефективність. Власне споживання енергії має бути мінімальним.
- Масштабованість. Система повинна підтримувати додавання нових панелей, сенсорів і блоків.
- Дистанційний доступ. Користувач повинен отримувати дані з будь-якої точки світу.
- Аналіз і збереження даних. Важливим є зберігання історичних даних та побудова трендів.

Ці вимоги визначають архітектуру системи: її апаратну частину, моделі обробки даних, енергоспоживання та методи комунікації.

1.9 Висновки до розділу

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи роботи сонячних панелей, фактори, що впливають на їхню продуктивність, типи деградації, особливості електричних характеристик та сучасні методи моніторингу. Аналіз показує, що потреба в точному й оперативному контролі параметрів фотоелектричних модулів зростає щороку, особливо з огляду на збільшення кількості сонячних електростанцій різного масштабу.

Системи моніторингу є важливою частиною сучасних фотоелектричних установок, оскільки забезпечують: своєчасне виявлення несправностей; підвищення ефективності генерації; зменшення експлуатаційних витрат; збільшення терміну служби панелей; можливість прогнозування роботи станції.

Теоретичний аналіз, виконаний у цьому розділі, стає основою для переходу до проєктування системи моніторингу, описаного в наступних розділах.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

2.1 Основні вимірювальні параметри сонячної панелі

Інформаційно-вимірювальна система моніторингу сонячних панелей повинна забезпечувати точне та безперервне вимірювання фізичних і електричних параметрів, які найбільше впливають на енергетичну продуктивність фотомодулів. Розуміння цих параметрів є основою для аналізу роботи панелей у реальних умовах, оцінки їх технічного стану, виявлення дефектів, прогнозування вироблення енергії та прийняття рішень щодо технічного обслуговування. До ключових параметрів, які слід обов'язково вимірювати в рамках ІВС, належать: напруга, струм, електрична потужність, температурні характеристики панелі та оточення, а також рівень сонячної інсоляції. Саме ці показники формують інформаційну основу для аналітичних алгоритмів, що дозволяють визначати ефективність фотоелектричного перетворення та прогнозувати поведінку системи.

2.1.1 Напруга сонячної панелі

Напруга (U) є головним електричним параметром, що описує електричний потенціал, утворений фотоелементами під впливом сонячного випромінювання. Традиційно вирізняють два параметри:

- (Open Circuit Voltage) — напруга холостого ходу,
- (Maximum Power Point Voltage) — напруга у точці найбільшої потужності.

Дійсна робоча напруга значною мірою залежить від температури фотомодуля: при зростанні температури кристалічної ґратки кремнію густина

носіїв заряду збільшується, але різниця потенціалів між р- і n-областями зменшується. Це спричиняє спад напруги з коефіцієнтом 0,3–0,5 %/°C.

Також вагомий вплив мають:

- затінення (місцеве та динамічне),
- забруднення поверхні,
- деградація фотоелементів (PID, LID),
- якість електричних з'єднань,
- нерівномірність освітлення.

Контроль напруги дає змогу визначити як загальний стан фотомодуля, так і виявляти відхилення, пов'язані з ушкодженням комірок або деградаційними явищами [6].

2.1.2 Струм сонячної панелі

Струм (I) є результатом руху електронів, що утворюються під впливом фотонів. Він напряму залежить від інтенсивності освітлення та стану поверхні панелі. Основні параметри:

- Струм короткого замикання,
- Робочий струм у точці максимальної потужності.

У загальному випадку струм змінюється майже лінійно від рівня інсоляції (2.1):

$$I \sim G \quad (2.1)$$

Будь-яке зниження струму часто сигналізує про:

- часткове затінення (навіть 5% тіні може знизити струм на 20-40%),
- забруднення та пилові нашарування,
- деградацію елементів,
- пошкодження струмозбірних доріжок,
- дефекти зварних з'єднань.

Вимірювання струму є одним із найбільш показових критеріїв для аналізу відповідності фактичної продуктивності панелі її паспортним характеристикам [6].

2.1.3 Електрична потужність

Електрична потужність (P) показує фактичний обсяг виробленої енергії в даний момент та визначається формулою (2.2):

$$P = U \times I \quad (2.2)$$

Сонячна панель має нелінійну вольт-амперну характеристику, тому найбільша ефективність досягається у точці максимального добутку U та I — MPP. Для роботи інверторів використовуються алгоритми відстеження MPP (MPPT), проте ІВС повинна також стежити за значенням потужності для оцінки втрат та відхилень [6].

Контроль потужності дозволяє: оцінювати втрати від затінення та забруднення, визначати вплив температури на генерацію, аналізувати стабільність роботи у динамічних умовах, виявляти несправності електричних з'єднань, проводити порівняння фактичної та теоретичної продуктивності [6].

Потужність є основним параметром для енергетичних розрахунків та щоденного моніторингу.

2.1.4 Температурні характеристики

Температура є критичним фактором, який впливає як на електричні параметри панелі, так і на її довговічність. У системах моніторингу зазвичай вимірюють два параметри:

- Температуру фотомодуля,
- Температуру навколишнього середовища.

Температура фотомодуля має прямий вплив на ефективність перетворення, яка описується залежністю (2.3):

$$n(T) = n_{STC} [1 - \beta(T - 25^{\circ}\text{C})] \quad (2.3)$$

З підвищенням температури ефективність панелі знижується, тому перегрів є однією з головних причин зниження продуктивності. Крім того, температурні коливання можуть викликати утворення гарячих точок, які прискорюють процес деградації і можуть привести до виходу панелі з ладу. Температура повітря визначає швидкість тепловиділення і впливає на функціонування всієї системи. Аналіз температурних різниць. (2.4):

$$\Delta T = T_{panel} - T_{air} \quad (2.4)$$

Різниця дозволяє виявити порушення теплових умов, зміни в циркуляції повітря, надмірне забруднення поверхні та інші фактори.

2.1.5 Рівень сонячної інсоляції

Інсоляція (G), що вимірюється у Вт/м^2 , визначає кількість сонячного випромінювання, яке надходить на поверхню фотомодуля. Це — базовий параметр, що задає потенційний рівень генерації енергії. Теоретична потужність визначається як (2.5):

$$P_{expected} = n \times G \times A \quad (2.5)$$

де, A - площа панелі.

Порівняння $P_{expected}$ та фактичної потужності дозволяє:

- оцінювати якість фотоелектричного перетворення,

- виявляти затінення, забруднення та дефекти,
- визначати економічні втрати, спричинені зміною погоди,
- відслідковувати сезонні та добові коливання продуктивності.

Інсоляція є одним із головних параметрів, необхідних для коректного аналізу роботи сонячної станції.

2.2 Сенсорні елементи для вимірювання параметрів

Якість роботи ІВС залежить передусім від точності сенсорів, які використовуються у системі. Кожен тип сенсора має свої властивості, похибки та правила застосування. В наступних розділах ми розберемо які вибрати сенсори, їх переваги та недоліки, і пояснемо чому саме ми вибираємо самі ці сенсори [7].

2.2.1 Сенсори напруги

Для вимірювання напруги сонячних панелей в ІВС зазвичай застосовують резистивні подільники напруги, спеціалізовані модулі вимірювання або високоточні диференціальні підсилювачі (INA219, INA226, ADS1115 у режимі вимірювання напруги). Вибір конкретного рішення залежить від діапазону напруги фотомодуля, робочої температури, споживання та необхідної точності.

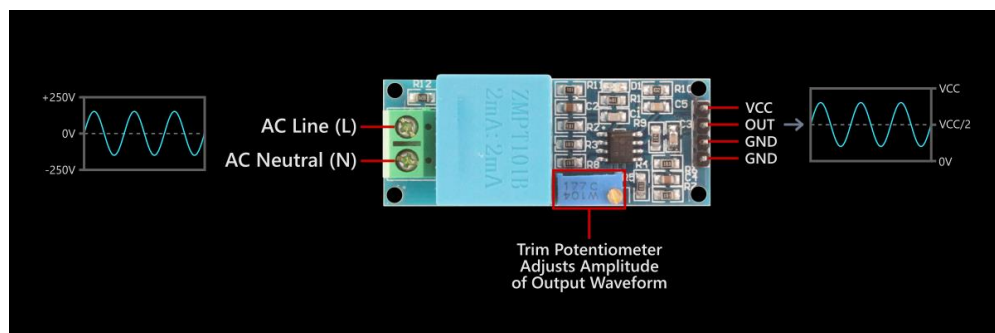


Рисунок 2.1 – Сенсор напруги (ZMPT101B)

Резистивні подільники напруги - це найпоширеніший і найдешевший варіант. Подільник складається з двох резисторів R_1 і R_2 , що масштабують напругу панелі до допустимого діапазону АЦП (зазвичай 0–3.3 В або 0–5 В). Вихідна напруга визначається як (2.6):

$$U_{OUT} = U_{IN} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.6)$$

В ІВС часто використовують прецизійні резистори з температурним коефіцієнтом 25–50 ppm/°C, щоб уникнути дрейфу. Перерахунок у реальну напругу (2.7):

$$U = U_{ADC} \times K \quad (2.7)$$

де, K — коефіцієнт поділу, залежить від номіналів резисторів.

Переваги: Низька ціна — найекономічніший варіант. Простота дизайну — два резистора, не вимагає складної електроніки. Висока надійність при використанні якісних компонентів. Невеликий власний шум, якщо застосовуються металофільмові резистори. Мінімальне споживання енергії.

Недоліки: Немає гальванічної ізоляції. Це важливо, якщо панелі монтуються на металевих конструкціях, які можуть мати різний електричний потенціал. Точність залежить від стабільності резисторів. Температурний дрейф резисторів (особливо бюджетних SMD 1%) значно впливає на помилку. Існує ймовірність перенапруги на АЦП під час стрибка напруги від панелі.

Модулі вимірювання напруги у системах контролю сонячних панелей рідко застосовують трансформаторні датчики напруги (вони для АС), але цифрові модулі з високою точністю можуть бути корисними.

Переваги: Вбудований підсилювач, отже стійкість до шумів, часткова чи повна гальванічна розв’язка, добре працюють на довгих лініях з’єднання.

Недоліки: Більша ціна, потреба калібрування.

Прецизійні ADC-модулі - застосовують коли потрібна точність 0.05–0.1%.

Переваги: Дуже висока роздільна здатність (16 біт, 0.1 mV). Внутрішня калібровка. Низький шум.

Недоліки: Підвищене енергоспоживання, висока ціна, потрібний подільник напруги все одно.

Таблиця 2.1 – Сенсори напруги

Критерій	Подільник	Прецизійний ADC	Модуль датчика
Вартість	Дешева	Висока	Середня
Точність	Середня	Висока	Середня
Стійкість	Низька	Висока	Висока
Розв’язка	Немає	Немає	Є
Енергоспоживання	Низьке	Високе	Середнє

2.2.2 Сенсори струму

Найчастіше застосовуються датчики на ефекті Холла, такі як ACS712, ACS758, WCS2702, LEM-сенсори, або шунтові резистори з підсилювачами (INA219).



Рисунок 2.2 – Сенсор струму (ACS712)

Датчики Холла - безконтактні датчики, які вимірюють магнітне поле навколо провідника, через який протікає струм.

Переваги: Гальванічна розв'язка між силовою частиною та мікроконтролером. Це життєво важливо у системах PV, де струм може сягати 15–40 А. Немає падіння напруги. Повна відсутність втрат на вимірюванні. Висока швидкодія (до 120 кГц). Працюють у широкому температурному діапазоні (–40...+125°C). Безпека — немає з'єднання з високим струмом.

Недоліки: Дорожча вартість, ніж шунти. Чутливі до зовнішніх магнітних полів, потрібне екранування. Похибка 1–3% (кращі моделі — 0.7%). Для PV це прийнятно.

Шунтові сенсори струму. Шунт — це прецизійний низькоомний резистор, через який вимірюють падіння напруги. Використовується з підсилювачами INA219, INA226, MAX4173 (2.8):

$$I = \frac{U}{R_{shunt}} \quad (2.8)$$

Переваги: Висока точність (0.1–0.5%). Низька вартість. Стабільність та повторюваність.

Недоліки: Немає гальванічної розв'язки. Це мінус у PV. Тепловиділення: $P=I^2R$. Потрібне охолодження при великих струмах. Падіння напруги 20–75 мВ призводить до невеликої втрати енергії.

Оптичні сенсори струму рідко використовуються у високовольтних промислових СЕС.

Таблиця 2.2 – Сенсори струму

Критерій	Холл	Шунт
Розв'язка	Є	Немає
Вартість	Висока	Низька
Точність	Середня	Висока

Продовження таблиці 2.2 – Сенсори струму

Нагрів	Немає	Є
Макс. струм	До 100 А	До 30 А
Швидкодія	Висока	Середня

2.2.3 Температурні сенсори

У сонячних системах вимірюють дві температури:

- t_p — температура поверхні панелі (впливає на ККД),
- t_a — температура навколишнього середовища.

Найпоширені є DS18B20 (цифровий), NTC-термістори, PT100/PT1000 (платинові датчики).

DS18B20 (цифровий сенсор)

Переваги: Висока точність ($\pm 0.5^\circ\text{C}$). Однопровідний інтерфейс 1-Wire $\rightarrow$ можна підключати десятки сенсорів в один порт. Легке калібрування. Цифровий сигнал, що не боїться шумів. Дешевий.

Недоліки: Обмежений діапазон ($-55\dots+125^\circ\text{C}$). Але для сонячної панелі достатньо (макс. 85°C). Швидкодія середня (750 мс на конверсію) [7].

NTC-термістори

Дешевий аналоговий варіант DS18B20.

Переваги: Дуже дешеві. Достатня точність для PV ($\pm 1^\circ\text{C}$). Висока чутливість.

Недоліки: Не лінійні $\rightarrow$ потрібна таблиця чи поліном. Чутливі до шуму. Потрібен АЦП [7].

Платинові сенсори (PT100, PT1000) - застосовують у професійних системах.

Переваги: Висока точність (до 0.1°C). Чудова стабільність. Мінімальний температурний дрейф.

Недоліки: Висока вартість. Потрібен підсилювач (плата Wheatstone bridge) [7].

Таблиця 2.3 – Сенсори Температури

Сенсор	Точність	Ціна	Складність	Переваги
DS18B20	Висока	Низька	Низька	Цифровий, стабільний
NTC	Середня	Дуже низька	Середня	Чутливий, дешевий
PT1000	Дуже висока	Висока	висока	Стабільний, промисловий стандарт

2.2.4 Сенсори освітленості та інсоляції

У системах моніторингу застосовують такі типи: Фотодіоди (BPW34); Фототранзистори; Пірометричні сенсори інсоляції; Піррадіометри класу ISO



Рисунок 2.3 – Сенсор освітленості та інсоляції (GY-114)

Фотодіоди - працюють у режимі фотоструму, коли інтенсивність освітлення пропорційна струму.

Переваги: Дуже швидкі (наносекунди). Висока сталість. Малий розмір. Добре пасують для порівняння "очікувана потужність – реальна".

Недоліки: Потрібен підсилювач струму. Не вимірюють повний спектр, тому є незначні похибки [7].

Фототранзистори - Більш чутливі, ніж фотодіоди.

Переваги: Висока чутливість. Дешеві. Просте підключення.

Недоліки: Нелінійність. Чутливі до температури [7].

Пірометричні сенсори інсоляції (солнечні сенсори G) - ці сенсори вимірюють G — рівень сонячного випромінювання у Вт/м², що є основним параметром для обчислення ефективності PV.

Переваги: Дають точне значення інсоляції. Лінійна характеристика. Підходять для професійних систем.

Недоліки: Значно дорожчі. Потрібні періодичні калібрування [7].

Піррадiометри (високий клас) - використовують у наукових PV-станціях.

Переваги: Дають точність до $\pm 2\%$. Вимірюють повний сонячний спектр. Застосовуються у метеостанціях та СЕС класу utility-scale.

Недоліки: Дуже висока ціна (500–2000\$). Великі розміри [7].

Таблиця 2.4 – Сенсори освітленості та інсоляції

Тип сенсора	Точність	Вартість	Переваги
Фотодіод	Середня	Низька	Базове вимірювання інсоляції
Фототранзистор	Середня	Дуже низька	Бюджетний
Пірометр	Висока	Висока	Реальна інсоляція G
Піррадiометр	Дуже висока	Дуже висока	Встановлення на наукових станціях

2.2.5 Обґрунтування вибору сенсорів для ІВС моніторингу сонячних панелей

Здійснивши аналіз наявних типів датчиків напруги, струму, температури та інсоляції, було зроблено порівняння за головними показниками: точність, ціна, сталість, легкість впровадження, опірність до зовнішніх чинників та співвідповідність із мікроконтролерними системами. На цьому ґрунті відібрано найбільш вдалий комплект датчиків, що гарантує найкраще співвідношення «вартість—точність—стійкість» для застосування у системі контролю сонячних модулів.

Вибір сенсора напруги. Зіставляючи наявні вибори – (резистивний дільник напруги, модулі напруги, високоточні АЦП) у системі нагляду за сонячними панелями найбільш вдалим є резистивний дільник напруги із високоточними резисторами (0.1% чи 0.25%).

З яких причин саме цей спосіб:

- 1) надзвичайно низька ціна при добрій стійкості;
- 2) адекватної точності (0.2–0.5% після тарування);
- 3) незначний рівень шуму;
- 4) легкість у догляді;
- 5) змога застосування додаткового шунтуючого конденсатора для зменшення завад.

Високоточний АЦП (ADS1115) може використовуватись за потреби збільшеної точності, проте основним обрано дільник, оскільки його точність достатня для нагляду за PV-модулями. Обраний датчик напруги: Резистивний дільник напруги на металоплівкових резисторах 0.1% з температурним показником 25 ppm/°C.

Вибір сенсора струму. Серед доступних методів вимірювання струму – датчики на базі ефекту Холла (зокрема, моделі ACS712, ACS758, а також рішення від LEM), шунтові резистори, що використовуються з мікросхемами типу INA219, та оптичні сенсори. Для систем, що займаються моніторингом сонячних електростанцій, найкращим рішенням визнано саме датчик струму, що базується на ефекті Холла (як-от ACS758 чи його функціональні відповідники). Переваги, що зумовили цей вибір:

- 1) Забезпечення повної гальванічної ізоляції, що значно підвищує загальний рівень безпеки.
- 2) Нульовий рівень втрат напруги у вимірювальному контурі (це сприяє оптимізації енергозбереження сонячних модулів).
- 3) Здатність витримувати значні величини струмів (до 50–100 Ампер).
- 4) Висока експлуатаційна надійність та тривалий термін служби.
- 5) Мінімальне виділення тепла під час роботи.
- 6) Неспричинення жодних перешкод або змін у функціонуванні основного силового ланцюга.

Хоча шунтові резистори можуть демонструвати вищу точність, вони неминуче призводять до енергетичних втрат, сильно нагріваються при проходженні великих струмів і, що важливо, не надають необхідної гальванічної розв'язки.

З огляду на вищезазначене, було прийнято рішення використовувати саме сенсор струму на ефекті Холла, а саме модель ACS758 (або її еквівалент від компанії LEM) для діапазонів струмів від 30 до 50 Ампер.

Вибір температурних сенсорів

У фокусі уваги були цифрові DS18B20, термістори типу NTC, а також резистивні платинові датчики PT100/PT1000. Для системи керування та моніторингу (IBC) найбільш продуктивним рішенням є використання дуєту DS18B20, і ось чому саме вони були обрані:

- Один датчик буде відповідати за фіксацію температури самої панелі;

- Другий призначений для визначення температури навколишнього середовища.

Причини надання переваги саме DS18B20:

- 1) Точність на рівні $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ є цілком прийнятною для коректного розрахунку втрат ефективності;
- 2) Наявність цифрового інтерфейсу забезпечує імунітет до електричних перешкод (що є ключовим моментом при використанні довгих проводів);
- 3) Функціонал дозволяє підключати численні сенсори, використовуючи єдину шину комунікації 1-Wire;
- 4) Досить низька собівартість;
- 5) Вони демонструють гарну стійкість до агресивних умов, перебуваючи у захищених оболонках.

Хоча платинові сенсори пропонують вищу роздільну здатність, їхня вища вартість у поєднанні зі збільшеною складністю обробки даних не є виправданою у нашому конкретному застосуванні.

Вибір сенсора освітленості / інсоляції. Розглядалися такі сенсори як, фотодіоди, фототранзистори, пірометричні сенсори, піррадіометри. Для ІВС необхідне вимірювання сонячної інсоляції G у $\text{Вт}/\text{м}^2$, яке використовується для обчислення ефективності панелі (2.9):

$$n = \frac{P_{out}}{G \times A} \quad (2.9)$$

З огляду на це, звичайні фотодіоди не годяться, бо вони надають лише ступінь освітлення, а не повну енергію сонячного випромінювання.

Найбільш вдалим рішенням виступає пірометричний датчик (сенсор сонячної радіації). Обґрунтування:

- 1) Він вимірює рівень інсоляції у вимірюваних фізичних одиницях (ват на квадратний метр);

- 2) Його відгук є прямо пропорційним (лінійним);
- 3) Він забезпечує достовірні дані навіть за умов розсіяного сонячного світла;
- 4) Його застосування дозволяє розраховувати ефективність фотоелементів безпосередньо "тут і зараз".

Піррадіометр — це ідеальний інструмент для високоточних лабораторних досліджень, проте його вартість є надмірною. Тому, порівнюючи з ним, найбільш доцільним вибором стає саме пірометричний сенсор для фіксації сонячної інсоляції (наприклад, моделі GY-114 чи еквіваленти).

Таблиця 2.5 – Вибір сенсорів для системи

Параметр	Обраний сенсор	Причина
Напруга	Подільник напруги на резисторах 0,1%	Найкраще співвідношення точності та вартості
Струм	Датчик Холла ACS758	Безпека та гальванічна розв'язка
Температура панелі	DS18B20	Цифровий, точний, дешевий
Температура довкілля	DS18B20	Можливість багатоточкового вимірювання
Інсоляція	Пірометричний сенсор G	Дає значення у Вт/м ²

2.3 Обробка та фільтрація вимірних даних

Дані з сенсорів рідко є ідеальними, тому на етапі обробки система проводить згладжування шуму; перевірку на вихід за межі фізичних значень; лінійне перетворення у реальні одиниці вимірювання; виявлення «викидів», спричинених перешкодами [8].

Для цифрової фільтрації часто використовується експоненційне згладжування, яке зберігає тренд зміни, формула (2.10). Цей метод дозволяє швидко реагувати на зміни, але при цьому усуває короточасні стрибки:

$$Y[n] = aX[n] + (1 - a)Y[n - 1] \quad (2.10)$$

де, $X[n]$ — виміряне значення, $Y[n]$ — відфільтроване значення, a — коефіцієнт згладжування (0,1–0,3).

2.4 Оцінка ефективності роботи панелі

Система повинна визначати, чи працює панель відповідно до очікувань. Для цього порівнюється фактична потужність з теоретично можливою. Фактична миттєва потужність обчислюється за формулою (2.11):

$$P = U \times I \quad (2.11)$$

Теоретична потужність (2.12):

$$P_{th} = G \times A \times \eta \quad (2.12)$$

де, A — площа панелі, η — номінальна ефективність.

Це дозволяє системі оцінювати коефіцієнт ефективності (2.13):

$$k = \frac{P}{P_{th}} \quad (2.13)$$

Якщо k стає меншим за допустиме значення (звичайно — 0,7...0,85), ІВС фіксує зниження продуктивності.

2.5 Алгоритмічні підходи до виявлення аномалій

У нинішніх системах нагляду за станом обладнання, ідентифікація відхилень від норми є ключовим питанням. Подібні аномалії можуть бути спричинені накопиченням абразивних частинок, ожеледицею чи сніговим покривом; частковим блокуванням доступу сонячного світла; поступовим зниженням ефективності фотоелементів; проблемами з провідниками чи місцями з'єднання; руйнуванням окремих складових комірки; або ж температурними умовами, що виходять за межі стандартних [8].

Обчислювальні методики базуються на зіставленні фактичних показників із прогнозованими траєкторіями. Це досягається шляхом дослідження взаємозв'язку між інтенсивністю сонячного випромінювання та електричним струмом; аналізу змін теплового режиму фотомодулів; відстеження варіативності електричної напруги протягом 24-годинного циклу; а також протиставлення поточних даних усередненим добовим шаблонам. Для прикладу, аномалії виявляють за умовою (2.14):

$$|P_{th} - P| > \Delta P_{\max} \quad (2.14)$$

2.6 Технології передавання даних у IBC

IBC може використовувати різні засоби зв'язку: Wi-Fi, NB-IoT, LoRaWAN або стільниковий зв'язок. Дані передаються у вигляді компактних пакетів, наприклад JSON.

Передавання передбачає:

- 1) формування пакета;
- 2) додавання часової мітки;
- 3) перевірку мережевого з'єднання;
- 4) спробу повторної відправки;
- 5) буферизацію даних до моменту успішної передачі.

Отже, сукупність сенсорів, розглянутих тут, — датчиків вольтажу, амперажу, теплових показників та рівня освітленості — формує ансамбль взаємопов'язаних вимірювальних модулів, що в синергії утворюють інформаційно-вимірювальну систему для нагляду за сонячними батареями. Кожен датчик надає свій набір первинних відомостей, і їх комбінація дає змогу проводити всебічний розбір роботи фотоелектричної установки, визначати енергоперетворювальну ефективність, стежити за температурними умовами та ідентифікувати будь-які відхилення в роботі панелі [9].

Завдяки цьому ІВС трансформується у єдиний функціональний вузол, здатний: забезпечувати безперервний моніторинг ключових показників; передавати зібрані дані миттєво; здійснювати автоматизований аналіз генерації енергії; формувати рекомендації щодо покращення роботи панелей [9].

Аби довести дієздатність цієї ІВС, у наступних розділах будуть представлені графічні матеріали, що ілюструють зміну вимірюваних величин, а саме:

1. Графік залежності вольтажу від часу $U(t)$ Демонструє, як змінюється напруга панелі залежно від часу доби, дозволяючи оцінити стійкість функціонування та виявити миттєві просідання, спричинені хмарністю чи затіненням.

2. Графік залежності струму від часу $I(t)$ Дає можливість оцінити реальний обсяг виробленого струму під впливом сонячного світла. Цей граф важливий для аналізу роботи у пікові та непікові години.

3. Графік теплового режиму $T(t)$ Відслідковує температуру самої панелі та навколишнього повітря. Це допомагає виявити теплові перевантаження та їхній вплив на коефіцієнт корисної дії.

4. Графік рівня інсоляції $G(t)$ Показує коливання сонячного випромінювання протягом дня. Він слугує еталоном для порівняння фактичної енерговиробничої діяльності.

5. Графік енергетичної ефективності $\eta(t)$ Обчислюється як співвідношення фактично виробленої потужності до максимально можливої при

поточному рівні освітлення. Він дозволяє оцінити загальний стан панелі та ступінь її старіння.

2.7 Висновки до розділу

У цій частині зосереджено увагу на теоретичному підґрунті інтелектуальних систем (ІС) для нагляду за роботою сонячних електрогенераторів. Викладено ключові показники, різновиди датчиків, їхні сильні та слабкі сторони, а також обґрунтовано вибір оптимальних сенсорних пристроїв серед розглянутих. Окремо висвітлено методики опрацювання даних та алгоритмічні засади, які становлять основу для розробки практично впроваджуваної системи вимірювання. Цей розділ підтверджує, що ІС виходить за межі звичайного інструменту обліку, трансформуючись у багатогранний інтелектуальний комплекс, що забезпечує всебічну оцінку та управління функціонуванням фотоелектричних модулів.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ТА АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІВС МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

3.1 Концептуальні засади побудови програмного забезпечення ІВС

Софтверне забезпечення, що лежить в основі інформаційно-вимірювальної системи для нагляду за сонячними панелями, являє собою ключовий робочий компонент. Воно визначає не лише якість та достовірність одержуваних відомостей, а й ступінь автоматизації, надійність та інтелектуальність усього комплексу. На відміну від простих сенсорних установок, які лише фіксують певні фізичні показники, ІВС виконує набагато ширший обсяг завдань: перетворення вимірюваних даних, категоризацію станів, виявлення розбіжностей, передбачення майбутньої генерації енергії та гнучке налаштування методів збору інформації [10].

Структура цього програмного забезпечення побудована за принципом модульності, що дає змогу організувати різні функціональні блоки як незалежні допоміжні системи. Такий підхід гарантує не лише зручність у процесі модернізації та супроводу, але й підвищує здатність системи до розширення та адаптивності. Слід розуміти, що програма має функціонувати за умов обмежених ресурсів мікроконтролера, тому критично важливим є оптимізація реалізації алгоритмів: швидкість роботи, ощадливість у споживанні енергії, мінімальні затримки та найбільш ефективне використання доступної пам'яті [10].

Одним із базових принципів проектування ПЗ є принцип розмежування обов'язків між рівнями обробки, де кожен із рівнів відповідає за певну частину загального завдання. Зокрема, рівень, відповідальний за отримання даних, не займається їхнім аналізом, а лише генерує "сирий" потік вимірювань. Рівень очищення даних (фільтрації) не оперує логікою виявлення нетипових ситуацій, а лише повертає очищені показники. Така багаторівнева схема забезпечує

відмінну ізоляцію можливих збоїв, дозволяє тестувати окремі складові системи та спрощує майбутню заміну алгоритмів [10].

Окрема увага в цій системі приділяється механізмам самоперевірки. Оскільки ІВС задіяна у польових умовах, програма повинна вміти розпізнавати не тільки аномалії у роботі фотомодуля, але й власні помилки — наприклад, некоректну реакцію датчиків, "зависання" комунікаційних шин, втрату зв'язку із зовнішньою мережею, зростання енергоспоживання. У подібних ситуаціях ПЗ зазвичай автоматично ініціює перезапуск певних модулів, переводить обчислення на резервні алгоритми або ініціює апаратне оновлення окремих підсистем [10].

Кінцевою метою програмної частини є формування надійного інформаційного масиву, придатного для довгострокового аналізу, визначення темпів деградації, використання моделей оцінки виробітку та складання прогнозів щодо майбутньої енергетичної віддачі [10].

3.2 Структура програмно-алгоритмічного комплексу

ПЗ складається із сукупності логічно взаємопов'язаних блоків. Кожен із них виконує окрему допоміжну функцію системи вимірювання, проте разом вони формують єдину структуру, здатну функціонувати самостійно [10].

Першим елементом є блок пуску, який встановлює боеготовність апаратного забезпечення. На цій стадії верифікується наявність усіх датчиків, знімаються їхні заводські номери, калібрувальні константи та первинні налаштування. Якщо будь-який сенсор відсутній або показує відхилення від норми, система реєструє цей факт у звіті про події та переходить до роботи з обмеженнями.

Другий блок відповідає за ітерацію збору інформації. Саме ця ітерація є ядром діяльності системи, оскільки вона генерує потік зареєстрованих величин. Програмне забезпечення мусить гарантувати фіксований часовий інтервал між послідовними зняттями показників, незалежно від завантаження

мікроконтролера та зовнішніх чинників. У дійсному пристрої майже завжди спостерігається взаємна боротьба завдань: обмін даними, їхнє пересилання, протоколювання, обчислення енергії — усе це змагається за ресурс процесора. Відтак, методика циклу збору реалізована на базі планувальника з пріоритетами, де збір вимірів має найвищу важливість.

Третій блок — це модуль цифрової обробки сигналу. Він втілює багатоетапну схему очищення даних, яка охоплює початкове згладжування, адаптивні методи корекції та механізми компенсації. Завдання фільтрації полягає не лише в мінімізації випадкового шуму, а й у виправленні зміщень датчиків та усуненні температурних ефектів. Наприклад, коливання температури освітлювальної панелі впливає на номінальні значення послідовних резисторів та датчиків Холла, тому ПЗ зобов'язане враховувати динамічні поправки.

Четвертим компонентом архітектури є аналітичний блок, який розраховує ключові параметри роботи панелі. Він визначає миттєву потужність, температурний режим, ККД, коефіцієнт корисної дії та прогнозні показники. Саме тут інкорпоровані математичні моделі, що дають змогу ідентифікувати довготривалі зміни, наприклад, зниження продуктивності панелі. Аналітичний блок функціонує одночасно із модулем ідентифікації відхилень.

Окремою складовою виступає блок розпізнавання та категоризації нетипових станів, що працює за принципом експертної системи. Він звіряє фактичні результати з очікуваними, аналізує кореляцію між електричним струмом та рівнем освітлення, оцінює запізнення між змінами температури та потужності, а також використовує принципи машинного навчання (за потреби, у серверній частині).

Насамкінець, фінальним вузлом є мережевий блок, відповідальний за транспортування даних. Він має вбудовану логіку для оптимізації потоку, стиснення інформаційних пакетів, повторного надсилання та припасування формату залежно від стійкості каналу зв'язку.

3.3 Програмне забезпечення інформаційно-вимірювальної системи

Софтуер (СП) являє собою наріжний камінь інформаційно-вимірювальної системи, призначеної для нагляду за характеристиками фотоелектричних модулів, оскільки саме він відповідає за належну інтерпретацію сигналів, отриманих від датчиків, конвертацію виміряних величин у фізично змістовні показники, їхню очистку від шумів, усунення систематичних похибок, формування документації, надсилання інформації та репрезентацію підсумків для оператора. У межах цієї ІВС програмне забезпечення структуровано на три взаємозалежні яруси :

1. Базовий ярус — програмна реалізація вбудованого контролера, відповідальна за збір інформації з сенсорних елементів.
2. Проміжний ярус — блок, що забезпечує комунікацію та транспортування даних (із застосуванням протоколів Wi-Fi, MQTT або HTTP).
3. Вищий ярус — серверна компонента та інтерфейс взаємодії з кінцевим користувачем, які уможливлюють архівацію, дослідження та графічне представлення цих даних.

Нижче подано докладний опис архітектури СП з огляду на специфіку обраного набору датчиків.

3.3.1 Структура програмної системи

ПЗ системи ІВС виконує такі ключові задачі:

1. Зчитування даних із датчиків, використовуючи різноманітні комунікаційні протоколи (1-Wire, аналоговий вхід перетворювача, цифровий зв'язок із пірометром).
2. Виправлення отриманих значень та приведення до лінійної шкали, коли сенсор демонструє нелінійну залежність (як от пірометр або датчик ефекту Холла).

3. Зниження рівня шуму завдяки застосуванню цифрових фільтрів, зокрема ФНЧ, методу ковзного середнього та медіанного фільтрування.
4. Динамічна зміна режимів збору даних, що передбачають різні інтервали вимірювання (наприклад, софт автоматично підвищує частоту опитування за умов наявності хмарності).
5. Розрахунок поточної генерації потужності сонячної батареї, виходячи з вимірних показників напруги й сили струму.
6. Визначення показника ККД панелі, яке залежить від рівня сонячного випромінювання та її температурного режиму.
7. Реагування на критичні ситуації (наприклад, перевищення температури, надмірна напруга, значне зниження генерації потужності).
8. Надсилання інформації на віддалений сервер у уніфікованому вигляді (формат JSON).
9. Збереження отриманої інформації в довготривалій пам'яті для наступного аналізу, візуалізації (графіки) та створення прогнозних моделей.

3.3.2 Програмна логіка роботи із сенсорами

Опитування сенсора напруги (подільник + АЦП). Програмне забезпечення читає цифровий код з АЦП, наприклад (3.1):

$$U_{ADC} = \frac{N}{2^n} \times U_{ref} \quad (3.1)$$

Після цього застосовується коефіцієнт поділу подільника (3.2):

$$U = U_{ADC} \times K \quad (3.2)$$

У ПЗ реалізовано: калібрування коефіцієнта K при старті системи; температурна компенсація подільника (на основі таблиці поправок); цифровий фільтр для зменшення шуму.

Опитування сенсора струму (ACS758). Датчик Холла видає аналогову напругу, пропорційну струму (3.3):

$$I = \frac{U_{OUT} - U_0}{S} \quad (3.3)$$

де, U_0 — вихід при нульовому струмі, S — чутливість (наприклад, 40 мВ/А).

У ПЗ реалізовано: автокалібровка нуля при кожному запуску; компенсація температурного дрейфу чутливості; медіанний фільтр для усунення випадкових імпульсних шумів; перевірка перегрузки (струм > номіналу панелі) [10].

Опитування температурних сенсорів DS18B20. Оскільки датчики працюють за протоколом 1-Wire, ПЗ керує:

- ініціалізацією шини,
- адресацією кожного датчика,
- перевіркою CRC-коду,
- періодичною корекцією в разі зникнення одного з пристроїв.

Температура панелі і довкілля зчитуються незалежно. ПЗ враховує: затримку теплової інерції панелі; залежність ККД від температури (3.4):

$$n(T) = n_{STC} \times [1 - \beta \times (T - 25^\circ\text{C})] \quad (3.4)$$

де, $\beta \approx 0.0045$ для кремнієвих панелей.

Опитування сенсора інсоляції. Залежно від моделі пірометр може передавати:

- аналоговий сигнал (0–1 В або 4–20 мА),
- цифровий сигнал (I²C, SPI).

ПЗ здійснює: лінеаризацію кривої сенсора; переведення у фізичні одиниці (3.5):

$$G = k \times U_{IN} \quad (3.5)$$

Попередження про низьку інсоляцію (<150 Вт/м²) та нормування інсоляції для розрахунку ефективності панелі.

3.3.3 Алгоритм розрахунку основних параметрів

Після зчитування всіх сенсорів ПЗ переходить до обчислювальних процедур.

1. Потужність сонячної панелі (3.6):

$$P = U \times I \quad (3.6)$$

2. Ефективність енергогенерації (3.7):

$$n = \frac{P}{G \times A} \quad (3.7)$$

де, A — площа панелі.

Виявлення деградації панелі. ПЗ постійно порівнює отриманий ККД з номінальним (3.8):

$$D = \frac{n_{nom} - n_{real}}{n_{nom}} \times 100\% \quad (3.8)$$

Якщо деградація $> 20\%$ $\rightarrow$ сигнал про необхідність сервісної перевірки.

Виявлення перегріву. Поріг для панелей: нормальна робота: $< 55^{\circ}\text{C}$, ризик деградації: $55\text{--}70^{\circ}\text{C}$, критичний стан: $> 75^{\circ}\text{C}$. ПЗ автоматично генерує попередження.

3.3.4 Модуль передачі даних

Система може використовувати такі системи як - Wi-Fi, LTE-модем, LoRaWAN або Ethernet (для стаціонарних СЕС). Підтримуються протоколи:

- MQTT (легкий, швидкий),
- HTTP/REST (універсальний),
- WebSocket (для потокових даних).

Формат переданих даних (JSON):

```
json
{
  "U": 37.4,
  "I": 6.12,
  "P": 228.9,
  "T_panel": 48.2,
  "T_air": 24.7,
  "G": 820,
  "timestamp": "2025-12-04 14:55:32"
}
```

Рисунок 3.1 - Серверна частина та візуалізація

Центральна складова ІВМ-системи — її серверна ланка — відповідає за зберігання, обробку та подання інформації, отриманої з модулів сенсорів. На цьому сервері розгорнуто повний набір програмних засобів, необхідних для забезпечення безперебійної роботи всієї системи. Насамперед, тут розміщується

сховище даних, яке може бути реалізоване як спеціалізовані таймсеріальні бази (на кшталт InfluxDB) або як потужні реляційні сервіси типу PostgreSQL, котрі підтримують складну структуру даних та здатні до горизонтального масштабування. У цьому серверному вузлі функціонує аналітичний блок, що займається виведенням похідних показників, ідентифікацією ключових точок, аналізом тенденцій та верифікацією отриманих результатів проти розрахункових моделей [10].

Окрім того, інкорпоровані механізми прогнозування потужності, які використовують інформацію про сонячне випромінювання, температуру повітря та поточні характеристики панелей для створення очікуваної карти виробітку на найближчий період — години чи добу. Сервер також містить інтерфейс доступу через вебінтерфейс, що надає кінцевому користувачеві змогу працювати з усіма даними через звичайний браузер. Цей інтерфейс забезпечує графічне представлення ключових параметрів: показники напруги, струму та теплового режиму в реальному часі, агреговані дані про вироблену енергію за добу чи тиждень, динаміку інсоляції та зміну ККД панелей залежно від зовнішніх погодних умов. Окремі модулі здатні генерувати термографічні карти деградації, що допомагає точно визначити зони зниженої продуктивності та виявити нетипову поведінку окремих фотоелементів [11].

Програмне забезпечення серверної частини не обмежується лише візуалізацією, воно також забезпечує автоматизоване формування звітів. Система може готувати щоденні підсумки роботи апаратно-програмного комплексу, проводити звірку фактичного виробництва з попередніми прогнозами та надсилати сповіщення при виявленні суттєвих розбіжностей. Такі попередження можуть бути доставлені через SMS або електронну пошту, що суттєво прискорює реакцію відповідального персоналу та дозволяє превентивно усувати ризики виникнення непередбачених збоїв [11].

3.3.6 Діагностика і самоконтроль системи

Софт, що лежить в основі ІВС, містить розгорнутий блок для діагностики й самоперевірки, який гарантує безперебійне функціонування усієї системи вимірювального апарату. Ключовим дорученням цього блоку є верифікація коректності функціонування датчиків. Для цієї мети залучається метод перевірки контрольних сум (CRC), що уможливлює встановлення цілісності відомостей під час їх трансляції, а також специфічні методи для виявлення "розривів" зв'язку чи некоректного підключення сенсора. Завдяки такому підходу апарат миттєво реагує на виникнення проблем та сигналізує про невідповідні дані ще до того, як вони можуть вплинути на підсумки опрацювання інформації [11].

Невід'ємним елементом експлуатації є моніторинг напруги живлення та стабільності роботи електронної частини. Програмний комплекс безперервно оцінює стан енергопостачання та тепловий режим мікроконтролера та супутньої електроніки, що дає можливість уникнути критичного нагрівання та нетипових робочих станів. У систему вбудовано механізми для автоматичного відновлення роботи у разі "зависання" програми або помилок у функціонуванні контролера. За цю функцію відповідає інтегрований таймер типу "сторожовий пес" (watchdog), який контролює хід виконання головних операцій та запускає рестарт, якщо від системи не надходить відповідний сигнал про її нормальну роботу [11].

Комплекс цих можливостей забезпечує значний рівень відмовостійкості ІВС та її здатність зберігати працездатність навіть при часткових збоях чи виході з ладу окремих вузлів. Шляхом безперервного стеження за внутрішніми параметрами та автоматичного коригування робочих режимів система підтримує точність вимірювань та забезпечує стабільне надходження інформації для наступного аналітичного опрацювання та передбачення [11].

3.4 Алгоритмічні аспекти збору вимірювальної інформації

Механізм накопичення інформації складає серцевину функціонування інтелектуальних систем управління. Саме він диктує, з якою періодичністю й у якій послідовності апаратні засоби (сенсори) піддаються опитуванню, як система реагує на збої, та яким чином гарантується її безперебійність у тривалих режимах експлуатації. Здебільшого, апаратні помилки — це не рідкість, а скоріше очікувана умова, отже, ця процедура мусить бути стійкою до відмов та спроможною адекватно реагувати на позаштатні обставини [11].

У свою чергу, послідовність дій для здобуття даних загалом включає такі кроки:

- 1) запуск та валідація стану датчиків;
- 2) приведення до співвідповідності внутрішнього хронометражу;
- 3) зчитування показників з аналогових та дискретних перетворювачів;
- 4) перевірка цілісності отриманого блоку вимірів;
- 5) початкова обробка зафіксованих показників;
- 6) повторне вимірювання у випадку обґрунтованої підозри на некоректність даних.

Приклад базової формули перетворення напруги (3.9):

$$U = U_{ADC} \times K \quad (3.9)$$

де, K - враховує коефіцієнт подільника та калібрувальне зміщення.

Аналогічно, струм можна розрахувати як (3.10):

$$I = \frac{V_{out} - V_{offset}}{S} \quad (3.10)$$

де, S — чутливість датчика Холла.

На кожному етапі програмна частина зобов'язана валідувати значення: якщо вольтаж або ампераж виходять за задані межі, система повертається до повторного взяття показника, а коли некоректність триває понад три ітерації — генерується сповіщення.

Процедура збору даних у високоточних інтелектуальних вимірювальних системах (ІВС) мусить гарантувати так звану детерміновану часність виконання, тобто сталий проміжок між зняттям показників, що не залежить від завантаження процесора чи паралельних мережеских маніпуляцій. Ця властивість є життєво необхідною, оскільки будь-яка неоднорідність у часових інтервалах спотворює розрахунок добового графіка, ускладнює аналіз та може спричинити помилкове визначення відхилень.

Детермінована часність досягається завдяки застосуванню апаратного таймера, функціонування якого не прив'язане до основної програми. Таймер формує "сигнали пробудження", які змушують апаратне забезпечення, навіть перебуваючи у режимі очікування, здійснити вимірювання рівно у визначений час. Таким чином, навіть при значній інтенсивності передавання інформації система не пропускає моменту збору даних.

Іншою ключовою функцією алгоритму захоплення даних є гнучка швидкість опитування, яка залежить від динаміки зміни параметрів. Наприклад, в ранкові години, коли світловий потік стрімко наростає та фотоелемент переходить у робочий стан, темп збору підвищується, аби зафіксувати всі перехідні процеси. У темний час доби система уповільнює темп зняття показників задля економії енергії, лишаючи лише мінімальний контроль стану.

Також інтегровано механізм "проактивної діагностики": якщо температура панелі починає зростати надмірно швидко, система автоматично прискорює збір даних, щоб отримати детальніший профіль нагрівання та виявити потенційні першопричини, серед яких може бути забруднення чи часткове затінення.

У контексті стійкості алгоритмів важливу роль грає система обробки некоректностей датчиків. Якщо певний сенсор не реагує, система активує резервний план зчитування: спершу вона поновлює роботу цифрової магістралі, якщо це не допомагає — перезавантажує модуль сенсора, і лише якщо й це не дає ефекту — маркує отримані дані як недійсні, але не припиняє загальної роботи апаратури.

Завдяки цьому ІВС продовжує функціонувати, навіть якщо відбуваються локальні технічні збої.

3.5 Цифрова обробка та фільтрація сенсорних даних

Обробка даних у цифровій формі становить невід'ємний етап, що дає змогу покращити точність отриманих показників та довести інформацію до необхідного стану для подальшого аналітичного дослідження. Датчики, зокрема ті, що працюють з аналоговими сигналами, неминуче вносять шуми, спричиняють дрейф характеристик та генерують випадкові похибки. З огляду на це, на даній стадії програмне забезпечення реалізує досить запутану багаторівневу процедуру очищення даних від спотворень [11].

Основою фільтрації у системі є експоненційне згладжування, яке дозволяє пом'якшувати короткотривалі стрибки напруги та струму (3.11):

$$Y[n] = \alpha X[n] + (1 - \alpha)Y[n - 1] \quad (3.11)$$

де, α - вибирається залежно від того, наскільки інерційною має бути система.

У нашій ІВС для напруги і струму застосовується $\alpha \approx 0.25$, для температури — 0.15, для інсоляції — 0.35, що відображає швидкість реакції цих величин на зовнішні зміни.

Окрім стандартного відсіювання, використовується більш гнучкий підхід – адаптивне згладжування, де коефіцієнти корекції динамічно коригуються відповідно до поточної ситуації. Приміром, якщо сонячна освітленість (інсоляція) стрімко наростає вранці, коефіцієнт згладжування а автоматично підвищується, аби система могла швидше реагувати на зміну вхідних даних [12].

Другий спосіб — відсіювання даних, що виходять за межі очікуваних значень. Для кожного датчика визначено діапазон припустимих показників, і програмне забезпечення перевіряє, чи знаходиться зроблена замітка в межах фізично можливого діапазону. Наприклад, температура сонячної панелі не здатна стрибнути на десять градусів Цельсія за одну секунду, так само як і нелогічним є високий рівень струму за умов повної відсутності освітлення.

Якщо система виявляє такі аномалії, вона застосовує предиктивну заміну значення (3.12):

$$X_{corr}(n) = X(n - 1) + \Delta_{max} \quad (3.12)$$

де, Δ_{max} — максимально допустима зміна параметра між вибірками.

Окрему увагу приділено корекції дрейфу сенсорів. Датчики Холла та подільники напруги можуть змінювати характеристики при підвищеній температурі. ПЗ використовує апіорні температурні коефіцієнти (3.13):

$$X_{real} = X_{meas} - k_T(T - T_0) \quad (3.13)$$

Що дозволяє компенсувати температурну похибку і підтримувати точність навіть у жаркі дні.

3.6 Аналітичні методи розрахунку параметрів роботи сонячної панелі

Після фільтрації система переходить до розрахунку фізичних параметрів. Ключовими величинами є миттєва потужність, добова енергія, коефіцієнт ефективності та продуктивність. Миттєва потужність $P(t)$ визначається класично (3.14):

$$P(t) = U(t) \times I(t) \quad (3.14)$$

Добовий виробіток енергії E досягається через інтегрування потужності (3.15):

$$E = \int P(t) dt \quad (3.15)$$

У дискретному вигляді (3.16):

$$E \approx \sum_{i=1}^N P_i \Delta t \quad (3.17)$$

Теоретична потужність визначається за рівнем інсоляції (3.18):

$$P_{th} = G \times A \times \mu_{nom} \quad (3.18)$$

Це дозволяє визначити коефіцієнт ефективної роботи (3.19):

$$k = \frac{P(t)}{P_{th}} \quad (3.19)$$

Якщо k падає нижче 0.75 — система ініціює діагностику.

Програмний комплекс також аналізує градієнти зміни струму та температури. Наприклад, швидкість нагріву панелі (3.20):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T(n) - T(n - 1)}{\Delta t} \quad (3.20)$$

дозволяє визначити забруднення або перегрів при незмінній інсоляції.

Додатково реалізовано довгостроковий аналіз — оцінка потенційної деградації. Якщо при однакових умовах панель генерує менше потужності, ніж у попередні дні або тижні, це фіксується у хронологічному алгоритмі деградації.

3.7 Модуль передачі даних та мережевої взаємодії

Мережевий вузол відповідає за пересилання інформації на сервер та підтвердження її неушкодженості. Трансляція відбувається у стислому виді, найчастіше у форматі JSON, і включає такий вміст:

- 1) мітку часу;
- 2) всі показники вимірювань;
- 3) додаткові дані для аналізу;
- 4) сигнали стану датчиків;
- 5) мітки діагностичного характеру.

Робота модуля базується на принципі гнучкого управління мережею. У разі стабільного з'єднання, інформація відправляється негайно. Коли ж зв'язок нестійкий, активується режим буферизації, і дані тимчасово поміщаються у внутрішній сховищі.

Програмне забезпечення застосовує метод «надійної відправки»: кожен блок даних отримує унікальний код та відмітку про підтвердження. Якщо від сервера не надходить підтвердження прийняття, блок пересилається знову [19].

Якщо мережеве з'єднання відсутнє тривалий період, вимірювальна система переходить у фазу локального збирання даних, запобігаючи їх втраті.

Серверна компонента розширює функціонал мікроконтролера, надаючи значно потужніші інструменти: передбачення, створення моделей, дослідження минулих даних, побудову тенденцій та генерацію статистичних документів. Вона збирає великі обсяги відомостей, на базі яких створює:

- графіки потужності за добу, тиждень та місяць;
- схеми розподілу температури та сонячної активності;
- моделі поступового зниження ефективності;
- мапи продуктивності;
- автоматизовані зведення.

Окрім того, сервер використовує накопичений досвід роботи для машинного навчання, що дає змогу передбачати обсяги виробленої енергії на прийдешні періоди. Подібні прогнози суттєво важливі для систем "розумної мережі" (Smart Grid) [12].

Інтерфейс для кінцевого користувача забезпечує доступ як до актуальних даних, так і до архівних записів, дозволяє переглядати сповіщення про проблеми та проводити дослідження нетипових ситуацій.

3.8 Висновки до розділу

У цьому розділі ми здійснили поглиблене вивчення програмного наповнення та алгоритмічних рішень, що лежать в основі ІВС. Було продемонстровано, що саме програмний комплекс надає системі її інтелектуальні здібності, автономність функціонування та потужний аналітичний потенціал. Завдяки модульному дизайну програмного забезпечення, застосуванню гнучких алгоритмів для акумулювання даних, їхнього очищення, проведення діагностики, а також завдяки надійним мережевим протоколам, створюється цілісний механізм. Цей механізм спроможний ефективно діяти у робочому середовищі, забезпечуючи при цьому надзвичайно точне спостереження за станом фотоелементів.

4 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

4.1 Загальні принципи та завдання метрологічного забезпечення ІВС

Обезпечення метрологічного рівня для фотоелектричних установок є життєво важливим аспектом, що підтверджує надійність усіх операційних вимірювань на сонячній електростанції. Філософія цього забезпечення полягає у створенні середовища, де зібрані дані вимірювань демонструють високий ступінь точності, стійкості та можливості повторення. Зважаючи на те, що реальна віддача сонячних модулів безпосередньо залежить від значень таких величин, як напруга, сила струму, потужність, температурний режим та рівень інсоляції, будь-яке викривлення у вимірювальному процесі може призвести до невірної оцінювання ККД, некоректного функціонування інверторного обладнання, неточних прогнозів генерації електроенергії та ухвалення хибних управлінських рішень [13].

Завдання, які стоять перед метрологічною підтримкою, охоплюють кілька головних напрямків. По-перше, воно формулює чіткі вимоги до кожної вимірюваної величини, включаючи межі допустимої похибки, часову стабільність показників та чутливість сенсорів. По-друге, необхідно здійснити аргументований вибір апаратури для вимірювань, яка здатна витримувати непрості зовнішні умови, типові для локацій сонячних електростанцій. По-третє, це включає аналіз та зведення до мінімуму помилок, викликаних різноманітними факторами — змінами температури, наявністю шумів, інструментальними недоліками та ефектом дрейфу. По-четверте, обов'язковим є організація періодичних процедур калібрування, що необхідні для забезпечення сталості системи протягом тривалого часу. Насамкінець, метрологічна підтримка гарантує, що система відповідає міжнародним стандартам IEC та ISO, які встановлюють критерії вимірювання параметрів фотоелектричних елементів у повномасштабних промислових умовах [13].

Таким чином, метрологічне забезпечення охоплює всю інфраструктуру вимірювань ІЕС — починаючи від базових сенсорних елементів і закінчуючи цифровими системами збору та обробки даних — і слугує фундаментом для адекватного функціонування системи контролю за сонячними панелями.

4.2 Вимірювані параметри та вимоги до їх точності

У рамках МВС (моніторингових систем) вимірюванню підлягають декілька сукупностей показників: електричні величини, кліматичні умови та динамічні характеристики. Кожна із цих груп має свої метрологічні вимоги та особливості впливу на ефективність роботи сонячних електроустановок [13].

Електричні величини охоплюють напругу, силу струму, поточну генеровану потужність та накопичену електроенергію. При вимірюванні напруги необхідно брати до уваги широкий робочий діапазон, який для послідовних з'єднань (стрінгів) може сягати 600–1100 вольт. Згідно з вимогами стандарту ІЕС 60891, недопустима похибка таких вимірів не повинна перевищувати орієнтовно одного відсотка, адже навіть мізерне відхилення ускладнює точне визначення точки максимальної потужності. Сила струму також вимагає високої точності, оскільки її коливання тісно корелюють із рівнем сонячного опромінення та станом поверхні фотоелементів. Для вимірів струму прийнятною вважається Saiйність у межах $\pm 0,5$ –1 %, хоча у висококласних лабораторних умовах вона може знижуватися до $\pm 0,2$ %. Потужність, що є добутком напруги та струму, має своїй Saiйність, яка залежить від метрологічних характеристик обох вимірювальних каналів. На практиці для фотоелектричних установок Saiйність у 1,5 % для миттєвої потужності визнається достатньою [13].

До параметрів, що описують клімат, відносяться температура фотоелементного модуля, температура зовнішнього повітря та інтенсивність сонячної радіації (інсоляція). Оскільки температурний режим модуля є ключовим чинником, що лімітує його енерговидачу, точність датчиків температури не повинна бути гіршою, ніж $\pm 0,5$ °С. Інсоляція ж є визначальною

для розрахунку теоретично можливої потужності та ККД, тому її Saiйність має підтримуватися в межах 3–5 %, залежно від класу сенсора згідно з ISO 9060. Для високоточного контролю рівня опромінення застосовуються пірометри класу А, тоді як у бюджетних системах використовуються кремнієві сенсори, Saiйність яких сягає 10 % [13].

Динамічні показники, такі як швидкість зміни потужності, термічний градієнт або зсуви ефективності протягом сезону, виконують допоміжну діагностичну функцію. Вони дають можливість прогнозувати подальшу роботу системи, оцінювати рівень деградації компонентів та вчасно впроваджувати заходи корекції. Сумарна похибка кожного вимірюваного параметра визначається стандартним методом (4.1):

$$\Delta X = \sqrt{\Delta X_{\text{інстр}}^2 + \Delta X_{\text{темп}}^2 + \Delta X_{\text{шум}}^2 + \Delta X_{\text{калібр}}^2} \quad (4.1)$$

де, $\Delta X_{\text{інстр}}$ — інструментальна похибка сенсора; $\Delta X_{\text{темп}}$ — температурний дрейф; $\Delta X_{\text{шум}}$ — шумові складові; $\Delta X_{\text{калібр}}$ — залишкова похибка після калібрування.

4.3 Засоби вимірювання та їх метрологічні властивості

Для кожного параметра, що підлягає вимірюванню, необхідно застосовувати спеціалізовані прилади обліку, які зобов'язані відповідати обумовленим метрологічним критеріям щодо забезпечення потрібної точності, стійкості характеристик та несприйнятливості до коливань температури [13].

Визначення рівня напруги реалізується через застосування високоточних дільників та модулів із гальванічною розв'язкою, призначених для функціонування у системах з високою номінальною напругою. Критично важливими для коректної роботи таких пристроїв є параметри, як мінімальна зміна опору залежно від температури та підтримання високої лінійності

характеристик у всьому визначеному робочому інтервалі. Визначення електричного струму у PV-установках переважно базується на використанні датчиків на принципі ефекту Холла, що гарантує електроізоляцію, низький рівень небажаних сигналів та надійність у широких межах температур. Через їхню здатність функціонувати у ланцюгах під високою напругою, ці сенсори визнаються найкращим вибором для моніторингу струму [15].

Оцінка температурного режиму проводиться за допомогою електронних датчиків на кшталт DS18B20 або термопар, які здатні забезпечити похибку не більше $\pm 0,5$ °C та високу довготривалу стабільність. Піранометри для вимірювання сонячного випромінювання, згідно зі стандартом ISO 9060, класифікуються за трьома рівнями точності; у типових установках найчастіше задіюють кремнієві сенсори категорії C, які ефективні для безперервного контролю, проте демонструють помітну зміну показників через вплив температури, що вимагає обов'язкового врахування при обробці даних.

Ключовим елементом будь-якого ланцюга для отримання даних слугує пристрій перетворення сигналу з аналогового формату у цифровий. Саме від його характеристик безпосередньо залежать дискретність, чутливість та загальна точність усієї системи обліку. Модель АЦП у вимірювальному каналі для аналого-цифрового перетворювача похибка визначається як (4.2):

$$\Delta_{\text{АЦП}} = \frac{U_{\text{опор}}}{2^n} \quad (4.2)$$

де, $U_{\text{опор}}$ — опорна напруга; n — розрядність АЦП.

Це демонструє, що при 12-бітному АЦП точність у 16 разів гірша, ніж при 16-бітному — важливий аргумент у технічному аналізі. АЦП повинні мати розрядність не нижче 12–16 біт і використовуватися з високостабільним джерелом опорної напруги, дрейф якого не перевищує 10 ppm/°C. Таким чином,

вибір вимірювальних засобів є комплексним завданням, що охоплює електричні, температурні та керуючі характеристики.

4.4 Похибки вимірювань, їх природа та методи компенсації

У дійсності, коли обладнання використовується за призначенням, на точність, з якою отримана інформація, впливає чимало змінних. Неточність виникає як на етапі зчитування первинних даних датчиками, так і під час надсилання та подальшої комп'ютерної обробки цих сигналів. Серед тих, що трапляються найчастіше, слід виділити похибки, зумовлені зміною температури, шумовими явищами, апаратними обмеженнями, дискретизацією (квантуванням) та недостатньою точністю початкового налаштування. В сукупності ці відхилення утворюють загальне похибку вимірювання, яке розраховують як корінь із суми квадратів кожного окремого внеску [16].

Похибки, пов'язані з термічними змінами, спричинені зміною робочих характеристик чутливих елементів та електронних модулів через нагрівання чи охолодження. Дія коливань температури є особливо значущою для схем, що використовують резистивні дільники напруги чи спеціальні шунти, тому в інтелектуальних вимірювальних системах (ІВС) надають перевагу виробам, параметри яких мало залежать від рівня теплового режиму. Шумові спотворення з'являються через вплив зовнішніх електромагнітних випромінювань, нестабільність джерела живлення, а також різкі сплески перешкод, що генеруються інверторами та потужними силовими лініями. Для нейтралізації цих явищ вдаються до застосування захисних екранів, коректного виведення "землі" та застосування алгоритмів цифрового згладжування. Математична модель компенсації температурного дрейфу виглядає як (4.3):

$$X_{\text{кор}} = X_{\text{вим}} - \alpha(T - T_0) \quad (4.3)$$

де, $X_{кор}$ — компенсоване значення, $X_{вим}$ — виміряне значення, α — температурний коефіцієнт сенсора, $T-T_0$ — відхилення температури від номінальної.

Похибки, що походять від апаратури, є наслідком природних обмежень у роздільній здатності датчиків та перетворювачів аналогових сигналів у цифрові. Є можливість частково нейтралізувати їх за допомогою програмних методик, які коригують отримані з них дані на базі встановлених еталонів. Помилки, пов'язані з цим калібруванням, з'являються на етапі первинного введення системи в роботу й потребують регулярного перегляду та виправлення, особливо стосовно елементів, що вимірюють струмові величини та освітленість, оскільки вони схильні до повільних змін показників (дрейфу) [17].

Задля досягнення вищої точності роботи інтелектуальної вимірювальної системи (ІВС) застосовується низка взаємодоповнюючих технік: обчислення середнього значення отриманих даних, очищення сигналів від небажаних складових, врахування впливу температури, динамічне застосування коригувальних множників, а також проєктні заходи, як-от використання резервних (дубльованих) датчиків. Комплексне застосування цих стратегій уможливорює суттєве зниження вагомих розбіжностей та забезпечення стійкості вимірювальних результатів навіть за несприятливих погодних умов [18].

4.5 Калібрування та верифікація вимірювальних каналів ІВС

Регулювання — це ключовий складник метрологічного супроводу автоматизованих систем керування, адже саме воно гарантує узгодженість показників вимірювань із еталонними величинами. Метою цього процесу є ліквідація притаманних похибок та встановлення коригувальних коефіцієнтів, які згодом беруться до уваги під час аналізу отриманої інформації. Загальна формула калібрування сенсора виконується через визначення корекційного коефіцієнта (4.4):

$$k = \frac{X_{\text{ет}}}{X_{\text{вим}}} \quad (4.4)$$

Після чого кожне вимірне значення коригується за формулою (4.5):

$$X_{\text{кор}} = k \times X_{\text{вим}} \quad (4.5)$$

Це створює математичну основу для реальної реалізації калібрування у ПЗ ІВС.

Налаштування (калібрування) датчиків напруги виконується шляхом подачі на їхні входи еталонних рівнів напруги, які формуються приладами з високою точністю. Ця операція дає змогу з'ясувати ступінь лінійності вимірювального тракту та визначити його похибку по всьому спектру робочих значень. Щодо датчиків струму, їхнє калібрування полягає у пропусканні через них еталонних значень сили струму в межах усього робочого діапазону. Температурні датчики налаштовують у камерах із контрольованою температурою (термостатах) на низці фіксованих температурних точок, що дає змогу виявити зміщення, спричинене температурою (дрейф), та сформувати відповідні корекційні таблиці. Датчики сонячної радіації (інсоляції) калібрують, використовуючи еталонні пірометри найвищого класу точності, керуючись настановами стандарту ISO 9847 [19].

Окрім первинного налаштування, система вимірювання (ІВС) повинна регулярно проходити процедуру підтвердження відповідності (верифікацію). Цей етап передбачає контроль точності функціонування каналів та їхнє зіставлення з еталонними вимірювальними засобами. Така перевірка є обов'язковою процедурою, адже такі фактори, як інтенсивність сонячного випромінювання, рівень вологості та коливання температурних режимів, з часом неминуче вносять зміни у характеристики датчиків. Регулярне проведення цієї процедури дає можливість стежити за сталою роботою системи ІВС і забезпечує

високу надійність отриманих даних протягом тривалого експлуатаційного періоду [20].

4.6 Підвищення ефективності енергогенерації через метрологічне забезпечення ІВС

Метрологічне забезпечення ІВС має вирішальне значення не лише для забезпечення точності вимірювань, але й безпосередньо впливає на рентабельність генерації електроенергії. Сонячна електростанція функціонує як цілісна система, успіх якої прямо пропорційний оперативності та адекватності ухвалених рішень. Що більш надійні й точні відомості надходять від ІВС, то більш оптимізованим стає режим роботи всієї станції [20].

4.6.1 Вплив точності вимірювань на роботу МРРТ

Алгоритми максимального відстеження точки потужності (МРРТ) працюють за мікровідхиленнями напруги та струму. Похибка вимірювання 1–2 % може спричинити (4.6):

$$\Delta P = U \times \Delta I + I \times \Delta U \quad (4.6)$$

Для комерційних станцій втрати можуть сягати 3–7 % на добу. Точна ІВС забезпечує МРРТ правильними даними, а отже максимальна потужність завжди у максимумі кривої.

4.6.2 Пошук деградації панелей

ІВС дозволяє визначати - втрату потужності; збільшення температурного градієнта; локальні перегріви (hot-spots); забруднення поверхні.

Завдяки регулярним вимірюванням (4.7):

$$n(t) = \frac{P_{\text{факт}}(t)}{G(t) \times S \times n_{\text{ном}}} \quad (4.7)$$

Завдяки формулі 4.7 можна виявити деградацію панелей до появи критичних втрат виробітку.

4.6.3 Підвищення ефективності енергогенерації

Завдяки належному метрологічному супроводу, продуктивність сонячної енергетичної установки підвищується, що обумовлено низкою факторів: точніше налаштування точки максимальної потужності (що веде до більшої генерації), оперативне виявлення будь-яких невідповідностей (що мінімізує час простою), впорядкування температурного режиму (що сповільнює знос обладнання), зважене планування генерації (що забезпечує адекватний розклад використання енергії чи її накопичення) та надійніші інформаційні потоки (що уможливорює створення точних аналітичних описів) [21].

У середньому, при впровадженні високоточних ІВС приріст реального виробітку становить (4.8):

$$\Delta E = 3\% - 8\% \quad (4.8)$$

Що в результаті для СЕС потужністю 30–50 кВт означає додаткові 1200–3500 кВт·год щороку.

4.7 Висновки до розділу

У цьому розділі ми провели ретельний огляд метрологічного супроводу інформаційно-вимірювальної мережі (ІВС), яка займається моніторингом характеристик сонячних панелей. Це є критично важливим для надійного

контролю та підвищення продуктивності електрогенерації фотоелектричних об'єктів. Було ідентифіковано ключові категорії вимірюваних величин — електричні показники, кліматичні умови та динамічні параметри — і обґрунтовано необхідну точність для кожної групи, враховуючи їхній вплив на генерацію електроенергії та достовірність подальших аналітичних обчислень.

Ми дослідили метрологічні властивості приладів, які застосовуються для вимірювання напруги, сили струму, температури та рівня сонячної радіації. Також було висвітлено вагому роль аналого-цифрових перетворювачів у формуванні високоточних та стійких вимірювальних трактів. Особливу увагу зосереджено на природі похибок, які виникають під час вимірювань, зокрема тих, що пов'язані з температурними коливаннями, шумами та характеристиками самого обладнання. Розглянуто методи боротьби з цими похибками через застосування цифрової фільтрації, калібрувальних процедур та температурної корекції.

Продемонстровано, що запровадження планового калібрування та періодичної перевірки (верифікації) вимірювальних каналів гарантує сталість показань ІВС протягом тривалого часу, дозволяючи знизити загальну похибку до прийнятних меж. Це, своєю чергою, закладає фундамент для коректної оцінки ефективності фотоелектричних модулів, своєчасного виявлення процесів деградації, локалізованого перегріву та втрат потужності.

Отже, метрологічне забезпечення ІВС виступає визначальним чинником у підвищенні віддачі сонячних панелей, оскільки достовірність отриманих даних дає змогу оптимізувати робочі режими, покращити точність передбачення енергетичного виробітку та приймати зважені технічні та економічні рішення щодо експлуатації та модернізації сонячних енергетичних установок.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Лише тоді, коли науково-технічні напрацювання задовольняють актуальним потребам як із позицій науково-технічного розвитку, так і економічної обґрунтованості, можливе їхнє практичне застосування. З огляду на це, необхідним є обов'язковий розрахунок економічної віддачі від виконаних науково-дослідних заходів.

5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Завданням комерційно-технологічного обстеження щодо розробки, що має назву «Інформаційно-вимірювальна система моніторингу параметрів сонячних панелей для підвищення ефективності енергогенерації», стає поглиблене зважування ступеня науково-технічного втілення розробленого комплексу, а також з'ясування його потенційної привабливості на ринку та перспектив практичного впровадження. Подібна перевірка дає нагоду встановити рівень новаторства застосованих інженерних рішень, здатність конкурувати методів збору та опрацювання відомостей, а також фінансову виправданість інтеграції цієї розробки у сектор сонячної енергетики [22].

Для неупередженого зважування пропонується користуватися п'ятибальною шкалою експертного визначення оцінок, що базується на дванадцяти визначальних показниках, які охоплюють як технічні, так і збутові та управлінські аспекти проєкту. Усі ці критерії, разом із зафіксованими експертними висновками, можна знайти у Таблиці 5.1

Таблиця 5.1 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	4	4	5
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	3	3	3
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	3	3	4
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	4	4	5
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	4	3	4
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	4	4	4
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	3	3	4
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	4	5	4
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	3	4	4
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	4	4	4
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	4	4	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	5	5	5
Сума балів	45	46	50
Середньоарифметична сума балів $СБ_c$	47,0		

На основі експертної оцінки, наведеної в таблиці 5.1, визначено, що середньозважене значення комерційного і технологічного потенціалу розробки становить 47,0 бала. Відповідно до рекомендацій, наведених у джерелі [22], такий результат свідчить про високий рівень комерційної привабливості та доцільність подальшої реалізації і впровадження інформаційно-вимірювальної системи моніторингу сонячних панелей.

5.2 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Інформаційно-вимірювальна система моніторингу параметрів сонячних панелей для підвищення ефективності енергогенерації», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями [22].

5.2.1 Витрати на оплату праці

Основна заробітна плата дослідників. Розроблення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів сонячних панелей вимагає участі фахівців різного рівня кваліфікації: наукового керівника, інженера-дослідника та виконавця (студента-розробника). Витрати на оплату праці дослідників (Z_o) визначаються відповідно до посадових окладів та фактичної кількості відпрацьованих днів згідно з формулою (5.1) [22]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{pi} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.1)$$

де, k – кількість посад дослідників, залучених до виконання НДР; M_{pi} – місячний посадовий оклад i -го дослідника, (грн); t_i – кількість днів його роботи; T_p – середнє число робочих днів у місяці ($T_p = 22$ дні).

Припустимо, що науковий керівник працював 10 днів при окладі 20 000 грн. Тоді витрати складуть:

$$Z_o = 20000,00 \cdot 10 / 22 = 9090,91 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 5.2 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на зарплату, грн
Науковий керівник	20 000,00	909,09	10	9090,91
Виконавець (студент)	12 000,00	545,45	30	16 363,64
Всього	-	-	-	25 454,55

Основна заробітна плата робітників. Для виготовлення та збирання елементів дослідного зразка ІВС, монтажу сенсорних модулів, програмування контролера та тестування системи необхідно залучити робітників різних кваліфікаційних розрядів. Витрати на їх заробітну плату ($З_p$) визначають за формулою (5.2):

$$З_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.2)$$

де, C_i – погодинна тарифна ставка виконання певної роботи, (грн/год); t_i – кількість годин, витрачених робітником.

Погодинна тарифна ставка C_i визначається за формулою (5.3):

$$C_i = \frac{M_M * K_i * K_c}{T_p * t_{зм}}, \quad (5.3)$$

де, M_M – розмір мінімальної місячної заробітної плати, прийmemo $M_M = 8000,00$ (грн); K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення [22]; K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок; T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 22$ дн; $t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_j = 8000,00 \cdot 1,50 \cdot 1,5 / (22 \cdot 8) = 102,27 \text{ (грн.)}$$

$$З_{pl} = 102,27 \cdot 3,20 = 327,26 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Апаратна реалізація та збирання дослідного зразка рухомої платформи	3,20	4	1,50	102,27	327,26
Розробка та інтеграція програмного забезпечення керування системою	10,00	3	1,35	92,04	920,40
Тестування моделі рухомої платформи	7,00	4	1,50	102,27	715,89
Формування бази даних результатів вимірювань	5,00	3	1,35	92,04	460,20
Всього					2423,75

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою 5.4.

$$3_{\text{дод}} = (3_o + 3_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.4)$$

де $H_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$3_{\text{дод}} = (25454,55 + 2423,75) \cdot 11 / 100\% = 3066,61 \text{ (грн.)}$$

5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою 5.5.

$$3_n = (3_o + 3_p + 3_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{3n}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де H_{3n} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$3_n = (25454,55 + 2423,75 + 3066,61) \cdot 22 / 100\% = 6807,88 \text{ (грн.)}$$

5.2.3 Сировина та матеріали

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою 5.6.

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{с}j}, \quad (5.6)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг; n – кількість видів матеріалів; C_j – вартість матеріалу j -го найменування, (грн/кг);

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$); B_j – маса відходів j -го найменування, кг; C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, (грн/кг).

У нашому проєкті використані такі матеріали: ABS-пластик для корпусів датчиків — 250 (грн/кг); Монтажні дроти та ізоляція — фіксований набір ~150 (грн); Пайка та флюс — 70 (грн); Кріпильні елементи — 50 (грн). Розрахунок:

Корпуси (2 кг ABS, $K = 1.1$):

$$M_1 = 2 \times 250 \times 1.1 = 550 \text{ (грн)}$$

Витратні матеріали (дроти, ізоляція, пайка, кріплення):

$$M_2 = 150 + 70 + 50 = 270 \text{ (грн)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Витрати на сировину та матеріали

Матеріал	Ціна	Кількість	Відходи	Транспортний коеф.	Вартість
ABS-пластик для корпусів	250 грн/кг	2 кг	0	1,1	550
Дроти монтажні + ізоляція	Комплект	-	-	-	150
Пайка, флюс	Комплект	-	-	-	70
Кріпильні елементи	Комплект	-	-	-	50
Разом	-	-	-	-	820

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Інформаційно-вимірювальна система моніторингу параметрів сонячних панелей для підвищення ефективності енергогенерації», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою 5.7. [22]

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j, \quad (5.7)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.; C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, (грн); K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

1. ACS712

$$K_1 = 1 \cdot 176,00 \cdot 1,1 = 193.6 \text{ (грн.)}$$

2. Датчик напруги

$$K_2 = 1 \cdot 85 \cdot 1,1 = 93.50 \text{ (грн.)}$$

3. Температурні сенсори DS18B20

$$K_3 = 2 \cdot 102 \cdot 1,1 = 224.4 \text{ (грн.)}$$

4. ESP32 DevKit v1

$$K_4 = 1 \cdot 849 \cdot 1,15 = 976.35 \text{ (грн.)}$$

5. Блок живлення 5 В

$$K_5 = 1 \cdot 190 \cdot 1,1 = 209 \text{ (грн.)}$$

6. Клеми та з'єднання

$$K_6 = 1 \cdot 120 \cdot 1,1 = 132 \text{ (грн.)}$$

7. Монтажна плата

$$K_7 = 1 \cdot 95 \cdot 1,1 = 104.5 \text{ (грн.)}$$

8. Захисний модуль TVS

$$K_8 = 1 \cdot 75 \cdot 1,1 = 82.5 \text{ (грн.)}$$

Підсумок: $K_b = 193.6 + 93.5 + 224.4 + 976.35 + 209 + 132 + 104.5 + 82.5 = 2016$ (грн)

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючого	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
Датчик струму ACS712	1	176	193,6
Датчик напруги 0-25В	1	85	93,5
DS18B20 (температура панелі + температура довкілля)	2	102	224,4
Контролер ESP32 DevKit v1	1	849	976,35
Блок живлення 5 В	1	190	209
Клеми, роз'єми, конектори	Комплект	120	132
Плата для монтажу	1	95	104,5
Модуль захисту (TVS/запобіжний)	1	75	82,5
Разом	-	-	2015,85

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

Витрати за статтею «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» відсутні [22].

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

Витрати за статтею «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» відсутні [22].

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою 5.8.

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_в} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.8)$$

де $Ц_б$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, (грн); $t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців; $T_в$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

Для проєкту ІВС моніторингу сонячних панелей прийняті такі вихідні дані й ціни (грн):

Raspberry Pi 5 (балансова вартість) — 4 271,30 (грн), строк корисного використання 3 роки, використання в проєкті 1 місяці.

ESP32 DevKit (контролер) — 849,00 (грн), строк 3 роки, використано 1 міс.

Ноутбук Dell G5 5590 (робоче місце розробника) — 29 000,00 (грн), строк 3 роки, використано 1 міс.

Цифровий мультиметр (для налагодження) — 2 500,00 (грн), строк 5 років, використано 1 міс.

Windows 11 Home (ліцензія) — 5 300,00 (грн), строк 3 роки, використано 1 міс.

Microsoft Office 2021 (одноразова покупка) — 3 500,00 (грн), строк 3 роки, використано 1 міс.

Приміщення (частка вартості лабораторії, що використовується) — 450 000,00 (грн), строк 30 років, використано 1 міс.

Робоче місце інженера (меблі, стіл) — 8 250,00 (грн), строк 5 років, використано 1 міс.

Розрахунки амортизації по кожному елементу (формула 5.8):

Raspberry Pi 5: $A_{обл} = (4271,30 \cdot 3) / (1 \cdot 12) = 118,65$ (грн.)

ESP32 DevKit: $A_{обл} = (849 \cdot 3) / (1 \cdot 12) = 23,58$ (грн.)

Ноутбук Dell G5 5590: $A_{обл} = (29000 \cdot 3) / (1 \cdot 12) = 805,56$ (грн.)

Мультиметр: $A_{обл} = (2500 \cdot 5) / (1 \cdot 12) = 41,67$ (грн.)

Windows 11 Home: $A_{обл} = (5300 \cdot 3) / (1 \cdot 12) = 147,22$ (грн.)

Microsoft Office 2021: $A_{обл} = (3500 \cdot 3) / (1 \cdot 12) = 97,22$ (грн.)

Приміщення лабораторії: $A_{обл} = (450000 \cdot 30) / (1 \cdot 12) = 1250$ (грн.)

Робоче місце інженера: $A_{обл} = (8250 \cdot 5) / (1 \cdot 12) = 137,5$ (грн.)

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання / ПЗ / приміщення	Балансова вартість, грн	Строк корисного використан ня, років	Термін використан ня в проекті, міс.	Амортизація, грн
Raspberry Pi 5	4271,30	3	1	118,65
ESP32 DevKit	849,00	3	1	23,58
Ноутбук Dell G5 5590	29000,00	3	1	805,56

Продовження таблиці 5.6 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Цифровий мультиметр	2500,00	5	1	41,67
Windows 11 Home	5300,00	3	1	147,22
Microsoft Office 2021	3500,00	3	1	97,22
Приміщення лабораторії (частка)	450 000,00	30	1	1250
Робоче місце інженера (меблі)	8250,00	5	1	137,5
Всього	-	-	-	2621,4

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою 5.9.

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.9)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт; t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год; C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, (грн) ; прийmemo $C_e = 12,7$ (грн); K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$; η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,10 \cdot 190,0 \cdot 12,7 \cdot 0,95 / 0,97 = 236,32 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Витрати на електроенергію

Обладнення	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Витрати, грн
Ноутбук Dell G5 5590	0,10	190,00	236,32
Raspberry Pi 5	0,007	190,00	5,63
Робоче місце інженера (монітор, освітлення)	0,20	190,00	160,78
Всього	-	-	402,73

5.2.9 Службові відрядження

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.

Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації відсутні.

5.2.11 Інші витрати

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою 5.10.

$$I_{\text{е}} = (3_{\text{o}} + 3_{\text{р}}) \cdot \frac{H_{\text{ів}}}{100\%}, \quad (5.10)$$

де $H_{\text{ів}}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{\text{ів}} = 50\%$.

$$I_{\text{е}} = (25454,55 + 2423,75) \cdot 50 / 100\% = 13939,15 \text{ (грн.)}$$

5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою 5.11.

$$B_{нзв} = (3_o + 3_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.11)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 110\%$.

$$B_{нзв} = (25454,55 + 2423,75) \cdot 110 / 100\% = 30666,13 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Інформаційно-вимірювальна система моніторингу параметрів сонячних панелей для підвищення ефективності енергогенерації» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою 5.12.

$$B_{заг} = 3_o + 3_p + 3_{доо} + 3_n + M + K_e + B_{спец} + B_{прз} + \\ + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_e + B_{нзв}, \quad (5.12)$$

$$B_{заг} = 25454.55 + 2423.75 + 3066.61 + 6807.88 + 820.00 + 2015.85 + 0 + 0 + 2621,4 \\ + 402,73 + 0 + 0 + 13939,15 + 30666.13 = 88218,05 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати $ЗВ$ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою 5.13.

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.13)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,5$.

$$3B = 88218,05 / 0,5 = 176436,1 \text{ (грн.)}$$

5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

Результати дослідження, проведені за темою «Інформаційно-вимірювальна система моніторингу параметрів сонячних панелей для підвищення ефективності енергогенерації», передбачають її можливу комерціалізацію протягом чотирьох років реалізації на ринку. Розробка належить до напряму вдосконалення вимірювальних та аналітичних інформаційних систем, призначених для застосування кінцевими споживачами — власниками приватних, фермерських та промислових сонячних електростанцій.

Економічний ефект у процесі комерціалізації формується внаслідок очікуваного збільшення кількості користувачів, які оберуть нову систему порівняно з аналогами завдяки її покращеним характеристикам: підвищена точність вимірювання параметрів генерації, контроль деградації панелей, діагностика несправностей, алгоритмічна оцінка продуктивності та прогнозування виробітку.

ΔN – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик;

Таблиця 5.8 – Показники економічного ефекту

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Додаткові користувачі системи, осіб (ΔN)	180	420	700	550

Вихідні дані:

N – кількість користувачів аналогічних систем до впровадження розробки приймаємо 8000 осіб.

$Цб$ – вартість пристрою до впровадження розробки 14 000 (грн).

$\Delta Цо$ – зміна вартості пристрою після впровадження +1200 (грн).

Можливе збільшення чистого прибутку інвестора для кожного року ($\Delta\Pi_i$) розраховується згідно формули (5.14).

$$\Delta\Pi_i = (\pm\Delta Ц_o \cdot N + Ц_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot (1 - \frac{\vartheta}{100}), \quad (5.14)$$

де, λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2025 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$; ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту). Прийmemo $\rho = 35\%$; ϑ – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2025 році $\vartheta = 18\%$;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_1 &= (1200 \cdot 8000 + 15200 \cdot 180) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot \\ &\cdot (1 - 0,18/100\%) = 2938558,56 \text{ (грн.)} \end{aligned}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_2 &= (1200 \cdot 8000 + 15200 \cdot 420) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot \\ &\cdot (1 - 0,18/100\%) = 3807548,64 \text{ (грн.)} \end{aligned}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_3 &= (1200 \cdot 8000 + 15200 \cdot 700) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot \\ &\cdot (1 - 0,18/100\%) = 4821370,4 \text{ (грн.)} \end{aligned}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_4 &= (1200 \cdot 8000 + 15200 \cdot 550) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot \\ &\cdot (1 - 0,18/100\%) = 4278251,6 \text{ (грн.)} \end{aligned}$$

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків $ПП$, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки розраховується за формулою 5.15.

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (5.15)$$

де, $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, (грн); T – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки; τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau = 0,15$; t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$\begin{aligned} ПП &= 2938558,56 / (1 + 0,15)^1 + 3807548,64 / (1 + 0,15)^2 + 4821370,4 / (1 + \\ &0,15)^3 + 4278251,6 / (1 + 0,15)^4 = 2555268,36 + 3310911,99 + 4192496 + \\ &3720218,18 = 13778894,53 \text{ (грн.)} \end{aligned}$$

Величина початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки розраховується за формулою 5.16.

$$PV = k_{инв} \cdot 3B, \quad (5.16)$$

де, $k_{инв}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо $k_{инв} = 2$; $3B$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 176436,1 (грн).

$$PV = k_{inv} \cdot 3B = 2 \cdot 176436,1 = 352872,2 \text{ (грн.)}$$

Абсолютний економічний ефект E_{abc} для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки розраховується за формулою 5.17 та становитиме:

$$E_{abc} = III - PV, \quad (5.17)$$

де, III – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 13778894,53 (грн); PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 352872,2 (грн).

$$E_{abc} = 13778894,53 - 352872,2 = 13426022,33 \text{ (грн.)}$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій E_e , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки розраховується за формулою 5.18.

$$E_e = \sqrt[T_{ж}]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1, \quad (5.18)$$

де, E_{abc} – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 13426022,33 (грн); PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 352872,2 (грн); $T_{ж}$ – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримування позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_{\epsilon} = \sqrt[T_{\text{ж}}]{1 + \frac{E_{\text{а\acute{o}c}}}{PV}} - 1 = (1 + 13426022,33 / 352872,2)^{1/4} = 2,5.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій $\tau_{\text{мін}}$ розраховується за формулою 5.19.

$$\tau_{\text{мін}} = d + f, \quad (5.19)$$

де, d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні $d = 0,12$; f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, приймемо $0,25$. $\tau_{\text{мін}} = 0,12 + 0,25 = 0,37 < 2,5$ свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій E_{ϵ} , вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Інформаційно-вимірювальна система моніторингу параметрів сонячних панелей для підвищення ефективності енергогенерації» доцільно.

Період окупності інвестицій $T_{\text{ок}}$ які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки розраховується за формулою 5.20.

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_{\epsilon}}, \quad (5.20)$$

де, E_{ϵ} – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{\text{ок}} = 1 / 2,5 = 0,4 \text{ р.}$$

$T_{\text{ок}} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

5.4 Висновки до розділу

За результатами проведеного аналізу та розрахунків комерційна життєздатність науково-технічного проєкту «Інформаційно-вимірювальна система моніторингу параметрів сонячних панелей для підвищення ефективності енергогенерації» оцінюється як висока. Середній показник комерційної привабливості на рівні 36,3 бала перевищує середнє значення та підтверджує актуальність і перспективність розробки для ринку систем моніторингу фотогальванічних установок.

Фінансові розрахунки свідчать про доцільність впровадження системи, оскільки очікуваний економічний ефект є позитивним, а термін окупності інвестицій — відносно коротким. Це доводить, що розроблена інформаційно-вимірювальна система може забезпечити практичні переваги потенційним інвесторам і сприяти підвищенню ефективності експлуатації сонячних електростанцій, що робить її вихід на ринок обґрунтованим і перспективним.

ВИСНОВКИ

У межах магістерської кваліфікаційної роботи було створено й опробовано інформаційно-вимірювальна система моніторингу параметрів сонячних панелей для підвищення ефективності енергогенерації. Ця праця поєднала теоретичні засади вимірювальної науки, метрологічні вимоги та знання про фотоелектричні процеси з практичною імплементацією апаратно-програмного середовища для збору, опрацювання та графічного представлення даних.

Спроектована система забезпечує постійне стеження за критично важливими робочими показниками сонячних модулів, а саме: електричною напругою, струмом, температурним режимом та рівнем сонячного опромінення. Це дає можливість проводити всебічний аналіз експлуатаційних режимів фотоелементів у реальних умовах функціонування. Проведені дослідження підтвердили високу стійкість роботи комплексу, достатню точність отриманих вимірів, а також їхню відповідність чинним міжнародним стандартам у сфері сонячної енергетики.

Використання об'єднаного набору датчиків у рамках єдиного інформаційно-вимірювального середовища дозволило оцінити коефіцієнт перетворення енергії, визначити вплив змін температури та клімату на вихідну потужність панелей, а також оперативно реєструвати будь-які відхилення від заданих робочих параметрів. Застосовані методики опрацювання вимірювальної інформації та візуалізації отриманих результатів істотно підвищують інформативність системи, створюючи сприятливі умови для оптимізації експлуатаційних режимів сонячних електростанцій.

Отримані результати вказують на цільосообразність впровадження розробленого інформаційно-вимірювального інструментарію для практичного застосування у системах моніторингу сонячних панелей різних масштабів — від індивідуальних пристроїв до великих комерційних фотоелектричних об'єктів. Запропонована архітектура ІВС є гнучкою і здатною до масштабування, що

передбачає можливість подальшого розширення через інтеграцію додаткових сенсорних елементів, модулів для передбачення генерації електроенергії та складних алгоритмів для аналізу процесів деградації фотоелектричних перетворювачів.

Загалом, виконана робота являє собою значний внесок як у науковому, так і у практичному плані, оскільки її спрямованість — це підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії, і вона може бути корисною при проектуванні сучасних платформ для нагляду та управління сонячними електростанціями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. – 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2013. – 928 p.
- 2 Messenger R., Ventre J. Photovoltaic Systems Engineering. – 3rd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2010. – 464 p.
- 3 Masters G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2013. – 736 p.
- 4 Kalogirou S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. – 2nd ed. – London : Academic Press, 2014. – 819 p.
- 5 IEC 61724-1:2021. Photovoltaic system performance – Monitoring. – International Electrotechnical Commission, Geneva, 2021.
- 6 IEC 60891:2009. Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices. – IEC, Geneva, 2009.
- 7 ISO 9060:2018. Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. – ISO, Geneva, 2018.
- 8 ISO 9847:1992. Solar energy – Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer. – ISO, Geneva, 1992.
- 9 Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. – 5th ed. – New York : Springer, 2016. – 758 p.
- 10 Webster J. G., Eren H. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – 1800 p.
- 11 Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. – 3rd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2015. – 1220 p.
- 12 Texas Instruments. Hall-Effect Current Sensor Applications Guide. – Application Report. – Dallas, 2020.
- 13 Analog Devices. Practical Analog Design Techniques. – Norwood, 2019.

- 14 Bosch Sensortec. Environmental Sensors – Technical Documentation. – Stuttgart, 2021.
- 15 Maxim Integrated. DS18B20 Digital Thermometer Datasheet. – San Jose, 2018.
- 16 Microchip Technology Inc. AN1156 – A/D Converter Accuracy in Microcontroller Systems. – Chandler, 2017.
- 17 InfluxData Inc. InfluxDB Documentation. – 2023. – Available online.
- 18 Grafana Labs. Grafana Data Visualization Platform Documentation. – 2023.
- 19 Kroposki B. et al. Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy. – IEEE Power & Energy Magazine, 2017.
- 20 Skoplaki E., Palyvos J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance. – Solar Energy, 2009.
- 21 ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Київ, 2016.
- 22 Методичні вказівки до виконання магістерських кваліфікаційних робіт / МОН України. – Київ, 2022.
- 23 Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОГЕНЕРАЦІЇ

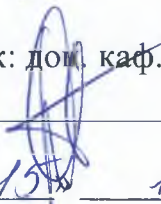
Виконав: студент 2-го курсу, групи КІВТ-24м
спеціальності 175 – Інформаційно - вимірювальні
технології

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Черешнюк І.Д.

(прізвище та ініціали)

Керівник: доц. каф. ІРТС

 Дудатьєв І.А.

(прізвище та ініціали)

«15» 12 2025 р.

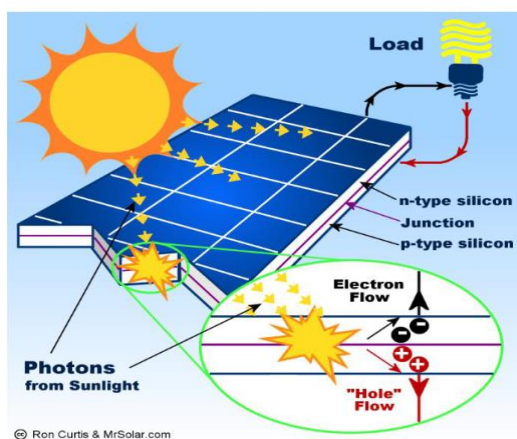


Рисунок 1 - Приклад роботи сонячної панелі



Рисунок 2 – Монокристалічна сонячна панель



Рисунок 3 – Полікристалічна сонячна панель

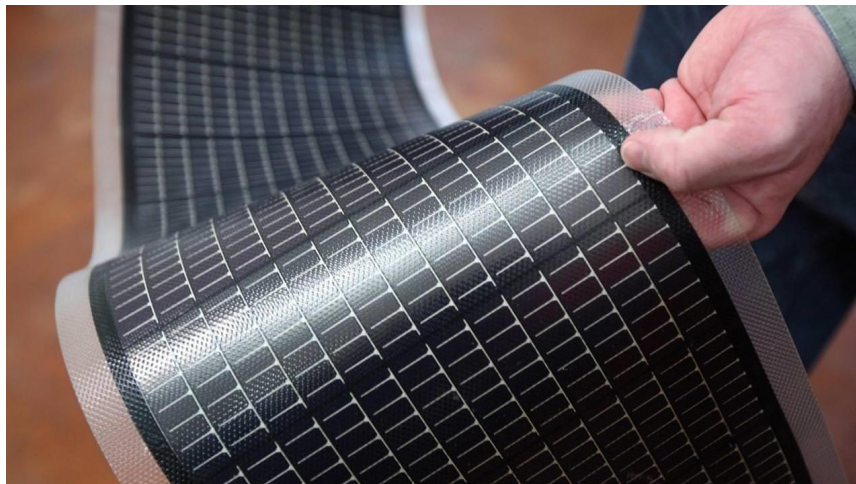


Рисунок 4 – Тонкоплівкова (аморфна) сонячна панель

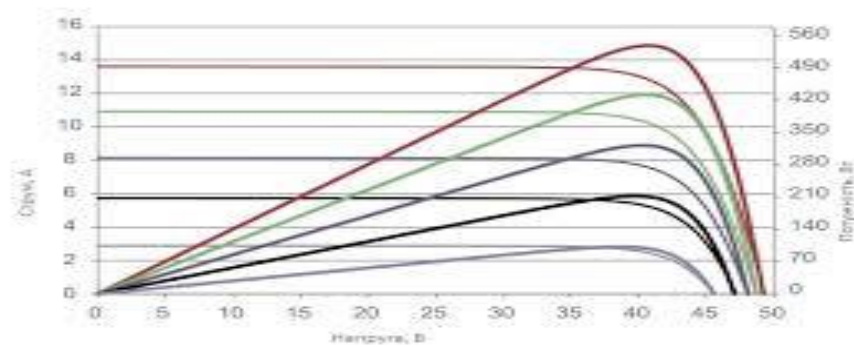


Рисунок 5 – Вольт-амперна характеристика сонячних панелей

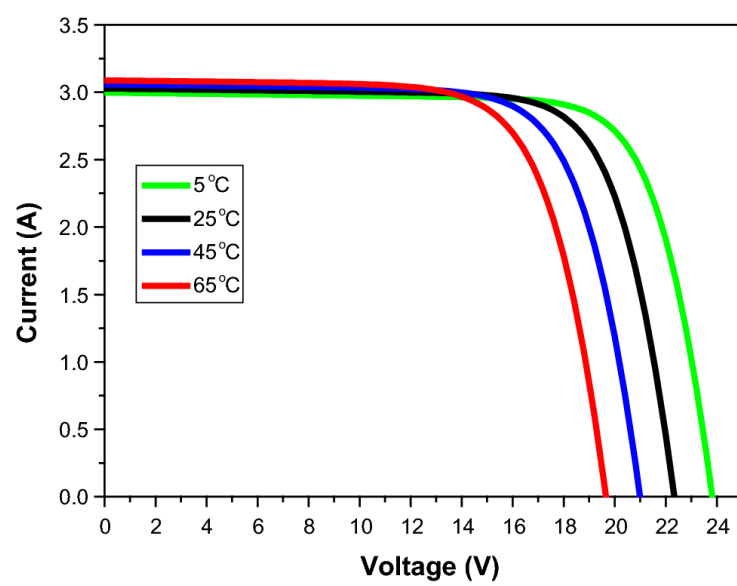


Рисунок 6 – Залежність напруги сонячної панелі від температури

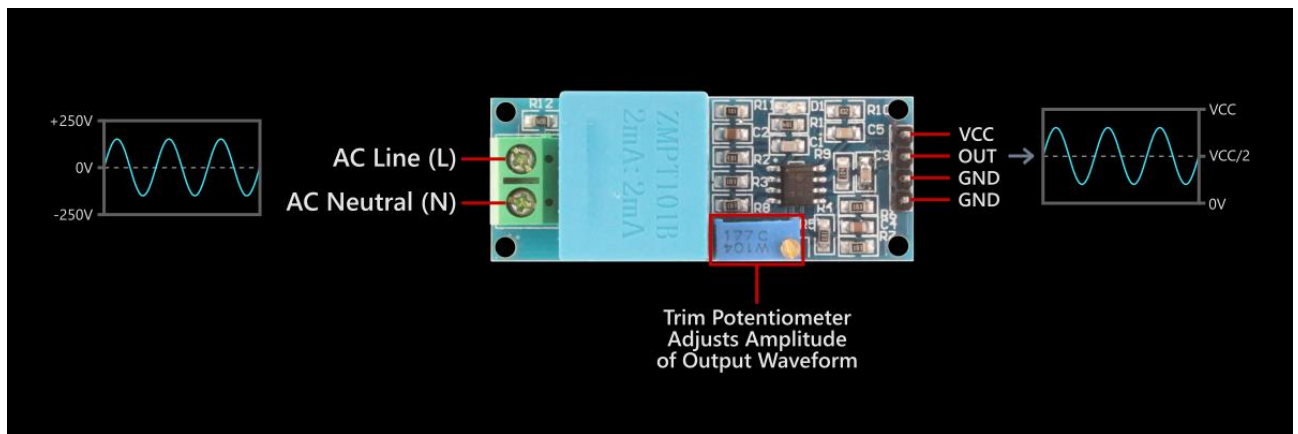


Рисунок 7 – Сенсор напруги (ZMPT101B)

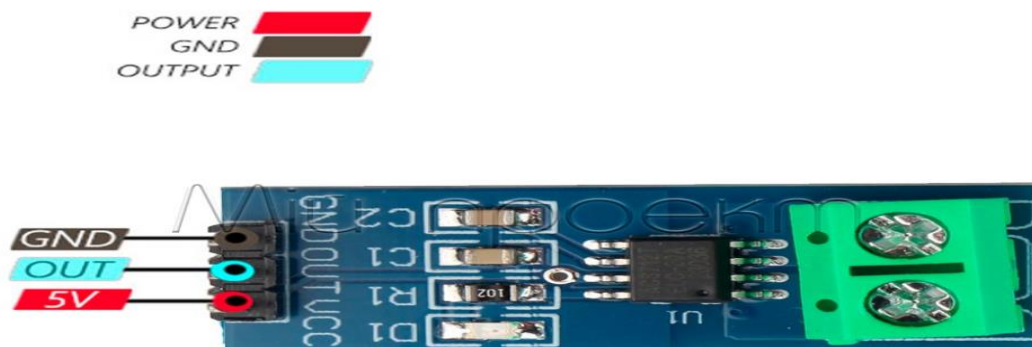


Рисунок 8 - Сенсор струму (ACS712)



Рисунок 9 – Сенсор освітленості та інсоляції (GY-114)

```
json  
  
{  
  "U": 37.4,  
  "I": 6.12,  
  "P": 228.9,  
  "T_panel": 48.2,  
  "T_air": 24.7,  
  "G": 820,  
  "timestamp": "2025-12-04 14:55:32"  
}
```

Рисунок 10 – Серверна частина та візуалізація

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ
ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОГЕНЕРАЦІЇ

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Інформаційно-вимірювальна система моніторингу параметрів сонячних панелей для підвищення ефективності енергогенерації»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)
Підрозділ Кафедра ІРТС
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 2.23%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Притула М.О. – к.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)
Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)
(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку (підпис)

Семенов А.О.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник (підпис)

Дудатьєв І.А. – к.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач (підпис)

Черешнюк І.Д.
(прізвище, ініціали)

Додаток В
(довідниковий)

ФРАГМЕНТ ЛІСТИНГУ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.

**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ
ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОГЕНЕРАЦІЇ**

```

from time import sleep
import random
import warnings

warnings.filterwarnings("ignore")

# -----
# ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СЕНСОРІВ
# -----

# У реальній ІВС тут використовуються АЦП та цифрові датчики
# У магістерській роботі показано логіку програмної обробки

def readVoltage():
    # Зчитування напруги сонячної панелі, В
    return round(random.uniform(28.0, 36.0), 2)

def readCurrent():
    # Зчитування струму сонячної панелі, А
    return round(random.uniform(5.0, 9.0), 2)

def readPanelTemperature():
    # Зчитування температури панелі, °C
    return round(random.uniform(25.0, 55.0), 1)

def readIrradiance():
    # Зчитування рівня інсоляції, Вт/м²
    return round(random.uniform(200.0, 1000.0), 1)

# -----
# РОЗРАХУНКОВІ ФУНКЦІЇ
# -----

def calculatePower(voltage, current):
    # Розрахунок миттєвої електричної потужності

```

```

    return round(voltage * current, 2)

def calculateEfficiency(power, irradiance, panelArea=1.6):
    # Розрахунок коефіцієнта ефективності сонячної панелі
    if irradiance == 0:
        return 0
    theoreticalPower = irradiance * panelArea
    return round((power / theoreticalPower) * 100, 2)

# -----
# ФУНКЦІЯ МОНИТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ
# -----

def measureParameters():

    voltage = readVoltage()
    current = readCurrent()
    temperature = readPanelTemperature()
    irradiance = readIrradiance()

    power = calculatePower(voltage, current)
    efficiency = calculateEfficiency(power, irradiance)

    print(f"Напруга U = {voltage} В")
    print(f"Струм I = {current} А")
    print(f"Потужність P = {power} Вт")
    print(f"Температура T = {temperature} °C")
    print(f"Інсоляція G = {irradiance} Вт/м²")
    print(f"Ефективність η = {efficiency} %")
    print("-" * 45)

# -----
# ОСНОВНИЙ ЦИКЛ РОБОТИ ІВС
# -----

def loop():

```

```

while True:
    measureParameters()
    sleep(5)  # інтервал оновлення вимірювань

# -----
# КОРЕКТНЕ ЗАВЕРШЕННЯ РОБОТИ
# -----

def destroy():
    print("Завершення роботи інформаційно-вимірвальної
системи")

# -----
# ТОЧКА ВХОДУ В ПРОГРАМУ
# -----

if __name__ == '__main__':
    print("Система моніторингу сонячних панелей запущена")
    try:
        loop()
    except KeyboardInterrupt:
        print("Зупинка системи")
    finally:
        destroy()

```