

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

Парандій Роман Богданович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.518.3:621.311.243
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення інформаційно-вимірювальної системи альтернативного
моніторингу роботи однофазної гібридної фотоелектричної станції

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики

(назва освітньої програми)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня _____ Р. Б. Парандій
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Яворський Андрій Вікторович, доцент, к.т.н.
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка"

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інформаційно-
вимірювальних технологій та
енергетичного менеджменту

В. С. Цих

«___» _____ 20__ року

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

Парандію Роману Богдановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розроблення інформаційно-вимірювальної системи альтернативного моніторингу роботи однофазної гібридної фотоелектричної станції*

керівник роботи *Яворський Андрій Вікторович, доцент, к.т.н.*

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

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

2. Строк подання студентом роботи 9 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи

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

1. Розробити структуру альтернативної системи моніторингу гібридної фотоелектричної станції.

2. Обрати необхідні засоби вимірювання та контролю, виконати їх інтеграцію з програмно-апаратним комплексом Smart-MAIC.

3. Розробити схеми підключення вимірювальних пристроїв та провести оцінювання точності контролю основних параметрів роботи станції.

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання “5” травня 2026 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання (відповідно до наказу).	05.05.2026	
2	Складання плану.	10.05.2026	
3	Підбір джерел, оброблення зібраних матеріалів.	10.05.2026 – 01.06.2026 р.	
4	Розроблення 1 розділу: «Аналіз особливостей роботи гібридних фотоелектричних станцій та систем їх моніторингу».	01.06.2026 – 12.06.2026 р.	
5	Розроблення 2 розділу: «Розроблення інформаційно-вимірювальної системи альтернативного моніторингу гібридної фотоелектричної станції».	12.05.2026 – 28.05.2026 р.	
6	Розроблення 3 розділу: «Оцінювання працездатності та метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальної системи альтернативного моніторингу».	28.05.2026 – 06.06.2026 р.	
7	Оформлення роботи.	06.06.2026 – 09.06.2026 р.	

Студент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Парандій Р. Б. «Розроблення інформаційно-вимірювальної системи альтернативного моніторингу роботи однофазної гібридної фотоелектричної станції». Дипломна робота освітнього рівня - бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – Івано-Франківськ, 2026.

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена розробленню альтернативної системи моніторингу гібридної фотоелектричної станції для розширення можливостей контролю її технічного стану та параметрів функціонування. Структурно робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 99 сторінок, включаючи 23 рисунки і 9 таблиць. Бібліографія охоплює 40 використаних джерел.

У першому розділі проведено аналіз сучасних систем моніторингу фотоелектричних станцій, розглянуто особливості роботи гібридних інверторів та існуючих засобів контролю параметрів енергетичних систем. Визначено переваги та недоліки стандартних систем моніторингу, а також обґрунтовано необхідність контролю додаткових параметрів, які впливають на ефективність роботи фотоелектричної станції.

У другому розділі розроблено структуру альтернативної системи моніторингу на базі програмно-апаратного комплексу Smart-MAIC. Виконано вибір та обґрунтування використання вимірювального обладнання, зокрема лічильника електричної енергії D103-21, універсальних лічильників імпульсів D105, датчиків температури DS18B20, датчика температури та вологості DHT22, датчика сонячного випромінювання RK200-04 та пристрою контролю напруги акумуляторної батареї. Розроблено схеми підключення та описано принцип роботи системи.

У третьому розділі проведено оцінювання точності вимірювання основних контрольованих параметрів, виконано аналіз роботи системи в умовах втрати доступу до хмарного сервісу та здійснено функціональне порівняння стандартної

і розробленої систем моніторингу. Також наведено рекомендації щодо практичного застосування системи для контролю роботи гібридних фотоелектричних станцій.

Практична цінність роботи полягає у розробленні альтернативної системи моніторингу, яка забезпечує розширений контроль параметрів роботи фотоелектричної станції, дозволяє здійснювати моніторинг температурних режимів обладнання, параметрів навколишнього середовища, рівня сонячного випромінювання та стану акумуляторної батареї, що сприяє підвищенню ефективності експлуатації енергетичної системи.

Ключові слова: ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ, ГІБРИДНИЙ ІНВЕРТОР, СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ, SMART-MAIC, СОНЯЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ТЕМПЕРАТУРА, ВОЛОГІСТЬ, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, АЛЬТЕРНАТИВНИЙ МОНІТОРИНГ.

ABSTRACT

Parandii, R. B. “Development of an Information and Measurement System for Alternative Monitoring of a Single-Phase Hybrid Photovoltaic Power Plant.” Bachelor’s thesis, submitted in manuscript form. Specialization – 152 “Metrology and Information and Measurement Technology.” – Ivano-Frankivsk, 2026.

This bachelor’s thesis is devoted to the development of an alternative monitoring system for a hybrid photovoltaic power plant to expand the capabilities for monitoring its technical condition and operational parameters. Structurally, the thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, and a list of references. The total length of the thesis is 99 pages, including 23 figures and 9 tables. The bibliography includes 40 references.

The first chapter analyzes modern monitoring systems for photovoltaic power plants, examines the operational characteristics of hybrid inverters, and reviews existing methods for monitoring power system parameters. It identifies the advantages and disadvantages of standard monitoring systems and justifies the need to monitor additional parameters that affect the efficiency of a photovoltaic power plant.

The second chapter outlines the structure of an alternative monitoring system based on the Smart-MAIC hardware and software platform. The selection and justification for the use of measurement equipment were carried out, specifically the D103-21 electricity meter, D105 universal pulse counters, DS18B20 temperature sensors, the DHT22 temperature and humidity sensor, the RK200-04 solar radiation sensor, and a battery voltage monitoring device. Connection diagrams were developed, and the system’s operating principle was described.

In the third chapter, the measurement accuracy of the main monitored parameters is evaluated, the system’s performance under conditions of lost access to the cloud service is analyzed, and a functional comparison of the standard and developed monitoring systems is conducted. Recommendations are also provided regarding the practical application of the system for monitoring the operation of hybrid photovoltaic power plants.

The practical value of this work lies in the development of an alternative monitoring system that provides enhanced control of photovoltaic plant operating parameters, allowing for the monitoring of equipment temperature conditions, environmental parameters, solar radiation levels, and battery status, which contributes to improving the operational efficiency of the power system.

Keywords: PHOTOVOLTAIC STATION, HYBRID INVERTER, MONITORING SYSTEM, SMART-MAIC, SOLAR RADIATION, TEMPERATURE, HUMIDITY, BATTERY, INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM, ALTERNATIVE MONITORING.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ГІБРИДНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА СИСТЕМ ЇХ МОНІТОРИНГУ	15
1.1 Особливості роботи однофазної гібридної фотоелектричної станції.....	15
1.1.1 Основні компоненти гібридної фотоелектричної станції.....	17
1.1.2 Основні режими роботи гібридної фотоелектричної станції.	22
1.2 Необхідність моніторингу параметрів роботи фотоелектричних станцій.	23
1.2.1 Контроль генерації та споживання електроенергії.....	23
1.2.2 Моніторинг параметрів акумуляторних батарей.	25
1.2.3 Аналіз аварійних режимів та ефективності роботи станції.....	26
1.3 Аналіз стандартних систем моніторингу фотоелектричних станцій.	26
1.3.1 Система моніторингу Deye Cloud.	27
1.3.2 Система моніторингу SolarMan.....	29
1.3.3 Система моніторингу SolaXCloud.....	30
1.3.4 Переваги стандартних систем моніторингу.	32
1.4 Недоліки стандартних систем моніторингу та необхідність створення альтернативної інформаційно-вимірювальної системи.	32
1.4.1 Залежність від серверів виробника та інтернет-з'єднання	33
1.4.2 Залежність моніторингу від комплектних реєстраторів даних.....	34
1.4.3 Втрата даних при порушенні роботи хмарних сервісів	35
1.4.4 Обмеження функціональних можливостей стандартного моніторингу	38
1.4.5 Обґрунтування необхідності альтернативної системи моніторингу	40
1.5 Висновки до розділу 1	41

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ ГІБРИДНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ.....	43
2.1 Загальна структура альтернативної системи моніторингу.	43
2.1.1 Архітектура системи Smart-MAIC.	45
2.1.2 Принцип збору, обробки та збереження даних.....	46
2.2 Трифазний лічильник D103-21 у системі альтернативного моніторингу. .	47
2.2.1 Призначення та функції трифазного лічильника D103-21 у однофазній мережі.	48
2.2.2 Основні параметри та принцип роботи трифазного лічильника D103-21.....	50
2.3 Універсальний лічильник імпульсів D105 у системі альтернативного моніторингу.	51
2.3.1 Призначення універсального лічильника імпульсів D105.	52
2.3.2 Конструкція та можливості універсального лічильника імпульсів D105.	53
2.4 Датчики температури та вологості у системі моніторингу.	55
2.4.1 Датчик температури DS18B20.....	56
2.4.2 Датчик температури та вологості DHT22.	57
2.4.3 Датчик інтенсивності сонячного випромінювання.	59
2.5 Використання гальванічної розв'язки у системі моніторингу.	63
2.5.1 Призначення гальванічної розв'язки.	64
2.5.2 Захист вимірювальних каналів системи.	65
2.6 Розроблення вузла контролю напруги акумуляторної батареї.	67
2.6.1 Використання дільника напруги для вимірювання напруги АКБ.	68
2.6.2 Розрахунок параметрів дільника напруги	69

	10
2.6.3 Масштабування сигналу та програмна обробка даних.	70
2.7 Організація візуалізації параметрів роботи фотоелектричної станції.....	73
2.7.1 Формування інформаційної панелі моніторингу.....	74
2.7.2 Відображення параметрів генерації та споживання.....	75
2.7.3 Відображення метеорологічних параметрів.	76
2.8 Висновки до розділу 2.	77
РОЗДІЛ 3. ОЦІНЮВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТА МЕТРОЛОГІЧНИХ	
ХАРАКТЕРИСТИК ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	
АЛЬТЕРНАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ	80
3.1 Аналіз вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальної системи. ...	81
3.2 Оцінювання точності вимірювання параметрів інформаційно-	
вимірювальної системи.	82
3.2.1 Оцінювання точності вимірювання напруги акумуляторної батареї... 83	
3.2.2 Оцінювання точності вимірювання температури.....	84
3.2.3 Оцінювання точності вимірювання температури та вологості.....	85
3.2.4 Оцінювання точності вимірювання сонячного випромінювання.....	86
3.3 Аналіз роботи системи моніторингу в умовах втрати доступу до хмарного	
сервісу.....	87
3.4 Функціональне порівняння стандартного та альтернативного моніторингу.	
.....	89
3.5 Рекомендації щодо практичного застосування розробленої системи.	90
3.6 Висновки до розділу 3.	91
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	95

ВСТУП

Актуальність роботи

В останні роки гібридні фотоелектричні станції набули значного поширення серед побутових споживачів електроенергії в Україні. Однією з основних причин популяризації сонячної енергетики стало впровадження механізму «зеленого тарифу», який дозволяв власникам приватних фотоелектричних станцій продавати надлишок згенерованої електроенергії у зовнішню мережу. За відпущену електроенергію споживачі отримували компенсацію відповідно до встановленого державою тарифу.

Однак упродовж останніх років ефективність використання домашніх сонячних електростанцій виключно в рамках «зеленого тарифу» почала знижуватися. Це пов'язано зі зменшенням вартості викупу електроенергії, нестабільністю виплат та збільшенням термінів окупності нових фотоелектричних станцій. Особливо помітними ці проблеми стали після початку повномасштабного вторгнення в Україну, коли спостерігались затримки виплат або їх неповне відшкодування.

Одночасно із цим в Україні різко зросла потреба у резервному електроживленні. Часті та тривалі відключення електроенергії призвели до активного поширення гібридних інверторів та акумуляторних систем накопичення енергії. У багатьох випадках користувачі спочатку встановлювали акумуляторні системи для забезпечення резервного живлення, а згодом додатково інтегрували сонячні панелі для компенсації власного споживання електроенергії.

Станом на 2022 рік в Україні налічувалось близько 45 тисяч побутових фотоелектричних станцій, а станом на 2025 рік їх кількість зросла майже до 70 тисяч. Це свідчить про швидкий розвиток сегменту побутової сонячної енергетики та зростання ролі гібридних фотоелектричних систем у забезпеченні енергетичної незалежності домогосподарств [1].

Важливою складовою експлуатації сучасної гібридної фотоелектричної станції є система моніторингу. Використання моніторингу дозволяє контролювати обсяги генерації та споживання електроенергії, здійснювати контроль стану акумуляторних батарей, аналізувати режими роботи інвертора та виявляти можливі несправності системи. Крім цього, моніторинг дає можливість оцінювати ефективність роботи фотоелектричної станції та оптимізувати режими використання накопиченої електроенергії.

Більшість сучасних виробників гібридних інверторів використовують власні хмарні системи моніторингу, в яких дані зберігаються на серверах виробника. Такий підхід створює залежність користувача від стабільності роботи серверної інфраструктури, доступності інтернет-з'єднання та функціонування комплектних реєстраторів даних. У разі виникнення несправностей або порушення роботи хмарного сервісу користувач може втратити доступ до історії роботи станції або частини архівних даних.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення альтернативної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу, яка забезпечить незалежний збір, аналіз та візуалізацію параметрів роботи однофазної гібридної фотоелектричної станції, а також створить додаткове джерело моніторингових даних для підвищення надійності контролю роботи фотоелектричної системи.

Мета і завдання дослідження

Розроблення інформаційно-вимірювальної системи альтернативного моніторингу роботи однофазної гібридної фотоелектричної станції для забезпечення незалежного збору, аналізу та візуалізації параметрів роботи системи, а також створення додаткового джерела моніторингових даних для підвищення надійності контролю роботи фотоелектричної станції.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз особливостей роботи однофазних гібридних фотоелектричних станцій;
- проаналізувати існуючі системи моніторингу фотоелектричних станцій та визначити їх основні недоліки;

- розробити структуру альтернативної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу;
- реалізувати вимірювання параметрів роботи фотоелектричної станції, акумуляторної батареї та метеорологічних параметрів;
- розробити вузол контролю напруги акумуляторної батареї;
- виконати оцінювання точності вимірювання основних параметрів системи;
- провести функціональне порівняння стандартного та альтернативного моніторингу.

Об'єкт дослідження

Процес моніторингу параметрів роботи однофазної гібридної фотоелектричної станції.

Предмет дослідження

Інформаційно-вимірювальна система альтернативного моніторингу параметрів роботи однофазної гібридної фотоелектричної станції.

Методи дослідження

У роботі використано методи аналізу технічної документації, методи інформаційно-вимірювальних технологій, методи збору, обробки та візуалізації даних, а також методи оцінювання точності вимірювання параметрів фотоелектричної станції.

Практичне значення одержаних результатів

Розроблення альтернативної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу, яка забезпечує незалежний збір, аналіз та візуалізацію параметрів роботи однофазної гібридної фотоелектричної станції, дозволяє створити додатковий канал отримання моніторингових даних, а також підвищує надійність контролю роботи фотоелектричної системи у випадку порушення роботи основного хмарного сервісу моніторингу.

Апробація роботи

Основні результати роботи були представлені на XXXVIII науково-технічній конференції студентів (2025/2026 н.р.), де робота зайняла I призове місце.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ГІБРИДНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА СИСТЕМ ЇХ МОНІТОРИНГУ

1.1 Особливості роботи однофазної гібридної фотоелектричної станції.

Гібридна фотоелектрична станція є однією з найбільш універсальних систем у сфері сонячної енергетики, оскільки поєднує у собі функції генерації, накопичення та резервного живлення електроенергії. На відміну від класичних мережевих фотоелектричних станцій, гібридна система здатна працювати не лише паралельно із зовнішньою електричною мережею, але й забезпечувати резервне живлення споживачів у разі зникнення напруги у мережі.

Основною особливістю гібридної фотоелектричної станції є наявність акумуляторної системи накопичення енергії, яка дозволяє зберігати надлишок згенерованої електроенергії та використовувати його у подальшому для живлення навантаження. Це забезпечує підвищення рівня енергетичної незалежності користувача та дозволяє більш ефективно використовувати електроенергію, згенеровану сонячними панелями.

Гібридні фотоелектричні станції можуть використовуватись як у побутовому секторі, так і на комерційних та промислових об'єктах. У побутових умовах найбільш поширеними є однофазні гібридні системи, які використовуються у приватних будинках, квартирах та невеликих об'єктах із однофазним електроживленням. Такі системи дозволяють забезпечувати резервне живлення критичного навантаження, накопичувати електроенергію в акумуляторах та частково або повністю компенсувати власне споживання електроенергії. Приклад реалізації однофазної гібридної фотоелектричної станції побутового призначення наведено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Приклад реалізації однофазної гібридної фотоелектричної станції потужністю 8 кВт побутового призначення.

Разом із однофазними системами широко застосовуються і трифазні гібридні фотоелектричні станції, які використовуються на об'єктах із трифазною мережею живлення. До таких об'єктів можуть належати комерційні підприємства, виробничі приміщення, офісні будівлі, складські комплекси та інші об'єкти не побутового призначення. Використання акумуляторних систем накопичення енергії у складі трифазних гібридних станцій дозволяє забезпечувати резервне живлення обладнання, компенсувати пікове споживання електроенергії, підвищувати рівень енергетичної незалежності та оптимізувати витрати на електроенергію. Приклад реалізації трифазної гібридної фотоелектричної станції для комерційного об'єкта наведено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Приклад реалізації трифазної гібридної фотоелектричної станції потужністю 50 кВт для комерційного об'єкта.

1.1.1 Основні компоненти гібридної фотоелектричної станції.

До основних компонентів гібридної фотоелектричної станції належать фотоелектричні модулі, гібридний інвертор, акумуляторна батарея, навантаження споживача та зовнішня електрична мережа [1].

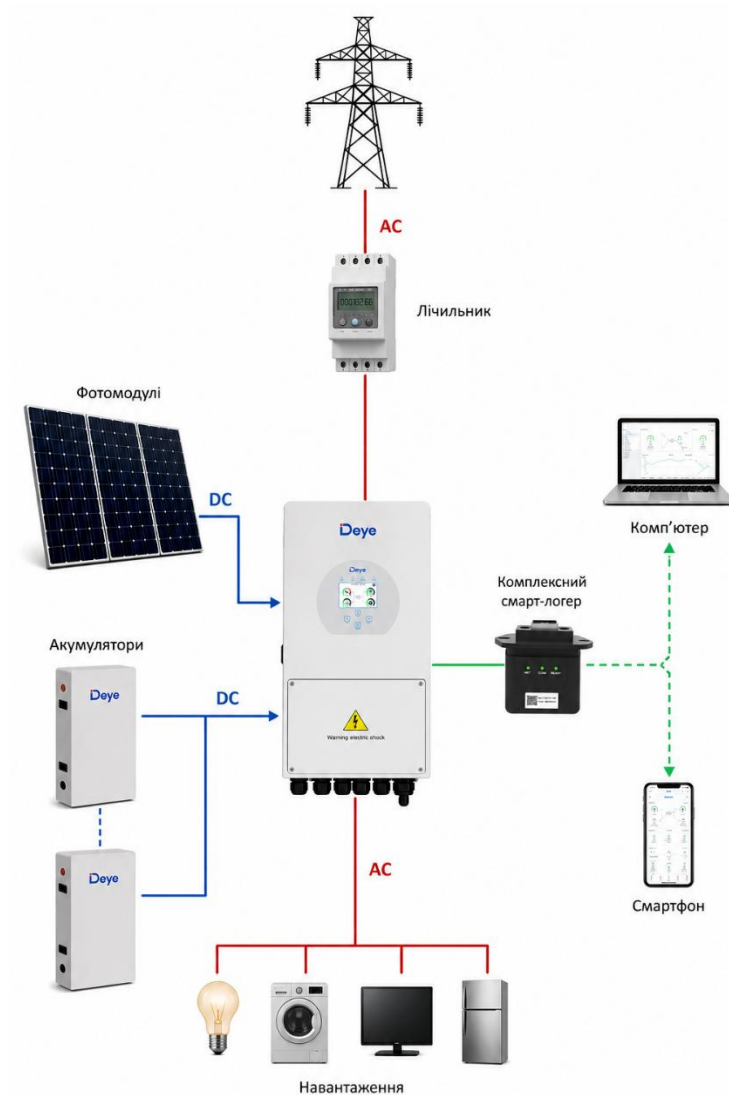


Рисунок 1.3 – Структура гібридної однофазної фотоелектричної станції

Фотоелектричні модулі виконують функцію перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію постійного струму. Отримана електроенергія передається до гібридного інвертора, який є основним керуючим елементом системи.

Гібридний інвертор забезпечує перетворення постійного струму у змінний струм, здійснює керування зарядом та розрядом акумуляторної батареї, контролює режими роботи системи та забезпечує взаємодію із зовнішньою мережею. Крім цього, інвертор може здійснювати автоматичне перемикання між різними джерелами енергії залежно від режиму роботи системи.

Акумуляторна батарея використовується для накопичення електричної енергії та подальшого живлення навантаження у разі відсутності генерації або при зникненні напруги зовнішньої мережі.

Навантаженням у системі виступають електроприлади споживача, які можуть бути поділені на резервні та нерезервні. Резервне навантаження підключається безпосередньо до виходу гібридного інвертора та забезпечується живленням навіть під час аварійного відключення електроенергії.

Зовнішня електрична мережа використовується як додаткове джерело живлення системи, а також може використовуватись для передачі надлишку згенерованої електроенергії.

Станом на сьогодні в Україні найбільше поширення серед гібридних інверторів отримали рішення компаній Deye, SolaX та FoxESS. Популярність даних систем пов'язана з підтримкою акумуляторних батарей, можливістю роботи у резервному режимі, широкими можливостями налаштування та наявністю систем дистанційного моніторингу.

Особливої популярності на українському ринку набули гібридні інвертори Deye. Це пов'язано з поєднанням широкого функціоналу, підтримки резервного живлення, сумісності з різними типами акумуляторних батарей та відносно доступної вартості у порівнянні з багатьма європейськими та американськими аналогами. Важливим фактором також стала підтримка роботи як з низьковольтними, так і з високовольтними акумуляторними системами, що дозволяє використовувати обладнання як у побутових, так і у комерційних проєктах.

Значне поширення обладнання Deye призвело до формування великої спільноти користувачів, монтажних організацій та сервісних спеціалістів. Завдяки цьому користувачі мають доступ до великої кількості практичних рекомендацій, прикладів налаштування та досвіду експлуатації реальних об'єктів. Наявність розвиненої спільноти спрощує впровадження та подальше обслуговування обладнання, що також позитивно впливає на його популярність.

Поряд з рішеннями Deye значне поширення отримали гібридні інвертори компаній SolaX та FoxESS, які також підтримують роботу з акумуляторними батареями, мають власні системи моніторингу та використовуються при побудові сучасних фотоелектричних станцій різного призначення [2].

Для кращого розуміння технічних можливостей сучасних гібридних фотоелектричних станцій доцільно розглянути приклад реального комплекту обладнання, який складається з гібридного інвертора Deye SUN-6K-SG05LP1-EU та акумуляторної батареї Deye SE-G5.1 Pro-B. Основні технічні характеристики обладнання наведено в таблицях 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики гібридного інвертора Deye SUN-6K-SG05LP1-EU [34].

Параметр	Значення
Модель	SUN-6K-SG05LP1-EU
Тип інвертора	Однофазний гібридний
Номінальна вихідна потужність	6 кВт
Максимальна потужність ФЕМ	12 кВт
Кількість MPPT-трекерів	2
Діапазон напруги АКБ	40–60 В
Максимальний струм заряду АКБ	135 А
Максимальний струм розряду АКБ	135 А
Максимальний ККД	97,6 %
Ступінь захисту	IP65
Робоча температура	від -40 °C до +60 °C
Інтерфейси зв'язку	WIFI,RS485,CAN

Як видно з таблиці 1.1, інвертор Deye SUN-6K-SG05LP1-EU підтримує роботу з низьковольтними акумуляторними батареями напругою 48 В класу LiFePO_4 та забезпечує функції резервного живлення, накопичення електроенергії й роботи як у мережевому, так і в автономному режимах.

Таблиця 1.2 – Основні технічні характеристики акумуляторної батареї Deye SE-G5.1 Pro-B [35].

Параметр	Значення
Модель	SE-G5.1 Pro-B
Тип акумулятора	LiFePO ₄
Номинальна напруга	51,2 В
Робочий діапазон напруг	43,2–57,6 В
Номинальна ємність	100 А·год
Номинальна енергоемність	5,12 кВт·год
Корисна енергія	4,6 кВт·год
Рекомендована глибина розряду (DOD)	90 %
Кількість циклів	≥6000
Можливість паралельного підключення	до 64 батарей
Маса	45 кг
Габаритні розміри	440 × 133 × 540 мм

Акумуляторна батарея Deye SE-G5.1 Pro-B побудована на основі літій-залізо-фосфатної технології (LiFePO₄), що забезпечує високий ресурс роботи, підвищену пожежну безпеку та можливість тривалої експлуатації у складі гібридних фотоелектричних станцій. Номинальна напруга батареї становить 51,2 В, що відповідає класу низьковольтних систем накопичення енергії, які широко використовуються у побутових та комерційних гібридних фотоелектричних станціях.

Наведені технічні характеристики свідчать про можливість використання такого комплексу обладнання для побудови однофазної гібридної фотоелектричної станції побутового призначення з функцією резервного живлення та накопичення електричної енергії.

1.1.2 Основні режими роботи гібридної фотоелектричної станції.

Однією з головних переваг гібридної фотоелектричної станції є можливість роботи у різних режимах залежно від потреб користувача та стану зовнішньої мережі.

Одним із основних режимів роботи є режим резервного джерела живлення. У цьому режимі акумуляторна батарея заряджається від зовнішньої мережі або фотоелектричних модулів, а у разі зникнення напруги мережі використовується для живлення резервного навантаження. Фактично у такому режимі гібридний інвертор виконує функцію джерела безперебійного живлення.

Крім цього, акумуляторна батарея може використовуватись для оптимізації споживання електроенергії. Наприклад, заряджання акумуляторів може виконуватись у нічний період за нижчим тарифом, а накопичена енергія може використовуватись у денні або вечірні години.

Іншим режимом роботи є режим часткової компенсації споживання. У такому випадку гібридний інвертор забезпечує живлення резервного навантаження від фотоелектричних модулів та акумуляторної батареї, а у разі недостатньої потужності додатково використовує електроенергію із зовнішньої мережі.

Також гібридна фотоелектрична станція може працювати у режимі обмеження генерації у зовнішню мережу. У цьому випадку інвертор за допомогою трансформаторів струму або smart-лічильника контролює величину генерації та автоматично обмежує віддачу електроенергії у зовнішню мережу, забезпечуючи компенсацію лише власного споживання об'єкта.

Додатково система може працювати у режимі експорту електроенергії у зовнішню мережу. У разі повного забезпечення навантаження та зарядження акумуляторної батареї надлишок електроенергії може передаватись у зовнішню мережу для подальшого продажу за механізмом «зеленого тарифу» або іншими механізмами компенсації електроенергії.

1.2 Необхідність моніторингу параметрів роботи фотоелектричних станцій.

Ефективна експлуатація сучасної фотоелектричної станції неможлива без використання системи моніторингу параметрів її роботи. Відсутність моніторингу суттєво ускладнює контроль технічного стану обладнання, аналіз генерації електроенергії та виявлення можливих несправностей у роботі системи. Без постійного збору та аналізу даних користувач фактично не має можливості об'єктивно оцінювати стан роботи фотоелектричної станції, контролювати ефективність її функціонування або своєчасно реагувати на виникнення аварійних чи нестандартних режимів роботи.

Система моніторингу забезпечує безперервний збір, обробку та візуалізацію параметрів роботи фотоелектричної станції. Це дозволяє користувачу контролювати генерацію та споживання електроенергії, аналізувати режими роботи інвертора, оцінювати стан акумуляторних батарей, а також здійснювати контроль температурних режимів роботи обладнання.

Наявність якісного моніторингу дозволяє не лише контролювати поточний стан системи, але й виконувати аналіз накопичених даних, оцінювати ефективність роботи окремих елементів фотоелектричної станції та виявляти можливі проблеми ще до виникнення серйозних несправностей.

1.2.1 Контроль генерації та споживання електроенергії.

Одним із основних завдань системи моніторингу є контроль генерації та споживання електроенергії. Наявність інформації про обсяги генерації дозволяє оцінювати ефективність роботи фотоелектричної складової системи, аналізувати вплив орієнтації фотоелектричних модулів, рівня сонячного випромінювання та умов експлуатації на виробіток електроенергії.

За допомогою системи моніторингу можливо здійснювати аналіз генерації окремих стрінгів фотоелектричної станції, оцінювати ефективність різних

орієнтацій фотоелектричних модулів та визначати можливі відхилення у роботі окремих елементів системи. Наприклад, у випадку сприятливих погодних умов та високої інтенсивності сонячного випромінювання суттєве зниження генерації може свідчити про забруднення поверхні фотоелектричних модулів, їх часткове затінення або виникнення несправностей у роботі окремих стрінгів. У такому випадку система моніторингу дозволяє своєчасно виявити відхилення та провести додатковий огляд обладнання.

Крім цього, контроль генерації дозволяє оцінювати ефективність розміщення фотоелектричних модулів та аналізувати вплив їх орієнтації на виробіток електроенергії. Це особливо актуально для фотоелектричних станцій зі складною конфігурацією або різною орієнтацією окремих груп фотоелектричних модулів.

Контроль споживання електроенергії дозволяє визначати кількість електроенергії, яку об'єкт отримує із зовнішньої мережі, а також оцінювати обсяг електроенергії, компенсованої за рахунок сонячної генерації. У випадку використання гібридної фотоелектричної станції у режимі транзиту електроенергії система моніторингу дозволяє оцінювати співвідношення між генерацією, власним споживанням та споживанням електроенергії із зовнішньої мережі.

На основі отриманих даних користувач може оцінювати економічну ефективність роботи станції, прогнозувати витрати на електроенергію та визначати рівень економії за рахунок використання сонячної генерації.

Крім цього, система моніторингу дозволяє будувати графіки навантаження та аналізувати характер споживання електроенергії протягом доби. Це дає можливість визначати пікові години споживання електроенергії та оптимізувати режими роботи акумуляторної системи. Наприклад, накопичена в акумуляторах енергія може використовуватись у години найбільшого навантаження або у періоди дії підвищеного тарифу на електроенергію.

1.2.2 Моніторинг параметрів акумуляторних батарей.

Акумуляторні батареї є однією з основних складових гібридної фотоелектричної станції, оскільки забезпечують накопичення електричної енергії та подальше резервне живлення навантаження.

Одним із найбільш важливих параметрів акумуляторної батареї є рівень її заряду. Контроль рівня заряду дозволяє оцінювати запас накопиченої енергії та прогнозувати можливу тривалість автономної роботи об'єкта.

Аналіз зміни рівня заряду акумуляторної батареї дає можливість оцінювати ефективність роботи системи накопичення енергії, визначати режими заряджання та розряджання, а також прогнозувати час автономної роботи залежно від величини навантаження. У випадку роботи об'єкта в автономному режимі система моніторингу дозволяє оцінювати швидкість розряду акумуляторів та приблизний залишковий час роботи системи.

Не менш важливим параметром є температура акумуляторної батареї. Робота акумуляторів при знижених або підвищених температурах може негативно впливати на їх ефективність, ресурс та термін експлуатації.

У випадку розміщення акумуляторних батарей у неопалюваних або недостатньо утеплених приміщеннях температура навколишнього середовища може суттєво впливати на характеристики акумуляторної системи. Низькі температури можуть призводити до пришвидшеного розряду акумуляторів та погіршення їх робочих характеристик. Тому система моніторингу дозволяє контролювати температурний режим акумуляторних батарей та своєчасно реагувати на виникнення несприятливих умов експлуатації.

У випадку виявлення критичних температур користувач може вчасно вжити відповідних заходів для захисту акумуляторної системи, наприклад обмежити використання акумуляторів або покращити температурні умови приміщення, в якому вони встановлені.

1.2.3 Аналіз аварійних режимів та ефективності роботи станції.

Система моніторингу дозволяє оперативно виявляти аварійні режими роботи та аналізувати причини виникнення несправностей у роботі фотоелектричної станції.

У разі виникнення відхилень у роботі обладнання система моніторингу надає можливість своєчасно виявити проблему та виконати подальший аналіз її причин. Наприклад, за допомогою моніторингу можливо виявити припинення заряджання акумуляторної батареї, втрату генерації фотоелектричних модулів, нестабільність роботи інвертора або проблеми із зовнішньою мережею.

Контроль температури обладнання також дозволяє виявляти можливі аварійні режими роботи. Наприклад, підвищення температури інвертора або інших елементів системи може свідчити про перевантаження обладнання, недостатню вентиляцію приміщення або інші порушення умов експлуатації.

Крім цього, система моніторингу дозволяє оцінювати ефективність роботи фотоелектричної станції в цілому. Аналіз параметрів генерації, температури обладнання, стану акумуляторних батарей та режимів роботи інвертора дозволяє виконувати комплексне оцінювання роботи системи та визначати можливі шляхи підвищення ефективності її експлуатації.

Наявність архіву накопичених даних також дозволяє виконувати аналіз роботи системи протягом тривалого періоду часу, оцінювати сезонні зміни генерації, аналізувати вплив погодних умов на роботу фотоелектричної станції та виконувати порівняння ефективності роботи системи у різних режимах експлуатації.

1.3 Аналіз стандартних систем моніторингу фотоелектричних станцій.

Сучасні гібридні фотоелектричні станції практично завжди комплектуються системами моніторингу, які забезпечують збір, передачу, обробку та візуалізацію параметрів роботи обладнання. Наявність системи

моніторингу дозволяє користувачу контролювати генерацію електроенергії, споживання, стан акумуляторної батареї та режими роботи інвертора.

У більшості випадків передача даних від інвертора до хмарного сервісу здійснюється через спеціалізований Wi-Fi або LAN-реєстратор даних, який підключається до інвертора та через мережу Інтернет передає інформацію на сервери виробника. Після цього користувач отримує доступ до параметрів роботи фотоелектричної станції через мобільний застосунок або web-інтерфейс [3-4].

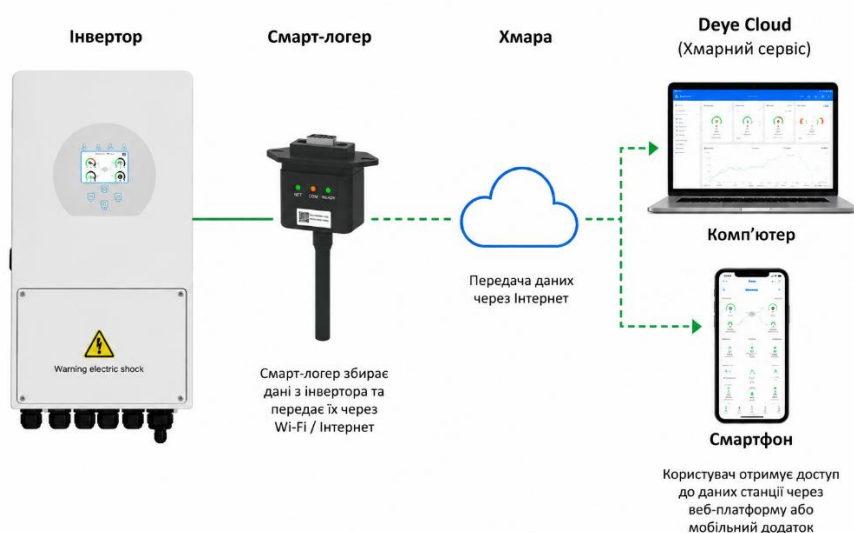


Рисунок 1.4 – Загальна схема передачі даних у системі моніторингу гібридної фотоелектричної станції

До найбільш поширених систем моніторингу гібридних фотоелектричних станцій належать Deye Cloud, SolarMAN та SolaXCloud.

1.3.1 Система моніторингу Deye Cloud.

Deye Cloud використовується для дистанційного контролю роботи гібридних інверторів компанії Deye. Система дозволяє користувачу

контролювати параметри генерації електроенергії, рівень споживання, стан акумуляторної батареї та параметри зовнішньої мережі [3].

Однією з особливостей Deye Cloud є можливість дистанційної зміни параметрів роботи інвертора. Через web-інтерфейс або мобільний застосунок користувач може змінювати режими роботи акумуляторної батареї, налаштування Time-of-Use, параметри заряджання та розряджання акумуляторів, а також параметри обмеження генерації у зовнішню мережу [6].

Система також підтримує ведення статистики та збереження історичних даних роботи фотоелектричної станції. Користувач може переглядати добову, місячну та річну генерацію електроенергії, а також аналізувати роботу станції за різні проміжки часу [3].

Інтерфейс системи моніторингу Deye Cloud наведено на рисунку 1.5.

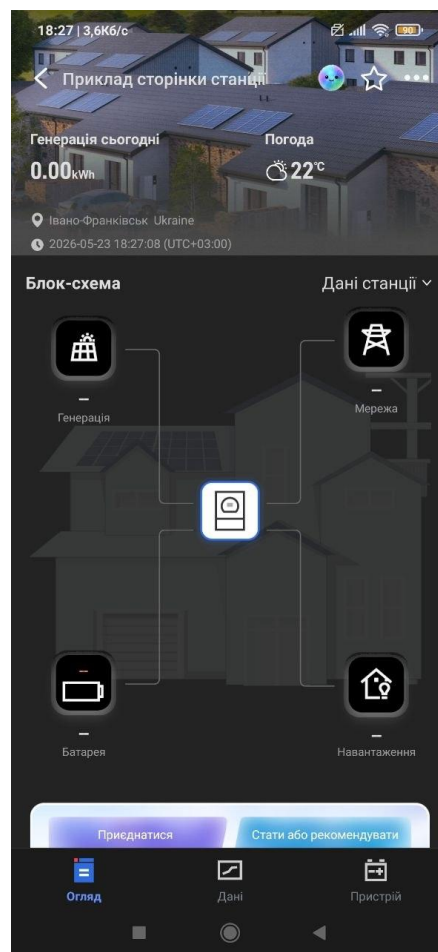


Рисунок 1.5 – Інтерфейс системи моніторингу Deye Cloud

Із рисунка видно, що система дозволяє відображати поточну генерацію електроенергії, рівень заряду акумуляторної батареї, параметри зовнішньої мережі та напрямки потоків енергії між окремими елементами фотоелектричної системи.

1.3.2 Система моніторингу SolarMan.

SolarMAN є універсальною платформою моніторингу фотоелектричних станцій, яка підтримує роботу з великою кількістю моделей інверторів різних виробників [4].

Передача даних у системі здійснюється через спеціалізований data logger, який збирає інформацію з інвертора та передає її через Wi-Fi або Ethernet до хмарного сервісу [7].

Система забезпечує контроль поточної генерації електроенергії, параметрів зовнішньої мережі, статистики виробітку та параметрів акумуляторної батареї. Однією з особливостей SolarMAN є наявність розширених графіків та статистичних даних, що дозволяє аналізувати роботу фотоелектричної станції протягом тривалого часу [4].

Крім цього, система підтримує функції аварійних повідомлень та моніторингу нестандартних режимів роботи інвертора. У випадку виникнення несправностей користувач отримує відповідні повідомлення через застосунок або web-інтерфейс [8].

Інтерфейс системи моніторингу SolarMAN наведено на рисунку 1.6.



Рисунок 1.6 – Інтерфейс системи моніторингу SolarMAN

Із рисунка видно, що система дозволяє відображати параметри генерації, статистику виробітку електроенергії та графіки роботи фотоелектричної станції.

1.3.3 Система моніторингу SolaXCloud.

SolaXCloud використовується для дистанційного моніторингу обладнання компанії SolaX Power. Передача даних до хмарного сервісу здійснюється через Wi-Fi або LAN-реєстратор даних [5].

Система дозволяє контролювати генерацію електроенергії, рівень споживання, стан акумуляторної батареї та режими роботи інвертора. Однією з особливостей SolaXCloud є детальна візуалізація потоків електроенергії між сонячними панелями, акумуляторною батареєю, навантаженням та зовнішньою мережею [5].

Користувач отримує можливість дистанційного доступу до параметрів роботи системи через мобільний застосунок або web-інтерфейс. Крім моніторингу, система дозволяє виконувати дистанційне налаштування окремих параметрів роботи інвертора [9].

Система також підтримує архівування історичних даних роботи фотоелектричної станції та дозволяє аналізувати параметри генерації за різні проміжки часу [5].

Інтерфейс системи моніторингу SolaXCloud наведено на рисунку 1.7.

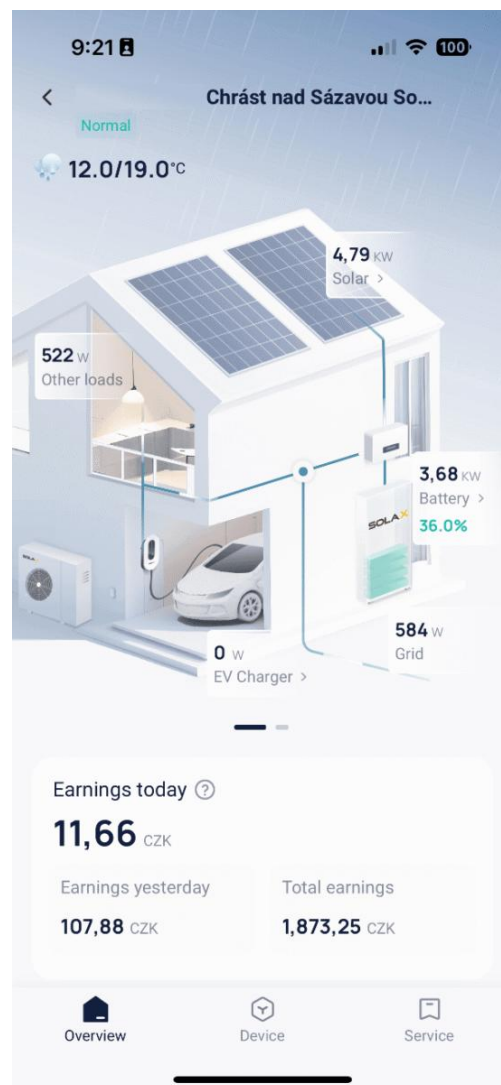


Рисунок 1.7 – Інтерфейс системи моніторингу SolaXCloud [10].

Із рисунка видно, що система дозволяє відображати напрямки потоків енергії, параметри генерації та рівень заряду акумуляторної батареї у режимі реального часу.

1.3.4 Переваги стандартних систем моніторингу.

Однією з основних переваг стандартних систем моніторингу є можливість дистанційного контролю параметрів роботи фотоелектричної станції. Користувач отримує доступ до параметрів системи практично з будь-якої точки світу за наявності доступу до мережі Інтернет [3–5].

Системи моніторингу дозволяють контролювати генерацію електроенергії, рівень споживання, параметри акумуляторної батареї, роботу інвертора та параметри зовнішньої мережі. Візуалізація параметрів у вигляді графіків, статистики та схем потоків енергії значно спрощує аналіз роботи фотоелектричної станції [4].

Додатковою перевагою є можливість дистанційної зміни окремих налаштувань інвертора. Сучасні системи моніторингу дозволяють змінювати режими роботи акумуляторної батареї, параметри заряджання та розряджання, налаштування Time-of-Use та інші параметри роботи системи без необхідності фізичної присутності біля обладнання [6, 9].

Також більшість сучасних систем моніторингу підтримують функції збереження історичних даних та аварійних повідомлень, що дозволяє користувачу аналізувати роботу фотоелектричної станції протягом тривалого часу та оперативно реагувати на виникнення несправностей [3,8].

1.4 Недоліки стандартних систем моніторингу та необхідність створення альтернативної інформаційно-вимірювальної системи.

Стандартні системи моніторингу фотоелектричних станцій є зручним інструментом для дистанційного контролю роботи інвертора, акумуляторної

батареї, генерації та споживання електроенергії. Вони дають користувачу можливість швидко переглядати основні параметри системи через мобільний застосунок або web-інтерфейс, а також змінювати окремі налаштування інвертора. Проте такі системи мають ряд обмежень, які пов'язані з їх хмарною архітектурою, залежністю від комплектних реєстраторів даних, обмеженою гнучкістю візуалізації та неможливістю повноцінного підключення додаткових сторонніх датчиків.

Основний принцип роботи більшості стандартних систем моніторингу полягає в тому, що інвертор передає дані на спеціалізований реєстратор даних, а той, у свою чергу, через Wi-Fi, Ethernet або інший канал зв'язку передає інформацію на хмарний сервер. Після цього користувач отримує доступ до даних через застосунок або web-платформу. Така схема є зручною для повсякденної експлуатації, але вона створює декілька проміжних ланок, від стабільності яких залежить робота всієї системи моніторингу [11], [13], [14].

1.4.1 Залежність від серверів виробника та інтернет-з'єднання

Одним із головних недоліків стандартних хмарних систем моніторингу є залежність від інтернет-з'єднання та серверної інфраструктури виробника. Якщо інвертор і реєстратор даних працюють справно, але відсутній доступ до мережі Інтернет, користувач фактично втрачає можливість дистанційно переглядати актуальні параметри роботи станції. У такому випадку сама фотоелектрична станція може продовжувати працювати, але її параметри не будуть передаватися до хмарного сервісу і не будуть відображатися в застосунку.

Крім локальних проблем із підключенням до мережі, існує також залежність від стабільності роботи серверів виробника. Дані у стандартних системах моніторингу зберігаються не на стороні користувача, а на стороні сервісу, який обслуговує виробник або стороння платформа моніторингу. Якщо у роботі такого сервісу виникає збій, користувач може тимчасово втратити доступ до поточних або історичних даних. Це особливо важливо для тих

випадків, коли моніторинг використовується не лише для зручності, а й для аналізу ефективності, діагностики проблем або підтвердження фактичної роботи станції за певний період.

У практичній експлуатації фотоелектричної станції така залежність може створювати ситуацію, коли обладнання фізично працює, інвертор не видає аварійних повідомлень, генерація та живлення навантаження відбуваються, але в хмарній системі моніторингу дані за певний проміжок часу відсутні. У такому випадку користувач не має повної картини роботи станції та змушений робити висновки лише на основі неповної інформації. Для систем, де важливим є накопичення історії роботи, така втрата даних є суттєвим недоліком.

Окремо варто зазначити, що хмарний принцип роботи не завжди є проблемою сам по собі. Навпаки, він забезпечує зручний дистанційний доступ і просту взаємодію користувача із системою. Проблема виникає тоді, коли хмарний сервіс є єдиним джерелом моніторингових даних. У такому випадку користувач повністю залежить від стабільності інтернет-з'єднання, реєстратора даних і серверів виробника. Саме тому для підвищення надійності контролю доцільно розглядати наявність додаткового незалежного каналу збору даних.

1.4.2 Залежність моніторингу від комплектних реєстраторів даних

Ще одним важливим обмеженням стандартних систем моніторингу є залежність від комплектних реєстраторів даних. У багатьох системах саме реєстратор даних, Wi-Fi dongle або smart-logger є проміжною ланкою між інвертором і хмарним сервісом. Він отримує параметри роботи з інвертора і передає їх на сервер виробника. Наприклад, у документації Deye Cloud окремо описано процедуру конфігурації Wi-Fi для logger-пристрою, що підтверджує його роль як елемента передачі даних між інвертором і хмарною платформою [11].

Фактично у такій схемі інвертор не передає дані безпосередньо користувачу. Для дистанційного доступу потрібна справна робота комплектного

реєстратора даних. Якщо такий пристрій пошкоджений, неправильно налаштований, втратив зв'язок із Wi-Fi або перестав коректно передавати інформацію, система моніторингу може стати недоступною. При цьому сам інвертор може продовжувати працювати у штатному режимі, а проблема стосуватиметься саме каналу передачі даних.

Для користувача це створює додаткову залежність від окремого апаратного елемента. У разі несправності реєстратора даних виникає необхідність його перевірки, повторного налаштування або заміни. Після заміни такого пристрою може знадобитися повторна прив'язка обладнання до облікового запису або до об'єкта моніторингу. Тому стандартна система моніторингу фактично залежить не лише від інвертора, а й від справності комунікаційного пристрою, який забезпечує передачу даних у хмарний сервіс.

Подібний принцип роботи характерний не лише для Deye Cloud, а й для інших систем моніторингу. У матеріалах SolarMAN описується Wi-Fi stick як пристрій, який збирає дані з інвертора та передає їх у хмарну платформу моніторингу. Це підтверджує, що реєстратор даних є типовим елементом архітектури сучасних систем дистанційного моніторингу фотоелектричних станцій [14].

Таким чином, комплектний реєстратор даних є одночасно корисним і вразливим елементом системи. З одного боку, він забезпечує зручну передачу інформації до хмарного сервісу. З іншого боку, його несправність або втрата зв'язку може призвести до повної відсутності даних у застосунку моніторингу. Саме тому наявність альтернативного каналу збору даних дозволяє зменшити ризик повної втрати контролю над параметрами роботи станції.

1.4.3 Втрата даних при порушенні роботи хмарних сервісів

Одним із найсерйозніших недоліків стандартних систем моніторингу є можливість втрати історичних даних у разі порушення роботи хмарного сервісу або каналу передачі інформації. Для користувача важливо не лише бачити

поточні параметри роботи станції, а й мати доступ до архіву даних. Саме історія роботи дозволяє аналізувати генерацію за добу, тиждень, місяць, порівнювати ефективність роботи станції в різні періоди та виявляти нестандартні режими.

Якщо протягом певного часу дані не передавались до хмарного сервісу, у користувача може утворитися “порожній” проміжок в історії моніторингу. При цьому сама станція могла працювати справно, але інформація про її роботу за цей період не буде доступною. У такій ситуації користувач не може точно визначити, скільки електроенергії було згенеровано, скільки енергії було спожито, який був стан акумуляторної батареї та чи виникали нестандартні режими роботи.

У межах даної роботи доцільно навести практичний приклад втрати даних у хмарній системі моніторингу. У конкретному випадку моніторинг фотоелектричної станції перестав відображати дані приблизно з половини першого дня, повністю був відсутній протягом другого і третього дня, а також частково був відсутній на четвертий день. При цьому інвертор продовжував працювати, а помилки у його роботі не були зафіксовані. Фактично проблема полягала не у роботі самої фотоелектричної станції, а у відсутності коректного відображення даних у системі моніторингу.

Приклад втрати даних у хмарній системі моніторингу наведено на рисунку 1.8.

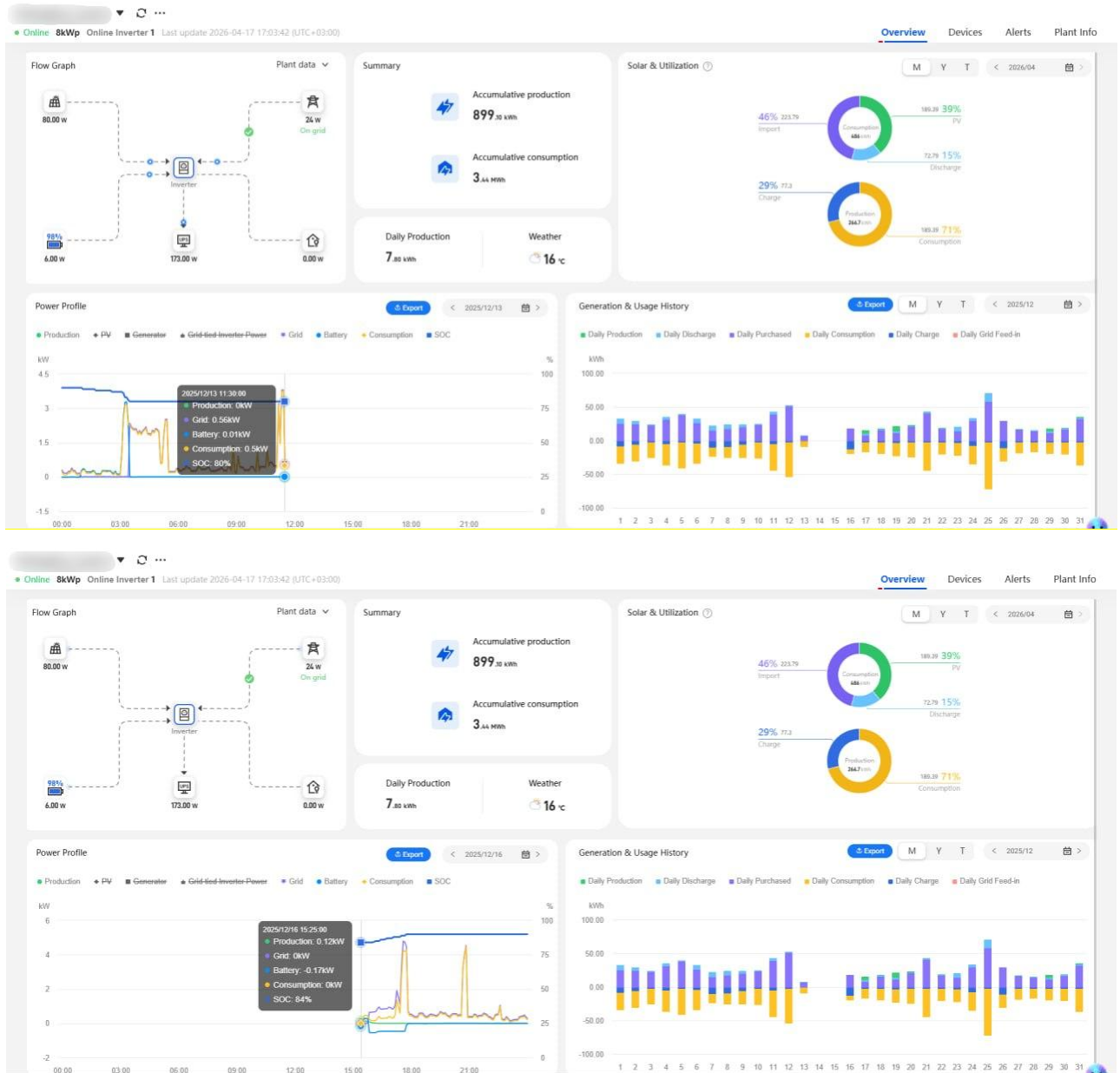


Рисунок 1.8 – Приклад втрати даних у хмарній системі моніторингу фотоелектричної станції

З рисунка видно, що в певний період часу система моніторингу не відображала дані роботи станції. Такий випадок показує, що навіть за умови справної роботи інвертора користувач може втратити частину історії моніторингу. Відновити такі дані після збою часто неможливо або дуже складно, оскільки вони не були збережені у доступному для користувача локальному архіві.

Наявність альтернативної інформаційно-вимірювальної системи дозволила б у такій ситуації продовжувати збір параметрів роботи станції

незалежно від основного хмарного сервісу. Навіть якщо стандартний моніторинг тимчасово не працює, альтернативна система могла б зберігати дані локально або на окремому сервері користувача. Це дозволило б уникнути повної втрати інформації та забезпечити безперервність аналізу роботи станції.

1.4.4 Обмеження функціональних можливостей стандартного моніторингу

Стандартні системи моніторингу, які надаються виробниками інверторів, зазвичай мають готовий набір параметрів, графіків і віджетів. Для більшості користувачів цього достатньо, оскільки система показує основні показники: генерацію, споживання, рівень заряду акумуляторів, параметри мережі та напрямки потоків енергії. Проте для більш детального аналізу роботи станції такого функціоналу може бути недостатньо.

Одним із обмежень є те, що користувач не завжди може самостійно формувати інтерфейс моніторингу під власні потреби. Наприклад, якщо потрібно постійно бачити напругу мережі, температуру інвертора, температуру акумуляторної батареї, температуру фотоелектричних модулів або інтенсивність сонячного випромінювання, стандартна система не завжди дозволяє винести ці параметри на головну інформаційну панель. Часто користувач змушений переглядати інформацію у тому вигляді, в якому її передбачив виробник.

Таке обмеження можна сформулювати таким чином: користувач не підлаштовує систему моніторингу під себе, а сам підлаштовується під її готову структуру. Це не є критичною проблемою для базового побутового використання, але може бути незручним у випадку, коли моніторинг потрібен для детального аналізу роботи системи, пошуку несправностей або порівняння різних параметрів.

Особливо важливим може бути контроль напруги зовнішньої мережі. В Україні якість електричної енергії є регламентованим показником. Згідно з інформацією НКРЕКП щодо ДСТУ EN 50160:2023, протягом кожного тижневого

періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги, усереднених на 10-хвилинному проміжку, мають бути в межах ± 10 % від номінальної напруги 230 В, тобто у діапазоні 207–253 В [17]. Це означає, що контроль напруги є важливим не лише з точки зору зручності, а й з точки зору оцінювання якості електропостачання.

У реальних умовах експлуатації напруга в мережі може бути заниженою або завищеною, особливо у віддалених населених пунктах, слабких лініях електропередачі або при нерівномірному навантаженні мережі. Для гібридного інвертора це може впливати на режими роботи, підключення або відключення від мережі, заряджання акумуляторів та стабільність живлення навантаження. Тому можливість вивести параметри напруги на окрему інформаційну панель і постійно контролювати їх була б практично корисною.

Стандартні системи моніторингу не завжди дають можливість підключати сторонні датчики або розширювати кількість вимірюваних параметрів. Наприклад, користувач може мати потребу у додатковому контролі температури приміщення, температури акумуляторів, температури фотоелектричних модулів, вологості повітря або сонячного випромінювання. Такі параметри не завжди передбачені заводською системою моніторингу, хоча вони можуть бути важливими для аналізу ефективності та умов експлуатації фотоелектричної станції.

Вимоги до систем моніторингу у сфері сонячної енергетики загалом передбачають збір достатньої кількості даних для оцінювання продуктивності, діагностики несправностей та аналізу роботи обладнання. У рекомендаціях Solar Best Practices моніторинг розглядається як важливий інструмент для контролю роботи PV-систем, збору даних та підтримки ефективної експлуатації [15]. Це підтверджує, що чим ширший набір параметрів доступний для аналізу, тим кращі можливості має користувач для оцінювання роботи станції.

1.4.5 Обґрунтування необхідності альтернативної системи моніторингу

З урахуванням наведених недоліків стандартних систем моніторингу доцільним є розроблення альтернативної інформаційно-вимірювальної системи, яка забезпечить додатковий незалежний канал збору, обробки та збереження даних. Така система не обов'язково повинна повністю замінювати заводський моніторинг інвертора. Її основне призначення полягає у створенні дублюючого джерела даних, яке може використовуватись для порівняння, контролю достовірності та безперервного накопичення інформації.

Альтернативна система моніторингу дозволяє отримувати дані незалежно від хмарного сервісу виробника інвертора. У випадку порушення роботи стандартного моніторингу користувач не втрачає повністю можливість контролю параметрів станції, оскільки має додаткове джерело інформації. Це особливо важливо для аналізу історичних даних, пошуку причин несправностей та оцінювання фактичної роботи станції у певний період.

Додатковою перевагою альтернативної інформаційно-вимірювальної системи є можливість гнучкого налаштування під потреби конкретного об'єкта. Користувач може самостійно визначати, які параметри необхідно контролювати, які датчики підключати та як саме відображати інформацію. Наприклад, окрім базових електричних параметрів, система може включати контроль температури інвертора, температури акумуляторної батареї, температури фотоелектричних модулів, вологості повітря та інтенсивності сонячного випромінювання.

У наукових і технічних роботах також розглядаються підходи до створення окремих IoT-систем моніторингу для фотоелектричних установок. Наприклад, у статті про розроблення недорогого пристрою моніторингу PV-системи на основі IoT описано систему, яка вимірює параметри фотоелектричного масиву, акумуляторного блоку та інвертора. Це підтверджує доцільність використання окремих інформаційно-вимірювальних систем для додаткового контролю параметрів роботи сонячних електростанцій [16].

Особливо важливою є можливість локального або незалежного збереження даних. Якщо інформація зберігається лише на серверах виробника, користувач не має повного контролю над її доступністю. Якщо ж альтернативна система передбачає збереження даних на локальному сервері, власному хмарному сховищі або окремій базі даних, це підвищує незалежність користувача і зменшує ризик повної втрати історії моніторингу.

Таким чином, альтернативна інформаційно-вимірювальна система моніторингу є доцільним доповненням до стандартного хмарного моніторингу. Вона дозволяє створити незалежний канал збору даних, підвищити надійність контролю, розширити перелік вимірюваних параметрів та забезпечити більшу гнучкість у візуалізації інформації. У подальших розділах роботи буде розглянуто структуру такої системи та обґрунтовано вибір технічних засобів для її реалізації.

1.5 Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто особливості роботи однофазних гібридних фотоелектричних станцій, їх основні компоненти та режими роботи. Встановлено, що гібридні фотоелектричні станції поєднують функції генерації електроенергії, акумулювання енергії та взаємодії із зовнішньою електричною мережею, що робить їх універсальним рішенням для побутових споживачів.

Було проаналізовано необхідність моніторингу параметрів роботи фотоелектричних станцій. Визначено, що моніторинг дозволяє контролювати генерацію та споживання електроенергії, стан акумуляторних батарей, параметри роботи інвертора, а також своєчасно виявляти аварійні та нестандартні режими роботи системи.

У розділі також проведено аналіз стандартних систем моніторингу на прикладі Deye Cloud, SolarMAN та SolaXCloud. Встановлено, що сучасні системи моніторингу забезпечують дистанційний контроль параметрів роботи станції

через мобільні застосунки та web-інтерфейси, а також дозволяють змінювати окремі налаштування інвертора.

Разом із перевагами було визначено ряд недоліків стандартних систем моніторингу, серед яких залежність від серверів виробника, інтернет-з'єднання та комплектних реєстраторів даних. Також встановлено, що у випадку порушення роботи хмарних сервісів існує ризик втрати частини історичних даних моніторингу.

На основі проведеного аналізу було обґрунтовано доцільність створення альтернативної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу, яка забезпечить незалежний канал збору та збереження даних, а також дозволить розширити кількість контрольованих параметрів фотоелектричної станції.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ ГІБРИДНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

2.1 Загальна структура альтернативної системи моніторингу.

Одним із недоліків стандартних систем моніторингу фотоелектричних станцій є їх залежність від серверів виробника обладнання та обмежені можливості щодо підключення додаткових засобів вимірювання. У більшості випадків користувач отримує доступ лише до тих параметрів, які передбачені виробником інвертора та системи моніторингу. Крім того, збереження історичних даних та функціонування системи моніторингу значною мірою залежать від працездатності хмарного сервісу виробника. У зв'язку з цим виникає необхідність створення альтернативної інформаційно-вимірювальної системи, яка дозволить здійснювати незалежний збір, обробку та зберігання даних про роботу фотоелектричної станції [13, 16].

У даній роботі пропонується альтернативна система моніторингу однофазної гібридної фотоелектричної станції на базі програмно-апаратного комплексу Smart-MAIC. Вибір даної платформи обумовлений можливістю підключення різноманітних вимірювальних пристроїв, підтримкою збору та архівування даних, наявністю засобів візуалізації, а також можливістю подальшого розширення функціоналу системи залежно від потреб користувача [17].

Основним призначенням розроблюваної системи є створення незалежного каналу збору даних, який може використовуватися як для порівняння показників зі штатною системою моніторингу інвертора, так і для забезпечення безперервного контролю роботи фотоелектричної станції у випадку втрати доступу до основного сервісу моніторингу. Такий підхід дозволяє підвищити надійність отримання інформації та зменшити залежність від сторонніх програмних платформ [13, 16].

Запропонована система передбачає контроль параметрів генерації та споживання електричної енергії, напруги акумуляторної батареї, температури окремих елементів обладнання, температури та вологості навколишнього середовища, а також інтенсивності сонячного випромінювання. Отримання зазначених даних дозволяє більш комплексно оцінювати роботу фотоелектричної станції, аналізувати ефективність використання сонячної енергії та своєчасно виявляти можливі відхилення у роботі обладнання [15, 16].

До складу інформаційно-вимірювальної системи входять засоби вимірювання електричних параметрів, датчики контролю стану обладнання та навколишнього середовища, пристрої збору і передачі даних, а також засоби їх подальшого зберігання та візуалізації. Загальна структура розробленої системи наведена на рисунку 2.1.

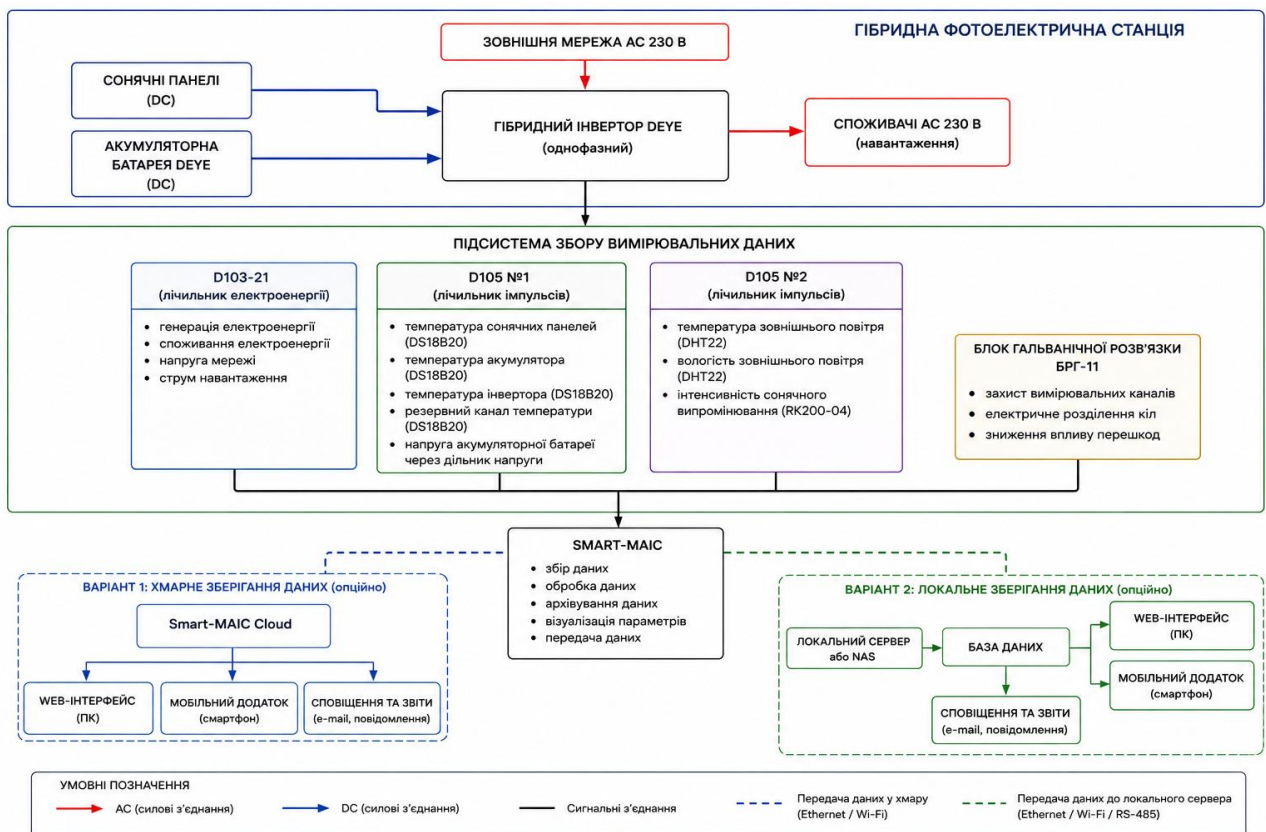


Рисунок 2.1 – Загальна структура альтернативної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу однофазної гібридної фотоелектричної станції.

Збір інформації у системі здійснюється за допомогою вимірювальних пристроїв та датчиків, після чого отримані дані передаються до програмного середовища Smart-MAIC для подальшої обробки, архівування та відображення. Залежно від обраної конфігурації системи дані можуть зберігатися як у хмарному середовищі, так і на локальному сервері користувача. Використання локального сховища дозволяє додатково підвищити надійність зберігання інформації та забезпечити доступ до архіву даних незалежно від роботи зовнішніх сервісів [16, 17].

Важливою особливістю запропонованої системи є можливість її подальшого розширення шляхом підключення додаткових вимірювальних каналів та датчиків без суттєвої зміни загальної архітектури системи. Завдяки цьому вона може бути адаптована до вимог конкретного об'єкта та забезпечувати отримання саме тих параметрів, які є необхідними для аналізу роботи фотоелектричної станції [17].

2.1.1 Архітектура системи Smart-MAIC.

Для забезпечення незалежного контролю роботи однофазної гібридної фотоелектричної станції у даній роботі пропонується альтернативна інформаційно-вимірювальна система моніторингу на базі програмно-апаратного комплексу Smart-MAIC. Основною метою її створення є отримання додаткового незалежного джерела даних про роботу станції, яке може використовуватися як для порівняння результатів зі штатною системою моніторингу інвертора, так і для забезпечення безперервного контролю параметрів роботи об'єкта у випадку порушення роботи основного сервісу моніторингу.

До складу розробленої системи входять засоби контролю електричних параметрів, датчики температури, вологості та сонячного випромінювання, вузол контролю напруги акумуляторної батареї, засоби захисту вимірювальних каналів та програмне середовище для збору і відображення інформації.

Контроль параметрів генерації та споживання електроенергії здійснюється за допомогою лічильника електричної енергії D103-21 [18]. Для підключення додаткових вимірювальних каналів використовуються два універсальні лічильники імпульсів D105 [19]. Такий підхід дозволяє одночасно контролювати як електричні параметри роботи фотоелектричної станції, так і умови її експлуатації.

Окрему увагу приділено контролю температурних режимів роботи обладнання. У системі передбачено вимірювання температури фотоелектричних модулів, акумуляторної батареї та інвертора за допомогою 1-провідного цифрового термометра DS18B20 [20]. Крім того, контроль температури та вологості зовнішнього повітря здійснюється за допомогою датчика DHT22 [21], а також датчика інтенсивності сонячного випромінювання [22]. Отримання цих даних дозволяє аналізувати вплив навколишнього середовища на ефективність роботи фотоелектричної станції.

Для захисту вимірювальних каналів від впливу перешкод та небажаних потенціалів передбачено використання блоку гальванічної розв'язки БРГ-11 [23].

2.1.2 Принцип збору, обробки та збереження даних.

Робота системи моніторингу базується на послідовному виконанні трьох основних процесів: збору даних, їх обробки та подальшого зберігання.

Первинна інформація формується безпосередньо вимірювальними пристроями. Лічильник D103-21 здійснює контроль електричних параметрів фотоелектричної станції, а універсальні лічильники імпульсів D105 отримують сигнали від підключених датчиків та перетворюють їх у цифрові дані, придатні для подальшої передачі та аналізу [18, 19].

Після отримання вимірних значень інформація передається до програмного комплексу Smart-MAIC. На цьому етапі виконується систематизація отриманих даних, їх прив'язка до часу вимірювання та формування архіву параметрів роботи фотоелектричної станції [17].

Важливою особливістю запропонованої системи є можливість використання різних способів зберігання інформації. Дані можуть передаватися до хмарного сховища для забезпечення віддаленого доступу через мережу Інтернет або зберігатися на локальному сервері користувача. Використання локального сховища дозволяє зменшити залежність від сторонніх сервісів та забезпечує збереження історичних даних навіть у випадку порушення роботи зовнішніх ресурсів.

Після обробки та збереження інформація стає доступною користувачу через веб-інтерфейс або мобільні пристрої. Отримані дані можуть використовуватися для поточного контролю роботи фотоелектричної станції, аналізу її ефективності, виявлення відхилень у роботі обладнання та формування звітів за необхідний період часу [17].

2.2 Трифазний лічильник D103-21 у системі альтернативного моніторингу.

Одним із основних елементів розробленої інформаційно-вимірювальної системи є трифазний лічильник електричної енергії Smart-MAIC D103-21. У даній роботі він використовується як основний засіб контролю електричних параметрів роботи однофазної гібридної фотоелектричної станції. Використання окремого лічильника електроенергії дозволяє отримувати незалежні дані щодо генерації та споживання електричної енергії незалежно від штатної системи моніторингу інвертора [18].

Застосування D103-21 у складі альтернативної системи моніторингу дозволяє реалізувати окремий канал контролю електричних параметрів об'єкта. Отримані дані можуть використовуватися для порівняння зі значеннями, які відображаються у штатній системі моніторингу інвертора, а також для проведення аналізу роботи фотоелектричної станції за тривалий період часу.

Лічильник підключається до системи Smart-MAIC та передає інформацію щодо електричних параметрів мережі до програмного комплексу для

подальшого архівування та візуалізації. Завдяки цьому користувач отримує можливість контролювати генерацію та споживання електроенергії в режимі реального часу, формувати архіви вимірювань та аналізувати режими роботи фотоелектричної станції [18].

Зовнішній вигляд трифазного лічильника електричної енергії Smart-MAIC D103-21 наведено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд трифазного лічильника електричної енергії Smart-MAIC D103-21 [18].

2.2.1 Призначення та функції трифазного лічильника D103-21 у однофазній мережі.

У розробленій системі альтернативного моніторингу для контролю електричних параметрів використовується трифазний лічильник електричної енергії Smart-MAIC D103-21. Незважаючи на те, що досліджувана фотоелектрична станція працює в однофазній мережі, використання саме трифазного лічильника дозволяє реалізувати більш гнучку систему контролю енергетичних потоків.

На відміну від звичайного однофазного лічильника, який контролює лише одну точку вимірювання, D103-21 дозволяє одночасно підключати три незалежні трансформатори струму. Завдяки цьому один пристрій може контролювати декілька ділянок однофазної мережі без використання додаткових лічильників [24].

У запропонованій схемі моніторингу один трансформатор струму встановлюється у колі критичного навантаження, другий - у точці обміну електроенергією між інвертором та зовнішньою мережею, а третій - у колі некритичного навантаження. Такий підхід дозволяє одночасно контролювати основні енергетичні потоки фотоелектричної станції та отримувати більш детальну інформацію про режими її роботи.

Схема підключення трифазного лічильника D103-21 у складі розробленої системи моніторингу наведена на рисунку 2.3.

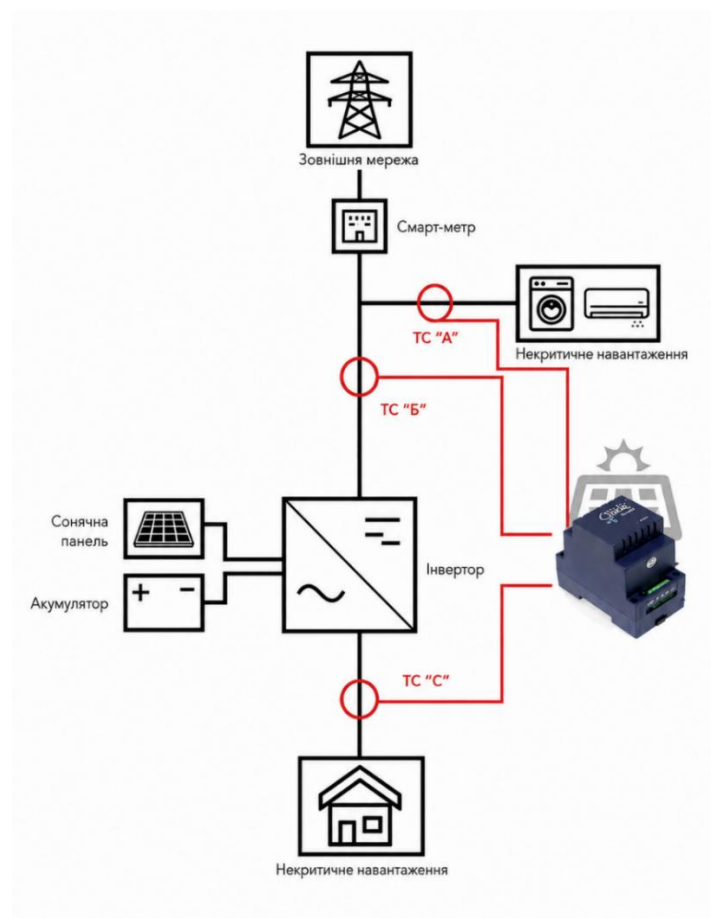


Рисунок 2.3 – Схема використання трифазного лічильника Smart-MAIC D103-21 для моніторингу однофазної гібридної фотоелектричної станції.

На рисунку 2.3 трансформатор струму ТС «А» здійснює контроль споживання некритичного навантаження, ТС «Б» контролює потоки електроенергії між інвертором та зовнішньою мережею, а ТС «С» використовується для контролю критичного навантаження. Отримані дані передаються до лічильника D103-21, після чого надходять до системи Smart-MAIC для подальшого архівування та аналізу.

2.2.2 Основні параметри та принцип роботи трифазного лічильника D103-21.

Принцип роботи лічильника полягає у безперервному вимірюванні значень струму та напруги з подальшою цифровою обробкою отриманих даних. На основі результатів вимірювань виконується розрахунок активної потужності, спожитої та згенерованої електричної енергії, коефіцієнта потужності та інших параметрів електричної мережі [18].

Особливістю D103-21 є можливість передачі даних через вбудований модуль Wi-Fi до системи Smart-MAIC без використання додаткових пристроїв зв'язку. Крім того, лічильник підтримує локальне накопичення даних, що дозволяє зберігати результати вимірювань навіть у випадку тимчасової втрати зв'язку із сервером [18].

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики лічильника електричної енергії Smart-MAIC D103-21 [18].

Параметр	Значення
Кількість фаз (ліній)	3
Діапазон вимірювання струму по одній фазі	50 мА - 100 А
Похибка вимірювання активної енергії	$\pm 0,5 \%$
Похибка вимірювання напруги та струму	$< 1 \%$
Максимальна потужність навантаження на керованому виході	до 50 Вт при напрузі 220 В

Продовження таблиці 2.1

Власне споживання потужності	< 1,2 Вт
Бездротовий інтерфейс зв'язку	Wi-Fi 2,4 ГГц (IEEE 802.11 b/g/n)
Інтервал оновлення даних	5 с
Інтервал збору даних	1 хв
Автономне накопичення даних при відсутності зв'язку із сервером	до 12 діб
Робочий діапазон температур	від -40 °C до +70 °C
Габаритні розміри (Д×В×Ш)	90×67×52 мм
Конструктивне виконання	3 DIN-модулі
Маса	0,1 кг

Як видно з таблиці 2.1, лічильник Smart-MAIC D103-21 забезпечує вимірювання основних електричних параметрів із достатньою для задач моніторингу точністю. Наявність вбудованого бездротового інтерфейсу Wi-Fi дозволяє інтегрувати пристрій до системи Smart-MAIC без використання додаткових засобів передачі даних, а можливість локального накопичення інформації протягом 12 діб забезпечує збереження результатів вимірювань у разі тимчасової втрати зв'язку із сервером [18].

2.3 Універсальний лічильник імпульсів D105 у системі альтернативного моніторингу.

Для збору інформації від додаткових датчиків у складі розробленої альтернативної системи моніторингу використовується універсальний лічильник імпульсів Smart-MAIC D105. На відміну від лічильника електричної енергії D103-21, який призначений для контролю електричних параметрів мережі, пристрій D105 використовується для підключення допоміжних вимірювальних

каналів та отримання інформації про параметри навколишнього середовища й стан окремих елементів фотоелектричної станції [19].

У рамках даної роботи передбачається використання двох лічильників D105. Перший лічильник призначений для збору даних від датчиків температури фотоелектричних модулів, акумуляторної батареї та корпусу інвертора, а також для контролю напруги акумуляторної батареї через аналоговий вхід. Другий лічильник використовується для підключення датчика температури та вологості зовнішнього повітря, а також датчика інтенсивності сонячного випромінювання. Такий підхід дозволяє розширити перелік контрольованих параметрів без необхідності використання додаткових контролерів.

Зовнішній вигляд універсального лічильника імпульсів Smart-MAIC D105 наведено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд універсального лічильника імпульсів Smart-MAIC D105 [19].

2.3.1 Призначення універсального лічильника імпульсів D105.

Основним призначенням лічильника D105 є збір, передача та архівування даних від різноманітних датчиків, які використовуються у системах диспетчеризації та моніторингу [19].

У запропонованій системі моніторингу D105 виконує функцію проміжної ланки між вимірювальними датчиками та програмним комплексом Smart-MAIC. Пристрій приймає сигнали від підключених датчиків, перетворює їх у цифровий формат та передає до системи моніторингу для подальшої обробки.

Використання D105 дозволяє реалізувати контроль температурних режимів роботи основного обладнання фотоелектричної станції. Це особливо важливо для оцінки впливу температури на ефективність роботи фотоелектричних модулів та акумуляторної батареї. Крім того, пристрій забезпечує можливість контролю зовнішніх метеорологічних параметрів, що можуть впливати на рівень генерації електроенергії.

Ще однією важливою функцією D105 є можливість контролю аналогових сигналів. У даній роботі ця можливість використовується для вимірювання напруги акумуляторної батареї через дільник напруги. Завдяки цьому система моніторингу отримує додатковий незалежний канал контролю стану акумуляторного накопичувача.

2.3.2 Конструкція та можливості універсального лічильника імпульсів D105.

Універсальний лічильник імпульсів D105 виконаний у компактному корпусі для монтажу на DIN-рейку та призначений для встановлення у розподільчих шафах і щитах автоматизації [19].

Конструкція пристрою передбачає наявність імпульсних входів для підключення датчиків із дискретними виходами, аналогового входу для вимірювання постійної напруги, а також спеціалізованих інтерфейсів для підключення температурних датчиків типу DS18B20 та комбінованих датчиків температури й вологості DHT22 [19–21].

На відміну від багатьох спеціалізованих контролерів, D105 підтримує одночасне підключення декількох температурних датчиків. Це дозволяє

контролювати температуру різних елементів фотоелектричної станції в межах одного пристрою та спрощує побудову системи моніторингу.

Передача даних до системи Smart-MAIC здійснюється через вбудований модуль Wi-Fi, що дозволяє відмовитися від прокладання додаткових ліній зв'язку. У разі тимчасової втрати зв'язку із сервером пристрій зберігає накопичені дані у власній пам'яті та передає їх після відновлення з'єднання [19].

Основні технічні характеристики універсального лічильника імпульсів D105 наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні технічні характеристики універсального лічильника імпульсів Smart-MAIC D105 [19].

Параметр	Значення
Імпульсний вхід	два, замикання контактів на GND
Аналоговий вхід	вимір напруги 0.1В . . 18В DC
Вимірювання температури датчиком DS18x20	-55°C . . +125°C, точність $\pm 0.5^\circ\text{C}$
Вимірювання температури та вологості DHT22	-40°C . . +80°C, вологість 0-99
Датчиків температури	макс. 5 шт. або DHT22 – 1 шт.
Максимальна потужність на керованому виході	50W
Споживана потужність	< 1.0W
Бездротовий протокол зв'язку	2.4 ГГц / IEEE 802.11 (b, g, n)
Інтервал оновлення даних	5 сек.
Інтервал збору даних	1 хвилина
Максимальний час накопичення даних за відсутності зв'язку з сервером	20діб
Встановлений робочий діапазон температури	-40 . . +60 °C.

Продовження таблиці 2.2

Електроживлення АС або DC	100 – 240 В, 50-60 Гц АС або 5V 0.6A DC
Розміри ДхВхШ	90х63х34 мм (2 DIN модулі)
Тип монтажу	на DIN рейку
Вага	0,1 кг

Як видно з таблиці 2.2, лічильник D105 поєднує можливості роботи з імпульсними, аналоговими та температурними датчиками, що дозволяє використовувати його як універсальний пристрій збору даних у складі альтернативної системи моніторингу. Підтримка бездротового зв'язку, локального накопичення інформації та широкого набору вхідних інтерфейсів забезпечує гнучкість його застосування для контролю різноманітних параметрів роботи фотоелектричної станції [19].

2.4 Датчики температури та вологості у системі моніторингу.

Однією з переваг запропонованої альтернативної системи моніторингу є можливість контролю не лише електричних параметрів фотоелектричної станції, але й умов її експлуатації. Температура обладнання та параметри навколишнього середовища безпосередньо впливають на ефективність роботи фотоелектричних модулів, акумуляторних батарей та інверторів. Тому до складу системи моніторингу додатково включено датчики температури та вологості.

У межах даної роботи для контролю температури окремих елементів фотоелектричної станції передбачено використання цифрових датчиків DS18B20, а для контролю параметрів навколишнього середовища - датчика DHT22. Зібрана інформація передається через універсальний лічильник імпульсів D105 до програмного комплексу Smart-MAIC, де використовується для подальшого аналізу та архівування [20, 21].

Застосування додаткових датчиків дозволяє отримати більш повне уявлення про режими роботи обладнання та вплив зовнішніх факторів на ефективність генерації електроенергії.

2.4.1 Датчик температури DS18B20.

Для контролю температури окремих елементів фотоелектричної станції у даній роботі використовуються цифрові датчики температури DS18B20 [20].

Особливістю даних датчиків є підтримка цифрового інтерфейсу 1-Wire, що дозволяє підключати декілька датчиків до однієї лінії зв'язку. Це спрощує монтаж та зменшує кількість кабельних з'єднань у системі моніторингу.

У запропонованій системі передбачено встановлення чотирьох датчиків DS18B20. Перший датчик використовується для контролю температури фотоелектричних модулів. Отримані дані дозволяють оцінювати вплив нагріву фотоелектричних модулів на їхню ефективність, оскільки зі зростанням температури вихідна потужність панелей зменшується.

Другий датчик встановлюється на акумуляторній батареї. Контроль температури акумуляторів є важливим для забезпечення їх безпечної експлуатації та оцінки умов роботи системи накопичення енергії.

Третій датчик використовується для контролю температури корпусу інвертора. Це дозволяє оцінювати тепловий режим роботи силової електроніки та своєчасно виявляти можливе перегрівання обладнання.

Четвертий датчик може використовуватися для контролю температури всередині приміщення, де встановлене обладнання фотоелектричної станції. Крім того, система передбачає наявність одного резервного каналу для можливого подальшого розширення функціоналу моніторингу.

Зовнішній вигляд цифрового датчика температури DS18B20 наведено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд цифрового датчика температури DS18B20 [20].

2.4.2 Датчик температури та вологості DHT22.

Для контролю кліматичних умов навколишнього середовища у системі моніторингу використовується цифровий датчик DHT22 [21].

Даний пристрій забезпечує одночасне вимірювання температури повітря та відносної вологості. На відміну від датчиків DS18B20, які контролюють температуру окремих елементів обладнання, DHT22 використовується для оцінки зовнішніх умов експлуатації фотоелектричної станції.

Отримані значення температури повітря дозволяють аналізувати вплив погодних умов на температуру фотоелектричних модулів та інвертора. Водночас інформація про вологість може використовуватися для оцінки умов роботи обладнання та подальшого аналізу експлуатаційних режимів станції.

Для забезпечення коректності вимірювань датчик DHT22 доцільно встановлювати у спеціальному радіаційному екрані DOL 140245 [39]. Радіаційний екран призначений для захисту датчика від прямого сонячного випромінювання та атмосферних опадів, одночасно забезпечуючи вільну циркуляцію навколишнього повітря навколо вимірювального елемента. Використання такого екрана дозволяє мінімізувати нагрівання корпусу датчика під дією сонячної радіації та підвищити достовірність вимірювання температури

зовнішнього повітря [40]. Без застосування радіаційного екрана датчик може нагріватися під впливом сонячних променів і вимірювати температуру власного корпусу, що призводить до завищення показів порівняно з фактичною температурою навколишнього середовища [40].

Зовнішній вигляд радіаційного екрана DOL 140245 наведено на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Радіаційний екран для датчиків кліматичних параметрів DOL 140245 [39].

Завдяки цифровому способу передачі даних датчик DHT22 легко інтегрується до складу системи моніторингу через універсальний лічильник імпульсів D105 [38].

Зовнішній вигляд датчика температури та вологості DHT22 наведено на рисунку 2.7.

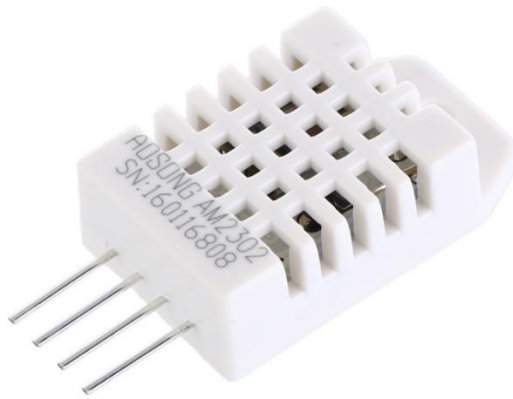


Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд датчика температури та вологості DHT22 [21].

2.4.3 Датчик інтенсивності сонячного випромінювання.

Для оцінювання впливу сонячної активності на роботу фотоелектричної станції до складу альтернативної системи моніторингу пропонується включити датчик інтенсивності сонячного випромінювання RK200-04 [22].

На відміну від стандартних систем моніторингу більшості гібридних інверторів, які відображають лише електричні параметри роботи станції, використання окремого датчика сонячного випромінювання дозволяє отримувати безпосередню інформацію про фактичну інсоляцію у місці встановлення фотоелектричних модулів.

Зовнішній вигляд датчика інтенсивності сонячного випромінювання RK200-04 наведено на рисунку 2.8.



Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд датчика інтенсивності сонячного випромінювання RK200-04 [22].

Принцип роботи датчика базується на перетворенні енергії сонячного випромінювання в електричний сигнал, величина якого пропорційна інтенсивності сонячного потоку. Отримані значення можуть використовуватися для оцінки умов роботи фотоелектричної станції та подальшого аналізу ефективності генерації електроенергії [22].

Оскільки датчик сонячного випромінювання встановлюється безпосередньо поблизу фотоелектричних модулів на відкритому повітрі, відстань між ним та шафою моніторингу може становити десятки метрів. Для забезпечення надійної передачі вимірювального сигналу в системі використовується струмова петля 4-20 мА. Даний спосіб передачі сигналу широко застосовується у промислових системах автоматизації завдяки високій завадостійкості, можливості передавання інформації на значні відстані та низькій чутливості до падіння напруги в лінії зв'язку [36].

Передача сигналу від датчика до шафи моніторингу здійснюється за допомогою екранованої витой пари. Для додаткового захисту вимірювального каналу у коло датчика встановлюється плавкий запобіжник номіналом 32 мА.

Оскільки універсальний лічильник імпульсів D105 використовує аналогові входи для вимірювання сигналів напруги, струмовий сигнал 4-20 мА перед подачею на пристрій перетворюється у сигнал напруги 0-10 В за допомогою перетворювача постійного струму та напруги ПНС-101 [37]. Перетворювач забезпечує масштабування сигналу та містить вбудовану гальванічну розв'язку між вхідними та вихідними колами, що дозволяє підвищити завадозахищеність вимірювального каналу та зменшити вплив різниці потенціалів між віддаленим датчиком і пристроєм збору даних [37].

Зовнішній вигляд перетворювача ПНС-101 наведено на рисунку 2.9.



Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд перетворювача постійного струму та напруги ПНС-101 [37].

Після перетворення сигнал надходить на аналоговий вхід універсального лічильника імпульсів D105, де виконується його обробка, архівування та передача до програмного комплексу Smart-MAIC. Отримані значення інтенсивності сонячного випромінювання архівуються разом з іншими параметрами роботи фотоелектричної станції та використовуються для побудови графіків і проведення подальшого аналізу.

Інформація про інтенсивність сонячного випромінювання дозволяє зіставляти погодні умови з фактичними показниками генерації електроенергії. Наприклад, у разі зниження потужності фотоелектричної станції можна визначити, чи пов'язане це зі зменшенням сонячної активності, чи причиною є несправність обладнання або виникнення додаткового затінення.

Крім того, використання датчика сонячного випромінювання дозволяє оцінювати ефективність роботи фотоелектричних модулів шляхом порівняння фактичної генерації електроенергії з рівнем отриманої сонячної енергії. Такий підхід дозволяє більш об'єктивно оцінювати технічний стан фотоелектричних модулів, а також рівень їх забруднення.

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики датчика інтенсивності сонячного випромінювання RK200-04 [22].

Параметр	Значення
Спектральний діапазон	300–1100 нм
Напруга живлення	5 В або 12–24 В DC
Діапазон вимірювання сонячного випромінювання	0–1500 Вт/м ²
Роздільна здатність	1 Вт/м ²
Вихідний сигнал	0–2,5 В; 0–5 В; 4–20 мА; RS485; SDI-12
Споживана потужність	0,2 Вт
Час відгуку	≤ 500 нс (95 %)
Косинусна похибка	±10 % (при куті піднесення Сонця 10°)
Нелінійність	≤ ±3 %
Температурний коефіцієнт	±0,08 %/°C
Стабільність показів	≤ ±2 % на рік
Робочий діапазон температур	від -40 °C до +80 °C
Ступінь захисту оболонки	IP67
Маса	420 г
Матеріал корпусу	Алюмінієвий сплав
Умови зберігання	від 10 °C до 60 °C при відносній вологості 20–90 % RH

Як видно з таблиці 2.3, датчик RK200-04 характеризується широким діапазоном вимірювання сонячного випромінювання, високою швидкістю та можливістю роботи в широкому температурному діапазоні. Наявність виконання з вихідним сигналом 4–20 мА дозволяє використовувати його у складі розробленої системи моніторингу із передачею даних на значні відстані через

екрановану виту пару. Застосування перетворювача ПНС-101 забезпечує узгодження сигналу з аналоговим входом D105 та додаткову гальванічну розв'язку вимірювального каналу, що підвищує надійність роботи всієї системи моніторингу [37].

2.5 Використання гальванічної розв'язки у системі моніторингу.

Під час побудови інформаційно-вимірювальних систем важливим завданням є забезпечення надійного та безпечного передавання вимірювальних сигналів між окремими елементами системи. Особливо це актуально для систем моніторингу фотоелектричних станцій, у яких одночасно використовуються силові кола, акумуляторні батареї та чутливі вимірювальні пристрої. У таких умовах виникнення різниці потенціалів між окремими елементами системи або поява електромагнітних завад можуть негативно впливати на точність вимірювань та стабільність роботи обладнання [25, 26].

Для підвищення надійності роботи запропонованої системи моніторингу передбачено використання блоку гальванічної розв'язки БРГ-11 виробництва Microl. Даний пристрій забезпечує електричне відокремлення вимірювальних кіл від інших елементів системи та дозволяє зменшити вплив небажаних електричних процесів на обладнання збору даних [23].

У межах даної роботи блок БРГ-11 використовується в каналі контролю напруги акумуляторної батареї. При цьому сигнал від акумуляторної батареї через дільник напруги надходить до блоку гальванічної розв'язки, після чого передається на аналоговий вхід універсального лічильника імпульсів D105. Такий підхід дозволяє підвищити безпечність вимірювань та зменшити ризик пошкодження вимірювального обладнання.

Зовнішній вигляд блоку гальванічної розв'язки БРГ-11 наведено на рисунку 2.10.



Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд блоку гальванічної розв’язки БРГ-11 [23].

2.5.1 Призначення гальванічної розв’язки.

Гальванічна розв’язка являє собою спосіб передавання інформації між двома електричними колами без створення прямого електричного з’єднання між ними. Основною метою її використання є усунення небажаного впливу різниці потенціалів, паразитних струмів та електромагнітних завад на роботу електронних пристроїв [25].

У вимірювальних системах гальванічна розв’язка дозволяє відокремити чутливі вимірювальні входи від джерел можливих перешкод. Завдяки цьому зменшується ймовірність виникнення похибок вимірювання та підвищується стійкість системи до зовнішніх впливів [26].

Для розроблюваної системи моніторингу особливого значення набуває контроль напруги акумуляторної батареї. Незважаючи на використання дільника напруги, між акумуляторною батареєю та вимірювальним обладнанням може виникати різниця потенціалів або вплив імпульсних перешкод, пов’язаних із роботою гібридного інвертора. Використання блоку БРГ-11 дозволяє додатково ізолювати вимірювальний канал та забезпечити більш надійну роботу аналогового входу лічильника D105 [23].

Таким чином, використання гальванічної розв'язки у складі системи моніторингу дозволяє підвищити електробезпеку, зменшити вплив завад та покращити достовірність отриманих результатів вимірювань.

2.5.2 Захист вимірювальних каналів системи.

Однією з причин виникнення похибок у вимірювальних системах є вплив завад загального виду, які можуть виникати внаслідок різниці потенціалів між окремими елементами системи або через вплив електромагнітних полів від силового обладнання [26].

У фотоелектричних станціях джерелами таких завад можуть бути інвертори, комутаційні пристрої, акумуляторні системи накопичення енергії та довгі лінії передачі сигналів від датчиків. У разі безпосереднього підключення аналогових входів до контролюваного обладнання це може призводити до появи додаткових похибок вимірювання або нестабільності показів.

Для мінімізації зазначених ризиків у системі передбачено використання блоку БРГ-11 між ділянкою напруги акумуляторної батареї та аналоговим входом універсального лічильника імпульсів D105. У такій конфігурації блок виконує функцію ізоляції вимірювального каналу від контролюваного кола та запобігає передачі небажаних електричних впливів до пристрою збору даних [23].

Використання гальванічної розв'язки також дозволяє підвищити надійність роботи системи моніторингу в цілому. У випадку виникнення аварійних режимів або короткочасних перенапруг ймовірність пошкодження вимірювального обладнання значно зменшується, що сприяє безперервному збору та збереженню даних.

Основні технічні характеристики блоку гальванічної розв'язки БРГ-11 наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні технічні характеристики блоку гальванічної розв'язки БРГ-11 [23].

Параметр	Значення
Вхідні сигнали	
Кількість входів	1
Тип входу	пасивний
Діапазони можливих вхідних сигналів/опір навантаження	від 0 мА до 5 мА / $R = 200 \text{ Ом}$ від 0 мА до 20 мА / $R \leq 50 \text{ Ом}$ від 4 мА до 20 мА / $R \leq 50 \text{ Ом}$ від 0 до 10 В / $R \geq 20 \text{ кОм}$
Межа основної зведеної похибки вимірювання	$\pm 0,2 \%$
Вихідні сигнали	
Кількість входів	1
Тип входу	активний
Діапазони можливих вихідних сигналів/опір навантаження	від 0 мА до 5 мА / $R = 2000 \text{ Ом}$ від 0 мА до 20 мА / $R \leq 500 \text{ Ом}$ від 4 мА до 20 мА / $R \leq 500 \text{ Ом}$ від 0 до 10 В / $R \geq 2000 \text{ Ом}$
Гальванічна розв'язка	- Повна. Вихід ізольований від інших кіл. - Напруга гальванічної розв'язки не менше 500 В.
Електричні дані	
Напруга живлення	Постійного струму: 24 В
Споживана потужність	Постійного струму: не більше 125 мА
Корпус	
Тип монтажу	на DIN-рейку

Продовження таблиці 2.4

Розмір корпусу (ВхШхГ)	76x26x115 мм
Маса, не більше	0,13 кг
Ступінь захисту	IP20

Як видно з таблиці 2.4, блок БРГ-11 забезпечує необхідний рівень електричної ізоляції для роботи з низьковольтними сигналами постійного струму та може ефективно використовуватися у складі вимірювальних каналів альтернативної системи моніторингу фотоелектричної станції [23].

2.6 Розроблення вузла контролю напруги акумуляторної батареї.

Одним із додаткових параметрів, контроль яких передбачається у розроблюваній альтернативній системі моніторингу, є напруга акумуляторної батареї. Контроль цього параметра дозволяє оцінювати режими роботи системи накопичення енергії, аналізувати процеси заряджання та розряджання акумулятора, а також здійснювати додаткову перевірку коректності роботи гібридного інвертора.

Для збору даних використовується аналоговий вхід універсального лічильника імпульсів D105, який підтримує вимірювання постійної напруги в діапазоні від 0,1 до 18 В [19]. Оскільки напруга акумуляторної батареї значно перевищує допустимий рівень для аналогового входу, виникає необхідність її попереднього масштабування.

З цією метою розроблено окремий вузол контролю напруги акумуляторної батареї, структурна схема якого наведена на рисунку 2.11.

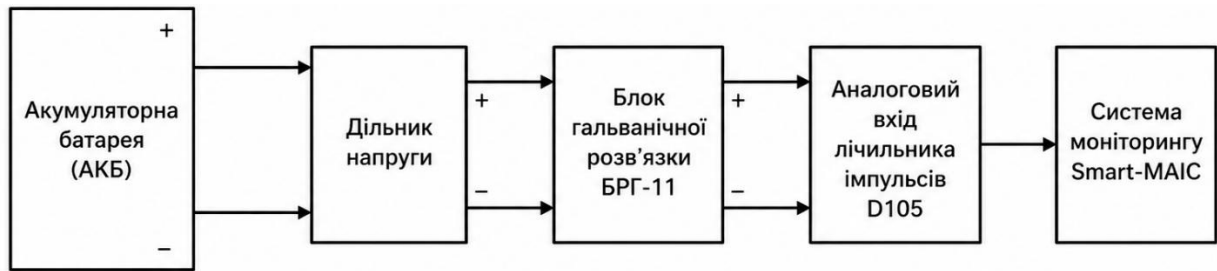


Рисунок 2.11 – Структурна схема вузла контролю напруги акумуляторної батареї.

Вузол складається з резистивного дільника напруги, блоку гальванічної розв'язки БРГ-11 та аналогового входу лічильника імпульсів D105. Після вимірювання дані передаються до системи Smart-MAIC для подальшого зберігання та аналізу.

2.6.1 Використання дільника напруги для вимірювання напруги АКБ.

Для зниження напруги акумуляторної батареї до рівня, допустимого для вимірювання аналоговим входом D105, використовується резистивний дільник напруги [27].

Принцип роботи дільника полягає у розподілі вхідної напруги між двома послідовно з'єднаними резисторами. Напруга для вимірювання знімається з точки їх з'єднання та пропорційна співвідношенню опорів резисторів.

У даній роботі розглядається система накопичення енергії на базі низьковольтної літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї з номінальною напругою 51,2 В. Під час повного заряджання напруга батареї може досягати 56–58 В [29]. Для забезпечення запасу за напругою при розрахунках прийнято максимальне значення 65 В.

Використання дільника напруги дозволяє реалізувати незалежний контроль напруги акумуляторної батареї без внесення змін до штатної системи керування інвертора та без використання дорогих вимірювальних модулів.

2.6.2 Розрахунок параметрів дільника напруги

Схема дільника напруги наведена на рисунку 2.12.

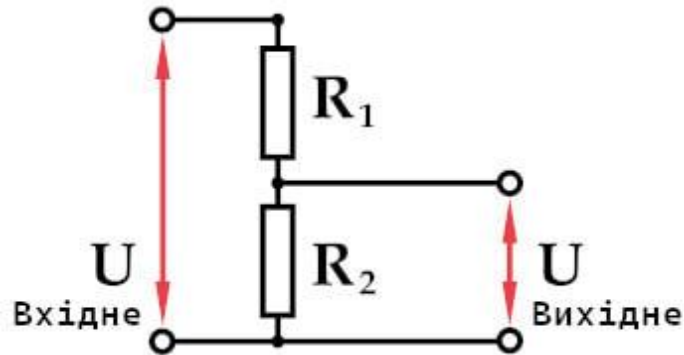


Рисунок 2.12 – Схема дільника напруги для контролю напруги акумуляторної батареї [33].

Для реалізації дільника були обрані такі номінали резисторів:

$$R_1 = 11 \text{ кОм}$$

$$R_2 = 2 \text{ кОм}$$

Розрахунок вихідної напруги виконується за формулою 2.1 [27]:

$$U_{\text{ВИХ}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{\text{ВХІД}} \quad (2.1)$$

де:

$U_{\text{ВИХ}}$ – вихідна напруга дільника, В;

$U_{\text{ВХІД}}$ – вхідна напруга, В;

R_1 – опір верхнього резистора, кОм;

R_2 – опір нижнього резистора, кОм.

Підставимо значення:

$$U_{\text{ВИХ}} = \frac{2}{11 + 2} \times 65 \text{ В}$$

$$U_{\text{ВИХ}} = \frac{130}{13}$$

$$U_{\text{ВИХ}} = 10 \text{ В}$$

Таким чином, при максимальній розрахунковій напрузі акумуляторної батареї 65 В на виході дільника формується сигнал величиною 10 В.

Отриманий результат було додатково перевірено за допомогою онлайн-калькулятора дільника напруги [30], що підтвердило правильність виконаних розрахунків.

Під час проєктування вузла контролю було прийнято рішення не використовувати повний діапазон аналогового входу D105. Незважаючи на те, що пристрій підтримує вимірювання напруги до 18 В [19], вихідну напругу дільника було обмежено значенням 10 В. Такий підхід створює додатковий запас безпеки та зменшує ризик перевищення допустимого рівня сигналу на аналоговому вході.

Крім того, необхідно враховувати вплив температури на параметри резисторів. Зі зміною температури змінюється їхній електричний опір, що може призводити до незначної зміни коефіцієнта перетворення дільника напруги [28]. Для мінімізації похибок вимірювання доцільно використовувати резистори з малим температурним коефіцієнтом опору.

2.6.3 Масштабування сигналу та програмна обробка даних.

Після проходження через дільник напруги та блок гальванічної розв'язки БРГ-11 сигнал надходить на аналоговий вхід лічильника імпульсів D105 [19, 23].

Оскільки система вимірює вже зменшену напругу, для отримання фактичного значення напруги акумуляторної батареї необхідно виконати зворотне масштабування даних.

Коефіцієнт масштабування визначається за формулою 2.2:

$$K = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (2.2)$$

Підставляємо значення:

$$K = \frac{11 + 2}{2}$$

$$K = \frac{13}{2}$$

$$K = 6,5$$

Отже, фактична напруга акумуляторної батареї визначається за формулою:

$$U_{\text{АКБ}} = U_{\text{вим}} \times 6,5$$

де:

$U_{\text{АКБ}}$ – реальна напруга акумуляторної батареї, В;

$U_{\text{вим}}$ – напруга, виміряна аналоговим входом D105, В.

Наприклад, якщо система Smart-MAIC отримала від аналогового входу значення 8 В, то реальна напруга акумуляторної батареї становитиме:

$$U_{\text{АКБ}} = 8 \times 6,5 = 52 \text{ В}$$

Після масштабування отримані дані записуються до бази даних системи Smart-MAIC та можуть використовуватися для побудови графіків, аналізу режимів роботи акумуляторної батареї, визначення циклів заряджання та розряджання, а також оцінки ефективності роботи системи накопичення енергії.

Оскільки отримана інформація зберігається у вольтах, для зручності контролю виникає необхідність її конвертації у відсотковий еквівалент рівня заряду (SoC). Для цього в системі Smart-MAIC використовується метод табличної апроксимації. Залежність рівня заряду від фактичної напруги батареї Deye SE-G5.1 Pro-B (конфігурація 16S), розрахована з урахуванням алгоритмів інвертора, наведена в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Залежність стану заряду (SoC) від напруги АКБ.

Рівень заряду (SoC, %)	Напруга однієї комірки (В)	Загальна напруга батареї (В)
100%	3.60	57.6
95%	3.38	54.1
90%	3.35	53.6

Продовження таблиці 2.5

85%	3.33	53.3
80%	3.32	53.1
75%	3.31	53.0
70%	3.30	52.8
65%	3.29	52.6
60%	3.28	52.5
55%	3.27	52.3
50%	3.26	52.2
45%	3.25	52.0
40%	3.24	51.8
35%	3.23	51.7
30%	3.21	51.4
25%	3.20	51.2
20%	3.15	50.4
15%	3.10	49.6
10%	3.00	48.0
5%	2.85	45.6
0%	2.70	43.2

Згідно з наведеними даними, діапазон від 100% до 0% відповідає зміні напруги від 57,6 В до 43,2 В. Таким чином, шляхом порівняння поточного масштабованого значення напруги з опорною матрицею таблиці 2.5, програмний комплекс здійснює розрахунок відсоткового значення SoC для його подальшого аналізу та виведення на дашборд користувача [35].

Для практичної реалізації процесу збору даних та забезпечення взаємодії всіх силових та вимірювальних компонентів розроблено загальну інженерну модель. Схему електричного з'єднання силового обладнання, споживачів, зовнішньої мережі та датчиків системи альтернативного моніторингу наведено на рисунку 2.13.

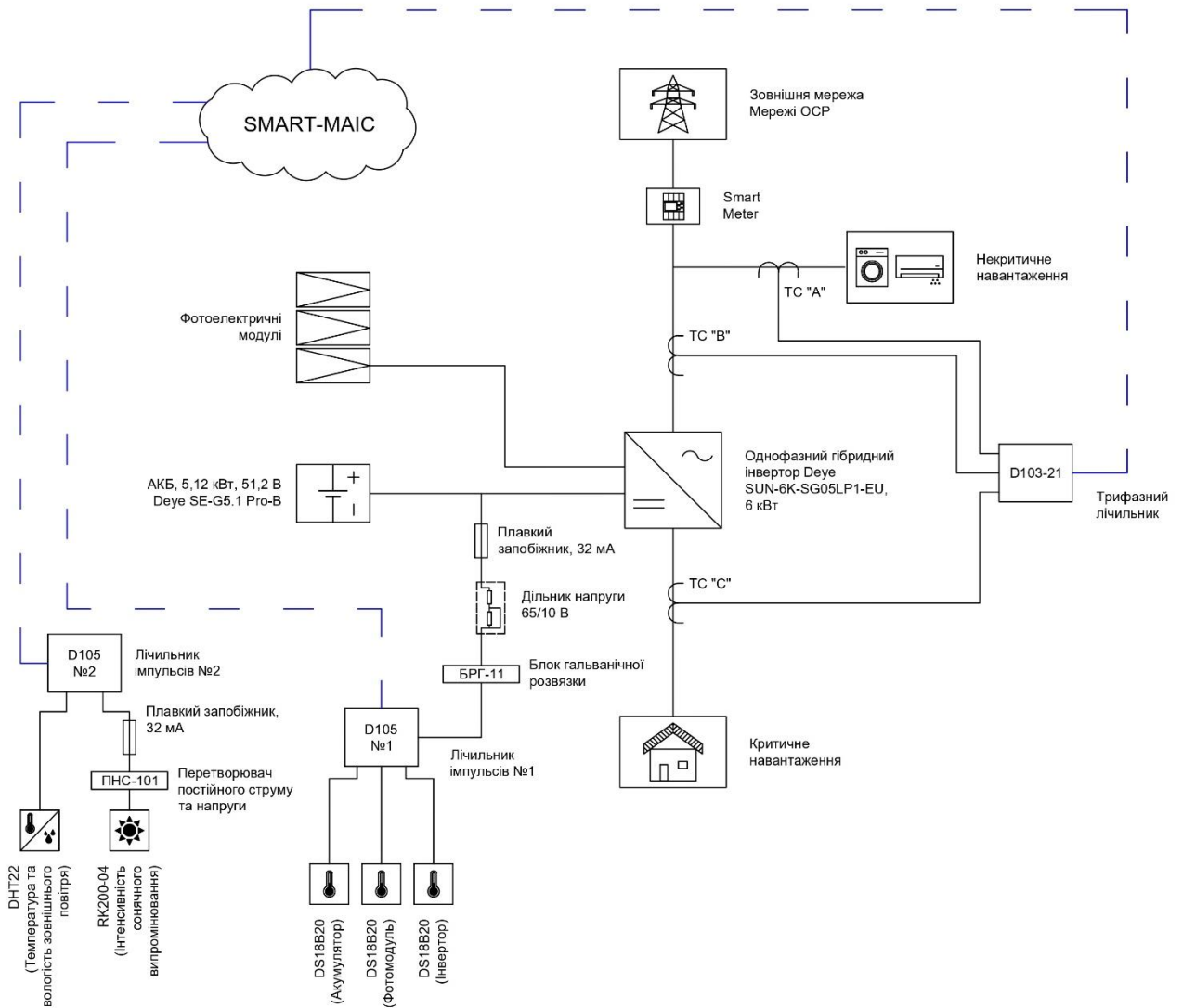


Рисунок 2.13 – Електрична схема інтеграції обладнання побутової фотоелектричної станції з системою альтернативного моніторингу.

2.7 Організація візуалізації параметрів роботи фотоелектричної станції.

Однією з ключових функцій будь-якої системи моніторингу є не лише збір та збереження даних, але й забезпечення їх зручного відображення для користувача. Велика кількість вимірюваних параметрів потребує їх систематизації та представлення у зрозумілому вигляді, що дозволяє оперативно оцінювати стан обладнання та аналізувати режими роботи фотоелектричної станції [15, 16].

У розроблюваній системі моніторингу візуалізація даних реалізується засобами платформи Smart-MAIC, яка забезпечує створення інформаційних панелей (дашбордів) з відображенням поточних значень параметрів, історичних графіків, архівних даних та службової інформації про стан обладнання [17].

Використання інформаційних панелей дозволяє об'єднати в одному інтерфейсі дані від лічильника електроенергії D103-21, лічильників імпульсів D105, датчиків температури, вологості, інтенсивності сонячного випромінювання та вузла контролю напруги акумуляторної батареї. Завдяки цьому користувач отримує можливість здійснювати комплексний контроль усіх основних параметрів роботи фотоелектричної станції.

2.7.1 Формування інформаційної панелі моніторингу.

Інформаційна панель моніторингу являє собою графічний інтерфейс користувача, призначений для відображення даних, що надходять від вимірювальних пристроїв системи моніторингу. Основним завданням такої панелі є забезпечення швидкого доступу до поточних та архівних параметрів роботи обладнання [16].

У системі Smart-MAIC інформаційна панель формується за модульним принципом. Користувач має можливість самостійно визначати склад віджетів, таблиць, графіків та індикаторів залежно від особливостей контролюваного об'єкта [17].

Для фотоелектричної станції доцільно передбачити окремі групи параметрів, що характеризують:

- генерацію електричної енергії;
- споживання електроенергії;
- роботу акумуляторної батареї;
- стан зовнішньої мережі;
- метеорологічні умови;
- температурні режими роботи обладнання.

Такий підхід дозволяє розділити інформацію за функціональними групами та спростити її аналіз оператором системи. Крім поточних значень параметрів, інформаційна панель повинна забезпечувати можливість перегляду історичних даних та побудови графіків за обраний проміжок часу [15].

2.7.2 Відображення параметрів генерації та споживання.

Однією з основних задач системи моніторингу є контроль енергетичних параметрів фотоелектричної станції. Для цього на інформаційній панелі відображаються дані про генерацію електроенергії, споживання навантаженням, роботу акумуляторної батареї та взаємодію із зовнішньою електричною мережею.

Приклад реалізації відповідної інформаційної панелі наведено на рисунку 2.14.

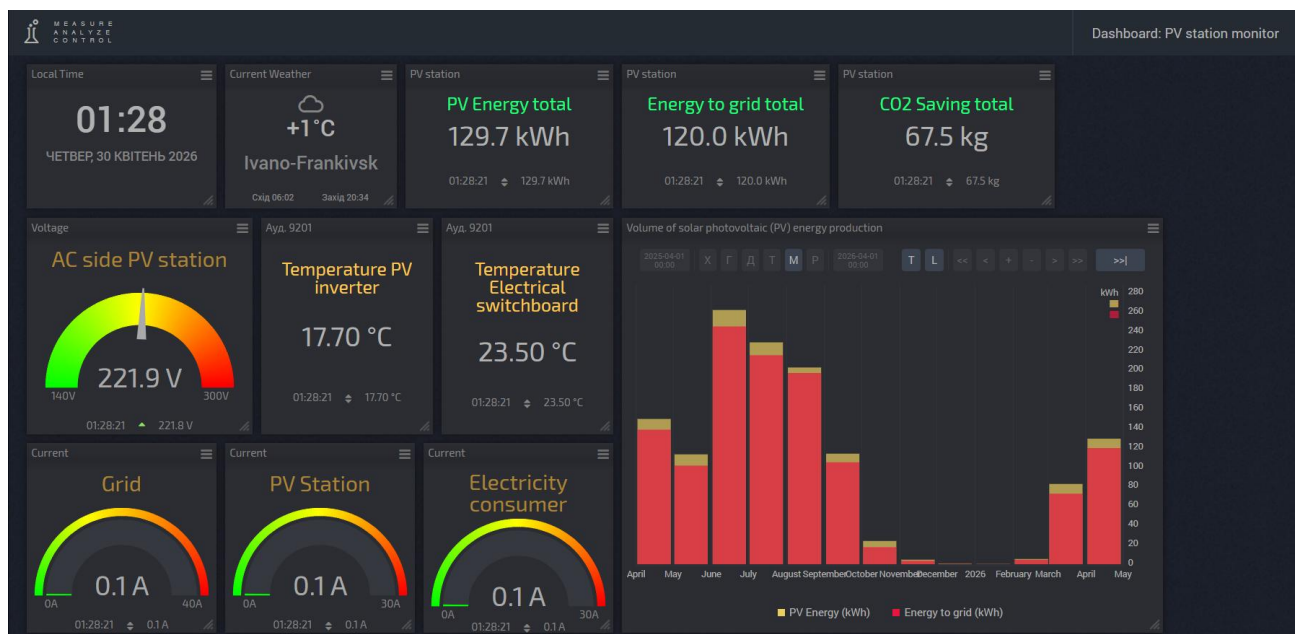


Рисунок 2.14 – Приклад інформаційної панелі відображення параметрів генерації та споживання електроенергії [31].

На панелі можуть відображатися поточні значення потужності, добова генерація електроенергії, обсяги споживання, рівень заряду акумуляторної

батареї, а також напрямки потоків енергії між окремими елементами системи. Крім числових показників, користувач отримує доступ до графіків зміни параметрів у часі, що дозволяє аналізувати режими роботи фотоелектричної станції протягом доби, тижня або місяця.

Використання графічного представлення даних значно спрощує виявлення аномальних режимів роботи обладнання, оцінку ефективності роботи системи накопичення енергії та аналіз співвідношення між генерацією і споживанням електроенергії [15].

2.7.3 Відображення метеорологічних параметрів.

Для більш повного аналізу роботи фотоелектричної станції до інформаційної панелі доцільно включати дані про параметри навколишнього середовища. Це дозволяє оцінювати вплив погодних умов на процес генерації електроенергії та здійснювати порівняння між рівнем сонячної активності й фактичною продуктивністю станції.

Приклад реалізації панелі моніторингу метеорологічних параметрів наведено на рисунку 2.15.

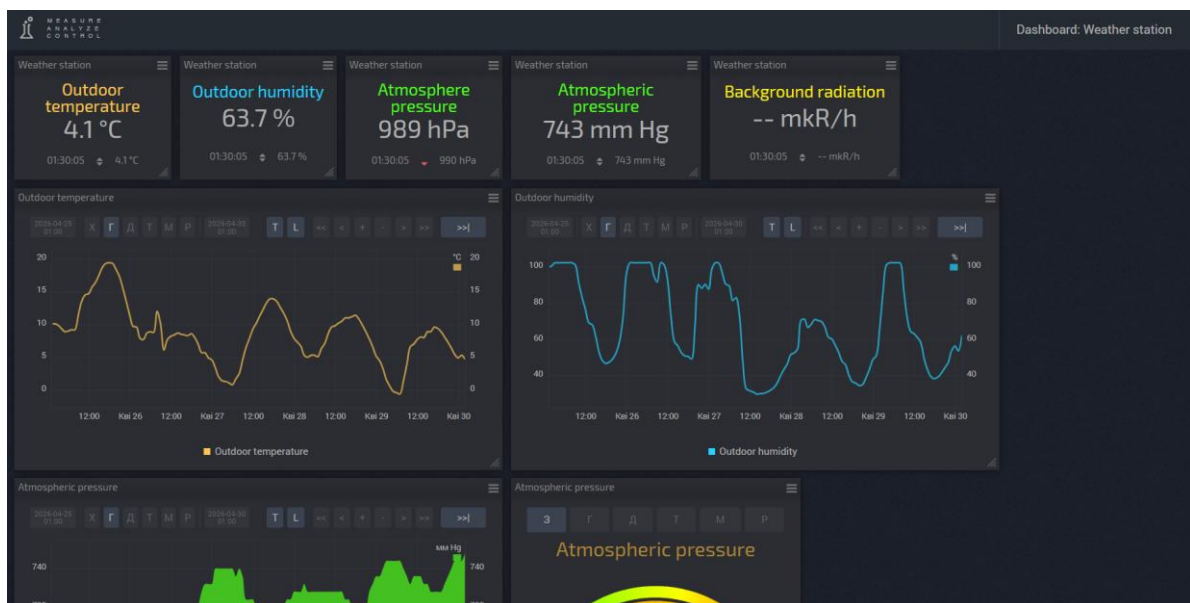


Рисунок 2.15 – Приклад інформаційної панелі відображення метеорологічних параметрів [32].

На даній панелі можуть відображатися значення температури зовнішнього повітря, відносної вологості, інтенсивності сонячного випромінювання, температури фотоелектричних модулів та інших параметрів, отриманих від встановлених датчиків.

Крім відображення поточних значень, система Smart-MAIC дозволяє формувати архіви вимірювань та будувати графіки зміни параметрів у часі. Це дає можливість аналізувати взаємозв'язок між погодними умовами та показниками роботи фотоелектричної станції, а також оцінювати вплив температури та рівня сонячного випромінювання на ефективність генерації електроенергії [16].

Таким чином, використання інформаційних панелей Smart-MAIC забезпечує комплексне відображення технічних та метеорологічних параметрів фотоелектричної станції, спрощує аналіз отриманих даних та підвищує ефективність контролю роботи обладнання [17].

2.8 Висновки до розділу 2.

У другому розділі дипломної роботи було розроблено структуру альтернативної системи моніторингу однофазної гібридної фотоелектричної станції на базі платформи Smart-MAIC. На відміну від штатних систем моніторингу виробників інверторного обладнання, запропоноване рішення забезпечує можливість збору та аналізу розширеного набору параметрів, необхідних для оцінки технічного стану та ефективності роботи фотоелектричної станції.

Обґрунтовано вибір системи диспетчеризації та моніторингу Smart-MAIC як програмно-апаратної основи розроблюваного рішення. Визначено архітектуру системи, принципи збору, обробки та зберігання даних, а також особливості організації віддаленого доступу до вимірювальної інформації.

Для контролю електричних параметрів станції запропоновано використання трифазного лічильника електричної енергії D103-21. Показано, що

застосування трифазного лічильника в однофазній системі дозволяє одночасно контролювати декілька точок вимірювання, а саме споживання критичного навантаження, споживання некритичного навантаження та обмін електроенергією із зовнішньою мережею.

Для збору інформації від додаткових датчиків обґрунтовано використання універсальних лічильників імпульсів D105. Розглянуто можливість підключення температурних датчиків, датчика вологості, датчика інтенсивності сонячного випромінювання та аналогових вимірювальних каналів.

У складі системи моніторингу передбачено використання цифрових датчиків температури DS18B20 для контролю температури фотоелектричних модулів, акумуляторної батареї, корпусу інвертора та приміщення, в якому розташоване обладнання. Для контролю параметрів навколишнього середовища запропоновано використання датчика температури та вологості DHT22, а також датчика інтенсивності сонячного випромінювання RK200-04.

Окрему увагу приділено розробленню вузла контролю напруги акумуляторної батареї. Для вимірювання напруги низьковольтної акумуляторної батареї використано резистивний дільник напруги з подальшим програмним масштабуванням вимірюного сигналу. Для підвищення надійності роботи вимірювального каналу запропоновано застосування блоку гальванічної розв'язки БРГ-11, який забезпечує додатковий захист аналогового входу системи моніторингу від впливу завад та різниці потенціалів.

Також у розділі розглянуто принципи організації візуалізації даних у системі Smart-MAIC. Запропоновано структуру інформаційних панелей для відображення параметрів генерації, споживання електроенергії та метеорологічних показників. Показано можливість використання архівних даних та графічного представлення результатів вимірювань для аналізу роботи фотоелектричної станції.

Таким чином, у результаті виконання другого розділу сформовано повну структуру альтернативної системи моніторингу фотоелектричної станції, визначено склад основного обладнання та датчиків, розроблено вузол контролю

напруги акумуляторної батареї, а також обґрунтовано способи збору, обробки та візуалізації даних. Отримані результати є основою для подальшої розробки електричних схем, алгоритмів роботи та практичної реалізації запропонованої системи моніторингу.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНЮВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТА МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ

У другому розділі було розроблено структуру інформаційно-вимірювальної системи альтернативного моніторингу однофазної гібридної фотоелектричної станції, обґрунтовано вибір обладнання та розглянуто принципи збору, передавання і візуалізації даних. Проте для практичного застосування розробленої системи недостатньо лише забезпечити отримання вимірювальної інформації. Важливо також оцінити точність отримуваних даних та визначити, наскільки результати вимірювань відповідають реальним параметрам роботи фотоелектричної станції.

У даному розділі виконано аналіз основних вимірювальних каналів системи моніторингу, до складу яких входять канали контролю напруги акумуляторної батареї, температури, вологості та інтенсивності сонячного випромінювання. Для кожного з них проведено оцінювання метрологічних характеристик на основі технічних параметрів використаних датчиків та вимірювальних пристроїв.

Окрім оцінювання точності вимірювань, розглядається працездатність системи в умовах втрати доступу до хмарного сервісу моніторингу. Також виконується порівняння функціональних можливостей стандартної системи моніторингу інвертора із запропонованою альтернативною системою, що дозволяє визначити переваги та особливості її практичного використання.

Результати проведеного аналізу дають можливість оцінити ефективність розробленої інформаційно-вимірювальної системи та сформулювати рекомендації щодо її подальшого застосування на фотоелектричних станціях різного призначення.

3.1 Аналіз вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальної системи.

Перед проведенням оцінювання точності вимірювань необхідно розглянути структуру вимірювальних каналів розробленої інформаційно-вимірювальної системи. Кожен вимірювальний канал призначений для контролю окремого параметра роботи фотоелектричної станції та включає первинний перетворювач, пристрій збору даних і програмне забезпечення для подальшої обробки отриманої інформації.

У розробленій системі моніторингу контроль параметрів здійснюється за допомогою лічильника електричної енергії D103-21, універсальних лічильників імпульсів D105 та набору датчиків, призначених для вимірювання температури, вологості, інтенсивності сонячного випромінювання та напруги акумуляторної батареї [17-22].

Основні вимірювальні канали системи наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вимірювальні канали інформаційно-вимірювальної системи альтернативного моніторингу.

Контрольований параметр	Первинний перетворювач	Пристрій збору даних
Напруга акумуляторної батареї	Дільник напруги	D105
Температура фотоелектричних модулів	DS18B20	D105
Температура акумуляторної батареї	DS18B20	D105
Температура інвертора	DS18B20	D105
Температура навколишнього середовища	DHT22	D105
Вологість повітря	DHT22	D105

Продовження таблиці 3.1

Інтенсивність сонячного випромінювання	RK200-04	D105
Параметри генерації та споживання електроенергії	D103-21	Smart-MAIC

Як видно з таблиці, система дозволяє контролювати не лише електричні параметри фотоелектричної станції, а й умови навколишнього середовища, які безпосередньо впливають на ефективність її роботи. До таких параметрів належать температура повітря, вологість та інтенсивність сонячного випромінювання.

Окремий вимірювальний канал реалізовано для контролю напруги акумуляторної батареї. Для цього використовується резистивний дільник напруги, сигнал з якого надходить на аналоговий вхід лічильника імпульсів D105. Такий підхід дозволяє здійснювати незалежний контроль стану системи накопичення енергії та порівнювати отримані результати з даними штатної системи моніторингу інвертора.

Збір інформації від усіх вимірювальних каналів здійснюється платформою Smart-MAIC, яка забезпечує централізоване зберігання даних, їх подальшу обробку та відображення у вигляді інформаційних панелей і графіків [17].

3.2 Оцінювання точності вимірювання параметрів інформаційно-вимірювальної системи.

Після визначення основних вимірювальних каналів необхідно оцінити точність вимірювання параметрів, які контролюються розробленою системою. Для цього використовуються технічні характеристики вимірювальних пристроїв, датчиків та елементів схеми, які були обрані для побудови альтернативної системи моніторингу.

У межах даної роботи оцінювання точності виконується для основних каналів: вимірювання напруги акумуляторної батареї, температури, температури та вологості повітря, а також інтенсивності сонячного випромінювання. Такий підхід дозволяє визначити, наскільки отримані системою дані можуть бути використані для аналізу роботи фотоелектричної станції.

Оцінювання виконується на основі паспортних характеристик обладнання та розрахункових параметрів вимірювальних схем. Для датчиків температури, вологості та сонячного випромінювання основним джерелом похибки є їх власна паспортна точність. Для каналу вимірювання напруги акумуляторної батареї додатково враховується вплив резистивного дільника напруги, аналогового входу лічильника D105 та температурної зміни опору резисторів.

3.2.1 Оцінювання точності вимірювання напруги акумуляторної батареї.

Згідно з технічними характеристиками D105, аналоговий вхід пристрою може використовуватися для вимірювання постійної напруги в низьковольтному діапазоні [19]. У розробленому вузлі контролю напруги акумуляторної батареї було прийнято рішення масштабувати максимальну розрахункову напругу 65 В до рівня 10 В. Це дозволяє не використовувати верхню межу вимірювального діапазону та створює додатковий запас за напругою.

Основними джерелами похибки цього каналу є похибка аналогового входу D105, допуск резисторів дільника напруги та зміна їхнього опору під впливом температури. Температурний коефіцієнт опору характеризує зміну електричного опору матеріалу при зміні температури, тому при побудові дільника доцільно використовувати резистори з малим температурним коефіцієнтом та невеликим допуском номіналу [28].

Якщо для дільника напруги використовувати резистори з допуском 1 %, то співвідношення опорів може незначно відрізнятись від розрахункового. Це призведе до зміни коефіцієнта масштабування i , відповідно, до похибки

визначення фактичної напруги акумуляторної батареї. Для зменшення цієї похибки доцільно застосовувати прецизійні резистори з допуском 0,1–1 %.

Таким чином, точність вимірювання напруги акумуляторної батареї залежить не лише від характеристик аналогового входу D105, але й від якості підібраних резисторів дільника напруги та правильності масштабування сигналу у програмному забезпеченні. Для задач моніторингу стану акумуляторної батареї така схема є достатньою, оскільки дозволяє контролювати зміну напруги в процесі заряджання та розряджання з необхідною для експлуатаційного аналізу точністю.

3.2.2 Оцінювання точності вимірювання температури.

Для контролю температури акумуляторної батареї у розробленій системі використовується цифровий датчик температури DS18B20. Передача результатів вимірювання здійснюється у цифровому вигляді, що дозволяє уникнути додаткових похибок, пов'язаних із передачею аналогового сигналу та його перетворенням [20].

Згідно з технічною документацією виробника, у діапазоні температур від -10 °C до +85 °C похибка вимірювання DS18B20 не перевищує $\pm 0,5$ °C [20]. Саме цей температурний діапазон відповідає умовам експлуатації акумуляторної батареї у складі гібридної фотоелектричної станції.

Відносну похибку вимірювання можна оцінити завдяки формулі 3.1 для типової робочої температури акумуляторної батареї 25 °C :

$$\delta = \left(\frac{0,5}{25} \right) \times 100\% = 2\% \quad (3.1)$$

Для температури 40 °C відносна похибка становитиме:

$$\delta = \left(\frac{0,5}{40} \right) \times 100\% = 1,25\%$$

Отримані значення свідчать про те, що зі збільшенням температури відносна похибка зменшується, тоді як абсолютна похибка залишається сталою та не перевищує $\pm 0,5$ °C.

Для задач моніторингу фотоелектричної станції така точність є достатньою, оскільки датчик DS18B20 використовується для контролю температури основних елементів системи, зокрема акумуляторної батареї, інвертора та фотоелектричних модулів. Максимальна паспортна похибка $\pm 0,5$ °C є незначною порівняно з характерними змінами температури цих елементів під час роботи. Отримані результати дозволяють своєчасно виявляти перегрів обладнання, контролювати режими роботи акумуляторної батареї та оцінювати вплив температурних умов на роботу фотоелектричних модулів. Таким чином, точність датчика DS18B20 є достатньою для вирішення задач експлуатаційного моніторингу та не має суттєвого впливу на достовірність отриманих даних.

3.2.3 Оцінювання точності вимірювання температури та вологості.

Для моніторингу параметрів довкілля у створеній системі застосовано цифровий датчик температури та вологості DHT22. Цей пристрій дає змогу одночасно фіксувати температуру повітря та відносну вологість, що необхідно для оцінювання умов роботи фотоелектричної станції (ФЕС) та аналізу погодного впливу на її загальну ефективність [21].

За паспортом датчика DHT22, гранична абсолютна похибка вимірювання температури становить $\pm 0,5$ °C, а відносної вологості - не перевищує $\pm 2\%$ [21].

Щоб оцінити точність роботи пристрою, розрахуємо відносну похибку вимірювань для різних експлуатаційних умов:

Для температури: за типових 25 °C відносна похибка складає:

$$\delta = \left(\frac{0,5}{25} \right) \times 100\% = 2\%$$

При підвищенні температури до 35°C цей показник зменшується:

$$\delta = \left(\frac{0,5}{35} \right) \times 100\% = 1,43\%$$

Це підтверджує, що при стабільній абсолютній похибці ($\pm 0,5$ °C) відносна похибка вимірювання температури знижується із зростанням її фактичного значення.

Для вологості: за середнього рівня відносної вологості повітря 60% відносна похибка розрахунку дорівнює:

$$\delta = \left(\frac{2}{60} \right) \times 100\% = 3,33\%$$

У вологішому середовищі (80%) вона зменшується до:

$$\delta = \left(\frac{2}{80} \right) \times 100\% = 2,5\%$$

Отримані результати доводять, що похибки вимірювань є мінімальними й не викривляють загальну картину умов експлуатації станції.

Для моніторингу фотоелектричних систем параметри датчика DHT22 є цілком прийнятними, оскільки його завдання полягає в оперативному контролі зовнішнього середовища, а не у виконанні прецизійних метеорологічних досліджень. Зібрані дані дозволяють ефективно аналізувати, як саме температурні режими та вологість впливають на функціонування фотоелектричних модулів, інвертора й акумуляторів.

Отже, точність датчика DHT22 є повністю достатньою для експлуатаційного моніторингу, оскільки він забезпечує збір достовірної інформації про стан навколишнього середовища.

3.2.4 Оцінювання точності вимірювання сонячного випромінювання.

Для контролю інтенсивності сонячного випромінювання у розробленій системі використовується датчик RK200-04. Отримані дані використовуються для аналізу умов роботи фотоелектричної станції та оцінювання ефективності генерації електроенергії. Передача інформації здійснюється через універсальний лічильник імпульсів D105 до програмного комплексу Smart-MAIC [22].

Згідно з технічними характеристиками датчика RK200-04, нелінійність вимірювання не перевищує ± 3 %, а роздільна здатність становить 1 Вт/м^2 [22].

Для оцінювання точності вимірювання розглянемо типове значення інтенсивності сонячного випромінювання 800 Вт/м^2 , яке відповідає умовам ефективної роботи фотоелектричних модулів.

Абсолютна похибка вимірювання згідно формулі 3.2 становитиме:

$$\Delta = 800 \times 0,03 = 24 \text{ Вт/м}^2 \quad (3.2)$$

Для інтенсивності сонячного випромінювання 1000 Вт/м^2 абсолютна похибка дорівнюватиме:

$$\Delta = 1000 \times 0,03 = 30 \text{ Вт/м}^2$$

Отримані результати свідчать про те, що абсолютна похибка зростає пропорційно до величини вимірюваного сонячного випромінювання, тоді як відносна похибка залишається сталою та не перевищує 3 %.

Для задач моніторингу фотоелектричної станції така точність є достатньою, оскільки датчик використовується переважно для оцінювання зміни рівня сонячної активності та порівняння отриманого сонячного випромінювання з фактичною генерацією електроенергії. Отримані дані дозволяють виявляти зниження ефективності роботи фотоелектричних модулів, оцінювати вплив погодних умов та своєчасно виявляти можливі відхилення у роботі станції.

Таким чином, точність датчика RK200-04 є достатньою для вирішення задач експлуатаційного моніторингу та забезпечує отримання достовірної інформації про рівень сонячного випромінювання.

3.3 Аналіз роботи системи моніторингу в умовах втрати доступу до хмарного сервісу.

Однією з особливостей сучасних систем моніторингу фотоелектричних станцій є використання хмарних сервісів для збереження та відображення даних. При цьому працездатність системи значною мірою залежить від наявності

доступу до мережі Інтернет та функціонування віддаленого серверного обладнання.

У стандартній системі моніторингу гібридного інвертора основна інформація про роботу станції передається до хмарного сервісу виробника. У випадку втрати доступу до мережі Інтернет користувач втрачає можливість віддаленого контролю параметрів роботи станції, перегляду архівних даних та отримання повідомлень про аварійні події.

Запропонована альтернативна система моніторингу також використовує мережевий обмін даними для віддаленого доступу до інформації. Проте її структура є більш гнучкою, оскільки всі вимірювальні пристрої функціонують незалежно від програмного інтерфейсу користувача. У разі тимчасової відсутності доступу до хмарного сервісу вимірювання параметрів продовжується, а після відновлення зв'язку накопичені дані можуть бути передані до системи зберігання та обробки інформації.

Крім того, використання окремих вимірювальних пристроїв дозволяє виконувати локальний контроль стану обладнання навіть за відсутності доступу до віддалених серверів. Це підвищує надійність системи моніторингу та зменшує залежність від зовнішніх інформаційних сервісів.

Також варто зазначити, що стандартний моніторинг не розрахований на локальне збереження даних і повністю залежить від хмарного сервера, який надає виробник інвертора або розробник програмного забезпечення для моніторингу фотоелектричної станції. Однак система альтернативного моніторингу від Smart-MAIC дозволяє, окрім хмарного збереження даних, здійснювати накопичення моніторингових даних на власний сервер за його наявності. Завдяки цьому з'являється можливість зробити систему альтернативного моніторингу повністю незалежною від чинників, що пов'язані з виробником обладнання чи програмного забезпечення, і організувати власну локальну мережу, для якої буде необхідним лише стабільне Wi-Fi-з'єднання.

Таким чином, розроблена альтернативна система моніторингу забезпечує вищу гнучкість та стійкість до відмов каналів зв'язку порівняно зі стандартним

рішенням, що позитивно впливає на надійність контролю роботи фотоелектричної станції.

3.4 Функціональне порівняння стандартного та альтернативного моніторингу.

Для оцінювання ефективності запропонованого рішення виконано порівняння можливостей стандартної системи моніторингу інвертора та розробленої альтернативної системи моніторингу.

Таблиця 3.2 – Порівняння функціональних можливостей систем моніторингу.

Функція	Стандартний моніторинг інвертора	Альтернативний моніторинг
Контроль генерації електроенергії	Так	Так
Контроль споживання електроенергії	Частково	Так
Контроль обміну електроенергією з мережею	Так	Так
Контроль температури фотоелектричних модулів	Ні	Так
Контроль температури акумуляторної батареї	Так	Так
Контроль температури інвертора	Обмежено	Так
Контроль температури навколишнього середовища	Ні	Так
Контроль вологості повітря	Ні	Так

Продовження таблиці 3.2

Контроль інтенсивності сонячного випромінювання	Ні	Так
Контроль напруги акумуляторної батареї	Так	Так
Можливість підключення додаткових датчиків	Ні	Так
Незалежність від виробника інвертора	Ні	Так
Формування власних інформаційних панелей	Обмежено	Так
Можливість улаштування власного сервера для накопичення даних	Ні	Так

Наведене порівняння показує, що стандартна система моніторингу орієнтована переважно на контроль електричних параметрів інвертора та енергетичних потоків. Водночас розроблена альтернативна система дозволяє контролювати значно ширший перелік параметрів, включаючи температуру окремих елементів обладнання, параметри навколишнього середовища та рівень сонячного випромінювання.

Важливою перевагою альтернативного моніторингу є можливість подальшого розширення функціоналу шляхом підключення додаткових вимірювальних каналів без необхідності заміни основного обладнання.

3.5 Рекомендації щодо практичного застосування розробленої системи.

Розроблена система моніторингу може бути використана під час експлуатації гібридних фотоелектричних станцій приватних домогосподарств, навчальних лабораторій та комерційних об'єктів.

Під час впровадження системи доцільно встановлювати датчики температури безпосередньо на корпусах фотоелектричних модулів, акумуляторної батареї та інвертора. Це дозволить своєчасно виявляти перегрів обладнання та аналізувати вплив температурних режимів на ефективність роботи системи.

Датчик інтенсивності сонячного випромінювання рекомендується встановлювати в площині фотоелектричних модулів. Таке розташування забезпечує найбільш коректне порівняння рівня сонячного випромінювання з фактичною генерацією електроенергії.

Для підвищення достовірності вимірювань напруги акумуляторної батареї доцільно використовувати прецизійні резистори з малим допуском та виконувати періодичну перевірку правильності масштабування вимірювального каналу.

Під час експлуатації системи рекомендується регулярно аналізувати співвідношення між рівнем сонячного випромінювання та фактичною генерацією електроенергії. Значні відхилення між цими параметрами можуть свідчити про забруднення поверхні фотоелектричних модулів, появу затінення або виникнення несправностей окремих елементів станції.

Використання розробленої системи дозволяє отримати більш повну інформацію про режими роботи фотоелектричної станції та підвищити ефективність її експлуатації.

3.6 Висновки до розділу 3.

У третьому розділі виконано аналіз точності вимірювання основних параметрів розробленої системи моніторингу фотоелектричної станції. Проведено оцінювання точності вимірювання напруги акумуляторної батареї, температури, вологості та інтенсивності сонячного випромінювання. Отримані результати показали, що похибки вимірювань знаходяться в допустимих межах

та забезпечують достатню достовірність даних для вирішення задач експлуатаційного моніторингу.

Проаналізовано роботу системи в умовах втрати доступу до хмарного сервісу та встановлено, що запропонована структура моніторингу є менш залежною від зовнішніх інформаційних ресурсів порівняно зі стандартними рішеннями виробників інверторів.

Виконано функціональне порівняння стандартної та альтернативної систем моніторингу. Встановлено, що розроблена система забезпечує контроль більшої кількості параметрів, зокрема температури обладнання, вологості повітря, інтенсивності сонячного випромінювання та напруги акумуляторної батареї.

Запропоновано рекомендації щодо практичного впровадження та експлуатації системи. Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленої альтернативної системи моніторингу для підвищення ефективності контролю роботи гібридних фотоелектричних станцій.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розроблено альтернативну систему моніторингу гібридної фотоелектричної станції, призначену для розширення можливостей контролю її технічного стану та режимів роботи. Актуальність виконаної роботи обумовлена обмеженими функціональними можливостями стандартних систем моніторингу більшості гібридних інверторів, які переважно забезпечують контроль електричних параметрів та не дозволяють отримувати достатній обсяг інформації про умови експлуатації обладнання.

У ході виконання роботи проведено аналіз принципів побудови сучасних систем моніторингу фотоелектричних станцій, розглянуто їх основні функції, переваги та недоліки. Визначено перелік параметрів, контроль яких є доцільним для підвищення інформативності моніторингу та забезпечення більш повного аналізу роботи фотоелектричної станції.

На основі проведеного аналізу запропоновано структуру альтернативної системи моніторингу, до складу якої входять лічильник електричної енергії D103-21, універсальні лічильники імпульсів D105, датчики температури DS18B20, датчик температури та вологості DHT22, датчик інтенсивності сонячного випромінювання RK200-04, а також вузол контролю напруги акумуляторної батареї. Розглянуто принципи взаємодії окремих елементів системи та особливості їх інтеграції у програмний комплекс Smart-MAIC.

У роботі обґрунтовано доцільність контролю додаткових параметрів, зокрема температури фотоелектричних модулів, акумуляторної батареї та інвертора, температури і вологості навколишнього середовища, інтенсивності сонячного випромінювання та напруги акумуляторної батареї. Використання зазначених даних дозволяє більш повно оцінювати умови експлуатації фотоелектричної станції, своєчасно виявляти можливі відхилення у роботі обладнання та аналізувати фактори, що впливають на ефективність генерації електроенергії.

Проведено оцінювання точності вимірювання основних контрольованих параметрів. Отримані результати показали, що застосовані технічні рішення забезпечують достатню точність для задач експлуатаційного моніторингу. Виконаний аналіз роботи системи в умовах втрати доступу до хмарного сервісу підтвердив можливість збереження працездатності вимірювальної частини системи та її меншу залежність від зовнішніх інформаційних ресурсів.

За результатами функціонального порівняння встановлено, що розроблена система моніторингу забезпечує контроль більшої кількості параметрів порівняно зі стандартними рішеннями, що використовуються виробниками гібридних інверторів. При цьому зберігається можливість подальшого розширення функціональних можливостей системи шляхом підключення додаткових вимірювальних каналів.

Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленої альтернативної системи моніторингу для підвищення ефективності контролю роботи гібридних фотоелектричних станцій, своєчасного виявлення несправностей обладнання та покращення якості аналізу режимів їх експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Reneco. Гібридна сонячна станція: принцип роботи та переваги [Електронний ресурс]. URL: <https://reneco.com.ua/stati-ua-solnechnye-paneli/gibridna-sonyachna-stantsiya-printsip-roboti-ta-perevagi/> (дата звернення: 19.05.2026).
2. Sanlarix. Які бренди гібридних інверторів є провідними на ринку? [Електронний ресурс]. URL: <https://sanlarix.com.ua/top-5-gibrydnyh-invertoriv-dlya-sonyachnoyi-elektrostantsiyi-deye-solax-fox-growatt-stromherz/> (дата звернення: 28.05.2026).
3. DeyeInverter. Deye Cloud App User Manual [Електронний ресурс]. URL: <https://pt.deyeinverter.com/deyeinverter/2025/09/03/deyecloudusermanual.pdf> (дата звернення: 23.05.2026).
4. SOLARMAN. SOLARMAN Smart Explained: Intelligent Solar Monitoring Made Simple [Електронний ресурс]. URL: <https://www.solarmanpv.com/solarman-smart-explained-intelligent-solar-monitoring-made-simple.html> (дата звернення: 23.05.2026).
5. SolaXCloud. SolaXCloud V6 APP Operation Manual [Електронний ресурс]. URL: <https://kb.solaxpower.com/solution/detail/2c9fa414901535f80190bfb230b21c6e> (дата звернення: 23.05.2026).
6. DeyeInverter. Manuals & Video Tutorials [Електронний ресурс]. URL: <https://www.deyeinverter.com/download/product-manual/> (дата звернення: 23.05.2026).
7. SOLARMAN. Optimize Your Solar System Performance with PV Monitoring Software [Електронний ресурс]. URL: <https://www.solarmanpv.com/optimize-your-solar-system-performance-with-pv-monitoring-software/> (дата звернення: 23.05.2026).

8. SOLARMAN. Functional Classification of Solar Data Logger [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solarmanpv.com/functional-classification-of-solar-data-logger/> (дата звернения: 23.05.2026).
9. SolaXCloud. Other Device-Related Operations [Электронный ресурс]. URL: <https://doc.solaxcloud.com/en/hc-w/device/otheroperation.html> (дата звернения: 23.05.2026).
10. Neota.cz. SOLAX-CLOUD-HOME [Электронный ресурс]. URL: <https://www.neota.cz/solax-cloud/attachment/solax-cloud-home/> (дата звернения: 23.05.2026).
11. Developer. Wi-Fi Configuration Operation Manual [Электронный ресурс]. URL: <https://developer.deyecloud.com/support/app/wifiConfiguration> (дата звернения: 24.05.2026).
12. Smartechs. How to Set Up Your Deye Inverter on WiFi & Connect to the App [Электронный ресурс]. URL: <https://smartechs.co.za/deye-inverter-wifi-setup-guide/> (дата звернения: 24.05.2026).
13. Solar-Tech-Support. How Solar Monitoring Works [Электронный ресурс]. URL: <https://solar-tech-support.co.uk/guides/how-solar-monitoring-works/> (дата звернения: 30.05.2026).
14. SOLARMAN. What Is a WiFi Stick for Solar Inverter? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solarmanpv.com/what-is-a-wifi-stick-for-solar-inverter.html> (дата звернения: 24.05.2026).
15. Solar Best Practices. Operation & Maintenance Best Practices Guidelines (Version 6.0) [Электронный ресурс]. URL: <https://solarbestpractices.com/guidelines/detail/data-and-monitoring-requirements> (дата звернения: 24.05.2026).
16. Development of a low-cost monitoring device for solar electric (PV) system using internet of things (IoT) [Электронный ресурс] // ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025033791> (дата звернения: 30.05.2026).

17. Smart-MAIC. Система диспетчеризації та моніторингу Smart-MAIC [Електронний ресурс]. URL: <https://smart-maic.com/> (дата звернення: 30.05.2026).
18. Smart-MAIC. Лічильник електричної енергії D103-21 [Електронний ресурс]. URL: https://support.smart-maic.com/uk/knowledge-bases/2/articles/3-energomonitor-smart-maic-d103-trohfaznij?_ga=2.265235018.47866058.1780148994-1058041046.1780148994 (дата звернення: 30.05.2026).
19. Smart-MAIC. Універсальний лічильник імпульсів D105 [Електронний ресурс]. URL: https://support.smart-maic.com/uk/knowledge-bases/2/articles/51-lchilnik-mpulsv-smart-maic-d105?_ga=2.42485344.418819672.1780149076-1356003609.1780149076 (дата звернення: 30.05.2026).
20. Maxim Integrated. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet [Електронний ресурс]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS18B20.pdf> (дата звернення: 30.05.2026).
21. Aosong. DHT22 Temperature and Humidity Sensor Datasheet [Електронний ресурс]. URL: <https://datasheetgo.com/dht22-temperature-humidity-sensor/> (дата звернення: 30.05.2026).
22. RIKA Sensor. RK200-04 Solar Radiation Sensor - Sunshine Duration Sensor [Електронний ресурс]. URL: <https://www.rikasensor.com/rk200-04-solar-radiation-sensor-solar-irradiance-sensor.html> (дата звернення: 30.05.2026).
23. Microl. Блок гальванічної розв'язки БРГ- 11 [Електронний ресурс]. URL: <https://microl.ua/ua/product/blok-galvanicnoi-rozvazki> (дата звернення: 30.05.2026).
24. Smart-MAIC. Схема підключення сонячної електростанції [Електронний ресурс]. URL: <https://support.smart-maic.com/uk/knowledge-bases/2/articles/35-shema-pdklyuchennya-sonyachno-elektrostants> (дата звернення: 31.05.2026).

25. Вікіпедія. Гальванічна розв'язка [Електронний ресурс]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Гальванічна_розв'язка (дата звернення: 31.05.2026).
26. Кочан В., Яскілка В., Кочан О. Подавлення завад загального виду у вимірювальних каналах за допомогою гальванічної розв'язки [Електронний ресурс] // Вісник Тернопільського національного технічного університету. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/2771/2/TNTUB_2013_v70_No2-V_Kochan_V_Yaskilka_O_Kochan-Common_mode_noise_rejection_in_measurement_190.pdf (дата звернення: 31.05.2026).
27. Вікіпедія. Дільник напруги [Електронний ресурс]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Дільник_напруги (дата звернення: 31.05.2026).
28. Вікіпедія. Температурний коефіцієнт опору [Електронний ресурс]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Температурний_коефіцієнт_опору (дата звернення: 31.05.2026).
29. MAST Group. Акумуляторна батарея LiFePO4 51.2V 200 Ah [Електронний ресурс]. URL: https://mast-group.com.ua/catalog/generatori_ta_promislovi_minielektrostantsii/akumulyatori/7981/ (дата звернення: 31.05.2026).
30. MyProject. Калькулятор дільника напруги [Електронний ресурс]. URL: <https://myproject.com.ua/kalkuliator-dilnyka-napruhy.html> (дата звернення: 31.05.2026).
31. Smart-MAIC. Дашборди системи енергомоніторингу університету ІФНТУНГ. Фотоелектрична станція [Електронний ресурс]. URL: <https://dash.smart-maic.com/sharedash8434205658> (дата звернення: 31.05.2026).
32. Smart-MAIC. Дашборди системи енергомоніторингу університету ІФНТУНГ. Метеостанція [Електронний ресурс]. URL: <https://dash.smart-maic.com/sharedash1511935099> (дата звернення: 31.05.2026).
33. E-Lab. Дільник напруги і струму [Електронний ресурс]. URL: <https://e-lab.com.ua/electronics-basics/dilnyk-napruhy-i-strumu.html> (дата звернення: 01.06.2026).

34. Sun-Energy. Гібридний інвертор Deye SUN-6KSG05LP1-EU [Електронний ресурс]. URL: <https://sun-energy.com.ua/image/pdf/sun-3.6-10k-sg05lp1-eu.pdf> (дата звернення: 05.06.2026).
35. Sun-Energy. Акумуляторна батарея Deye SE-G5.1 Pro-B LiFePO4 LV 51.2v 100AH 5.12kWh [Електронний ресурс]. URL: <https://sun-energy.com.ua/image/pdf/jh6TooL9zXlf3hkzWOlCtogJ3XIT4pMZgsmeQGs1.pdf> (дата звернення: 05.06.2026).
36. Hengko. Що таке вихід 4-20 мА? [Електронний ресурс]. URL: <https://www.hengko.com/uk/news/what-is-4-20ma-output/> (дата звернення: 08.06.2026).
37. Microl. ПНС-101 - Перетворювач постійного струму та напруги [Електронний ресурс]. URL: <https://microl.ua/ua/product/peretvoruvac-postijnogo-strumu-ta-naprugi-pns-101> (дата звернення: 08.06.2026).
38. Smart-MAIC. D105: Підключення датчика температури та вологості DHT22 [Електронний ресурс]. URL: <https://support.smart-maic.com/uk/knowledge-bases/2/articles/149-d105-pdklyuchennya-datchika-temperaturi-ta-vologost-dht22> (дата звернення: 08.06.2026).
39. Vada. Радіаційний екран для датчиків DOL 140245 [Електронний ресурс]. URL: <https://vada.ua/radiatsiyniy-ekran-dlya-datchikiv-klimatu/> (дата звернення: 08.06.2026).
40. Mbcontrol. What a Radiation Shield Does and Why Your Sensors Need One [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mbcontrol.com/radiation-shield-for-outdoor-temperature-humidity-sensors/> (дата звернення: 08.06.2026).