

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

Кульчак Андрій Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.2-79
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів
фотоелектричної станції з метою підвищення ефективності її роботи
(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 А. М. Кульчак
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Цих Віталій Сергійович, канд. техн. наук, доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

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

Івано-Франківськ – 2026

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 _____

«____» _____ 20__ року

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

Кульчаку Андрію Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів фотоелектричної станції з метою підвищення ефективності її роботи

керівник роботи Цих Віталій Сергійович, канд. техн. наук, доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “05” травня 2026 року № 204/7

2. Строк подання студентом роботи 12 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи _____

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

1. Проаналізувати теоретичний матеріал для виконання роботи.

2. Розробити план проведення дослідження фотоелектричної станції з інформаційно-вимірювальною системою та зібрати технічні характеристики обладнання.

3. Провести дослідження та вимірювання, зібрати дані вимірювання.

4. Проаналізувати отримані дані вимірювань шляхом проведення розрахунків та побудови графіків залежності.

5. Зробити висновки.

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

1. Структурна схема лабораторної установки дослідження фотоелектричної станції з використанням інформаційно-вимірювальної системи.

2. Функціональна схема лабораторної установки дослідження фотоелектричної станції з використанням інформаційно-вимірювальної системи.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 05 травня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розроблення реферату	24.11.2025	
2	Видача завдання на дипломну роботу	05.05.2026	
3	Виконання розділу 1	05.06.2026	
4	Креслення схем до дипломної роботи	06.06.2026	
5	Складання календарного плану	08.06.2026	
6	Написання вступу	08.06.2026	
7	Виконання розділу 2	10.06.2026	
8	Виконання розділу 3	13.06.2026	
9	Написання висновків	13.06.2026	
10	Оформлення дипломної роботи	13.06.2026	
11	Погодження остаточного варіанту роботи з керівником	13.06.2026	
12	Здача роботи на перевірку на наявність плагіату	13.06.2026	
13	Проходження нормоконтролю роботи	15-18.06.2026	
14	Рецензування дипломної роботи	18-22.06.2026	
15	Захист дипломної роботи	23-24.06.2026	

Студент

(підпис)

Кульчак А. М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Цих В. С.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кульчак А. М. «Розроблення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів фотоелектричної станції з метою підвищення ефективності її роботи». Дипломна робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». Освітньо-професійна програма – 39560 «Інженерія відновлюваної енергетики» – Івано-Франківськ, 2026.

Дипломна робота: 80 сторінок, 37 рисунків, 9 таблиць, 29 використаних джерел, 1 графік залежності, 2 схеми.

В кваліфікаційній роботі виконано дослідження роботи фотоелектричних модулів, проведені в лабораторних умовах. В роботі досліджено деградацію сонячних панелей, впливу температури на ефективність. Для проведення таких досліджень розроблено інформаційно-вимірювальну систему моніторингу за фотоелектричними модулями, щоб відстежувати параметри сонячних модулів в процесі їх експлуатації.

Оскільки розвиток концепцій екології та енергоефективності призводить до розвитку відновлюваних джерел енергії, і серед відновлюваних джерел енергії в Україні найпоширенішою є сонячна енергетика, то потрібно досліджувати підвищення ефективності та збільшення терміну експлуатації сонячних модулів.

Одним із найвпливовіших факторів на деградацію фотоелектричних модулів є вплив температури, що значно знижує ефективність не тільки через деякий термін експлуатації, але й в процесі експлуатації під час нагрівання модулів. Тож потрібно дослідити причину впливу температури та їхні фактори за допомогою розроблення інформаційно-вимірювальної системи, яка би вимірювала параметри роботи станції, щоб зрозуміти, в який спосіб можна підвищувати ефективність та збільшувати термін експлуатації фотоелектричних модулів.

Ключові слова: *фотоелектричний модуль, фотоелектрична станція, ефективність, потужність, температура, параметри, залежність, засоби вимірювання, інформаційно-вимірювальна система, дослідження, вимірювання.*

ABSTRACT

Kulchak A. M. «Development of an information-measuring system for monitoring the parameters of a photovoltaic power station with a purpose of improving its operational efficiency». Bachelor's Thesis, manuscript form. Specialty – 152 «Metrology and Information-Measuring Technology». Educational-Professional Program – 39560 «Renewable Energy Engineering». – Ivano-Frankivsk, 2026.

The Bachelor's Thesis: 80 pages, 37 figures, 9 tables, 29 references, 1 dependency graph, 2 diagrams.

This qualification thesis features research into the performance of photovoltaic modules conducted under laboratory conditions. The study examines the degradation of solar panels and the effect of temperature on their efficiency. To carry out this research, an information-measuring system for monitoring photovoltaic modules was developed to track the parameters of solar modules during their operation.

As the development of concepts relating to ecology and energy efficiency is driving the development of renewable energy sources, and solar energy is the most widespread form of renewable energy in Ukraine, it is necessary to explore ways of improving the efficiency and extending the operating life of solar modules.

One of the most significant factors affecting the degradation of photovoltaic modules is the effect of temperature, which significantly reduces efficiency not only after a certain period of operation but also during operation when the modules heat up. It is therefore necessary to research the causes of temperature effects and their contributing factors by developing an information-measuring system that would monitor the station's operating parameters, in order to understand how to improve the efficiency and extend the operating life of photovoltaic modules.

Keywords: *photovoltaic module, photovoltaic power station, efficiency, power, temperature, parameters, dependency, measuring instruments, information-measuring system, research, measurement.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ.....	9
1.1 Фотоелектричні станції. Сонячні панелі. Будова, принцип роботи та типи сонячних панелей.....	9
1.2 Основні проблеми деградації сонячних панелей в процесі їх експлуатації. Ефективність роботи сонячних панелей при впливі температури.....	12
1.3 Основні параметри роботи фотоелектричних станцій.....	19
1.4 Засоби вимірювань основних параметрів роботи фотоелектричних станцій.....	27
1.5 Основні вимоги до точності вимірювань.....	37
1.6 Постановка завдання.....	41
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ ПЛАНУ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ.....	42
2.1 Розроблення плану проведення досліджень деградації та ефективності роботи фотоелектричних модулів з використанням інформаційно-вимірювальної системи.....	42
2.2 Схема лабораторної установки дослідження фотоелектричної станції з використанням повної інформаційно-вимірювальної системи.....	46
2.3 Збір метрологічних характеристик про обладнання інформаційно-вимірювальної системи.....	48
РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	49

3.1 Опис проведення попереднього дослідження та обладнання, яке використовувалося в лабораторній установці.....	49
3.2 Отримані дані під час попереднього дослідження.....	53
3.3 Аналіз попередніх досліджень ефективності роботи фотоелектричних модулів в залежності від впливу температури за допомогою розрахунків та графіків залежності.....	55
3.4 Метрологічний аналіз точності отриманих даних під час попереднього дослідження.....	59
ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	65
ДОДАТКИ.....	6

ВСТУП

Актуальність теми роботи

На даний час концепція сталого розвитку, екології та енергоефективності набуває все більшого значення, тому розвиваються екологічні та ефективні технології, до яких належать відновлювані джерела енергії, зокрема сонячна енергетика, яка набуває найбільшого розвитку серед відновлюваних джерел енергії. До технологій сонячної енергетики належать фотоелектричні модулі, які розвиваються в плані підвищення ефективності їх роботи. Тобто в світі з'являються нові технології фотоелектричних модулів, які мають все більшу ефективність, до яких також належать двосторонні фотоелектричні модулі. Найбільш впливовим фактором зменшення ефективності роботи фотоелектричних модулів є вплив температури. Для підвищення ефективності фотоелектричних модулів потрібно зменшувати вплив температури, що важливо досліджувати для з'ясування причин впливу температури на ефективність роботи фотоелектричних модулів, щоб в майбутньому запропонувати ефективну технологію фотоелектричних модулів, яка значно зменшить вплив температури та підвищить їх ефективність.

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є з'ясування причин впливу температури на ефективність та деградацію фотоелектричних модулів, отримуючи інформацію з інформаційно-вимірювальної системи, точність якої має оцінюватися, шляхом проведення метрологічних і технічних розрахунків та побудови різних графіків залежності для аналізу впливу температури на ефективність фотоелектричних модулів.

Завданням є проведення теоретичного аналізу дослідження деградації та ефективності роботи фотоелектричних модулів та аналіз засобів вимірювання інформаційно-вимірювальної системи, та завданням є проведення дослідження ефективності роботи фотоелектричної станції в лабораторних умовах за допомогою інформаційно-вимірювальної системи, точність отриманих даних

якої має бути проаналізовано шляхом метрологічних розрахунків, а також має бути проаналізовано отримані дані шляхом розрахунків інших технічних параметрів станції та побудови графіків залежності отриманих як виміряних, так і розрахованих значень параметрів фотоелектричної станції.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес оцінювання параметрів ефективності роботи фотоелектричної станції.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є отримані виміряні дані з інформаційно-вимірювальної системи на фотоелектричній станції при дослідженні впливу температури на ефективність роботи фотоелектричних модулів з оцінюванням точності отриманих даних.

Методи дослідження

В дипломній роботі застосовувалися методи розрахунків технічних параметрів фотоелектричної станції, методи побудови графіків залежності різних параметрів за допомогою програмних середовищ таких, як MS Excel. Графіки залежності були проаналізовані статистичним методом за допомогою побудови апроксимації графіка функції, визначення функції апроксимації, її коефіцієнта детермінації та інших статистичних параметрів, також аналіз був проведений за допомогою розрахунків похибок непрямих вимірювань для оцінювання точності отриманих результатів.

Практичне значення отриманих результатів

Отримані результати мають практичне значення в тому плані, що дозволяють побачити характер графіків залежності та побачити причини впливу температури на зменшення ефективності фотоелектричних модулів, тобто, де відбуваються теплові втрати і на що затрачаються. Результат даного дослідження практично можна буде використати для спрощення подальшого дослідження нової технології фотоелектричних модулів з більшою ефективністю та меншим впливом температури, оскільки вже буде відомо в якому напрямку потрібно розвивати технологію.

Апробація результатів дослідження

Апробація результатів дослідження здійснювалася під час представлення доповіді на конференціях «Приладобудування: стан і перспективи» (м. Київ, 13-14 травня 2025 р.; м. Київ, 12-13 травня 2026 р.), «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку» (м. Київ, 22-24 листопада 2023 р.; м. Київ, 18-20 листопада 2025 р.) на базі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 21-23 травня 2025 р.) на базі Інституту відновлюваної енергетики Національної академії наук (НАН) України, «Цифрові технології в енергетиці та автоматичності» (м. Київ, 5 червня 2026 р.) на базі Національного університету біоресурсів і природокористування України та Інститутів НАН України та «Сучасні проблеми теплоелектроенергетики та захисту довкілля» (м. Полтава, 21-22 вересня 2023 р.) на базі Національного університету «Полтавська Політехніка імені Юрія Кондратюка».

На основі проведеного нами раніше дослідження була опублікована стаття на тему «Аналіз досліджень впливу температури на деградацію та ефективність роботи сонячних панелей» в науковому журналі категорії Б «Енергетика: економіка, технології, екологія» від Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1 Фотоелектричні електростанції. Сонячні панелі. Будова, принцип роботи та типи сонячних панелей.

Фотоелектрична станція складається із сонячних панелей та додаткових пристроїв для подачі струму із синхронізованими значеннями параметрів з мережею та навантаженням, також для захисту від ураження струму і для накопичення (акумулявання) енергії із автоматизованою системою керування заряджанням пристроїв накопичення енергії. Загальний вигляд фотоелектричної станції зображений на рисунку 1.1.

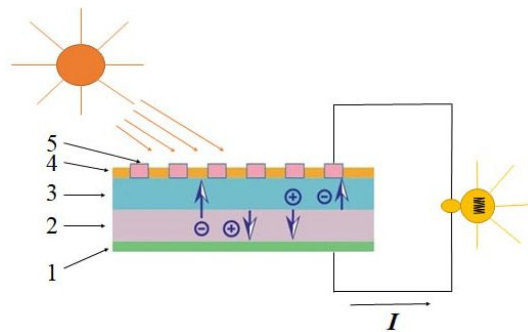


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд фотоелектричної станції

Сонячна панель (сонячна батарея) – це з'єднання фотоелектричних модулів, яке використовується для виробництва електричної енергії, шляхом поглинання більшої кількості світлової енергії Сонця. Фотоелектричний модуль – з'єднання фотоелементів, а, в свою чергу, фотоелемент – це напівпровідниковий пристрій, в якому світлова енергія Сонця перетворюється в електричну за допомогою фотоелектричного ефекту.

Фотоелектричний ефект (фотоефект) – явище взаємодії електромагнітного випромінювання з матеріалом, в результаті чого частинки електромагнітного випромінювання (фотони) «вибивають» електрони з поверхні матеріалу, оскільки при взаємодії електромагнітного випромінювання з матеріалом фотони передають свою енергію електронам, які, в свою чергу, переходять на новий енергетичний рівень, через що з появою енергії вони «вивільняються» з матеріалу.

Будова та принцип роботи фотоелектричного елемента зображені на рисунку 1.2.



*1 – внутрішній електрод, 2 – напівпровідник р-типу, 3 – напівпровідник n-типу,
4 – антиблік-покриття, 5 – зовнішній електрод, I – струм*

Рисунок 1.2 – Будова та принцип роботи фотоелектричного елемента

Для збільшення потужності сонячні панелі з'єднують послідовно та паралельно. Оскільки послідовне з'єднання забезпечить збільшення напруги, а паралельне – збільшення струму, що в результаті дасть збільшення потужності на виході сонячних панелей.

Якщо на одній сонячній панелі виникне тінь, то цілий ряд панелей не буде працювати, що призведе до суттєвого зменшення потужності, тобто одна частина панелей буде працювати і видавати потужність, а інша частина панелей не буде працювати. Цю проблему можна вирішити використанням на кожному фотоелектричному модулі байпас-діодів, завдяки яким тільки один затінений модуль не буде працювати, а інші модулі в ряду зможуть працювати.

В загальному сонячні панелі бувають двох типів: кристалічні, які поділяються на моно- та полікристалічні, та тонкоплівкові. Кристалічні сонячні панелі виготовляються з кремнію, який спочатку розплавляють. Сплав кремнію кристалізується у злитки з чистого кремнію. Тонкі пластини кремнію вирізаються з монокристалу кремнію (для виготовлення монокристалічних фотоелементів) або зі злитків кристалів кремнію (для виготовлення полікристалічних фотоелементів). Ефективність кристалічних фотоелементів може становити від 15 до 24%. Всі три типи сонячних панелей зображено на рисунку 1.3.

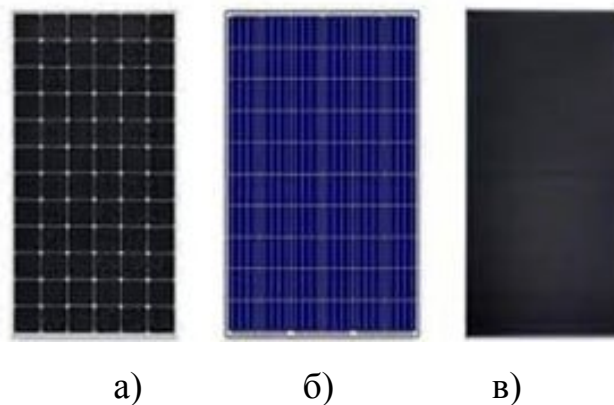


Рисунок 1.3 – Типи сонячних панелей: а) монокристалічні, б) полікристалічні, в) тонкоплівкові

Монокристалічний кремній – це тип кремнію, виготовлений із монокристалічної структури. Монокремній має однорідну форму, оскільки вся структура вирощена з одного кристала. Тому вони мають більшу щільність поглинання сонячної енергії. Це призводить до високої ефективності перетворення енергії монокристалічних сонячних панелей – від 20 до 24%. Монокристалічні панелі мають високу вихідну потужність, займають менше місця і служать найдовше. Ще одна перевага, яка полягає в тому, що вони дещо менше зазнають впливу високих температур у порівнянні з полікристалічними панелями.

Полікристалічний кремній – це тип кремнію, виготовлений зі злитків кристалів кремнію. Через злитки кристалів кремнію виникають межі між ними. Це в свою чергу спричиняє обмеження проходження електронів у фотоелементах. Це призводить до зменшення ефективності перетворення енергії полікристалічних панелей, яка складає від 15 до 20%.

Тонкоплівковий фотоелектричний елемент – тип фотоелемента, який виготовляють шляхом друку або розпилення тонкого напівпровідникового шару матеріалу на скляну, металеву або пластикову фольгу. Товщина кожного фотоелемента значно менша за розрізаний кристалічний елемент. Ефективність перетворення енергії цих сонячних панелей складає від 7 до 12%. Тонкоплівкові сонячні панелі можуть виготовлятися з таких матеріалів: телурид кадмію (CdTe), аморфний кремній, диселенід міді-індію (CIS), селенід міді-індію-галію (CIGS).

Монокристалічні і тонкоплівкові сонячні панелі використовуються для домашніх (приватних) електростанцій. Монокристалічні і полікристалічні сонячні панелі використовуються в основному для промислових підприємств, а також для промислових сонячних електростанцій, які розраховані для транспортування електроенергії в загальну енергомережу для живлення населення.

Детальний опис сонячних панелей, будови, принципу роботи та їхніх типів також наведено в статті [1], де раніше нами це було описано.

1.2 Основні проблеми деградації сонячних панелей в процесі їх експлуатації. Ефективність роботи сонячних панелей при впливі температури

Однією з основних проблем фотоелектричних модулів є деградація сонячних панелей.

Деградація сонячних панелей – зменшення вихідної потужності сонячних панелей з часом в процесі експлуатації, яке спричинене виникненням різних

фізичних процесів та яке призводить до зниження ефективності і можливого виходу з ладу.

Швидкість деградації сонячних панелей залежить від будови модулів:

1. монокристалічні модулі зазвичай працюють 30 років і більше;
2. полікристалічні служать 20 і більше років;
3. аморфні від 7 до 20 років – все залежить від року виробництва і застосування нових тонкоплівкових технологій.

В середньому фотоелектричні модулі втрачають ефективність зі швидкістю 1% щороку. Це підтверджують виробники – зазвичай вони гарантують 90% продуктивності до перших десяти років і 80% до 25 або 30 років роботи. Однак нові дослідження підтверджують, що монокристалічні сонячні панелі, виготовлені після 2000 року, можуть деградувати зі швидкістю всього 0,4%. Тонкоплівкові сонячні батареї втрачають в середньому 10-40% ефективності в перші кілька років.

Виробники визначають закінчення терміну служби сонячних панелей – коли їх обсяг виробництва падає нижче 80%. Але це не означає, що вони припинять працювати. Сонячні панелі будуть продовжувати виробляти енергію, але з набагато нижчою ефективністю, тому на виході будуть мати набагато нижчу потужність.

В залежності від причин пошкодження деградація поділяється на такі види:

1. Механічна деградація;
2. Деградація, викликана впливом навколишнього середовища;
3. Електрична деградація;
4. Деградація, пов'язана з будовою сонячних панелей.

Механічна деградація – деградація, викликана механічним впливом, тобто механічними пошкодженнями. Механічна деградація може виникнути й внаслідок людського фактору. Наслідками механічної деградації можуть бути:

2. Мікротріщини;
3. Розшарування.

Деякі типи мікротріщин можуть зростати в залежності від їхньої форми та розташування. Це зростання мікротріщин може відбутися внаслідок транспортування, неправильного встановлення, поводження, вібрації, надмірного навантаження, навантаження на навколишнє середовище, неправильного очищення, а також під час експлуатації та етапу обслуговування. Тріщини описують як справжню проблему, яка виникла з фотоелектричними панелями протягом усього терміну служби. Нові сонячні панелі можуть мати мікротріщини, але вони майже не впливають на термін експлуатації панелей, тому впливом тріщин можна знехтувати. Проблема виникає, тобто мікротріщини перетворюються в тріщини, що значно впливає на термін експлуатації, тоді, коли сонячні панелі перебувають в декількох екстремальних умовах, наприклад, погодні умови, механічне очищення сонячних панелей, тобто людський фактор, тощо. Вплив цих тріщин залежить від їх орієнтації та форми, яка створюється типом причини. Приклад мікротріщин, які переросли в тріщини, зображено на рисунку 1.5, (б).

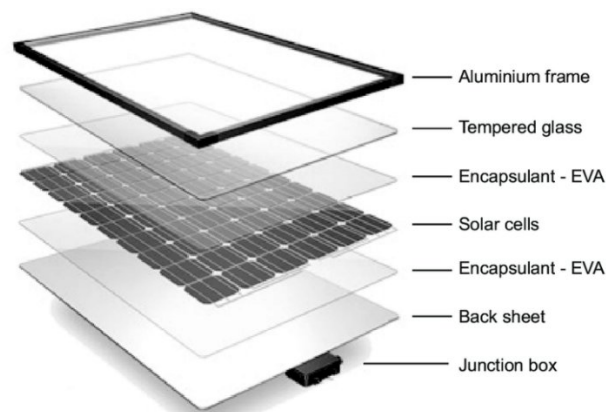


Рисунок 1.4 – Склад сонячної панелі [2]

Основними видами погіршення якості інкапсулянтів є зміна кольору та розшарування. Розшарування відбувається через втрату міжфазних зв'язків, що призводить до появи проміжків між склом–EVA, EVA–фотоелементом, фотоелементом–EVA та EVA–задньою стороною фотоелектричного модуля. Етиленвінілацетат (EVA) – інкапсулянт, який використовується в складі сонячної панелі з метою герметизації панелі, як це показано на рисунку 1.4.

Детальніше склад сонячної панелі описано в підручнику [2]. Крім того, розшарування фотоелектричного модуля вважається одним із основних видів виходу з ладу модуля. За даними SolarWorld (німецька компанія), збій розшарування спостерігався у понад 90% відновлених модулів. Однак немає підстав вважати, що це пов'язано з виробниками. Це явище в основному спостерігається і реєструється в екстремальних погодних умовах, особливо в умовах вологого тепла (при температурі повітря 80 °C та відносній вологості повітря 80%). Зменшення продуктивності модуля через індукцію (вплив) проникнення вологи, що призводить до погіршення вихідної потужності, і збільшення послідовного опору, що є наслідками розшарування. Приклад розшарування наведений на рисунку 1.5, (а).

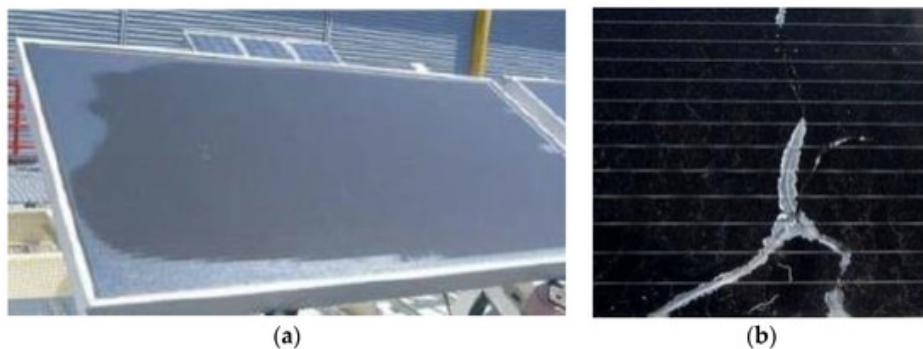


Рисунок 1.5 – Пошкоджені сонячні панелі: (а) розшарування; (б) тріщини

Сонячні модулі схильні до впливу зовнішніх факторів навколишнього середовища, що призводить до природного зносу сонячних модулів. Такі процеси зносу та старіння відбуваються через проходження хімічних реакцій в напівпровідниках, що викликають кристалічні затвердіння. Також старіння відбувається через забруднення фотомодулів, впливу кліматичних умов, погоди та ультрафіолету від сонячного світла, що призводить до підвищення опору сонячних модулів, в результаті чого виникає нагрівання модулів, через що можуть виникати наслідки деградації, описані вище, що пришвидшує старіння сонячних модулів. Зазвичай даний тип деградації незворотній, і з економічної та

технічної точки зору сенсу в його усуненні немає, й усунення даного типу деградації складно буде реалізувати.

До впливу забруднення на деградацію сонячних модулів відноситься вплив снігу, бруду, пилу та інших речовин, які покривають поверхню сонячного модуля. Інтенсивність забруднення поверхні модуля залежить від місця його встановлення та навколишнього середовища. Накопичений пил з часом посилює забруднюючий ефект. Фактично, забруднення впливає на зростання перехідного опору в сонячних панелях, що призводить до втрат потужності на нагрівання сонячних панелей, в результаті чого потужність на виході зменшується. Загальна потужність, яка генерується сонячними панелями, залежить від кількості накопиченого пилу на поверхні панелей. У 2014 році були проведені дослідження по визначенню закономірності розподілу пилу в різних частинах світу, в результаті яких встановлено, що Близький Схід та Північна Африка є територіями з найбільшим накопиченням пилу у світі.

Електрична деградація – деградація, викликана проходженням електричних процесів, електричного струму в сонячних модулях, які призводять до зменшення вихідної потужності модулів. До електричної деградації належить потенційна індукована деградація (PID), яка виникає внаслідок виникнення струмів витоку із сонячних панелей, що може загрожувати життю людей, і що призводить до зменшення вихідної потужності панелей. Про PID-деградацію детальніше буде описано нижче. Крім PID-деградації, до електричної деградації належить ще електроміграція.

Але для роз'яснення електроміграції потрібно розуміти деякі процеси виготовлення кристалічних кремнієвих фотоелементів. Хімічне травлення – процес зрівнювання поверхні монокристалічних пластин, яких готують для виготовлення фотоелементів, шляхом видалення кількох мікрометрів верхнього шару поверхні пластини для відшліфування пластини, щоб фотоелемент мав ідеально рівну поверхню. Текстурування – процес створення хаотично розташованих мікропірамід на поверхні пластини для зменшення відбиття світла від поверхні пластини. Плазмохімічне травлення – процес фізичного видалення

легованої речовини, яку легують у кремнієву пластину для створення напівпровідників двох типів, з непорібних місць у пластині, тому що речовина має бути легована тільки на поверхні пластини, але під час легування речовина розтікається по всій площині пластини, не тільки на її поверхні. Металізація – створення контактів в струмознімній шині на фронтальній стороні та в металевому контакті на тильній стороні елемента, що дає можливість знімати вироблений струм та підключати фотоелементи до навантаження.

Технологія виготовлення сонячних панелей детальніше була досліджена в навчальному посібнику [3] та авторефераті дисертації [4].

Електроміграція (ЕМ) має величезний вплив на металізацію та з'єднання фотоелектричних модулів. Високий струм, що проходить через фотоелектричний модуль, може спричинити перепад напруги та потенційно призвести до ЕМ. Збої внаслідок цього явища, які впливають на зростання ямок травлення на межі розділу метал/напівпровідник, можуть бути різними, а утворення горбів і виступів, які викликають замикання (шунтування), і утворення пустот у провіднику зрештою призводять до відкритого розриву. І переднє, і заднє з'єднання перетинають стінку фотоелемента в межах невеликої зони дефекту шунта, знижуючи якість сонячної батареї. На рисунку 1.6 зображено результати випробування надійності металізації Cu/Ni/Si сонячних елементів при температурі 235 °C, через що мідь починає мігрувати (дифундувати) в Ni/Si, в результаті чого на сонячних панелях утворюються масивні порожнечі.

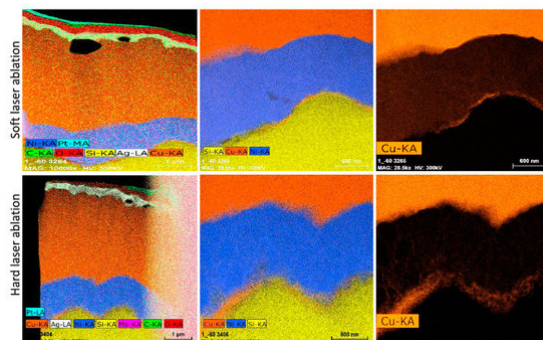


Рисунок 1.6 – Cu/Ni/Si стек ТЕМ-зображення, отримані після прискореного старіння при 235 °C

Деградація, пов'язана з будовою сонячних панелей залежить від:

1. технології виробництва;
2. застосовуваних при виготовленні матеріалів;
3. методу пайки сонячних елементів;
4. якості EVA плівки, розташованої між скляною плитою і елементами;
5. хорошої герметизації і якості нижньої захисної плівки.

В загальному, деградація сонячних панелей поділяється на три основні види:

2. Світлова індукована деградація (LID – Light induced degradation);
3. Потенційна індукована деградація (PID – Potential induced degradation);
4. Температурна індукована деградація (TID – Temperature induced degradation).

Світлова індукована деградація (LID) – деградація сонячних панелей, яка виникає, коли сонячна панель вперше піддається впливу сонячної інсоляції, в результаті її фотопровідність зменшується. Це вважається етапом «налаштування» панелі.

Потенційна індукована деградація (PID) – деградація сонячних панелей, яка виникає, коли через різні компоненти в системі протікає струм, який може нести небезпеку для життя людей. Цей струм виникає через те, що різні компоненти знаходяться під різною напругою. Наприклад, при різниці потенціалів між сонячними елементами і конструкцією (монтажною рамою, алюмінієвим або сталевим каркасом). Ця різниця потенціалів називається напругою витоку, а струм, який виникає внаслідок напруги витоку, називається струмом витоку. PID не завжди відбувається, але якщо це трапиться, продуктивність панелі може знизитися аж до 30%. Схильні до неї всі типи панелей. У деяких випадках потенційна деградація може бути оборотною, але цей процес завжди є досить непростою технічною проблемою, яка потребує негайного вирішення.

Температурна індукована деградація (TID) – деградація сонячних панелей, яка викликана підвищенням температури навколишнього середовища, і відповідно, підвищенням температури поверхні сонячних панелей, що

призводить до значного зменшення вихідної потужності сонячних панелей з часом. Підвищення температури навколишнього середовища призводить до ще більшого підвищення температури сонячних панелей, оскільки сонячні панелі складаються переважно з кремнію, а кремній – металоїд, тобто він і метал, і неметал одночасно, а значить, він є теплопровідним. Влітку в спекотну погоду температура поверхні сонячних панелей може підвищуватися до 50–60 °С. Така висока температура поверхні сонячних панелей призводить до зниження ефективності сонячних панелей. Тому підвищення температури поверхні сонячних панелей також впливає на прискорення їх деградації.

Температура поверхні сонячних панелей призводить не тільки до прискорення деградації, тобто до зменшення загальної ефективності панелей з часом, але й до зменшення ефективності сонячних панелей на момент нагрівання сонячних панелей до високої температури. Тобто вплив температури на ефективність сонячних панелей на момент їх нагрівання є також досить суттєвим, що в подальшому впливає на деградацію та зменшення терміну експлуатації сонячних панелей. Такий вплив температури на зменшення ефективності можна пояснити тим, що енергія нагрітих сонячних панелей витрачається на нагрівання повітря поблизу панелей, тому через високу температуру також зростає перехідний опір сонячних панелей, що призводить до втрат потужності та зменшення ефективності сонячних панелей загалом.

Різні види деградації сонячних панелей та вплив температури на їх ефективність роботи детально описано та досліджено нами раніше в статті [1].

1.3 Основні параметри роботи фотоелектричних станцій

Параметри роботи фотоелектричних станцій – ті параметри, які характеризують роботу фотоелектричних станцій. Такі параметри поділяються на вихідні та вхідні параметри.

Вихідні параметри – це ті, які отримуємо внаслідок роботи фотоелектричних модулів. До вихідних параметрів належать струм короткого

замикання, напруга холостого ходу, номінальний струм в точці максимальної потужності, номінальна напруга в точці максимальної потужності, максимальна (пікова) потужність, миттєвий струм, миттєва напруга, миттєва потужність, максимальна напруга системи, максимальний струм запобіжника системи, коефіцієнт заповнення, ефективність модуля, питомий вихід електроенергії, вироблена електрична енергія (генерація) та якість електричної енергії (коефіцієнт гармонік та коефіцієнт потужності).

Вхідні параметри – це ті, які впливають на роботу фотоелектричних модулів. До вхідних параметрів належать інтенсивність світла, освітленість, навколишнє зтінення (площа затінення панелей), орієнтація, кут нахилу модулів, повітряна маса (AM), температура повітря, температура поверхні фотомодулів, номінальна температура роботи фотоелементів (NOCT), номінальна температура ефективної роботи фотомодулів, діапазон робочої температури, температурні коефіцієнти по максимальній потужності, напрузі холостого ходу та струму короткого замикання, вологість повітря, швидкість вітру, також основним параметром погоди є індекс ясності, струм витоку та напруга витоку між сонячною панеллю та монтажною конструкцією (опорною рамою або заземленим каркасом). Також якість роботи фотоелектричних модулів та вплив на їх деградацію залежить від параметрів, отриманих в результаті виробництва, транспортування та експлуатації сонячних модулів: якість кремнію, герметизація, товщина опорної конструкції (рами), геометричні та вагові параметри, матеріали, з яких виготовлені як сонячні панелі, так і опорна конструкція (рама), міцність сонячних панелей, міцність опорної конструкції, навантаження фотомодулів, якість скла. До геометричних та вагових параметрів належать габаритні тривимірні розміри (висота, ширина, товщина), кількість фотоелементів у модулі та маса. Також на деградацію сонячних панелей впливає наявність дефектів, які згадувалися вище, подряпини, гарячі точки, мікротріщини, тріщини, розшарування, електроміграція. Ці дефекти виникають внаслідок впливу різних фізичних (механічних (людських), електричних, навколишнього середовища та ін.) факторів, які згадувалися раніше. На

деградацію сонячних панелей впливають ще хімічні параметри такі, як зменшення товщини EVA-плівки, втрата її властивостей, кристалічні затвердіння сонячних панелей, перетікання (легування) хімічних речовин в фотоелектричних модулях (електроміграція).

Струм короткого замикання – максимально можливий струм, який виникає внаслідок короткого замикання в сонячних панелях, тобто при зменшенні їхнього опору близько до нуля замиканням провідниками сонячних панелей. Струм короткого замикання, як і будь-який струм, вимірюється в А.

Напруга холостого ходу – максимально можлива напруга, яка виникає в режимі холостого ходу, тобто при розімкнутому колі сонячних панелей без підключення навантаження в коло, у випадку кола без навантаження опір в колі вважається нескінченним. Напруга холостого ходу вимірюється, як і будь-яка напруга, у В або кВ.

Максимальна (пікова) потужність – потужність сонячних панелей, яка є на виході максимальною завдяки підбору опору сонячних панелей так, щоб досягти точки максимальної потужності. Максимальна потужність визначається добутком напруги та струму в точці максимальної потужності.

Миттєва потужність – потужність сонячних панелей в даний момент часу і змінюється в режимі реального часу. Тому миттєва потужність P_m відповідно є добутком миттєвої напруги та миттєвого струму: $P_m = U_m * I_m$. Будь-яка потужність (миттєва, максимальна та ін.) вимірюється у Вт або кВт.

Максимальна напруга системи – максимальна напруга, яка можлива на виході системи сонячних модулів при послідовному з'єднанні в стрінг для підключення до інвертора.

Максимальний струм запобіжника системи – максимальний струм короткого замикання, який витримує запобіжник на стороні постійного струму від сонячних панелей та який є більшим, ніж струм короткого замикання сонячних панелей, щоб запобіжник зміг розірвати коло від сонячних панелей при виникненні короткого замикання в панелях.

Ефективність сонячних модулів – частка енергії сонячного світла, яке падає на поверхню сонячних модулів (на вході) та перетворюється в корисну електричну енергію (на виході). Ефективність є безрозмірною величиною, тобто вона вимірюється або в одиницях, або у відсотках (%). Ефективність (e) сонячних модулів розраховується за формулою 1.1.

$$e = \frac{E_{\text{ел}}}{E_{\text{св}}} = \frac{P_{\text{ел}}}{P_{\text{св}}} = \frac{P/S}{E} = \frac{P}{E*S} = \frac{U*I}{E*S} = \frac{U*I}{E*I*w} \quad (1.1)$$

де $P_{\text{ел}}$ і $P_{\text{св}}$ – електрична вихідна потужність і потужність падаючого світла відповідно, які знаходяться відношенням електричної енергії $E_{\text{ел}}$ і енергії падаючого світла $E_{\text{св}}$ до часу відповідно, U , I – напруга і струм на виході модулів відповідно, E – інтенсивність світла, $S = l*w$ – площа сонячного модуля, яка визначається добутком довжини l на ширину w .

Коефіцієнт заповнення – відношення максимальної потужності сонячних панелей до добутку напруги холостого ходу та струму короткого замикання. Коефіцієнт заповнення є також безрозмірною величиною і вимірюється або в одиницях, або у %. Коефіцієнт заповнення (FF) визначається за формулою 1.2.

$$FF = \frac{P_{\text{max}}}{U_{\text{хх}}*I_{\text{кз}}} = \frac{U_{\text{MPP}}*I_{\text{MPP}}}{U_{\text{хх}}*I_{\text{кз}}} \quad (1.2)$$

де P_{max} – максимальна потужність, U_{MPP} і I_{MPP} – напруга і струм в точці максимальної потужності, $U_{\text{хх}}$ – напруга холостого ходу, $I_{\text{кз}}$ – струм короткого замикання.

Вироблена електрична енергія ($E_{\text{ел}}$) визначається добутком сумарної миттєвої потужності на час, протягом якого змінювалася потужність, і визначається за формулою 1.3. Вироблена електрична енергія вимірюється в кДж або зазвичай в кВт*год.

$$E_{\text{ел}} = \sum P_m * t \quad (1.3)$$

де $\sum P_m$ – сума миттєвих потужностей, які змінювалися за час t .

Питомий вихід електроенергії – вироблена електрична енергія сонячними панелями за одиницю їх пікової (максимальної) потужності. Питомий вихід електроенергії вимірюється у кВт*год/кВтп. кВтп – одиниця вимірювання пікової потужності сонячних панелей. Питомий вихід електроенергії (SY) визначається за формулою 1.4.

$$SY = \frac{E_{\text{ел}}}{P_{\text{max}}} = \frac{E_{\text{ел}}}{P_p} \quad (1.4)$$

де P_p – пікова (максимальна) потужність сонячних панелей.

Наведені параметри та відповідні формули були досліджені в тезах [5], [6].

Якість електричної енергії – форма графіків залежності всіх електричних параметрів, від яких залежить забезпечення якості подачі безперебійної та безпечної електроенергії. Основними кількісними параметрами, які характеризують якість електроенергії, є коефіцієнт гармонік та коефіцієнт потужності.

Коефіцієнт гармонік – коефіцієнт, який характеризує відхилення форми графіка залежності напруги від часу від ідеально чистої синусоїди. Коефіцієнт гармонік (THD) є безрозмірною величиною і зазвичай вимірюється у %. Чим «чистіша» синусоїда, тим значення коефіцієнта гармонік буде ближчою до 0 %, чим гірша форма синусоїди, тим більшим буде значення коефіцієнта гармонік і ближчою до 100 %.

Коефіцієнт потужності – коефіцієнт, який характеризує зсув фаз графіків напруги та струму. Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) є також безрозмірною величиною і зазвичай вимірюється в одиницях. Якщо коефіцієнт потужності дорівнює 1, то напруга і струм у фазах збігаються. Чим менший коефіцієнт і чим дальший від 1, то тим більшим є зсув фаз між напругою і струмом. Коли $\cos \varphi$ дорівнює 0, то фази напруги і струму будуть зсунуті на кут 90°.

Інтенсивність світла – енергія світлового випромінювання, яка проходить за одиницю часу та падає на одиницю площі поверхні. Інтенсивність світла вимірюється у Вт/м². Інтенсивність світла (E) визначається за формулою 1.5.

Освітленість (E_v) – світловий потік, який падає на одиницю площі поверхні. Світловий потік (Φ) – енергія світлового потоку, який проходить за одиницю часу, в залежності від сприйняття світла оком людини. Сила світла (I_v) – світловий потік, який проходить під кутом одиниці тілесного кута, тобто під кутом 1 стерadian. Освітленість та сила світла визначається за формулами 1.6 та 1.7.

$$E = \frac{E_{\text{св}}}{t \cdot S} \quad (1.5)$$

$$E_v = \frac{\Phi}{S} \quad (1.6)$$

$$I_v = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (1.7)$$

Опис фотометричних параметрів з відповідними формулами наведений в статті [7].

Номінальна робоча температура фотоелементів (NOCT – Nominal operating cell temperature) – температура поверхні сонячних модулів за умов, які наближені до реальності: інтенсивність світла $E = 800$ Вт/м², температура навколишнього середовища $t = 20$ °C, швидкість вітру $v = 1$ м/с та повітряна маса AM1,5. Зазвичай номінальна робоча температура фотоелементів (NOCT) становить 45 °C. Але цей параметр може бути різним для різних фотомодулів. За умов номінальної робочої температури фотоелементів (NOCT) зазвичай проводять лабораторне вимірювання технічних (вихідних) характеристик фотоелектричного модуля, які були описані вище.

Повітряна маса (AM) – коефіцієнт, який характеризує, який шлях та під яким кутом проходить сонячне випромінювання крізь атмосферу до землі. Наприклад, при AM1,0 сонячне випромінювання проходить під прямим кутом до поверхні землі, тобто коли Сонце знаходиться в zenіті. При AM1,5 кут падіння

променів (кут між променями та перпендикуляром (нормаллю) до поверхні землі) становить 48,2 °С.

Стандартні тестові умови (STC – Standard test conditions) – це ідеальні умови, за яких проводиться лабораторне вимірювання технічних характеристик фотоелектричного модуля тих самих, що й за умов NOCT. Але технічні характеристики фотомодуля, отриманих за ідеальних умов STC, є основними і використовуються для проведення розрахунків щодо правильного вибору фотоелектричних модулів для встановлення сонячної електростанції. Умовами STC для проведення вимірювання характеристик модуля є: інтенсивність світла 1000 Вт/м², температура поверхні модулів 25 °С, маса повітря AM1,5. Всі технічні характеристики, які стосуються як усіх вихідних параметрів, так і деяких вхідних параметрів, для яких проводили вимірювання, описані в технічному паспорті (datasheet) на кожен модуль фотоелектричного модуля. Умови NOCT також прописуються в технічному паспорті.

Номінальна температура ефективної роботи фотомодулів – ідеальна температура поверхні фотомодулів, при якій фотомодулі працюють найефективніше без втрат потужності через вплив температури. Ця температура відрізняється від температури NOCT, тобто 45 °С, застосовується для умов STC і становить 25 °С.

Діапазон робочої температури – діапазон температурних умов, при яких сонячні панелі можуть ефективно працювати. Якщо сонячні панелі будуть знаходитися в умовах температур, які виходять за межі цього діапазону, то панелі працювати не будуть, тобто не зможуть генерувати електроенергію, а якщо тривалий час панелі будуть перебувати в таких умовах, то навіть вийдуть з ладу. Діапазон робочих температур прописується в кожному технічному паспорті на фотоелектричні модулі.

Основні параметри роботи фотоелектричних модулів описані в технічних паспортах на фотоелектричні модулі [8], [9].

Температурні коефіцієнти – коефіцієнти, які вказують на втрату деяких параметрів сонячних модулів (максимальної потужності, напруги холостого

ходу та струму короткого замикання), що залежать від впливу температури. Фізично, температурний коефіцієнт – зменшення значень параметрів (максимальна потужність, напруга холостого ходу та струм короткого замикання) сонячних модулів на одиницю температури нагрівання/охолодження поверхні модулів. Температурні коефіцієнти є безрозмірними величинами і зазвичай вимірюються у відсотках, тому для правильних розрахунків параметрів сонячних модулів потрібно коефіцієнти з відсотків переводити в одиниці. Існують деякі формули, за якими можна розрахувати ці три параметри сонячних модулів при певній температурі їх поверхні. Вихідна потужність фотоелектричного модуля в залежності від температури (P_t) розраховується за формулою 1.8.

$$P_t = P_{max} * \frac{E}{E_{STC}} * (1 + \alpha_{Pt} * (T_{PV} - T_{STC})) \quad (1.8)$$

де E_{STC} – інтенсивність світла за умов STC, $E_{STC} = 1000 \text{ Вт/м}^2$, α_{Pt} – температурний коефіцієнт по максимальній потужності, T_{PV} – температура поверхні сонячних панелей, яка фіксується тоді, коли вимірюється інтенсивність світла E , T_{STC} – температура поверхні фотомодулів за умов STC, $T_{STC} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Напруга холостого ходу в залежності від температури (U_t) та струм короткого замикання в залежності від температури (I_t) розраховуються за формулами 1.9 та 1.10.

$$U_t = U_{xx} - |k_U| * (T_{PV} - T_{STC}) * U_{xx} \quad (1.9)$$

$$I_t = I_{кз} + |k_I| * (T_{PV} - T_{STC}) * I_{кз} \quad (1.10)$$

де k_U – температурний коефіцієнт по напрузі холостого ходу, k_I – температурний коефіцієнт по струму короткого замикання.

Значення температурних коефіцієнтів є унікальними та прописані також в технічному паспорті на кожен модель фотоелектричних модулів, як це показано в технічних паспортах [8], [9].

Формули знаходження потужності, напруги холостого ходу, струму короткого замикання через температурні коефіцієнти описані в посібнику [10].

Інші вхідні параметри описані в попередніх пунктах щодо особливостей роботи сонячних модулів в процесі деградації під час їх експлуатації, тому немає сенсу ще раз ці параметри описувати.

1.4 Засоби вимірювань основних параметрів роботи фотоелектричних станцій

Засіб вимірювальної техніки – технічний засіб, який використовується під час вимірювань та має нормовані метрологічні характеристики.

Засіб вимірювань – засіб вимірювальної техніки, який реалізує процедуру вимірювань, має нормовані метрологічні характеристики, котрий відтворює та (або) зберігає одиницю фізичної величини, розмір якої приймається сталим в межах визначеної похибки протягом визначеного інтервалу часу.

Вимірювальний пристрій – засіб вимірювальної техніки, у якому виконується лише одна із складових частин процедури вимірювання (вимірювана операція). Наприклад: перетворення, масштабування, порівняння, обчислення сигналу чи інші операції із сигналом.

Загалом технічні характеристики поділяються на нормовані та дійсні, які є реальними для засобів вимірювання і мають відповідати нормованим.

До дійсних характеристик належить: похибка вимірювань, чутливість, ціна поділки шкали, діапазон вимірювань, варіація показів, розмах показів.

До нормованих метрологічних характеристик засобів вимірювань належить: діапазон вимірювань, клас точності (похибка вимірювань), чутливість та поріг чутливості, стала та ціна поділки шкали – для аналогових вимірювальних приладів, кількість розрядів і значення одиниці найменшого розряду – для цифрових вимірювальних приладів. Нормовані метрологічні характеристики відображають реальні властивості засобу вимірювання і перелік цих характеристик повинен бути достатнім для оцінювання результатів вимірювань

та встановлення параметрів якості виконаних вимірювань. Одними із основних параметрів якості виконаних вимірювань є похибка та клас точності.

Основними засобами вимірювання вищезгаданих параметрів з попереднього пункту є: цифровий мультиметр, струмовимірювальні кліщі, цифровий тестер фотоелектричних модулів, ампервольтметр, ватметр, омметр, розумний лічильник електричної енергії, аналізатор якості електроенергії, термометр, пірометр, піранометр, вимірювач інтенсивності світла для фотоелектричних модулів, люксметр, психрометр, анемометр, термоанемометр, лінійка (рулетка або лазерний далекомір), засоби вимірювання, вбудовані в обладнання сонячної електростанції, які вимірюють параметри генерації станції.

Цифровий мультиметр – електронний засіб вимірювання багатьох електричних параметрів таких, як напруга, сила постійного струму, опір в електричному колі, напруга, сила змінного струму, частота струму, ємність конденсатора в різних діапазонах вимірювання. Загальний вигляд цифрового мультиметра зображений на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 – Загальний вигляд цифрового мультиметра

Струмовимірювальні кліщі – засіб вимірювання електричних параметрів майже всіх тих самих, що й в мультиметрі. Струмовимірювальні кліщі охоплюють кліщами провідник, в якому тече струм, і прилад показує виміряні значення електричних параметрів. Зазвичай найбільше мультиметри використовуються для вимірювання напруги, а струмовимірювальні кліщі – для вимірювання струму, оскільки прилади найточніше вимірюють ці параметри. Для вимірювання напруги і струму часто можуть одночасно використовувати ці два прилади для отримання точніших значень вимірювальних параметрів. На рисунку 1.8 зображений загальний вигляд струмовимірювальних кліщів.



Рисунок 1.8 – Загальний вигляд струмовимірювальних кліщів

Цифровий тестер фотоелектричного модуля – засіб вимірювання електричних параметрів на виході фотоелектричних модулів, а саме напруги холостого ходу, струму короткого замикання, максимальної потужності, напруги та струму в точці максимальної потужності. Мультиметр та тестер паралельно підключаються до обладнання, в якому вимірюються електричні параметри, за допомогою двох провідників з різнойменними зарядами. Загальний вигляд тестера зображений на рисунку 1.9.



Рисунок 1.9 – Загальний вигляд тестера фотоелектричного модуля
Seaward PV150

Ампервольтметр – засіб вимірювання напруги та струму через послідовне та паралельне підключення до обладнання, в якому вимірюється напруга і струм. Таке одночасне вимірювання напруги і струму зазвичай потрібне для розрахунків потужності. Загальний вигляд ампервольтметра та схема його підключення наведені на рисунку 1.10. Зображення взяте із частини лабораторного практикуму [11].

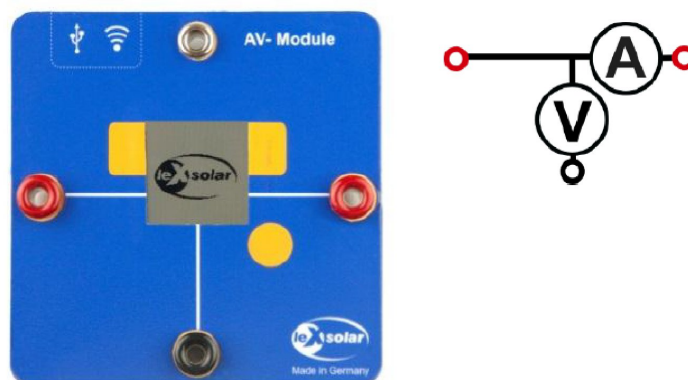


Рисунок 1.10 – Загальний вигляд та схема підключення ампервольтметра [11]

Ватметр вимірює потужність, перемножуючи значення напруги та струму. Омметр вимірює опір ділянки кола через відношення напруги на струм за

Законом Ома. Зазвичай омметр в залежності від його типу може вимірювати перехідний опір, опір ізоляції обладнання, опір заземлення, опір навантаження, внутрішній опір джерела живлення, в тому числі і сонячних панелей.

Розумний лічильник електроенергії (Smart-лічильник) – засіб вимірювання електричної енергії, який її вимірює в двох напрямках. Тобто такі лічильники можуть вимірювати електроенергію, яка споживається навантаженням і яка генерується джерелом живлення. Особливо, розумні лічильники найбільше використовуються на сонячних електростанціях, де потрібно вимірювати як ту енергію, яку генерує сонячна станція, так і ту, яку споживає навантаження. Також розумні лічильники є невід’ємною частиною «розумних» електромереж. Загальний вигляд розумного лічильника зображений на рисунку 1.11.



Рисунок 1.11 – Загальний вигляд розумного лічильника електроенергії

Аналізатор якості електроенергії – засіб вимірювання та аналізу якості подачі електроенергії. На дисплеї аналізатора можна побачити графіки залежності напруги та струму від часу, їхню форму синусоїди, а також можна перейти в режим перегляду параметрів і побачити, що вирахував прилад на основі графіків функції, тобто що виміряв прилад непрямым методом. Тому аналізатор, крім якості електроенергії, може ще визначити коефіцієнт гармонік, значення напруги та струму в різних точках потужності, частоту струму коефіцієнт амплітуд, а в деяких аналізаторах можна вимірювати ще й коефіцієнт

потужності. Тобто в аналізаторах вимірюються всі ті параметри, від яких залежить якість електроенергії. Загальний вигляд аналізатора якості зображений на рисунку 1.12.



Рисунок 1.12 – Загальний вигляд аналізатора якості електроенергії

Термометр – засіб вимірювання температури повітря або поверхні різних матеріалів. Рідинні термометри зазвичай використовуються для вимірювання температури повітря. Такі термометри для сонячних електростанцій потрібні, щоб визначити, як температура повітря впливає на температуру поверхні фотомодулів і в результаті на роботу модулів. Крім температури повітря, потрібно ще вимірювати температуру поверхні фотомодулів. Температура поверхні зазвичай вимірюється безконтактними інфрачервоними термометрами. Такі термометри називаються пірометрами, які показують значення температури поверхні, просто наводячи лазерний пучок на місце, де потрібно вимірювати температуру. В залежності від відстані пірометра до об'єкта вимірювання вибирається радіус кола місця вимірювання, де виміряні значення усереднюються до одного значення, яке виводиться на дисплей пірометра. Чим на більшій відстані знаходиться пірометр від об'єкту, тим більший радіус і тим більше коло точок, які охоплює пірометр для усереднення вимірювань. Залежність відстані від радіусу характеризується роздільною здатністю, яка для

кожного пірометра є унікальною і прописується в технічному паспорті на пірометр. Загальний вигляд пірометра та схема представлення пояснення його роздільної здатності зображено на рисунку 1.13.

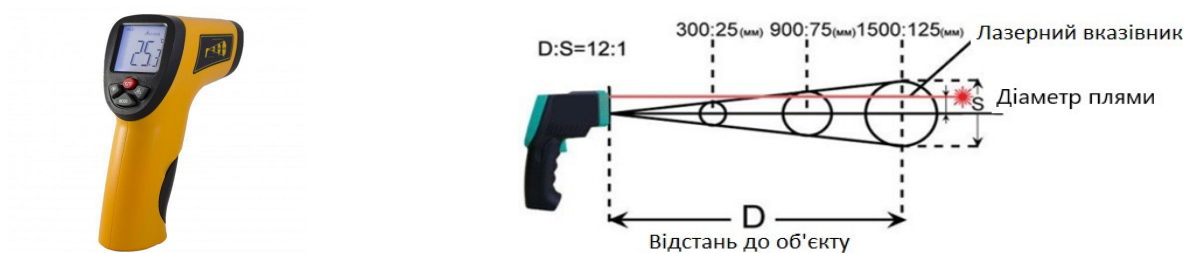


Рисунок 1.13 – Загальний вигляд пірометра та схема представлення пояснення його роздільної здатності [12]

Піранометр – засіб вимірювання інтенсивності світла, який має спеціальний датчик, який відкривається на повітрі перед Сонцем або штучним джерелом світла і вимірює інтенсивність світла, а виміряні значення показує на дисплеї електронного пристрою, який за допомогою провідника з'єднаний з датчиком. В електронному пристрої піранометра можна налаштовувати, в яких одиницях і в яких діапазонах вимірювань має вимірювати піранометр. Загальний вигляд піранометра зображений на рисунку 1.14.



Рисунок 1.14 – Загальний вигляд піранометра [12]

Засоби вимірювання температури та інтенсивності світла і їх зображення описані в лабораторному практикумі [12].

Фотоелектричний вимірювач сонячної радіації – засіб вимірювання інтенсивності світла та інших входних параметрів фотоелектричних модулів. Тобто фотоелектричний вимірювач сонячної радіації призначений для використання на фотоелектричних станціях, щоб виміряти основні входні параметри фотоелектричних модулів. До таких параметрів, які вимірює цей

засіб, належить інтенсивність світла, азимут розташування модулів, їх кут встановлення, температура навколишнього середовища, температура поверхні фотоелектричних модулів. На рисунку 1.15 зображений загальний вигляд фотоелектричного вимірювача сонячної радіації.



Рисунок 1.15 – Загальний вигляд фотоелектричного вимірювача сонячної радіації

Люксметр – засіб вимірювання освітленості, який за принципом роботи схожий до піранометра, і зазвичай використовує той самий датчик, що й піранометр. Хоча датчики піранометра можуть бути різними, але в люксметрі зазвичай використовується один датчик – датчик з фотодіодом. Загальний вигляд люксметра зображений на рисунку 1.16.

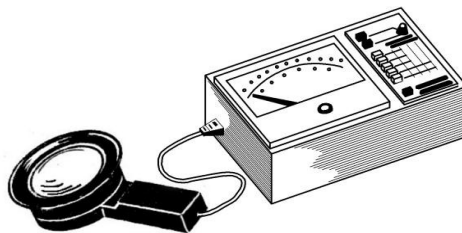


Рисунок 1.16 – Загальний вигляд люксметра [13]

Загальний вигляд люксметра та його опис наведений в частині посібника [13].

Психрометр – засіб вимірювання вологості повітря, принцип роботи якого заснований на вимірюванні температури двох термометрів: сухого і вологого.

На основі різниці температур двох термометрів та показів сухого термометра визначали відносну вологість повітря, беручи значення з психрометричної таблиці. Анемометр – засіб вимірювання швидкості вітру із крильчастим датчиком, який обертається при виникненні вітру, і в залежності від частоти обертання вираховується швидкість вітру електронним пристроєм, до якого приєднаний датчик. В електронному пристрої можна налаштувати покази значень швидкості вітру на різні одиниці вимірювання. Ці два метеорологічні прилади потрібні для вимірювання вологості повітря, швидкості вітру, оскільки ці параметри будуть впливати на деградацію та ефективність роботи сонячних модулів.

Термоанемометр – засіб вимірювання трьох параметрів мікроклімату одночасно. До таких параметрів належить температура повітря, вологість повітря та швидкість вітру. Загальний вигляд термоанемометра зображений на рисунку 1.17.



Рисунок 1.17 – Загальний вигляд термоанемометра [12]

Загальний вигляд термоанемометра наведений в лабораторному практикумі [12].

Тепловізор – засіб вимірювання температури та визначення місць різної інтенсивності температури за допомогою спеціальних термографічних знімків (термограм) через вимірювання інтенсивності інфрачервоного випромінювання та перетворення його в значення температури за Законом Стефана-Больцмана. За допомогою тепловізора можна також вимірювати температуру поверхні фотомодулів, як і пірометром, оскільки тепловізор також може безконтактно

вимірювати температуру. Але, через наявність можливого фіксування термограм, в сонячній енергетиці тепловізор використовується також з метою виявлення дефектів на сонячних модулях, оскільки під час ввімкнення дефектного модуля в електричному колі на місці дефекту буде збільшений опір, а, отже, і на місці дефекту буде підвищена температура, що зможе виявити тепловізор. Тому саме тепловізор найкраще використовувати для виявлення дефектів на сонячних модулях. Загальний вигляд тепловізора зображено на рисунку 1.18.



Рисунок 1.18 – Загальний вигляд тепловізора

Тепловізор описаний в лабораторному практикумі [12].

Існують ще засоби вимірювання, вбудовані в обладнання сонячної електростанції, які вимірюють параметри генерації станції. Ці засоби вимірювання зазвичай вбудовані в перетворювач постійного струму на змінний (інвертор), присрій, який контролює рівень заряду в акумуляторах (контролер заряду), панель керування, систему моніторингу генерації сонячних панелей в режимі реального часу. Всі ці засоби вимірювання показують схему підключення станції в різних режимах її роботи, а також яка потужність кожного обладнання і в яких напрямках відбувається перетікання генерації на сонячній станції в різних режимах роботи. На рисунку 1.19 зображений загальний вигляд дисплеїв, які показують виміряні значення та які вбудовані в обладнання.



Рисунок 1.19 – Загальний вигляд дисплеїв, які показують виміряні значення та які вбудовані в обладнання

Отже, багато з вищезгаданих засобів вимірювання можуть використовуватися для отримання цінної інформації для результатів та аналізу експериментального дослідження деградації та ефективності роботи будь-яких типів фотоелектричних модулів.

1.5 Основні вимоги до точності вимірювань

Серед перелічених вище нормативних і дійсних характеристик основними є клас точності засобів вимірювань і похибка вимірювань, тому що саме ці параметри впливають на точність. Чим меншим буде значення цих параметрів, тим точнішим буде засіб вимірювань.

Похибка вимірювань поділяється на три види: абсолютна, відносна та приведена. Окремо приведена похибка поділяється на приведену похибку за максимальним діапазоном вимірювань та показами приладу.

Абсолютна похибка – це різниця між вимірним значенням фізичної величини $X_{\text{вим}}$ й істинним $X_{\text{іст}}$ (дійсним X_0) значенням величини. Абсолютна похибка ΔX розраховується за формулою 1.11.

$$\Delta X = X_{\text{вим}} - X_{\text{іст}} \quad (1.11)$$

Результат вимірювання величини представлений через істинне значення величини у формулі 1.12.

$$X_{\text{іст}} = X_{\text{вим}} \pm \Delta X \quad (1.12)$$

Відносна похибка – відношення абсолютної похибки до істинного значення величини і розраховується за формулою 1.13.

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{\text{іст}}} * 100\% \quad (1.13)$$

Приведена похибка – відношення абсолютної похибки до нормованого значення величини X_n і розраховується за формулою 1.14.

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_n} * 100\% \quad (1.14)$$

Нормоване значення величини може бути максимальним діапазоном вимірювань або вимірюваним значенням величини, від чого якраз і залежить приведена похибка за максимальним діапазоном вимірювань та за вимірюваним значенням величини.

Залежно від причини появи похибки прийнято поділяти на три типи: промахи, систематичні і випадкові похибки.

Промахи, або грубі помилки можуть виникати в результаті неправильних дій експериментатора (невірне зчитування показів з приладу, помилковий запис,

неправильне вмикання приладу і т. ін.) або під час порушення умов експерименту (коливання напруги, зміна температури матеріалу, його забруднення та інше). Під час опрацювання результатів вимірювань промахи повинні бути виключені.

Систематичними називаються похибки, величина і знак яких не змінюються у всіх вимірюваннях, які проводяться в однакових умовах.

Якщо результати однакових вимірювань виявляються різними, то вони матимуть невеликі відхилення від істинного значення, причому величина і знак відхилення будуть змінюватися від досліду до досліду випадковим чином. Похибки такого типу називаються випадковими.

Виникнення випадкових похибок зумовлене великим числом малих впливів. Наприклад, на результат вимірювання можуть вплинути коливання температури, густини повітря, зміна зовнішніх електричних і магнітних полів, вібрації і багато інших причин, врахувати які неможливо. Ці впливи і викликають нерегулярні, неконтрольовані, випадкові зміни результатів однакових вимірювань.

Кожний засіб вимірювання має свою інструментальну похибку, яка зазвичай еквівалентна абсолютній похибці. Також засіб вимірювання має клас точності, який може бути еквівалентним усім трьом видам похибок. Клас точності засобу вимірювань – це узагальнена характеристика засобу, яка визначається границями його допустимих основної і додаткових похибок, а також регламентованими характеристиками, що впливають на його точність. Слід відзначити, що клас точності ЗВ – це не похибка, а кількісна характеристика, за величиною якої можна оцінити похибку ЗВ. Тобто інструментальна похибка та клас точності є нормативно допустимими параметрами, яким мають відповідати дійсні значення цих параметрів засобів вимірювання. Якщо клас точності еквівалентний приведеній похибці за максимальним діапазоном вимірювань, то інструментальна похибка визначається за формулою 1.15.

$$\Delta x_{\text{інстр}} = \frac{\text{Кл.точн.} \cdot x_{\text{max}}}{100} \quad (1.15)$$

У випадку, якщо похибка вимірювання будь-якої величини складається з декількох похибок, які вносяться різними незалежними причинами, то теорія похибок дає такий закон їх додавання за формулою 1.16.

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_m^2} \quad (1.16)$$

Якщо в результаті проведення вимірювань різних трьох взаємопов'язаних величин отримали під час розрахунків середні значення величин та їх абсолютні похибки, тобто, наприклад, $u \pm \Delta u$, $v \pm \Delta v$, $w \pm \Delta w$, ... На основі функції $f = f(u, v, w, \dots)$ знайшли істинне значення шуканої величини, яким є середнє значення величини f . Для знаходження f достатньо у функцію підставити середнє значення $f = f(u, v, w, \dots)$.

Очевидно, що величина отримана з деякою похибкою Δf . Похибка Δf під час непрямого вимірювання залежить від похибок прямо виміряних величин і виду функціональної залежності. Якщо прямі вимірювання проведені незалежними способами і відносні похибки δu , δv , δw , ... невеликі, то теорія похибок дає формулу 1.17 для знаходження похибки.

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{df}{du} \Delta u\right)^2 + \left(\frac{df}{dv} \Delta v\right)^2 + \left(\frac{df}{dw} \Delta w\right)^2 + \dots} \quad (1.17)$$

де $\frac{df}{du}$, $\frac{df}{dv}$, $\frac{df}{dw}$, ... – часткові похідні від функції $f = f(u, v, w, \dots)$, які обчислюються за середніми значеннями всіх фізичних величин u , v , w , ...

Основні поняття теорії похибок та точності вимірювань і відповідні формули описані в лабораторних практикумах [12] та [14].

1.6 Постановка завдання

Постановкою завдання, яке потрібно вирішити в роботі, є:

1) Розроблення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу для проведення досліджень роботи фотоелектричних модулів. До інформаційно-вимірювальної системи будуть входити засоби вимірювання параметрів фотоелектричної станції, які описані вище і необхідні для подальших досліджень. Для спрощення дослідження потрібно поділити інформаційно-вимірювальну систему за параметрами, а саме на інформаційно-вимірювальну систему вимірювання вхідних параметрів та інформаційно-вимірювальну систему вимірювання вихідних параметрів, які би використовувалися для дослідження деградації та ефективності роботи фотоелектричних модулів.

2) Розроблення плану подальших досліджень роботи фотоелектричної станції з використанням інформаційно-вимірювальної системи.

3) Розроблення структурної та функціональної схем для дослідження роботи фотоелектричної станції з використанням інформаційно-вимірювальної системи.

4) Збір метрологічних характеристик засобів вимірювання, які належать до інформаційно-вимірювальної системи.

5) Збір технічних характеристик обладнання, яке використовувалося в абсораторній установці дослідження.

6) Опис проведення попереднього дослідження фотоелектричної станції з неповним переліком засобів вимірювання в інформаційно-вимірювальній системі.

7) Збір вимірюваних даних основних параметрів фотоелектричної станції.

8) Проведення розрахунків та побудова графіка залежності ефективності роботи фотоелектричного модуля від температури.

9) Аналіз проведених розрахунків та побудованого графіка залежності. Наведення висновків аналізу.

10) Проведення розрахунків похибок непрямих вимірювань для оцінювання точності отриманих вимірюваних та розрахованих даних.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ ПЛАНУ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Розроблення плану проведення досліджень деградації та ефективності роботи фотоелектричних модулів з використанням інформаційно-вимірювальної системи

Перед проведенням дослідження, спочатку потрібно розробити покроковий план дослідження, яке буде проводитися зі збором даних, виміряних за допомогою інформаційно-вимірювальної системи.

Для планування дослідження потрібно розробити інформаційно-вимірювальну систему (IVC), яка буде використовуватися для вимірювання параметрів фотоелектричної станції. Як вже згадувалося вище, IVC буде поділена на інформаційно-вимірювальну систему вимірювання вхідних параметрів та інформаційно-вимірювальну систему вимірювання вихідних параметрів роботи фотоелектричних модулів.

В таблиці 2.1 наведена інформаційно-вимірювальна система вимірювання вхідних параметрів роботи фотоелектричних модулів.

Таблиця 2.1 – Інформаційно-вимірювальна система вимірювання вхідних параметрів роботи фотоелектричних модулів

Відповідний вхідний параметр	Засіб вимірювання
Інтенсивність світла, Вт/м ²	Піранометр, фотоелектричний вимірювач сонячої радіації
Освітленість, лк	Люксметр
Світлове випромінювання, кВт*год/м ²	Піранометр, піргеліометр, піранометр із затінюючим екраном, альбедометр
Температура повітря, °C	Термоанемометр
Температура поверхні фотомодулів, °C	Пірометр
Вологість повітря, %	Термоанемометр
Швидкість вітру, м/с	Термоанемометр
Струм витоку, А	Струмовимірювальні кліщі
Напруга витоку, В	Мультиметр

Продовження таблиці 2.1

Орієнтація модулів, °	Компас
Кут нахилу модулів, °	Вимірювач сонячної радіації, в якого вбудований кутомір
Альbedo поверхні землі, %	Альбедометр, а також визначається шляхом розрахунків по сонячній інсоляції та береться з відомих табличних даних
Геометричні розміри сонячного модуля (висота, ширина, товщина), мм×мм×мм	Лінійка, рулетка, лазерний далекомір, штангенциркуль, також ці дані відомі з технічних характеристик сонячного модуля
Відстань від штучного імітатора сонячного випромінювання до фотоелектричного модуля, м	Лінійка, рулетка, лазерний далекомір
Герметичність та інші порушення, що призводять до виникення дефектів та прискорюють деградацію	Тепловізор
Товщина опорної конструкції, мм	Штангенциркуль

В таблиці 2.2 наведена інформаційно-вимірювальна система вимірювання вихідних параметрів роботи фотоелектричних модулів.

Таблиця 2.2 – Інформаційно-вимірювальна система вимірювання вихідних параметрів роботи фотоелектричних модулів

Відповідний вихідний параметр	Засіб вимірювання
Максимальна (пікова) потужність, Вт та кВт	Фотоелектричний тестер
Номінальний струм в точці максимальної потужності, А	Фотоелектричний тестер, ампервольтметр, струмовимірювальні кліщі
Номінальна напруга в точці максимальної потужності, В	Фотоелектричний тестер, ампервольтметр, мультиметр
Струм короткого замикання, А	Фотоелектричний тестер, ампервольтметр, струмовимірювальні кліщі
Напруга холостого ходу, В	Фотоелектричний тестер, ампервольтметр, мультиметр
Миттєва потужність, Вт та кВт	Мультиметр та струмовимірювальні кліщі, виміряні дані яких визначаються шляхом розрахунків, та лічильник електроенергії
Миттєвий струм, А	Струмовимірювальні кліщі
Миттєва напруга, В	Мультиметр
Максимальна напруга системи на вході до інвертора, В	Мультиметр
Максимальний струм запобіжника системи на вході до інвертора, А	Струмовимірювальні кліщі
Вироблена електрична енергія (генерація), кВт*год	Розумний лічильник електроенергії
Якість електроенергії	Аналізатор якості електроенергії

Продовження таблиці 2.2

Коефіцієнт гармонік, %	Аналізатор якості електроенергії
Коефіцієнт потужності, % та одиниці	Аналізатор якості електроенергії, фазометр

Інформаційно-вимірювальна система раніше нами була визначена та досліджена в науково-дослідній роботі [15], [16].

Перед основним дослідженням роботи фотоелектричної станції з використанням інформаційно-вимірювальної системи було проведено попереднє дослідження залежності ефективності сонячних модулів від температури з використанням деяких засобів вимірювання з інформаційно-вимірювальної системи для отримання даних деяких параметрів, які необхідні суто для встановлення залежності ефективності сонячних модулів від температури. Попереднє дослідження буде описане в наступних розділах. Дослідження було раніше нами проведено і описано в статті [1].

Для проведення основних досліджень, які будуть проводитися в майбутньому, потрібно зібрати невелику лабораторну установку фотоелектричної станції з деякими засобами вимірювання з інформаційно-вимірювальної системи. До установки фотоелектричної станції мають входити фотоелектричні модулі, автономний інвертор, акумуляторна батарея, контролер заряду з MPPT-трекером, щит захисту, також фотоелектричні модулі потрібно освітлювати за допомогою імітатора сонячного випромінювання, а саме галогенної лампи, в якій інтенсивність світла має регулюватися за допомогою автотрансформатора. В дослідній установці мають використовуватися два фотоелектричних модуля, кожен з яких буде досліджуватися окремо. Один модуль буде новим, а інший – зношений з більшим терміном експлуатації. Ці два модулі потрібні для дослідження деградації сонячних модулів. До інформаційно-вимірювальної системи має входити піранометр, фотоелектричний вимірювач сонячної радіації, люксметр, термоанемометр, пірометр, штангенциркуль, лінійка (рулетка, лазерний далекомір), фотоелектричний тестер, струмовимірювальні кліщі, мультиметр, «розумний» лічильник електроенергії, аналізатор якості електроенергії.

Дослідження потрібно проводити за різних умов температури та інтенсивності світла, тобто потрібно спочатку проводити вимірювання параметрів фотоелектричної станції за умов різної температури нагрівання фотоелектричних модулів, але при певній сталій інтенсивності світла. Після того, коли при тій інтенсивності світла фотомодуль припинить нагріватися, тобто коли модуль дійде до певного значення температури, яка більше не буде збільшуватися, потрібно ще трохи збільшити інтенсивність світла, щоб нагрівався фотомодуль, коли знову не буде збільшуватися температура, тоді потрібно знову трохи збільшувати інтенсивність світла і т. д.

Під час проведення вимірювань потрібно зібрати дані інтенсивності світла, освітленості, кута нахилу сонячних модулів, температури повітря, вологості повітря, швидкості вітру, температури поверхні фотомодулів, габаритних розмірів фотомодулів, відрегульованої відстані галогенної лампи від фотоелектричних модулів, відрегульованої напруги на автотрансформаторі, який під'єднаний до галогенної лампи, максимальної потужності, струму та напруги в точці максимальної потужності, напруги холостого ходу, струму короткого замикання, миттєвих значень потужності, напруги та струму, генерації, споживання та показників якості електроенергії. Для вимірювання струму короткого замикання потрібно буде коло сонячних модулів поставити в режим короткого замикання, тобто потрібно буде напряму з'єднати два різнойменні провідники фотоелектричних модулів між собою, щоб опір був нескінченно близьким до нуля. Для вимірювання напруги холостого ходу потрібно створити режим холостого ходу, тобто від'єднати навантаження від сонячних модулів, приєднавши тільки мультиметр.

Після проведених досліджень потрібно провести комплекс розрахунків, а саме розрахунки ефективності модулів, коефіцієнту заповнення, внутрішнього опору сонячних модулів, втрат теплової енергії в сонячних модулях, втрат теплової енергії в світловому випромінюванні, яке поширюється від галогенної лампи, світлової енергії випромінювання, яку поглинають сонячні модулі. Розрахунки світлової енергії, теплової енергії випромінювання можна здійснити

на основі виміряних значень інтенсивності світла та освітленості. Розрахунки внутрішнього опору сонячних модулів та втрат теплової енергії в модулях можна здійснити на основі отриманих значень напруги холостого ходу, струму короткого замикання та миттєвого значення струму.

Під час аналізу досліджень потрібно буде побудувати графіки залежностей із статистичним аналізом, а саме графіки залежностей ефективності від температури поверхні модулів, ефективності від інтенсивності світла, температури поверхні фотомодулів від теплової енергії випромінювання, ефективності від теплової енергії випромінювання, ефективності від світлової енергії випромінювання, ефективності від втрат теплової енергії в сонячних модулях. Також, крім ефективності, такі графіки потрібно побудувати для максимальної потужності, напруги та струму в точці максимальної потужності та миттєвих значень цих трьох величин, напруги холостого ходу, струму короткого замикання, внутрішнього опору сонячних модулів. Можливо, ще потрібно буде побудувати деякі графіки для коефіцієнту заповнення сонячних модулів. Такі графіки потрібно будувати для аналізу причин впливу температури на ефективність фотомодулів.

2.2 Схема лабораторної установки дослідження фотоелектричної станції з використанням повної інформаційно-вимірювальної системи

Дана схема установки буде використовуватися для майбутнього дослідження фотоелектричної станції з використанням усієї інформаційно-вимірювальної системи.

Структурна схема лабораторної установки дослідження фотоелектричної станції з використанням інформаційно-вимірювальної системи наведена на рисунку 2.1.

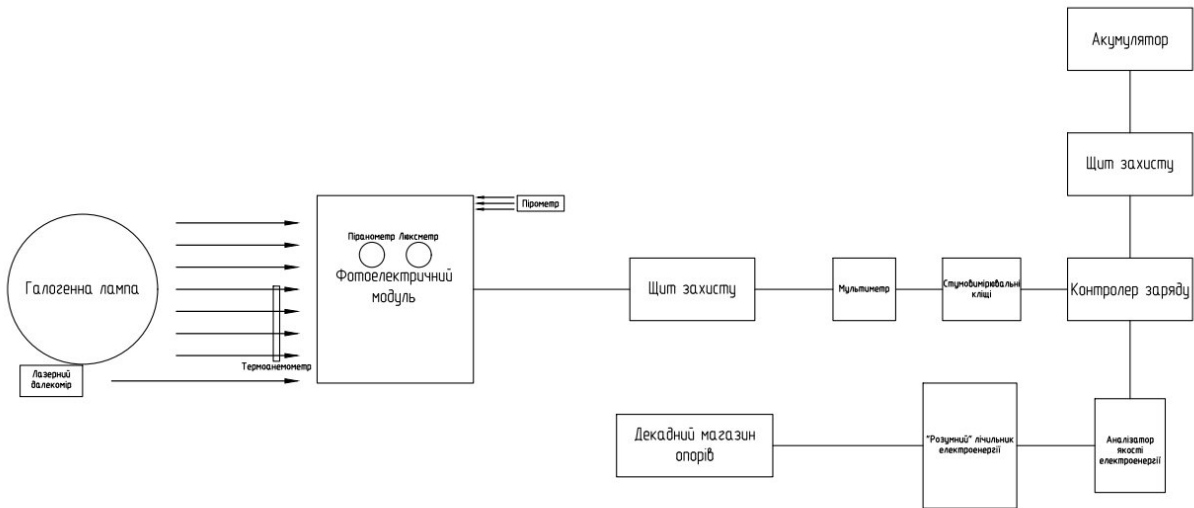


Рисунок 2.1 – Структурна схема лабораторної установки дослідження фотоелектричної станції з використанням інформаційно-вимірювальної системи

Функціональна схема лабораторної установки наведена в додатку А на рисунку 2.2.

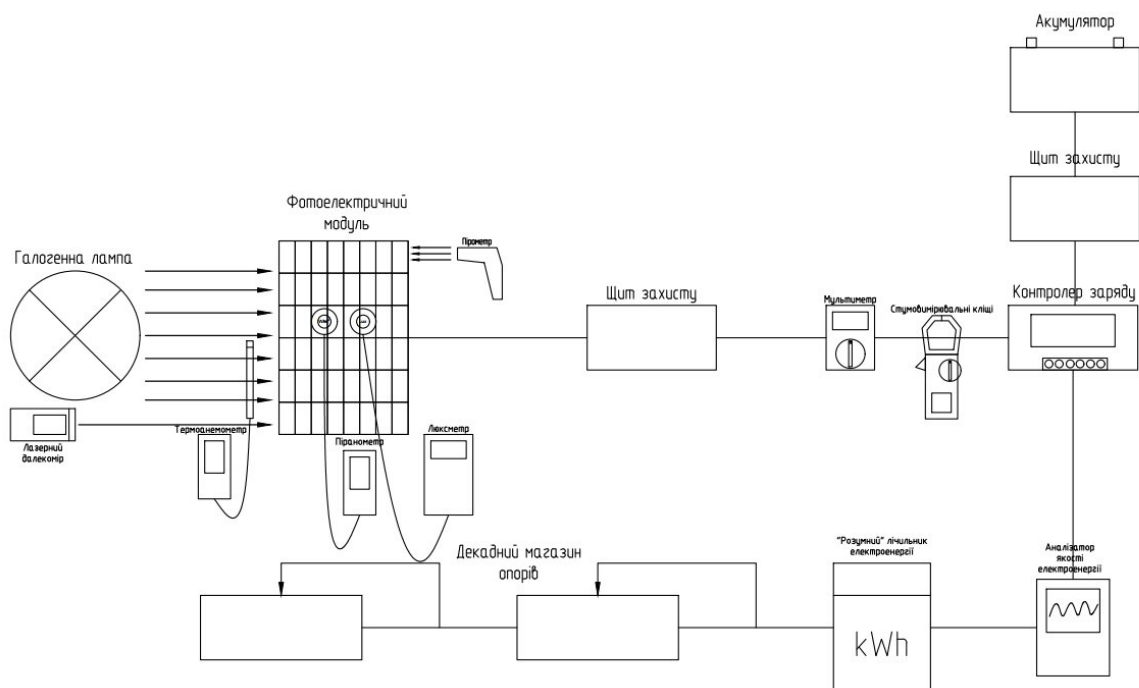


Рисунок 2.2 – Функціональна схема лабораторної установки дослідження фотоелектричної станції з використанням інформаційно-вимірювальної системи

Для побудови схем використовувалося програмне середовище для проектування AutoCAD.

2.3 Збір метрологічних характеристик про обладнання інформаційно-вимірювальної системи

На основі встановленої моделі кожного засобу вимірювання інформаційно-вимірювальної системи потрібно знайти їх технічні паспорти, де вказані технічні (метрологічні) характеристики засобів вимірювання.

В інформаційно-вимірювальній системі буде використовуватися вимірювальне обладнання таких моделей: піранометр Voltcraft PL-110SM, люксметр DER EE DE-3350 Digital Light Meter, термоанемометр Актаком АТТ-1004, пірометр Fluke 574, штангенциркуль, лазерний далекомір Leica DISTO™ A5, який буде використовуватися для вимірювання відстані від галогенної лампи до сонячної панелі, струмовимірювальні кліщі UNI-T UT219DS, мультиметр UNI-T PRO UTM1195E, «розумний» лічильник електроенергії Fronius Smart Meter TS 65A-3, аналізатор якості електроенергії METREL MI 2892 Power Master, фотоелектричний вимірювач сонячної радіації Seaward Solar Survey 200R та фотоелектричний тестер UNI-T UT673PV.

Технічні характеристики засобів вимірювання інформаційно-вимірювальної системи наведені в Додатках А-I на рисунках А.1-I.1, які взяті з технічних паспортів [17-28].

Штангенциркуль, який буде використовуватися для вимірювання товщини сонячної панелі та опорної конструкції, має клас точності 0,05 та діапазон вимірювання 150 мм.

Отже, нами було визначено модель, знайдено технічні паспорти та технічні характеристики кожного засобу вимірювання, який буде використовуватися в інформаційно-вимірювальній системі.

РОЗДІЛ 3

ПРОВЕДЕННЯ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Опис проведення попереднього дослідження та обладнання, яке використовувалося в лабораторній установці

Для початку було проведене неповне дослідження впливу температури на ефективність роботи фотоелектричних модулів, тобто було проведене дослідження не з усією інформаційно-вимірювальною системою, яка використовуватиметься в повному дослідженні. В цьому дослідженні були виміряні дані не усіх параметрів, а тільки тих, які потрібні були суто для дослідження впливу температури на ефективність сонячних модулів, тобто щоб отримати тільки графік залежності ефективності фотоелектричних модулів від температури і більше нічого. Під час проведення цього дослідження нами було звернено увагу на основну помилку, якої припустилися, що буде обов'язково враховано в наступному дослідженні цієї роботи для недопущення таких помилок. Також в дослідженні були використані засоби вимірювання та обладнання, над яким проводилося дослідження, в зменшеному розмірі цього обладнання в порівнянні з технічними характеристиками обладнання, яке буде використовуватися в основному дослідженні в наступній роботі.

Проведення експериментального дослідження відбувалося при різному нагріванні фотоелектричного модуля від 19 до 78 °С. Для нагрівання фотоелектричного модуля змінювали інтенсивність світла, в ролі джерела якого використовувалася одна галогенна лампа, від 187 до 2000 Вт/м². Змінювати інтенсивність світла від галогенної лампи можливо завдяки зміні вхідної напруги, яка подається на лампу і яку можна змінювати за допомогою автотрансформатора. Для вимірювання температури фотоелектричного модуля використовували пірометр, а для вимірювання інтенсивності світла – піранометр. Дані засоби вимірювання використовували тих самих моделей, що були описані в попередньому розділі. Вимірювання було проведено над

електричним колом, яке використовували в лабораторній установці. Електричне коло експерименту складається з джерела струму, тобто із сонячної панелі, навантаження, до якого належить декадний магазин додаткових опорів та ампервольтметра, який призначений для вимірювання струму та напруги на виході фотоелектричного модуля. В дослідженні використовувався декадний магазин опорів та ампервольтметр з комплекту обладнання німецької компанії leXsolar. Схема та загальний вигляд ампервольтметра з даного комплекту зображені в розділі 1 на рисунку 1.10. Схема та загальний вигляд декадного магазину опорів зображені на рисунку 3.1.

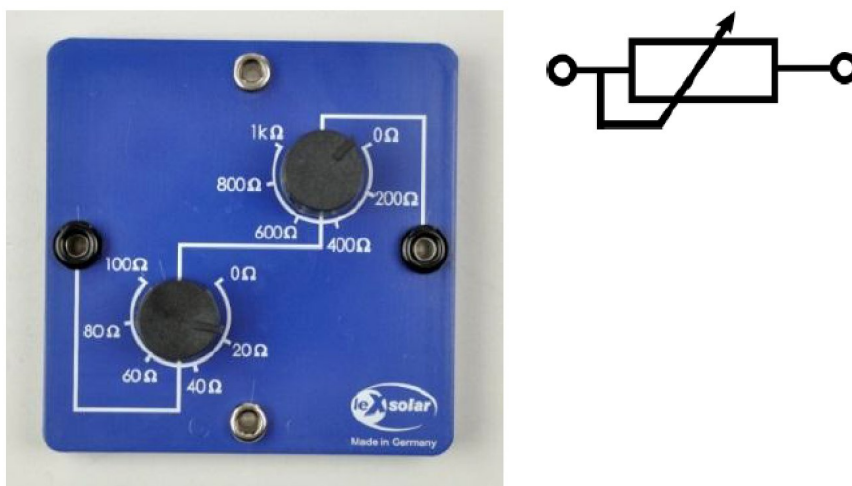


Рисунок 3.1 – Схема та загальний вигляд декадного магазину опорів

Технічні характеристики ампервольтметра наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики ампервольтметра

Параметр	Вимірювання напруги	Вимірювання струму
Діапазон	0...12 В	0...2 А
Точність	1 мВ	0,1 мА (0...199 мА); 1 мА (200 мА...1 А)
Автоматичне відключення	>12 В	>2 А

Окрім зазначеного в таблиці, до технічних характеристик ампервольтметра належить внутрішній опір, який становить $<0,5 \text{ Ом}$ при вимірюванні струму від 0 до 200 мА та $<0,2 \text{ Ом}$ при вимірюванні струму від 200 мА до 2 А.

Декадний магазин опорів, зображений на рисунку 3.1, складається із двох регуляторів опору (потенціометрів) різних діапазонів, на яких налаштовується відповідний опір навантаження. Один потенціометр має діапазон 0-100 Ом, інший – 0-1000 Ом. Обидва з'єднані послідовно, так що потенціометр може досягати опору від 0 Ом до 1100 Ом. Похибка вимірювання становить 0,5 Ом для резистора меншого діапазону і 5 Ом для іншого.

Технічні характеристики ампервольтметра та декадного магазину опорів з комплекту обладнання leXsolar взяті з частини лабораторного практикуму [11].

В лабораторній установці використовувалася сонячна панель fosea SOLAR MODULE TYPE 1,5 Mono Crystalline Module та галогенна лампа PHILIPS PAR38 EC 120W, технічні характеристики яких наведені на рисунках 3.2 та 3.3, відповідно.

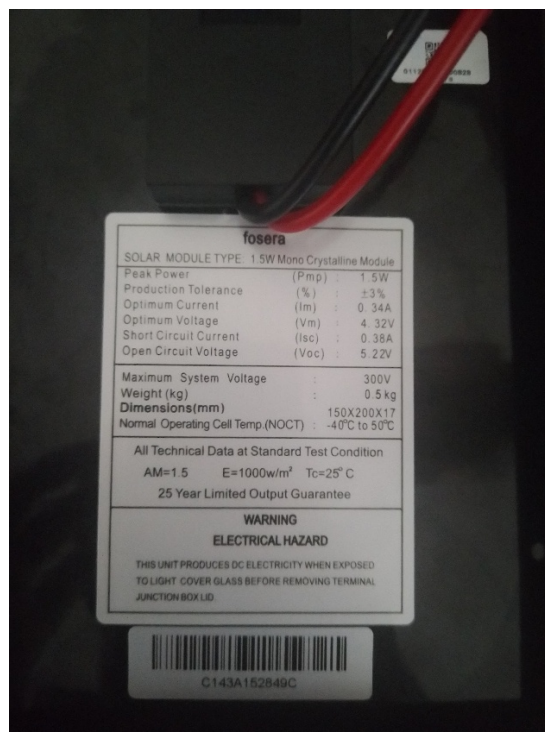


Рисунок 3.2 – Технічні характеристики сонячної панелі fosea SOLAR MODULE TYPE 1,5 Mono Crystalline Module

PAR38

PAR38 120W E27 24V SP 10D 1CT/12

Pressed-glass 121 mm diameter reflector lamps of high luminous intensity

Product data

General Information		Controls and Dimming	
Cap base	E27 (E27)	Dimmable	Yes
Operating position	UNIVERSAL [Any or Universal (U)]		
Nominal lifetime	2,000 h	Mechanical and Housing	
Switching Cycle	8,000	Bulb shape	PAR38 [PAR 4.75 inch/121 mm]
Rated Lifetime (Hours)	2,000 h		
Lighting Technology	Incandescent	Approval and Application	
		Energy consumption kWh/1,000 hours	127 kWh
Light Technical		Product Data	
Beam angle (nom.)	10 degree(s)	Order product name	PAR38 120W E27 24V SP 10D 1CT/12
Correlated Colour Temperature	2700 K	Full product name	PAR38 120W E27 24V SP 10D 1CT/12
Colour rendering index (CRI)	100	Full EOC	87150038073915
Luminous flux in 90° cone (rated)	1,545 lm	Order code	38073915
		Material no. (12 NC)	923810020511
Operating and Electrical		Local order code	24120ESPAR38
Power Consumption	120.0 W	SAP numerator – quantity per pack	1
Starting time (nom.)	0.0 s	EAN/UPC – Product/Case	871500380739
Warm-up time to 60% light	Instant full light s	Numerator – packs per outer box	12
Power Factor (Fraction)	1	EAN/UPC – Case	871500381118
Voltage (nom.)	24 V		
Voltage (nom.)	24 V		

Рисунок 3.3 – Технічні характеристики галогенної лампи PHILIPS PAR38 EC 120W

Технічні характеристики галогенної лампи взяті з технічного паспорту [29].
Технічні характеристики сонячної панелі були нами зняті під час дослідження.

Лабораторна установка із засобами вимірювання для дослідження ефективності роботи фотоелектричних модулів в залежності від впливу температури зображена на рисунку 3.4.

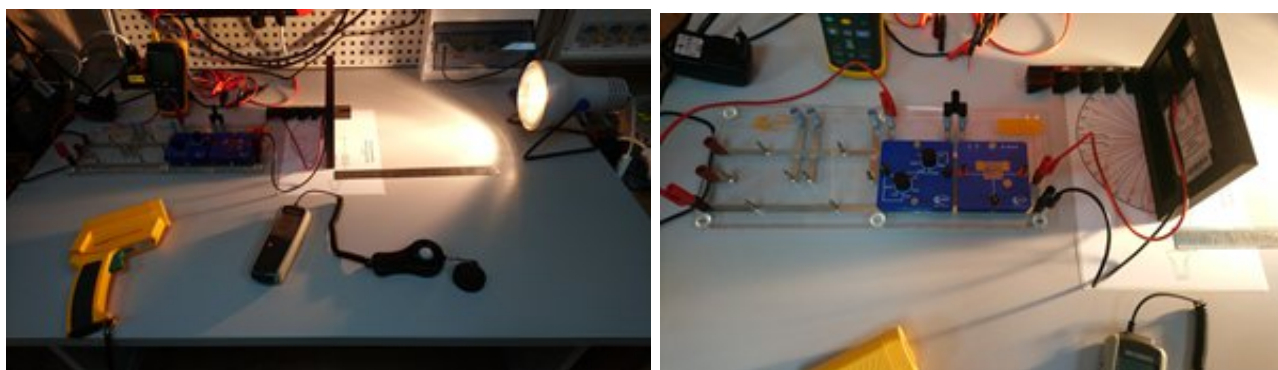


Рисунок 3.4 – Лабораторна установка із засобами вимірювання для дослідження ефективності роботи фотоелектричних модулів в залежності від впливу температури

3.2 Отримані дані під час попереднього дослідження

Під час проведення попереднього дослідження були отримані результати прямих вимірювань таких параметрів, як температура поверхні фотоелектричного модуля, вихідні значення струму і напруги та інтенсивність світла. Ці дані фіксували при температурі нагрівання фотоелектричного модуля на кожен 1 °С. Дані саме цих параметрів отримували для розрахунків вихідної потужності, вихідної потужності на площу та основного параметра – ефективності, залежність якого визначали від температури. Вихідна потужність на площу визначалася відношенням вихідної потужності до площі фотоелектричного модуля, яка була знайдена шляхом добутку довжини фотоелектричного модуля на його ширину, яку вимірювали за допомогою лінійки. В результаті вимірювань та розрахунків встановили, площа фотоелектричного модуля, над яким проводилося дослідження, становить: $S = 0,01378 \text{ м}^2$. Площу сонячного модуля потрібно визначати для того, щоб, знаходячи ефективність модуля, була визначена однакова площа як для інтенсивності світла, так і для вихідної потужності.

В таблиці 3.2 наведені отримані результати вимірювань під час проведення досліджень при різній температурі нагрівання фотоелектричного модуля від 19 до 78 °С.

Таблиця 3.2 – Отримані результати вимірювань під час проведення досліджень при різній температурі нагрівання фотоелектричного модуля від 19 до 78 °С

№ досліджу	Температура поверхні сонячної панелі t , °С	Інтенсивність світла E , Вт/м ²	Вихідна напруга U , В	Вихідний струм I , мА
1	19	187	0,899	17,7
2	20	187	0,913	18,2
3	21	187	0,922	18,3
4	22	187	0,955	19,3
5	23	187	0,945	18,9
6	24	187	0,93	18,5
7	25	196	0,95	18,9

Продовження таблиці 3.2

8	26	196	0,97	19,3
9	27	250	1,16	23,1
10	28	250	1,18	23,7
11	29	370	1,73	34,4
12	30	370	1,76	35
13	31	450	2,17	43,7
14	32	500	2,34	47,3
15	33	640	3,05	61,6
16	34	640	3,09	62
17	35	640	2,99	60,7
18	36	640	3,07	62,2
19	37	640	3,15	61,4
20	38	640	3,16	61,6
21	39	640	3,17	61,7
22	40	640	3,2	62,2
23	41	640	3	61,1
24	42	800	3,37	80
25	43	800	3,39	81,3
26	44	800	3,34	79,9
27	45	1000	4,19	100,9
28	46	980	4,41	92
29	47	980	4,4	92,7
30	48	980	4,4	92,2
31	49	1060	4,53	95,1
32	50	1060	4,51	94,9
33	51	1060	4,47	94,1
34	52	1166	4,37	108,5
35	53	1166	4,36	108,2
36	54	1410	4,5	112,3
37	55	1410	4,49	112,1
38	56	1410	4,46	111,3
39	57	1410	4,43	110,4
40	58	1410	4,43	110,3
41	59	1510	4,5	112,6
42	60	1510	4,46	111,8
43	61	2000	4,74	99,7
44	62	2000	4,42	99,2
45	63	2000	4,68	98,4
46	66	2000	4,65	97,8
47	67	2000	4,61	96,9
48	68	2000	4,59	96,7
49	69	2000	4,57	95,9
50	70	2000	4,56	95,9
51	71	2000	4,55	95,8
52	72	2000	4,49	94,2
53	73	2000	4,51	94,9
54	74	2000	4,5	94,6

Продовження таблиці 3.2

55	75	2000	4,48	94,3
56	76	2000	4,48	94,2
57	77	2000	4,47	94
58	78	2000	4,46	93,8

Отже, нами раніше було отримано виміряні дані під час проведення попереднього дослідження, які описані в статті [1].

3.3 Аналіз попередніх досліджень ефективності роботи фотоелектричних модулів в залежності від впливу температури за допомогою розрахунків та графіків залежності

Попереднє дослідження залежності ефективності роботи фотоелектричних модулів від температури було проаналізовано за допомогою розрахунків та графіка цієї ж залежності. Шляхом розрахунків були визначені параметри, які згадувалися в попередньому розділі. До таких параметрів відносяться вихідна потужність, вихідна потужність на площу, ефективність фотоелектричного модуля. Вихідна потужність сонячного модуля P визначається добутком виміряних значень напруги U та струму I . Вихідна потужність на площу P/S – відношення вихідної потужності P до площі сонячного модуля S . Ефективність сонячного модуля e визначається відношенням електричної енергії $E_{\text{ел}}$, яку виробляє модуль, до енергії падаючого світла $E_{\text{св}}$, якщо цю енергію звести, поділивши на час і площу, тоді ефективність e буде визначатися відношенням вихідної потужності на площу P/S до інтенсивності світла E . Ефективність e знаходиться за формулою 3.1.

$$e = \frac{E_{\text{ел}}}{E_{\text{св}}} = \frac{P_{\text{ел}}}{P_{\text{св}}} = \frac{P/S}{E} = \frac{P}{S \cdot E} = \frac{U \cdot I}{S \cdot E} = \frac{U \cdot I}{l \cdot w \cdot E} \quad (3.1)$$

де $P_{\text{ел}}$ і $P_{\text{св}}$ – електрична вихідна потужність і потужність падаючого світла, відповідно, які знаходяться відношенням електричної енергії $E_{\text{ел}}$ і енергії

падаючого світла $E_{\text{св}}$ до часу, відповідно, $S = l \cdot w$ – площа фотоелектричного модуля, яка знаходиться шляхом обчислення добутку довжини модуля l на його площу w .

Ефективність сонячного модуля та інші параметри, через які визначали ефективність, були обчислені для вимірюваного значення кожного параметра з таблиці 3.1 при різній температурі нагрівання на кожен 1 °С за формулою 3.1.

В таблиці 3.3 наведені отримані результати вимірювань та розрахунків параметрів попереднього дослідження залежності ефективності роботи фотоелектричного модуля від впливу температури при різній температурі нагрівання від 19 до 78 °С.

Таблиця 3.3 – Отримані результати вимірювань та розрахунків параметрів попереднього дослідження при різній температурі нагрівання від 19 до 78 °С

№ дослід у	Температура поверхні сонячної панелі t , °С	Ефективність сонячної панелі η , %	Вихід на напруга U , В	Вихідний струм I , мА	Вихідна потужність P , Вт	Вихідна потужність на площу P/S , Вт/м ²	Інтенсивність світла E , Вт/м ²
1	19	0,61750735	0,899	17,7	0,015912	1,1547388	187
2	20	0,64483907	0,913	18,2	0,016617	1,2058491	187
3	21	0,65477364	0,922	18,3	0,016873	1,2244267	187
4	22	0,71526975	0,955	19,3	0,018432	1,3375544	187
5	23	0,69311099	0,945	18,9	0,017861	1,2961176	187
6	24	0,66767306	0,93	18,5	0,017205	1,2485486	187
7	25	0,66478333	0,95	18,9	0,017955	1,3029753	196
8	26	0,69314446	0,97	19,3	0,018721	1,3585631	196
9	27	0,77782293	1,16	23,1	0,026796	1,9445573	250
10	28	0,81178519	1,18	23,7	0,027966	2,0294629	250
11	29	1,16722238	1,73	34,4	0,059512	4,3187228	370
12	30	1,20817479	1,76	35	0,0616	4,4702467	370
13	31	1,52925335	2,17	43,7	0,094829	6,8816401	450
14	32	1,60641509	2,34	47,3	0,110682	8,0320755	500
15	33	2,13035196	3,05	61,6	0,18788	13,634253	640
16	34	2,17230588	3,09	62	0,19158	13,902758	640
17	35	2,05793043	2,99	60,7	0,181493	13,170755	640
18	36	2,16520773	3,07	62,2	0,190954	13,857329	640
19	37	2,19305606	3,15	61,4	0,19341	14,035559	640
20	38	2,20718433	3,16	61,6	0,194656	14,125979	640
21	39	2,21776352	3,17	61,7	0,195589	14,193687	640
22	40	2,25689405	3,2	62,2	0,19904	14,444122	640

Продовження таблиці 3.3

23	41	2,07841981	3	61,1	0,1833	13,301887	640
24	42	2,44557329	3,37	80	0,2696	19,564586	800
25	43	2,50006349	3,39	81,3	0,275607	20,000508	800
26	44	2,42077286	3,34	79,9	0,266866	19,366183	800
27	45	3,06800435	4,19	100,9	0,422771	30,680044	1000
28	46	3,00435414	4,41	92	0,40572	29,442671	980
29	47	3,02034892	4,4	92,7	0,40788	29,599419	980
30	48	3,00405794	4,4	92,2	0,40568	29,439768	980
31	49	2,94933182	4,53	95,1	0,430803	31,262917	1060
32	50	2,93013528	4,51	94,9	0,427999	31,059434	1060
33	51	2,87966564	4,47	94,1	0,420627	30,524456	1060
34	52	2,95096057	4,37	108,5	0,474145	34,408200	1166
35	53	2,93606714	4,36	108,2	0,471752	34,234543	1166
36	54	2,60090171	4,5	112,3	0,50535	36,672714	1410
37	55	2,59050016	4,49	112,1	0,503329	36,526052	1410
38	56	2,55482815	4,46	111,3	0,496398	36,023077	1410
39	57	2,51712318	4,43	110,4	0,489072	35,491437	1410
40	58	2,51484318	4,43	110,3	0,488629	35,459289	1410
41	59	2,43514451	4,5	112,6	0,5067	36,770682	1510
42	60	2,39635137	4,46	111,8	0,498628	36,184906	1510
43	61	1,71472424	4,74	99,7	0,472578	34,294485	2000
44	62	1,59094339	4,42	99,2	0,438464	31,818868	2000
45	63	1,67094339	4,68	98,4	0,460512	33,418868	2000
46	66	1,65010885	4,65	97,8	0,45477	33,002177	2000
47	67	1,62085994	4,61	96,9	0,446709	32,417199	2000
48	68	1,61049709	4,59	96,7	0,443853	32,209942	2000
49	69	1,59021408	4,57	95,9	0,438263	31,804282	2000
50	70	1,58673439	4,56	95,9	0,437304	31,734688	2000
51	71	1,58160377	4,55	95,8	0,43589	31,632075	2000
52	72	1,53468069	4,49	94,2	0,422958	30,693614	2000
53	73	1,55297169	4,51	94,9	0,427999	31,059434	2000
54	74	1,54462989	4,5	94,6	0,4257	30,892598	2000
55	75	1,53288824	4,48	94,3	0,422464	30,657765	2000
56	76	1,5312627	4,48	94,2	0,422016	30,625254	2000
57	77	1,52460087	4,47	94	0,42018	30,492017	2000
58	78	1,51795356	4,46	93,8	0,418348	30,359071	2000

На основі отриманих даних розрахунків та вимірних значень нами було побудовано графік залежності ефективності роботи фотоелектричного модуля від температури його поверхні при нагріванні від 19 до 78 °С, який зображений на рисунку 3.5. Також побудовано криву апроксимації отриманих результатів на базі поліному другого степеня із коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,8168$.

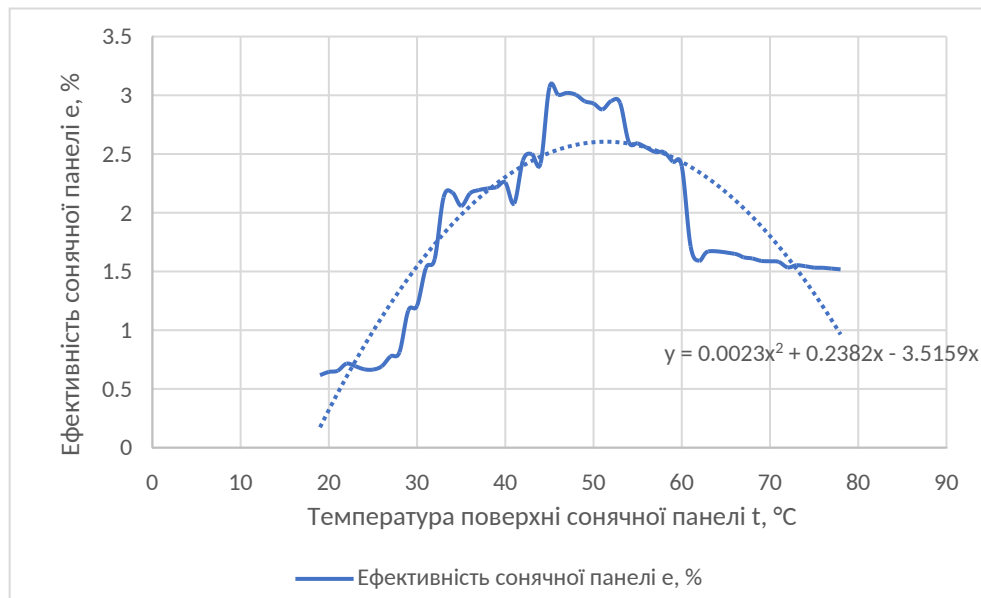


Рисунок 3.5 – Графік залежності ефективності роботи фотоелектричного модуля від температури його поверхні при нагріванні від 19 до 78 °С

Отже, згідно отриманих результатів можна зробити висновок про максимальну ефективність роботи сонячного модуля при температурі його нагрівання 45-53 °С. При зростанні температури понад 50-55 °С ефективність виробітку електричної енергії починає активно знижуватись, що свідчить про зменшення ефективності роботи сонячного модуля загалом. Також з рисунка видно, що графік залежності не є стабільним, тобто, то графік різко змінюється, то графік плавно змінюється, що свідчить про неточність та неправильність вимірювання, яка полягає в тому, що під час проведення досліджень змінювали температуру нагрівання фотоелектричного модуля одночасно з інтенсивністю світла, тоді як потрібно інтенсивність світла змінювати окремо від температури, тобто потрібно певну інтенсивність світла налаштувати в галогенній лампі, залишати її незмінною, поки модуль не нагріється до певної максимальної температури, яка не зможе збільшуватися при даній інтенсивності, тоді інтенсивність знову трохи підвищувати, чекати поки модуль не нагріється до максимальної температури, потім знову інтенсивність підвищувати і т. д. Звісно, потрібно знімати виміряні дані вихідних параметрів фотоелектричних модулів із заданим кроком вимірювання температури, поки буде панель нагріватися. На основі отриманих результатів потрібно буде побудувати графіки залежності від

температури при різній інтенсивності світла, що буде обов'язково враховано в подальшому основному дослідженні фотоелектричних модулів. В такому випадку вже зможемо отримати лінійний графік залежності такий, який зазначають виробники в технічних паспортах на сонячні панелі. Під час проведення попереднього дослідження графік залежності таким не вийшов, тому що вимірювання було проведено неправильно. Лінійна залежність вихідних параметрів від температури очевидна з формул 1.8-1.10 з розділу 1. Також потрібно врахувати теплову складову світла, що не було враховано в попередньому дослідженні, для цього потрібно проводити вимірювання за допомогою люксметра. Крім цього, в дослідженні не було враховано вплив теплової складової світла на фотоелектричний модуль, де також є теплові втрати на нагрів модуля. Теплові втрати в сонячному модулі можна визначити за допомогою внутрішнього опору, який буде визначатися шляхом відношення вимірних значень напруги холостого ходу до струму короткого замикання, що буде обов'язково враховано в майбутньому дослідженні.

Аналіз попередніх досліджень залежності ефективності фотоелектричного модуля від температури, проведений нами раніше, був описаний в статті [1].

3.4 Метрологічний аналіз точності отриманих даних під час попереднього дослідження

Після проведення основних досліджень, отримання вимірних даних та їх аналізу потрібно оцінити точність вимірних і розрахункових даних, використовуючи розрахунки похибок непрямих вимірювань. В даному випадку потрібно розрахувати похибку непрямих вимірювань ефективності через часткові похідні за формулою 1.17, знаючи рівняння розрахунку значень ефективності з формули 3.1, оскільки ефективність взаємопов'язана величина із вимірними величинами. Кінцеве рівняння ефективності має наступний вигляд за формулою 3.2.

$$e = \frac{U * I}{l * w * E} \quad (3.2)$$

На основі кінцевого рівняння похибка непрямих вимірювань ефективності буде розраховуватися за формулою 3.3.

$$\Delta e = \sqrt{\left(\frac{de}{dU} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{de}{dI} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{de}{dl} \Delta l\right)^2 + \left(\frac{de}{dw} \Delta w\right)^2 + \left(\frac{de}{dE} \Delta E\right)^2} \quad (3.3)$$

де $\frac{de}{dU}$, $\frac{de}{dI}$, $\frac{de}{dl}$, $\frac{de}{dw}$, $\frac{de}{dE}$ – часткові похідні функції $e(U, I, l, w, E)$, які обчислюються за середніми значеннями фізичних величин U, I, l, w, E .

Тоді часткові похідні на основі функції 3.2 будуть обчислюватися за формулою 3.4.

$$\begin{aligned} \frac{de}{dU} &= \frac{I}{l * w * E}; \quad \frac{de}{dI} = \frac{U}{l * w * E}; \quad \frac{de}{dl} = -\frac{U * I}{l^2 * w * E}; \quad \frac{de}{dw} = -\frac{U * I}{l * w^2 * E}; \\ \frac{de}{dE} &= -\frac{U * I}{l * w * E^2} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Тепер отримані рівняння часткових похідних підставляємо у формулу 3.3 у рівнянні 3.5.

$$\Delta e = \sqrt{\left(\frac{I}{l * w * E} * \Delta U\right)^2 + \left(\frac{U}{l * w * E} * \Delta I\right)^2 + \left(-\frac{U * I}{l^2 * w * E} * \Delta l\right)^2 + \left(-\frac{U * I}{l * w^2 * E} * \Delta w\right)^2 + \left(-\frac{U * I}{l * w * E^2} * \Delta E\right)^2} \quad (3.5)$$

Підставляємо в останню формулу величину e за рівнянням 3.6.

$$\Delta e = \sqrt{\left(e * \frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(e * \frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(e * \frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(e * \frac{\Delta w}{w}\right)^2 + \left(e * \frac{\Delta E}{E}\right)^2} \quad (3.6)$$

Виносимо e за дужки і з-під кореня, та отримуємо рівняння 3.7.

$$\Delta e = e * \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta w}{w}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2} \quad (3.7)$$

Формули, які отримали в останніх рівняннях, визначають абсолютну похибку ефективності. Переносячи абсолютне значення величини e з правої частини рівняння в ліву, отримаємо формулу обчислення відносної похибки ефективності 3.8.

$$\frac{\Delta e}{e} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta w}{w}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2} \quad (3.8)$$

З таблиці 3.1 візьмемо значення похибок ампервольтметра з комплекту обладнання leXsolar по вимірюванню двох величин: напруги та струму. Абсолютна похибка вимірювання напруги становить 1 мВ або 0,001 В. З таблиці 3.2 бачимо, що вимірювання струму для сонячної панелі відбувалося на діапазоні 0...200 мА, що означає, абсолютна похибка вимірювання струму становить 0,1 мА або 0,0001 А. Вмірювання довжини та ширини панелі здійснювали лінійкою, похибка якої дорівнює половині ціни поділки. Якщо ціна поділки лінійки становить 1 мм, то абсолютна похибка вимірювання довжини і ширини становить 0,5 мм або 0,0005 м. Вимірювання інтенсивності світла проводили за допомогою піранометра Voltcraft PL-110SM, дані похибок якого зазначені в додатку А. Абсолютна похибка вимірювання інтенсивності світла становить 10 Вт/м². Оскільки невідома похибка непрямих вимірювань площі сонячного модуля, яка становить 0,1378, але відомі похибки окремо довжини та ширини, то при розрахунках похибки потрібно вказати значення довжини і ширини, які були виміряні, а не площі, тому що площа була визначена розрахунковим шляхом. Лінійні розміри модуля, на основі яких обчислили площу модуля, становлять: довжина $l = 0,13$ м, ширина $w = 0,106$ м.

Маючи дані абсолютних похибок усіх вимірюваних величин та виміряні і розраховані значення параметрів кожного номера досліду з таблиці 3.3,

обчислюємо абсолютні похибки непрямих вимірювань ефективності для кожного номера досліду розрахованого значення ефективності за формулою 3.6, які наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Абсолютні похибки непрямих вимірювань ефективності для кожного номера досліду розрахованого значення ефективності

№ досліду	Температура поверхні сонячної панелі t , °C	Ефективність сонячної панелі ϵ , %	Абсолютна похибка непрямих вимірювань ефективності сонячної панелі $\Delta\epsilon$, %
1	19	0,617507354	0,033424636
2	20	0,644839068	0,034893527
3	21	0,654773639	0,035428975
4	22	0,715269747	0,038681887
5	23	0,693110996	0,037491046
6	24	0,667673059	0,03612286
7	25	0,66478333	0,034345744
8	26	0,693144457	0,035803001
9	27	0,777822932	0,03165774
10	28	0,811785196	0,033030425
11	29	1,167222375	0,032521078
12	30	1,208174793	0,033655619
13	31	1,529253346	0,035415302
14	32	1,606415094	0,033761294
15	33	2,130351959	0,03589667
16	34	2,172305878	0,036601235
17	35	2,057930425	0,034681432
18	36	2,165207729	0,036480653
19	37	2,19305606	0,036953923
20	38	2,207184325	0,037190822
21	39	2,217763516	0,037368477
22	40	2,256894049	0,03802487
23	41	2,078419811	0,035024501
24	42	2,445573295	0,034145613
25	43	2,500063498	0,034901885
26	44	2,420772859	0,033799821
27	45	3,068004354	0,036051598
28	46	3,004354136	0,035851272
29	47	3,020348923	0,03603992
30	48	3,004057937	0,035847123
31	49	2,949331818	0,033263036
32	50	2,930135279	0,033047196
33	51	2,879665635	0,032480513
34	52	2,950960574	0,031159972
35	53	2,936067137	0,031003397

Продовження таблиці 3.4

36	54	2,600901708	0,024424172
37	55	2,59050016	0,024326916
38	56	2,554828151	0,023993579
39	57	2,517123182	0,023641337
40	58	2,514843179	0,023620122
41	59	2,435144513	0,022016001
42	60	2,396351368	0,021666894
43	61	1,714724238	0,013620281
44	62	1,590943396	0,01263876
45	63	1,670943396	0,013275459
46	66	1,650108853	0,013111312
47	67	1,620859942	0,01288098
48	68	1,610497097	0,012799115
49	69	1,590214078	0,012639754
50	70	1,586734398	0,012612117
51	71	1,581603774	0,012571583
52	72	1,534680697	0,012202337
53	73	1,552971698	0,01234611
54	74	1,544629898	0,012280499
55	75	1,532888244	0,012187877
56	76	1,5312627	0,012175182
57	77	1,524600871	0,012122695
58	78	1,517953556	0,012070322

Виміряні значення температури були отримані з абсолютною похибкою пірометра Fluke 574, яка зазначена в додатку Г. Абсолютна похибка вимірювання температури поверхні сонячного модуля становить 0,4 °С для виміряних значень температури від 19 до 70 °С і 1 °С для виміряних значень температури від 71 до 78 °С.

Отже, нами була розрахована абсолютна похибка непрямих вимірювань ефективності для кожного вимірювання на основі абсолютних похибок виміряних параметрів, які отримані з похибок засобів вимірювання, прописаних в технічній документації на ці ж засоби вимірювання, та на основі виміряних значень параметрів. Також визначена абсолютна похибка вимірювання температури поверхні сонячного модуля, яка зазначена в технічній документації пірометра.

ВИСНОВКИ

Отже, в роботі можна навести такі висновки:

- проведено теоретичний аналіз фотоелектричних модулів та кожного засобу вимірювання, який використовується в інформаційно-вимірювальній системі;
- визначено постановку завдання для цієї роботи;
- розроблено план подальшого дослідження фотоелектричних модулів з використанням інформаційно-вимірювальної системи;
- розроблено саму інформаційно-вимірювальну систему для дослідження роботи фотоелектричної станції;
- зібрано технічні характеристики кожного засобу вимірювання з визначеною моделлю;
- розроблено схему лабораторної установки для проведення дослідження в майбутньому;
- проведено та описано попереднє коротке дослідження залежності ефективності роботи фотоелектричних модулів від впливу температури з використанням деяких засобів вимірювання з інформаційно-вимірювальної системи;
- занесено отримані дані в одну з таблиць роботи;
- проведено розрахунки для отримання значень ефективності на основі вимірюваних даних;
- побудовано графік залежності ефективності від температури;
- детально проаналізовано отриманий графік залежності та наведено висновки щодо недосконалості проведеного дослідження та щодо того, як недопустити помилки при проведенні досліджень в майбутньому;
- виконано метрологічний аналіз точності отриманих вимірюваних та розрахованих даних за допомогою розрахунків похибок непрямих вимірювань.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Цих В. С., Кульчак А. М., Яворський А. В. Аналіз досліджень впливу температури на деградацію та ефективність роботи сонячних панелей. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2024. №2. С. 37–45.
2. Asenath W. Kiprono, Alberto Ibáñez Llario. Solar Pumping for Water Supply. Harnessing solar power in humanitarian and development contexts : book / Edited by Asenath W. Kiprono, Alberto Ibáñez Llario. Rugby, Warwickshire, United Kingdom : *Practical Action Publishing*, 2020. 252 p.
3. Литвиненко В. М. Дослідження технологічних процесів у виробництві структур кремнієвих діодів і сонячних елементів : навч. посіб. Херсон : Херсонський державний аграрно-економічний університет, 2024. 128 с.
4. Зубко Є. І., Швець Є. Я. Технологія виготовлення контактних систем монокристалічних пористих кремнієвих сонячних елементів на пористому кремнії : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.27.06. Кременчук, 2015. 23 с.
5. Цих В. С., Кульчак А. М., Яворський А. В. Особливості підвищення ефективності функціонування двосторонніх фотоелектричних модулів. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті* : матеріали XXIV міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 21-23 травня 2025 р. Київ, 2025. С. 279–280.
6. Кульчак А. М., Цих В. С., Яворський А. В. Аналіз параметрів щодо ефективності функціонування двосторонніх фотоелектричних модулів. *Приладобудування: стан і перспективи* : матеріали XXIV міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 13-14 травня 2025 р. Київ, 2025. С. 357-360.
7. Фотометрія. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/cdp/2lysyj_kurs_zagalnoyi_fiziky_sluhachiv-inozemciv/621.htm (дата звернення: 28.05.2026).
8. TW Solar. URL: <https://www.solargarden.com.ua/wp-content/uploads/2025/03/datasheet-sonyachna-panel-tongwei-solar-twmnd-72hd590-bifacial.pdf> (дата звернення: 28.05.2026).

9. Datasheet DNA 440M. URL: https://soncedim.com.ua/uploads/Datasheet-DNA-440M.pdf?srsltid=AfmBOor03hPMokOjRIJUBXjcd20M-jxNCYkEKvX_Q1vw4J9khQRGQZr4 (дата звернення: 28.05.2026).

10. Курак В. В., Андропова О. В., Дон Н. Л. Основи сонячної електроенергетики : навчальний посібник. Херсон : Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В. С., 2024. 348 с.

11. Райтер П. М. Обладнання та порядок виконання роботи для практичного заняття «Моделювання роботи розумної мережі»: лабораторний практикум. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2022. 20 с.

12. Цих В. С., Яворський А. В. Засоби вимірювальної техніки : лабораторний практикум. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2022. 127 с.

13. Костян А. А. Люкметри. URL: <https://kpksynergia.com/wp-content/uploads/2024/08/urok-11-12-12.09-kostyan-a.a.-gr.-2e-1-sistemi-elektrichnogo-osvitlennya-ta-oprominennya.pdf> (дата звернення: 27.05.2026).

14. Цих В. С., Яворський А. В., Миндюк В. Д. Основи метрології та забезпечення якості : лабораторний практикум. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. 61 с.

15. Кульчак А. М., Цих В. С. Дослідження інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів фотоелектричної станції з метою підвищення ефективності її роботи : науково-дослідна робота. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2026. 23 с.

16. Кульчак А. М., Цих В. С., Яворський А. В. Дослідження параметрів роботи фотоелектричних модулів для підвищення їх ефективності. *Приладобудування: стан і перспективи* : матеріали XXV міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 12-13 травня 2026 р. Київ, 2026. С. 379-382.

17. OPERATING INSTRUCTIONS PL-110SM Solar Radiation. URL: https://pf.agh.edu.pl/home/wfiis/pracfiz/Urzadzenia_pomiarowe/elektryczny/instrukcje/man_Vltcrft110SM.pdf (дата звернення: 07.06.2026).

18. DE-3350 Digital Light Meter. URL: <https://www.deree.com.tw/uploadfiles/79/EDM-NEW/de-3350.jpg> (дата звернення: 07.06.2026).
19. AKTAKOM – ATT-1004 Hot Wire Anemometer. URL: https://www.aktakom.com/products/index.php?SECTION_ID=167&ELEMENT_ID=723 (дата звернення: 07.06.2026).
20. AKTAKOM – ATT-1004 Анемометр заказать у производителя онлайн. URL: https://www.aktakom.ru/kio/index.php?SECTION_ID=2120&ELEMENT_ID=11289742 (дата звернення: 07.06.2026).
21. 574 – Fluke. URL: https://media.fluke.com/225fdad5-f5f6-4ac4-95a9-b10800be7ed9_original%20file.pdf (дата звернення: 07.06.2026).
22. Manual Leica DISTO A5 (page 1 of 14) (English) – Libble.eu. URL: <https://www.libble.eu/leica-disto-a5/online-manual-794247/#error> (дата звернення: 07.06.2026).
23. UT219 SERIES. URL: <https://agelectronica.lat/pdfs/textos/U/UT-219DS.PDF> (дата звернення: 07.06.2026).
24. Промисловий цифровий мультиметр UNI-T UT195E. URL: <https://uni-t.ua/uk/catalog/industrial-digital-multimeter-uni-t-ut195e/> (дата звернення: 07.06.2026).
25. Fronius Smart Meter TS 65A-3. URL: <https://www.fronius.com/da/denmark/solar-energy/installers-partners/technical-data/all-products/system-monitoring/hardware/fronius-smart-meter/fronius-smart-meter-ts-65a-3> (дата звернення: 07.06.2026).
26. MI 2892 – Аналізатор якості електроенергії. Клас А (УКР). URL: https://metrel.com.ua/files/MI_2892_Anal%D1%96zator_jakost%D1%96_elektroenerg%D1%96%D1%97_Klas_A_UKR_.pdf (дата звернення: 07.06.2026).
27. Solar Survey 100/200R Series. URL: <https://www.seaward.com/gb/support/download/372/> (дата звернення: 07.06.2026).

28. Цифровий тестер потужності фотоелектричних модулів UNI-T UT673PV. URL: <https://f00.psgsm.net/product/918921/unit-ut673pv-data-sheet-english.pdf> (дата звернення: 07.06.2026).

29. PAR38 120W E27 24V SP 10D 1CT/12. URL: <https://media.adeo.com/mkp/7d20f42091c526b59bfc6a82eb9e5ee1/media.pdf> (дата звернення: 11.06.2026).

ДОДАТОК А

Піранометр Voltcraft PL-110SM

На рисунку А.1 наведені метрологічні характеристики піранометра.

8. TECHNICAL DATA

Power supply:	3 x 1.5 V battery type AAA
Resolution:	1 W/m ² or BTU/(ft ² *h)
Measurement range illumination level:	0 – 1999 W/m ² or 634 BTU/(ft ² *h)
Reading frequency:	4 /sec.
Accuracy:	± 10W/m ² (±3BTU/(ft ² *h))or ± 5 %
Display:	3 ½ Digits
Operation temperature:	5 °C - 40 °C
Operation humidity:	0 - 80 %
Storage temperature:	-10 °C - 60 °C
Storage humidity:	0 - 70 %
Dimensions (L x W x H):	62 x 21 x 155 mm
Weight:	ca. 260 g

Рисунок А.1 – Метрологічні характеристики піранометра Voltcraft PL-110SM

ДОДАТОК Б

Люксметр DER EE DE-3350

Метрологічні характеристики люксметра, який також відноситься до інформаційно-вимірювальної системи, зображено на рисунку Б.1.

DER EE
Digital Light Meter
DE-3350 / DE-3351

■ FEATURES :

- Sensor Used The Exclusive Photo Diode & Color Correction Filter.
- Data Hold Function.
- Light Sensor Separate Design For Optimum Position Measure.
- Measurement Range Scale & Illuminated Units Are Displayed On LCD.
- Low Battery Indication.
- Offset Adjustment.
- High Accuracy & Sensitive.
- Large LCD Display And Distinct Digital Data Reading.
- Power Consumption : Approx. 2.5 mA
- Response Speed : 2.5 Times/Sec.
- 'OL' Display When Over Range.
- Cosine Angle Corrected

■ SPECIFICATIONS :

- **Indication** : 3 1/2 Digits LCD Readings With Maximum Value 2000.
- **Overload** : "OL" Display On LCD
- **Photometer Range(nm)** : 400~700
- **Sensitivity Peak Wavelength(nm)** : 550
- **Photometer Units** : LUX or Foot-Candle (FC); 1FC=10.76 LUX.
- **Measuring Range Scale** :
DE-3350 : 0.1 ~ 19990 LUX.
0.01 ~ 1999 FC
DE-3351 : 0.1 ~ 199900 LUX.
0.01 ~ 19990 FC
- **External Connection(DE-3351)** :
DC Jack Output (I.D. Ø3.5mm): DC 1mV/dgt (Max.)
DC 2V/F.S., Accuracy is $\pm 0.5\%$ rdg compare with meter's output.



DE-3350

DE-3351

■ MEASUREMENT RANGES : (23°C $\pm$ 8°C, 80% R.H. MAX.)

Accuracy : $\pm(\%rdg+dgt)$

Model	LUX	Accuracy	FC	Accuracy
DE-3350	200	4%+5	20	4%+5
	2,000		200	
	20,000	5%+4	2,000	5%+4
DE-3351	200	4%+5	20	4%+5
	2,000		200	
	20,000	5%+4	2,000	5%+4
	200,000		20,000	

■ DIMENSIONS & WEIGHT :

- **Meter** :
148 (L) x 71 (W) x 36 (H)mm
(5.83" x 2.8" x 1.42")
- **Light Receiver**
85(L)x67(W)x32(H)mm
(3.35" x 2.64" x 1.26")
- **Weight** :
Approx.270g (0.6 lbs.)(including battery)

■ TEMP./HUMIDITY :

- **Operation** :
0°C~ 50°C(32°F~122°F)
<80% R.H.(no condensation)
- **Storage** :
-10°C~ 60°C(14°F~140°F)
<70% R.H.(no condensation)

■ ACCESSORIES :

- Battery 9V1
- Instruction Manual1
- Leather Gift Box.....1

Appearance and specification may be revised if needed without notice in price.

Рисунок Б.1 – Метрологічні характеристики люксметра DER EE DE-3350

ДОДАТОК В

Термоанемометр Актаком АТТ-1004

Метрологічні характеристики термоанемометра Актаком АТТ-1004 наведені на рисунку В.1.

Specifications:

General specifications:

- Circuit: one-chip of micro-processor LSI circuit
- Large dual function display: 0.5in / 13 mm
- Telescope probe: glass thermistor placed in a small measuring head of 0.5in / 12mm on a telescopic handle
- Sampling time: 0.8 s. (approx.)
- Data output: RS-232 interface
- Temperature measurement: 32°F to 122°F / 0°C to 50°C
- Operating humidity: less than 80% RH
- Power Current: Approx. DC 30mA
- Dimension: 7.1 x 2.8 x 1.3 in / 180 x 72 x 32 mm
- Weight: 0.78 lb / 355 g

Electrical specification:

Measurement	Range	Resolution	Accuracy
m/s	0.2-20.0 m/s	0.1 m/s	(5% + 1d) reading or (1% + 1d) full scale
km/h	0.7-72.0 km/h	0.1 km/h	
ft/min	40-3940 ft/min	1 ft/min	
mile/h	0.5-44.7 mile/h	0.1 mile/h	
knots	0.4-38.8 knots	0.1 knots	

Рисунок В.1 – Метрологічні характеристики термоанемометра Актаком АТТ-1004

Технічні характеристики термоанемометра в режимі вимірювання швидкості вітру наведені в таблиці В.1.

Таблиця В.1 – Технічні характеристики термоанемометра в режимі вимірювання швидкості вітру

Діапазон вимірювань, м/с	Значення одиниці найменшого розряду, м/с	Абсолютна похибка вимірювань, м/с
0,5...20	0,1	$\pm(0,05 \times V + 0,2)$

де V – виміряне значення швидкості вітру, м/с.

Технічні характеристики термоанемометра в режимі вимірювання температури повітря наведені в таблиці В.2.

Таблиця В.2 – Технічні характеристики термоанемометра в режимі вимірювання температури повітря

Діапазон вимірювання, °C (°F)	Значення одиниці найменшого розряду, °C (°F)
0-50 (32-122)	0,1 (0,1)

Загальні технічні параметри термоанемометра наведені в таблиці В.3.

Таблиця В.3 – Загальні технічні параметри термоанемометра

Індикатор	ЖКИ 3,5 розряду двосторонній
Додаткові одиниці індикації швидкості вітру	км/год, фут/хв, вузли, милі/год
Тип датчика швидкості вітру /датчика контролю температури	термістор
Джерело живлення	6 батарей типу «ААА», 1,5 В
Робочі умови експлуатації: температура, °C / вологість, %	Від 0 до 50 / до 80
Габаритні розміри, мм (д×ш×в): вимірювального блоку / датчика швидкості вітру	185×80×35 / довжина від 250 до 950, Ø12
Діаметр чутливої частини датчика швидкості вітру, мм	11
Маса, г	405

ДОДАТОК Г

Пірометр Fluke 574

Метрологічні характеристики пірометра наведені на рисунку Г.1.

Specifications	
Temperature Range	- 30 to 900°C (- 25 to 1600°F)
Display Resolution	0.1°C (0.2°F)
Accuracy (Infrared)	± 0.75% of reading or ± 0.75K (± 1.5°F), whichever is greater at 25°C (77°F) ambient temperature, ± 2K (± 4°F) for targets below -5°C (23°F)
Ambient derating	< 0.05K/K or < 0.05%/K, whichever is greater at + 25°C (77°F) ± 25K (± 45°F)
Optical Resolution (Standard Focus)	60:1 (19mm spot size at 1.15 M.) (0.75in. spot size at 3.8 feet)
Optical Resolution (Close Focus)	50:1 (6mm spot size at 0.3 M.) (0.24in. spot size at 0.98 feet)
Accuracy (Thermocouple K & J)	± 2K or ± 0.75%, whichever is greater
Accuracy (Thermistor)	
-30 to 0°C (-22 to 32°F)	± 0.6K
0 to 70°C (32 to 158°F)	± 0.4K
70 to 100°C (158 to 212°F)	± 1K
100 to 120°C (212 to 248°F)	± 1.5K
Repeatability (Infrared)	± 0.5% of reading or ± 0.5°C (1°F), whichever is greater, ± 1°C (± 2°F) for targets below -5°C (23°F)
Response Time (95%)	250 mSec
Hot Spot Detection (30%)	85 mSec
Spectral Range	8 to 14 µm
Ambient Operating Range	0 to 50°C (32 to 122°F)
Storage Temperature (without batteries)	-20 to 50°C (-4 to 122°F)
Analog output	1 mV/°C(°F)
Digital Output	RS232
Power	2 x 1.5 V Alkaline Type AA
Battery Life	13 hrs. (50% laser and 50% backlight on)
Power supply (External)	7.5 V ≥ 200 mA (Using the power supply the display automatically switches on)
Dimensions	200 x 170 x 50 mm (7.9 x 6.7 x 2 inches)
Tripod Mount	1/4"-20 UNC

Рисунок Г.1 – Метрологічні характеристики пірометра Fluke 574

ДОДАТОК Д

Лазерний далекомір Leica DISTO™ A5

Метрологічні характеристики лазерного далекоміра наведені на рисунку Д.1.

Technical Data

Range (use target plate for longer distances)	0.05 m to 200 m 0.2 ft to 650 ft
Measuring accuracy up to 30 m (2 σ , standard deviation, room temperature)	typ.: $\pm 1.5\text{mm}^*$
Smallest unit displayed	1 mm
Laser class	II
Laser type	635 nm, < 1 mW
$\varnothing$ laser spot (at distance)	6 / 30 / 60 mm (10 / 50 / 100 m)
Autom. switch off laser	3 min
Autom. switch off instrument	6 min

Integrated telescopic viewer	2x magnification
Display illumination	✓
Integrated level	✓
Multifunctional endpiece	✓
Timer	✓
Single Measurement	✓
Maximum, Minimum, Continuous Measurement	✓
Historical storage of	20 values
Indirect Measuring functions with Pythagoras	✓
Storage of constant	✓
Area/Volume calculation with room calculations	✓
Addition/Subtraction	✓
Tripod thread	✓
Battery life, Type AA, 2 x 1.5V	up to 10 000 measurements
IP rating	IP 54 splash proof, dust proof
Dimension	148 x 64 x 36 mm
Weight (with batteries)	241 g
Temperature range:	
Storage	-25°C to +70°C (-13°F to +158°F)
Operating	-10°C to +50°C (-14°F to +122°F)

* maximum deviation occurs under unfavourable conditions such as bright sunlight or when measuring to poorly reflecting or very rough surfaces. For distances over 30 m the maximum deviation may increase to a maximum of $\pm 10\text{ mm}$.

Рисунок Д.1 – Метрологічні характеристики лазерного далекоміра Leica DISTO™ A5

ДОДАТОК Е

Струмовимірювальні кліщі UNI-T UT219DS

Метрологічні характеристики струмовимірювальних кліщів наведені на рисунку Е.1.

Features				
Auto/manual range/ZERO mode				
MAX/MIN				
True RMS/auto power off				
IP54/2m drop proof				
Data hold/relative mode				
Auto backlight				
Low battery indication				
3-phase motor sequence test (UT219M/DS)				
LoZ input for ghost voltage measurement				
Temperature and μ A measurements (flame sensor) (UT219M/DS)				
Inrush current/AC+DC voltage/V+A dual display (UT219DS)				

Specifications	Range	UT219E	UT219M	UT219DS
Certificates	CE, UKCA, cETLus, GS			
AC current (A)	600A	$\pm(1.8\%+6)$	$\pm(1.8\%+6)$	$\pm(1.8\%+6)$
DC current (A)	600A			
AC voltage (V)	1000V	$\pm(1\%+6)$	$\pm(1\%+6)$	$\pm(1\%+6)$
DC voltage (V)	1000V	$\pm(0.6\%+3)$	$\pm(0.6\%+3)$	$\pm(0.6\%+3)$
LoZ ACV	600V	$\pm(2.5\%+6)$	$\pm(2.5\%+6)$	$\pm(2.5\%+6)$
Resistance (Ω)	60M Ω	$\pm(1\%+3)$	$\pm(1\%+3)$	$\pm(1\%+3)$
Capacitance (F)	60mF	$\pm(4\%+7)$	$\pm(4\%+7)$	$\pm(4\%+7)$
Frequency (Hz)	10Hz~10MHz 600Hz~40MHz	$\pm(0.1\%+6)$	$\pm(0.1\%+5)$	$\pm(0.1\%+6)$
Duty cycle	0.1%~99.9%	$\pm(2.6\%+7)$		$\pm(2.6\%+7)$
Temperature	-40°C~1000°C -40°F~1832°F		$\pm(2\%+5)$ $\pm(2\%+9)$	$\pm(2\%+5)$ $\pm(2\%+9)$
Display count		6000	6000	6000
Jaw opening		33mm	33mm	33mm
AC current frequency response		40Hz~400Hz	40Hz~400Hz	40Hz~400Hz
AC voltage frequency response		40Hz~400Hz	40Hz~400Hz	40Hz~1kHz
3-phase motor sequence test			600V	600V
Low pass filter				1kHz, 3dB attenuation
V+A dual display				V
Diode test		12V	3V	3V
Measurement sampling rate		3 times/s	3 times/s	5 times/s
Analog bar sampling rate		10 times/s		20 times/s
Analog bar		31 segment		31 segment
Display interface (LCD)		Single	Single	Dual
Category ratings	CAT III 1000V, CAT IV 600V			

Characteristics	
Standard accessories	Test leads, batteries, carrying bag, point contact temperature probe (UT219M/UT219DS), English manual (German, French, Spanish optional)
Power	1.5V battery (R03) x 3
Display	35 x 31mm
Product size	234.6 x 82 x 47mm
Product net weight	310g
Standard individual packing	Gift box, blister
Standard quantity per carton	10pcs
Standard carton measurement	490 x 295 x 330mm
Standard carton gross weight	UT219E: 8kg, UT219M/UT219DS: 8.2kg

Рисунок Е.1 – Метрологічні характеристики струмовимірювальних кліщів UNI-T UT219DS

ДОДАТОК Є

Мультиметр UNI-T PRO UTM1195E

Метрологічні характеристики мультиметра зображені на рисунку Є.1.

Технічні характеристики

Вимірювання	Діапазон	Точність
Постійна напруга	600 мВ ~ 1000 В	±(0.5%+3)
Змінна напруга	600 мВ ~ 750 В	±(0.7%+3)
LoZ ACV	600 В	±(2.0%+3)
Постійний струм	600 мкА ~ 20 А	±(0.8%+3)
Змінний струм	600 мкА ~ 20 А	±(1.0%+3)
Опір	600 Ом ~ 60 МОм	±(0.8%+2)
Ємність	6 нФ ~ 60 мФ	±(3%+5)
Частота	60 Гц ~ 10 МГц	±(0.1%+4)
Прогальність	0.1% ~ 99.9%	±(2.0%+5)
Функції		
Аналогова шкала	31 сегмент	
True RMS	+	
Фільтр нижніх частот	1 кГц 3 дБ загасання	
Тестування діодів, перевірка провідності	3.5 В	
Авто / ручний вибір режиму	+	
Автовимкнення	+	
Звукове продзвонювання	+	
Індикатор розрядження батареї	+	
Функція утримання даних	+	
ФункціяMAX/MIN	+	
Вибір функцій	+	
Ліхтарик	+	
Автоматичне підсвічування	+	
Тест на падіння з 2 м	+	
Рівень захисту	IP65	
Загальні дані		
Живлення	9 В6F22 карбон-цинкова або 6LR61 алкалінова батарея	
Екран	РКД, 66 × 51 мм	
Розміри	195 × 95 × 58 мм	
Вага	473 г	

Рисунок Є.1 – Метрологічні характеристики мультиметра UNI-T PRO UTM1195E

ДОДАТОК Ж

«Розумний» лічильник електроенергії Fronius Smart Meter TS 65A-3

Технічні характеристики «розумного» лічильника електроенергії зображені на рисунку Ж.1.



Fronius Smart Meter TS*
The intelligent electricity meter with touchscreen operation.

			Fronius Smart Meter	
			TS 100A-1	TS 65A-3
Technical Data	Nominal voltage	V	230	208 - 400
	Operating voltage range	%	-30 to +20	-20 to +20
	nominal frequency	Hz	45 - 65	45 - 65
	maximum current	A	1 x 100	3 x 65
	grid type		1PN	2PN, 3P, 3PN
	Power line cross section	mm ²	1 - 25	1 - 16
	Neutral line cross section	mm ²	1 - 25	1 - 16
	CT's & Communication line cross section	mm ²	0.05 - 1.5	0.05 - 1.5
	Power consumption	W	<=1	<=1
	Starting current	mA	40	20
	Accuracy class		1	1
	Active energy accuracy		Class 1 (EN 62053-21) / Class B (EN 50470-3)	
	Reactive energy accuracy		Class 2 (EN 62053-23)	
	Short-time overcurrent		3,000 A / 10 ms	1,950 A / 10 ms
	Mounting		Indoors (DIN rail)	
	Housing		2 modules DIN 43880	3 modules DIN 43880
	Degree of protection		IP 51 (front frame), IP 20 (terminals)	
	Ambient temperature range	°C	-25 to +65	
	Dimensions (height x width x depth)	mm	91.5 x 35.8 x 63.0	91.5 x 53.8 x 63.0
	Weight	g	160	240
	Interface to inverter		Modbus RTU (RS485)	
	Display		3 x 8 digit / Touchscreen	
	Current Transformers		-	-

Рисунок Ж.1 – Технічні характеристики «розумного» лічильника електроенергії Fronius Smart Meter TS 65A-3

ДОДАТОК 3

Аналізатор якості електроенергії METREL MI 2892 Power Master

Метрологічні характеристики аналізатора якості електроенергії зображені на рисунку 3.1.

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ФУНКЦІЯ		
Входи напруги	AC+DC	
Кількість входів	5	
Номинальний діапазон напруги (L – N)	Фаза (L-N): 50 ... 1000 Vrms / Лінія (L-L): 50 ... 1730 Vrms	
Діапазон вимірювання	10% ... 150% номінальної напруги	
Похибка	IEC 61000-4-30 Клас A, $\pm 0.1\%$ номінальної напруги	
Частота дискретизації	7 кВиб/с @ 50/60 Hz, синхронізація з частотою мережі	
Діапазон частот мережі	1.7 кВиб/с @ VFD (5 Hz - 120 Hz)	
	12.2 кВиб/с @ 400 Hz	
	42.5 ... 69.0 Hz ± 10 mHz	
	5 ... 120 Hz ± 10 mHz (VFD)	
	335.0 ... 465.0 Hz ± 100 mHz	
Входи струму	AC+DC	
Кількість входів	4	
Діапазон вимірювання:	10.0 mVrms ... 300.0 mVrms $\pm 0.25\%$ U _{rms}	
Діапазон 1:	50.0 mVrms ... 3.000 Vrms $\pm 0.25\%$ U _{rms}	
Діапазон 2:		
Похибка струмових кліщів:		
A 1588	50 mA _{rms} ... 100 A _{rms} $\pm 0.5\%$ of m.v.	
A 1281	50 mA _{rms} ... 1200 A _{rms} $\pm 0.5\%$ of m.v.	
A 1069	500 mA _{rms} ... 200 A _{rms} $\pm 1.0\%$ of m.v.	
A 1501 / A 1502 / A 1227 / A 1445	3 A _{rms} ... 6000 A _{rms} $\pm 1.5\%$ of m.v.	
A 1503 / A 1446	6 A _{rms} ... 12000 A _{rms} $\pm 1.5\%$ of m.v.	
Функції	Діапазон вимірювання	Похибка
Потужність (P, Q, S, cos ϕ , PF...)	Залежить від напруги і вибраних кліщів	IEC 61557-12 Клас 1
Енергія	Залежить від напруги і вибраних кліщів	Активна: IEC 62053-21 Клас 1 Реактивна: IEC 62053-23 Клас 2
Гармоніки (DC ... 50th) @ 50/60 Hz	0 ... 20% номінальної напруги	IEC 61000-4-7 Клас 1
Гармоніки (DC ... 13th) @ 400 Hz		
Гармоніки (DC ... 20th) @ VFD (5 - 16 Hz)		
Гармоніки (DC ... 13th) @ VFD (16 - 33 Hz)		
Гармоніки (DC ... 5th) @ VFD (33 - 120 Hz)		
Інтергармоніки (1 ... 50th) @ 50/60 Hz	0 ... 20% номінальної напруги	IEC 61000-4-7 Клас 1
Інтергармоніки (1 ... 20th) @ VFD (5 - 16 Hz)		
Інтергармоніки (1 ... 13th) @ VFD (16 - 33 Hz)		
Інтергармоніки (1 ... 5th) @ VFD (33 - 120 Hz)		
Флікер	0.2 ... 10	IEC 61000-4-15 Клас F3
Сигналізація мережі	0 ... 15% номінальної напруги	IEC 61000-4-30 Клас A
Небаланс	Напруга: 0 ... 5% Струм: 0 ... 20%	
Температура	-10 ... 85 °C	± 0.5 °C
Провали, Випливи	10 ... 150% номінальної напруги	$\pm 0.2\%$ номінальної напруги ± 1 період
Перебої	0 ... 10% номінальної напруги	± 1 період
Регістрація		
Пам'ять	8GB microSD, підтримується до 32GB	
Загальний реєстратор		
Період інтегрування	1 секунда... 2 години	
Записувані сигнали	> 1000 (напруги, струми, гармоніки, потужність...) Мін., макс. та середнє значення за інтервал - Події напруги - Індивідуальні сигнали тривоги > 1 рік (залежно від об'єму SD карти)	
Тривалість		
Реєстратор форми сигналу		
Тривалість	До 20 секунд форми сигналу напруги та струму	
Запуск	- Ручний, події напруги, індивідуальні сигнали тривоги, рівень напруги або струму (кидок)	
Реєстратор перехідних процесів		
Частота дискретизації	> 49 кВиб/с	
Тривалість	До 50 періодів сигналу напруги та струму	
Запуск	Ручний, опінаюча або рівень напруги	
Загальні		
Дисплей	4.3" кольоровий TFT (480 x 272)	
Зв'язок	USB, Ethernet, RS-232	
Синхронізація часу	GPS приймач (A 1355)	
Живлення	110 ... 240 Vac або 6 x NiMH акумуляторів, розмір AA	
Категорія перенапруги	CAT IV / 600 V або CAT III / 1000 V	
Вага	0.96 kg	
Розміри	230 x 140 x 80 mm	

Рисунок 3.1 – Метрологічні характеристики аналізатора якості електроенергії
METREL MI 2892 Power Master

ДОДАТОК И

Фотоелектричний вимірювач сонячної радіації Seaward Solar Survey 200R

Технічні характеристики фотоелектричного вимірювача сонячної радіації наведені на рисунку И.1.

Comparison Chart:		
	SS100	SS200R
IEC 62446 compliant	•	•
Irradiance measurement (using solar reference cell)	•	•
Compass function	•	•
Roof pitch measurement	•	•
Ambient temperature	•	•
PV module temperature		•
Data logging function		•
Wireless connectivity		•

Technical Specification:	
Irradiance	
Display Range	100 – 1500 W/m ² or 30 – 500 BTU/hr-ft ²
Measurement Range	100 – 1250 W/m ² or 30 – 400 BTU/hr-ft ²
Resolution	1 W/m ² or 1 BTU/hr-ft ²
Temperature	
Display Range	-30°C to +125°C
Measurement Range	-30°C to +125°C
Resolution	1°
Compass Bearing	
Display Range	0° to 360°
Measurement Range	0° to 360°
Resolution	1°
Inclinometer	
Display Range	0° to 90°
Measurement Range	0° to 90°
Resolution	1°

General Specification:	
Instrument Dimensions and Weight	
Weight	0.25kg / 0.6lb
Dimensions	14.8 x 8.0 x 3.3cm / 5.8 x 3.2 x 1.3"
Display	Custom LCD
Power Source	2 x AA Alkaline Batteries
Battery Life	>20,000 Readings
Auto power down	After 2 minutes (unless in transmit mode)
Onboard memory	Datasets 5000 (Survey 200R only)
Connectivity (Survey 200R only)	
Sample Rate	1 to 60 minutes (user definable)
Connectivity	USB download to PC (using free DataLogger – available online) Wireless connection to PV150/PV200/PV210/Solar Utility Pro (range c. 30m/100 ft) Frequency 433MHz (Rest of World)/ 915MHz (US)

Рисунок И.1 – Технічні характеристики фотоелектричного вимірювача сонячної радіації Seaward Solar Survey 200R

ДОДАТОК І

Фотоелектричний тестер UNI-T UT673PV

Технічні характеристики фотоелектричного тестера наведені на рисунку І.1.

Technical Specifications

Specification		
Pmax	5~800W	±(1.0%+10)
Imp	0~35A	±(1.5%+5)
Vmp	12~60V	±(1.5%+5)
Voc	12~60V	±(1.5%+5)
Isc	0~35A	±(1.5%+5)
Features		
Display	Large LCD (52 x 66mm)	
Reverse polarity connect protection	✓	
Over voltage protection	✓	
Over current protection	✓	
Over temperature protection	✓	
Over power protection	✓	
Manual MPPT test	✓	
Data hold	✓	
Power supply	No battery needed powered by solar panel.	
Overcategory	CAT 0 60V	
Characteristics		
Product color	Red + Black	
Product size	143 x 74 x 25mm	

Рисунок І.1 – Технічні характеристики фотоелектричного тестера UNI-T
UT673PV