

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

Диндин Марія Михайлівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.91
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення методики та підбір засобів вимірювальної техніки для експрес-
контролю вживаних фотоелектричних модулів з метою їх вторинного
використання
(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 М. М. Диндин
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Яворський Андрій Вікторович , 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)

М. Івано-Франківськ – 2025 рік

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 перший (бакалаврський) рівень вищої освіти

Спеціальність 152 - " Метрологія та інформаційно- вимірювальна техніка"

(шифр і назва)

Освітня програма Інженерія відновлюваної енергетики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 20__ року

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

Диндин Марія Михайлівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення методики та підбір засобів вимірювальної техніки для експрес-контролю вживаних фотоелектричних модулів з метою їх вторинного використання

керівник роботи Яворський А.В. к. т. н. , доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "29" квітня 2025 року №268/7

2. Строк подання студентом роботи "09" червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи

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

1. Проаналізувати типи фотоелектричних модулів, технічні характеристики та типові дефекти, що виникають під час тривалої експлуатації.

2. Розробити методику експрес-контролю вживаних ФЕМ, визначити вимоги до її реалізації та обґрунтувати вибір вимірювальних засобів.

3. Провести експериментальні вимірювання параметрів вживаних модулів типу YINGLI YL 230-240 PT-29B та здійснити нормування результатів до умов STC.

4. Оцінити працездатність досліджених модулів за показниками деградації, класифікувати їх за технічним станом і сформулювати висновки щодо ефективності методики.

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

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

6. Консультанти розділів роботи

7. Дата видачі завдання “29” квітня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання (відповідно до наказу).	29.04.2025 р.	виконано
2	Розроблення 1 розділу: «Аналіз стану питання експрес-контролю фотоелектричних модулів».	30.04.2025 – 08.05.2025 р.	виконано
3	Розроблення 2 розділу: «Розробка методики експрес-контролю та підбір засобів виміральної техніки».	09.05.2025 – 20.05.2025 р.	виконано
4	Розроблення 3 розділу: «Проведення експериментальних досліджень розробленої методики експрес-контролю придатності фотоелектричних модулів».	21.05.2025 – 29.05.2025 р.	виконано
5	Оформлення роботи.	30.05.2025 – 10.06.2025 р.	виконано

Студент _____

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Диндин М.М. «Розроблення методики та підбір засобів вимірювальної техніки для експрес-контролю вживаних фотоелектричних модулів з метою їх вторинного використання»
Дипломна робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису.
Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – Івано-Франківськ, 2025.

У цій кваліфікаційній бакалаврській роботі розглянуто розроблення методики та підбір засобів вимірювальної техніки для експрес-контролю вживаних фотоелектричних модулів з метою їх вторинного використання. Структурно робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг становить 26 сторінок, включаючи 35 рисунків і 7 таблиць. Бібліографія охоплює 108 офіційних та наукових джерел.

У першому розділі роботи проведено аналіз сучасного стану у сфері експлуатації та вторинного використання фотоелектричних модулів. Узагальнено основні типи сонячних панелей, їх характеристики та типові дефекти, що виникають в процесі тривалої експлуатації. Розглянуто принципи та ефективність існуючих методів неруйнівного контролю технічного стану ФЕМ. Висвітлено питання утилізації та перспектив вторинного використання вживаних модулів, з акцентом на тенденції в Україні.

У другому розділі досліджено основні підходи до реалізації експрес-контролю на практиці. Визначено вимоги до методики оперативної перевірки стану вживаних ФЕМ, наведено порівняльну характеристику сучасних вимірювальних засобів та обґрунтовано їх вибір для експериментального дослідження. Розроблено структуровану послідовність дій, яка дозволяє провести швидку оцінку модуля з мінімальними витратами часу та ресурсів.

Третій розділ зосереджений на експериментальній перевірці розробленої методики. Здійснено вимірювання ключових електричних параметрів групи вживаних фотоелектричних модулів типу YINGLI YL 230-240 PT-29B. Проведено нормування результатів до стандартних умов STC із використанням панелі-свідка, а також розраховано відсоткову деградацію. На основі отриманих даних та проведеного аналізу зроблено висновки щодо експрес-контролю.

Результати роботи можуть бути застосовані в розробленні методики експрес-контролю для оперативної оцінки технічного стану вживаних фотоелектричних модулів з метою їх повторного використання. Запропонований підхід дозволяє швидко виявити функціонально придатні модулі, що забезпечує зменшення обсягів електронних відходів, зниження витрат на закупівлю нового обладнання та сприяє розвитку сталої енергетики. Результати дослідження можуть бути використані в практиці сервісного обслуговування сонячних електростанцій, під час технічного аудиту або у навчальних цілях при підготовці фахівців з відновлюваної енергетики.

Ключові слова: ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ МОДУЛЬ, ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЬ, ДІАГНОСТИКА, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ДЕГРАДАЦІЯ, STC, НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, I-V ХАРАКТЕРИСТИКА, ПОВТОРНЕ ВИКОРИСТАННЯ, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА.

ABSTRACT

Dyndyn M.M. "Development of a Methodology and Selection of Measurement Tools for Express Diagnostics of Used Photovoltaic Modules for the Purpose of Reuse". Bachelor's Thesis, manuscript form. Field of Study– 152 "Metrology and Information-Measuring Technology". – Ivano-Frankivsk, 2025.

This bachelor's qualification thesis is dedicated to the development of a methodology and selection of measurement tools for express diagnostics of used photovoltaic modules with the aim of their further reuse. Structurally, the thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references, and appendices. The total volume is 26 pages, including 35 figures and 7 tables. The bibliography comprises 108 official and scientific sources.

The first chapter analyzes the current state in the field of operation and reuse of photovoltaic modules. It summarizes the main types of solar panels, their characteristics, and typical defects that arise during long-term use. Principles and efficiency of existing non-destructive diagnostic methods for evaluating the technical condition of PV modules are reviewed. Issues of recycling and reuse prospects for used modules are also highlighted, with a particular focus on current trends in Ukraine.

The second chapter explores the main approaches to practical implementation of express diagnostics. The requirements for a rapid assessment methodology are defined, a comparative overview of modern measurement tools is provided, and the rationale for selecting the appropriate instruments for experimental research is presented. A structured diagnostic procedure is developed, enabling fast module assessment with minimal time and resource input.

The third chapter is dedicated to the experimental verification of the developed methodology. Measurements of key electrical parameters were conducted on a

group of used photovoltaic modules of the YINGLI YL 230-240 PT-29B type. The results were normalized to STC conditions using a reference panel, and the percentage degradation of each module was calculated. Based on the collected data and analysis, conclusions regarding the express diagnostics process were drawn.

The practical value of the thesis lies in the applicability of the developed express diagnostic methodology for rapid assessment of the technical condition of used photovoltaic modules for potential reuse. The proposed approach enables prompt identification of functionally viable modules, which contributes to reducing electronic waste, lowering equipment costs, and promoting sustainable energy development. The results of the study can be used in the maintenance of solar power systems, during technical audits, or as educational material for training specialists in the field of renewable energy.

Keywords: PHOTOVOLTAIC MODULE, EXPRESS DIAGNOSTICS, FAULT DETECTION, ENERGY EFFICIENCY, DEGRADATION, STC, NON-DESTRUCTIVE TESTING, I-V CHARACTERISTICS, REUSE, RENEWABLE ENERGY.

ЗМІСТ

Перелік основних позначень і скорочень символів.....	10
Вступ	11
Розділ 1. Аналіз стану питання експрес-контролю фотоелектричних модулів.....	13
1.1. Основні типи та характеристики фотоелектричних модулів.....	13
1.1.1. Монокристалічні сонячні панелі.....	13
1.1.2. Полікристалічні сонячні панелі.....	14
1.1.3. Тонкоплівкові сонячні панелі.....	15
1.1.4. Новітні технології.....	17
1.2. Причини вибракування та типові дефекти вживаних ФЕМ.....	20
1.2.1. Візуальні дефекти та їх причини.....	20
1.2.2. Електричні та приховані дефекти.....	24
1.3. Огляд методів контролю та діагностики ФЕМ.....	28
1.4. Утилізація і вторинне використання фотоелектричних модулів.....	35
1.4.1. Утилізація фотоелектричних модулів.....	35
1.4.2. Вторинне використання модулів.....	37
1.4.3. Приклади вторинного використання фотоелектричних модулів.....	38
1.4.4. Експлуатація та утилізація українських ФЕС.....	41
1.5. Засоби вимірювальної техніки для тестування модулів.....	43
1.6. Висновки до розділу 1.....	46

Розділ 2. Розробка методики експрес-контролю та підбір засобів вимірювальної техніки.....	48
2.1. Вимоги до методики експрес-контролю вживаних ФЕМ.....	48
2.2. Методика проведення експрес-діагностики вживаних фотоелектричних модулів.....	50
2.3. Підбір засобів вимірювальної техніки для реалізації експрес-контролю вживаних фотоелектричних модулів.....	53
2.4. Побудова схеми тестування і послідовність вимірювань.....	59
2.5. Приклад практичного застосування методики.....	61
2.6. Висновки до розділу 2.....	63
Розділ 3. Проведення експериментальних досліджень розробленої методики експрес-контролю придатності фотоелектричних модулів.....	65
3.1 Проведення експериментальних досліджень розробленої методики експрес-контролю придатності вживаних фотоелектричних модулів.....	65
3.2 Аналіз отриманих даних експрес-контролю фотоелектричних модулів	69
3.3 Висновки до розділу 3.....	81
Список використаних джерел.....	84

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ

ФЕС - Фотоелектрична станція

ФЕ – Фотоелемент

ФЕМ – Фотоелектричний модуль

EL - Electroluminescence Imaging (Електролюмінесцентна візуалізація)

IR - Інфрачервона термографія

NOCT - Nominal Operating Cell Temperature (Номінальна робоча температура модуля)

STC - Standard Test Conditions (Стандартні умови випробування)

UT- Ultrasonic Testing (Ультразвукове тестування)

ΔP- Відносна деградація потужності у відсотках

FF - Fill Factor (Коефіцієнт заповнення) — ефективність форми I-V кривої

I-V крива - Current-Voltage Curve (Залежність струму від напруги)

P_{mpp} - Maximum Power Point Power (Потужність у точці максимальної потужності)

I_{mpp} - Current at Maximum Power Point (Струм у точці максимальної потужності)

V_{mpp} - Voltage at Maximum Power Point (Напруга в точці максимальної потужності)

I_{sc} - Short Circuit Current (Струм короткого замикання)

V_{oc} - Open Circuit Voltage (Напруга холостого ходу)

ВСТУП

Актуальність роботи

У сучасних умовах активного розвитку відновлюваної енергетики особливого значення набуває питання ефективного використання фотоелектричних модулів (ФЕМ), що відпрацювали певний термін експлуатації. Згідно з дослідженнями, обсяг демонтажу ФЕМ, які не відповідають паспортним характеристикам або зазнали незначних пошкоджень, зростає щороку на десятки відсотків [1]. При цьому частина таких модулів зберігає функціональність, що дає підстави для їх вторинного використання в енергосистемах низької потужності, автономних або резервних джерелах живлення.

Актуальність даної теми зумовлена необхідністю розробки доступних, швидких та надійних методів оцінки стану вживаних ФЕМ. Існуючі методики, як правило, передбачають використання складного та дорогого лабораторного обладнання, що обмежує їх застосування у побутових або малих підприємницьких умовах. Разом з тим, розробка методів експрес-контролю дозволить значно знизити витрати на експлуатацію відновлюваних джерел енергії та зменшити екологічне навантаження шляхом повторного використання придатних до роботи модулів.

Науковці, зокрема А. А. Серeda [2], Т. Л. Гуревич [3] та інші, наголошують на важливості створення стандартів оцінювання залишкового ресурсу та ефективності вживаних сонячних модулів. У своїх роботах вони вказують на потребу адаптації вимірювальних засобів до умов поза лабораторією, з урахуванням змінних кліматичних і технічних факторів.

Результати роботи були представлені у доповіді: «Розроблення методики та підбір засобів вимірювальної техніки для експрес-контролю вживаних фотоелектричних модулів з метою їх вторинного використання / Васечко В. Б., Яворський А. В., Диндин М. М. // XXIV Міжнародна науково-технічна конференція „ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 13 – 14 травня 2025 р., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна. – С. 435-438.»

Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є розроблення методики експрес-контролю та обґрунтування вибору вимірювальних засобів для визначення працездатності вживаних фотоелектричних модулів з метою їх вторинного використання.

Об'єктом дослідження є вживані фотоелектричні модулі, предметом — методи і засоби їх діагностики в умовах обмеженого часу та ресурсів. Наукова новизна роботи полягає в розробленні універсальної методики експрес-оцінки стану ФЕМ, яка поєднує простоту виконання з достатньою точністю для прийняття рішень щодо подальшої експлуатації. Запропонована методика також враховує можливість використання недорогого портативного обладнання, що забезпечує її адаптацію до польових умов.

Предметом дослідження є методи експрес-контролю та засоби вимірювальної техніки, які застосовуються для оцінки технічного стану фотоелектричних модулів без їх демонтажу або пошкодження.

Методи дослідження У процесі дослідження застосовувались аналітичні методи (аналіз літературних джерел, огляд технічної документації), експериментальні вимірювання електричних параметрів модулів (P_{mp} , V_{oc} , I_{sc} , FF) з використанням цифрових тестерів, інфрачервоної термографії, а також розрахункові методи для нормування результатів до умов STC із застосуванням панелі-свідка.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення дослідження полягає у створенні бази для впровадження системи повторного використання фотоелектричних модулів у малих енергетичних проєктах, що, в свою чергу, сприятиме зниженню собівартості сонячної енергії та підтримці принципів кругової економіки.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

1.1. Основні типи та характеристики фотоелектричних модулів

Фотоелектричні (ФЕ) модулі є основою сучасної сонячної енергетики, перетворюючи сонячне випромінювання на електричну енергію. Ефективність та довговічність цих систем безпосередньо залежать від якості та стану окремих модулів. Експрес-контроль ФЕ модулів є критично важливим для забезпечення їхньої оптимальної роботи, виявлення дефектів на ранніх стадіях та мінімізації втрат.

Ринок фотоелектричних технологій пропонує різноманітні типи модулів, кожен з яких має унікальні характеристики, що впливають на їхню ефективність, вартість, довговічність та застосування.

1.1.1. Монокристалічні сонячні панелі

Монокристалічні сонячні панелі вирізняються своїм однорідним чорним або темно-синім кольором та заокругленими краями окремих комірок. Їхнє виробництво базується на вирощуванні єдиного кристала кремнію, що забезпечує високу чистоту матеріалу. Процес починається з вилучення чистого кремнію з кварциту (SiO_2) шляхом плавлення при температурах понад 1400°C , подальшої дистиляції для досягнення чистоти до 99.9999%, і додавання азоту та фосфору для створення високоефективного р-п переходу [4].

Ці модулі відомі своєю високою ефективністю, яка зазвичай коливається в діапазоні 18-21% і може перевищувати 20%. Сучасні дослідження демонструють рекордні показники ефективності для багатоперехідних сонячних елементів, що досягають 47.1%. Завдяки монокристалічній структурі, монокристалічні панелі мають найвищу потужність на одиницю площі, дозволяючи генерувати до 300 Вт з однієї стандартної панелі. Температурний коефіцієнт для монокристалічних

модулів становить від -0.3% до -0.5% на °C, що означає тимчасове зниження ефективності на 0.3-0.5% за кожен градус підвищення температури вище 25°C. Однак, вони загалом краще переносять високі температури порівняно з полікристалічними аналогами. Монокристалічні панелі також відрізняються високою довговічністю, часто служать довше, ніж полікристалічні, з річним показником деградації ефективності від 0.3% до 0.8%. Середній термін служби фотоелектричного модуля становить близько 30 років, а деякі виробники надають гарантії до 40-50 років. Початкова вартість монокристалічних панелей є найвищою серед поширених типів, в середньому від \$1 до \$1.50 за ват [6].

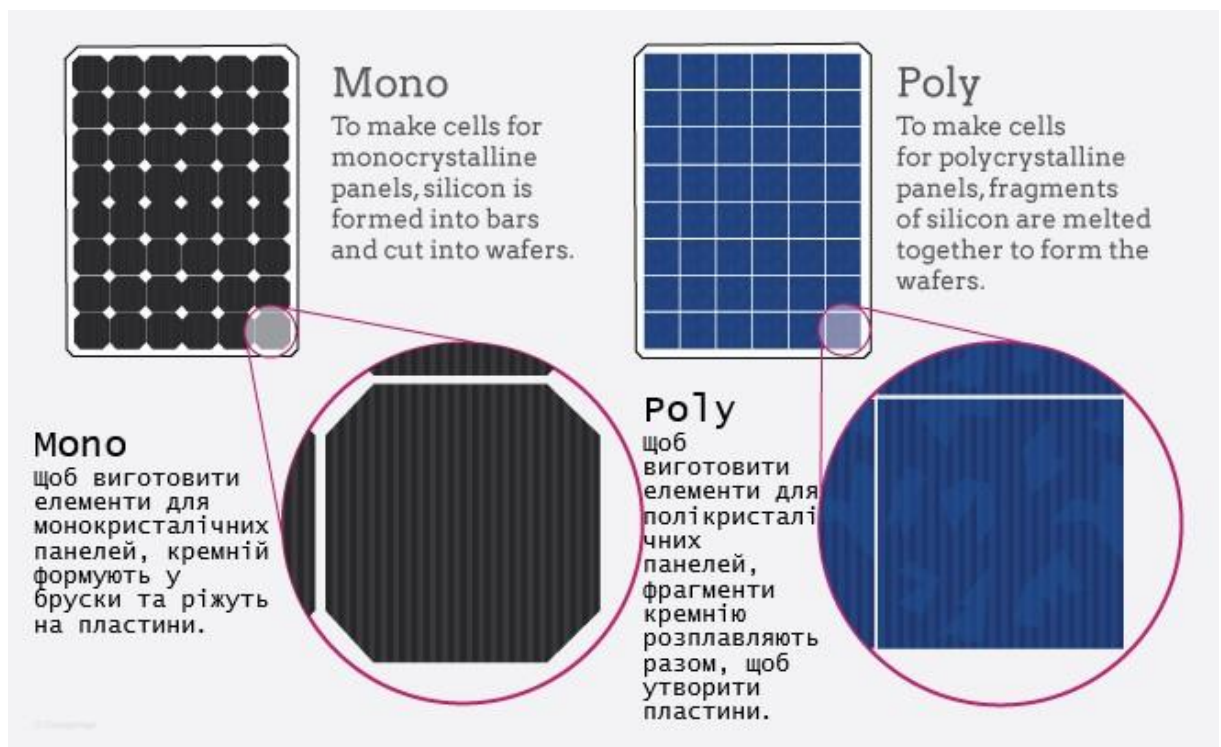


Рисунок 1.1. Порівняння структури та процесів виготовлення монокристалічних і полікристалічних сонячних елементів. [4]

1.1.2. Полікристалічні сонячні панелі

Полікристалічні сонячні панелі легко впізнати за їхнім блакитним, іноді райдужним, виглядом та квадратною формою комірок. Їхнє виробництво передбачає плавлення кількох кристалів кремнію та їх заливку у квадратну форму. Цей процес є простішим і менш витратним порівняно з

монокристалічними, оскільки він мінімізує відходи матеріалу. Чистота кремнію, що використовується в полікристалічних панелях, зазвичай нижча, ніж у монокристалічних.

Ефективність полікристалічних модулів зазвичай коливається в межах 15-17%. Хоча вони демонструють дещо меншу ефективність при перпендикулярному освітленні, вони краще використовують розсіяне сонячне світло протягом усього дня. Стандартна 60-елементна полікристалічна панель може генерувати від 240 до 300 Вт. Важливою характеристикою є їхній температурний коефіцієнт, який є вищим, ніж у монокристалічних, зазвичай від -0.4% до -0.5% на °C. Це означає, що полікристалічні панелі втрачають більше ефективності при підвищенні температури, що робить їх менш придатними для використання в дуже спекотних регіонах. Термін служби полікристалічних панелей подібний до монокристалічних, близько 25-30 років, проте швидкість деградації ефективності може бути дещо вищою. Завдяки простішому виробничому процесу та використанню кристалічних фрагментів, полікристалічні модулі є дешевшими, в середньому від \$0.70 до \$1 за ват [7].

1.1.3. Тонкоплівкові сонячні панелі

Тонкоплівкові сонячні панелі відрізняються своєю гнучкістю та легкістю, що досягається завдяки використанню дуже тонких шарів матеріалів. Вони не потребують жорсткої каркасної основи, що спрощує їх встановлення. Найбільш поширені матеріали для тонкоплівкових технологій включають телурид кадмію (CdTe), мідь-індій-галій-селенід (CIGS) та аморфний кремній (a-Si) [8].

Ці модулі є найменш ефективними серед трьох основних типів, з середньою ефективністю CIGS панелей 13-15%, CdTe – 9-11%, а a-Si – 6-8%. Однак, їхньою перевагою є хороша продуктивність при розсіяному світлі та високих температурах. Найвища зафіксована ефективність для CIGS досягала 23.4%, а для CdTe – 22.1%. Тонкоплівкові панелі мають кращий температурний коефіцієнт порівняно з кристалічними кремнієвими, іноді до -

0.16% на °C. Це робить їх привабливим вибором для жарких кліматів або регіонів з інтенсивним сонячним світлом протягом року.



Рисунок 1.2. Тонкоплівкова сонячна фотоелектрична установка. [8]

Щодо вартості, CIGS є найдорожчими серед тонкоплівкових (\$0.60-\$0.70 за ват), за ними йдуть CdTe (\$0.50-\$0.60) та аморфний кремній (\$0.43-\$0.50). Їхня гнучкість дозволяє встановлювати їх на різноманітні поверхні, включаючи вигнуті та нерівні форми, що відкриває нові можливості для інтеграції сонячної енергії, наприклад, у будівлі або портативні пристрої.

Вибір оптимального типу ФЕ модуля не є простим рішенням, що ґрунтується лише на номінальній ефективності чи початковій вартості. Необхідний комплексний аналіз, який враховує кліматичні умови, доступну площу, довгострокові експлуатаційні витрати та очікуваний термін служби. Наприклад, у спекотних регіонах, де високі температури можуть значно знижувати ефективність кристалічних модулів, тонкоплівкові та перовскітні панелі можуть демонструвати відносно кращу продуктивність завдяки їхньому кращому температурному коефіцієнту. Це може призвести до їхньої більшої економічної вигоди в довгостроковій перспективі, попри нижчу номінальну ефективність. Такий підхід підкреслює важливість розробки

нових матеріалів з покращеними температурними характеристиками для підвищення загальної ефективності PV систем у різних кліматичних зонах.

1.1.4. Новітні технології

Розвиток сонячної енергетики не стоїть на місці, і постійно з'являються нові, більш досконалі технології:

- Біфаціальні HJT панелі (Bifacial Heterojunction Technology - HJT): Ці інноваційні панелі використовують аморфний кристалічний кремній та відрізняються високою продуктивністю і низькою деградацією. Їхня ключова особливість полягає в здатності задньої сторони також вловлювати сонячне світло, що дозволяє виробляти на 10-15% більше електроенергії порівняно з традиційними односторонніми панелями. Це дозволяє зменшити кількість необхідних панелей для досягнення бажаної потужності, що, у свою чергу, скорочує площу, необхідну для сонячних парків.
- Перовскітні сонячні елементи (Perovskite Solar Cells): Цей новий клас сонячних елементів використовує гібридний органічно-неорганічний матеріал на основі галогенідів свинцю або олова. Вони привернули значну увагу завдяки низькій вартості обробки, можливості виробництва за допомогою розчинних процесів та відмінним характеристикам поглинання світла. Ефективність перовскітних елементів продемонструвала надзвичайно швидке зростання: від 3.8% у 2009 році до 25.2% у 2019 році, а для одиночних елементів повідомлялося про 25.8% та понад 30% для тандемних перовскіт/кремній елементів до 2021 року. Очікується, що їхня вартість становитиме близько \$0.15/Вт, що є найнижчим показником серед усіх типів сонячних елементів. Однак, стабільність та довговічність залишаються ключовими питаннями, що потребують подальших досліджень через деградацію матеріалу.
- Органічні сонячні елементи (Organic Solar Cells - OSCs): Ці елементи використовують органічні молекули або полімери для перетворення

сонячного світла в електроенергію. Вони гнучкі, легкі та можуть бути виготовлені за нижчою вартістю за допомогою методів друку. Ефективність OSC зазвичай становить 8-12%, хоча останні прориви досягли 19.31%. Основні недоліки включають нижчу ефективність порівняно з кремнієвими елементами та коротший термін служби через схильність органічних матеріалів до деградації від вологи та УФ-випромінювання.

- Багатоперехідні сонячні елементи (Multi-junction Solar Cells): Ці елементи складаються з кількох p-n переходів, виготовлених з різних напівпровідникових матеріалів, кожен з яких оптимізований для поглинання певного діапазону світлового спектра. Це дозволяє поглинати ширший діапазон довжин хвиль, значно підвищуючи загальну ефективність перетворення сонячного світла в електроенергію. Вони демонструють вищу ефективність, кращу продуктивність в умовах низького освітлення та високих температур, а також більшу довговічність. Проте, їхня структура є більш крихкою та схильною до пошкоджень.

Ці інновації вказують на диверсифікацію технологій ФЕ, що дозволить адаптувати сонячну енергетику до ширшого спектра застосувань та кліматичних умов, підвищуючи її загальну конкурентоспроможність. Наприклад, перовскітні та органічні елементи, з їхньою низькою вартістю та гнучкістю, можуть відкрити нові ринки для інтегрованих у будівлі PV систем та портативних пристроїв. Багатоперехідні елементи, хоча й дорожчі у виробництві, можуть бути економічно вигідними у концентруючих системах, де висока ефективність компенсує початкові витрати. Таким чином, майбутнє ринку ФЕ модулів буде характеризуватися не лише підвищенням ефективності, але й розробкою більш комплексних рішень, що враховують вартість, гнучкість, температурну стабільність та використання доступних ресурсів.

Для зручності порівняння основних типів фотоелектричних модулів, їхні ключові характеристики зведені в Таблиці 1.

Таблиця 1.1 Порівняльна характеристика основних типів фотоелектричних модулів

Характеристика	Монокристалічні	Полікристалічні	Тонкоплівкові (CdTe, CIGS, a-Si)	Перовскітні	Багатоперехідні
Зовнішній вигляд	Однорідний чорний/темно-синій, заокруглені краї комірок	Блакитний/райду жний, квадратні комірки	Гнучкі, легкі, безкаркасні	Залежить від складу, часто темні	Багатошарові
Матеріали	Кремній (єдиний кристал, висока чистота)	Кремній (кілька кристалів, нижча чистота)	CdTe, CIGS, a-Si, GaAs	Гібридні органічно-неорганічні галогеніди	Кілька напівпровідникових матеріалів
Середня ефективність	18-21% (до >20%, рекорд 47.1%*)	15-17%	6-15% (CdTe 9-11%, CIGS 13-15%, a-Si 6-8%)	25.2% (до 25.8%, <i>тандем</i> >30%)	>40% (теоретично до 63%)
Температурний коефіцієнт	-0.3% до -0.5% / °C	-0.4% до -0.5% / °C	-0.16% до -0.3% / °C (CdTe/CIGS ~0.3%)	Залежить від складу, досліджується	Низька чутливість до температури
Середня вартість за ват	\$1.00 - \$1.50	\$0.70 - \$1.00	\$0.43 - \$0.70 (a-Si) \$0.43- \$0.50, CdTe \$0.50- \$0.60, CIGS \$0.60- \$0.70)	~\$0.15 (очікувана)	Висока (для концентруючих систем)
Довговічність/Термін служби	~30 років (деградація 0.3-0.8%/рік)	25-30 років (деградація може бути вищою)	Коротший термін служби (схильні до деградації від вологи/УФ)	Досліджується (проблеми зі стабільністю)	Більш довговічні

Таблиця 1.1 - Продовження таблиці

Ключові переваги	Висока ефективність, висока потужність на площу, довговічність	Економічність, краще використання розсіяного світла	Гнучкість, легкість, низька вартість, краща робота при високих температурах	Швидке зростання ефективності, низька вартість, гнучкість	Дуже висока ефективність, широкий спектр поглинання
Ключові недоліки	Висока вартість, чутливість до температури	Нижча ефективність, більша чутливість до температури	Низька ефективність, короткий термін служби, менша ринкова частка	Проблеми зі стабільністю та довговічністю	Висока вартість виробництва, крихкість, потреба в концентр

** Рекордні показники ефективності для окремих елементів або тандемних систем, не для комерційних модулів.*

1.2. Причини вибракування та типові дефекти вживаних ФЕМ

Фотоелектричні модулі, попри свою заявлену довговічність, схильні до різноманітних дефектів та механізмів деградації, які можуть призвести до зниження продуктивності або повного виходу з ладу. Більшість цих проблем пов'язані з проникненням вологи та температурним стресом.

1.2.1 Візуальні дефекти та їх причини

Візуальний огляд є першим і найпростішим кроком у виявленні багатьох дефектів ФЕ модулів. До поширених візуальних дефектів належать:

Бульбашки: Часто є ознакою розшарування (delamination) або проблем з герметизацією. Вони вказують на втрату адгезії між шарами модуля, що може призвести до подальшого проникнення вологи.

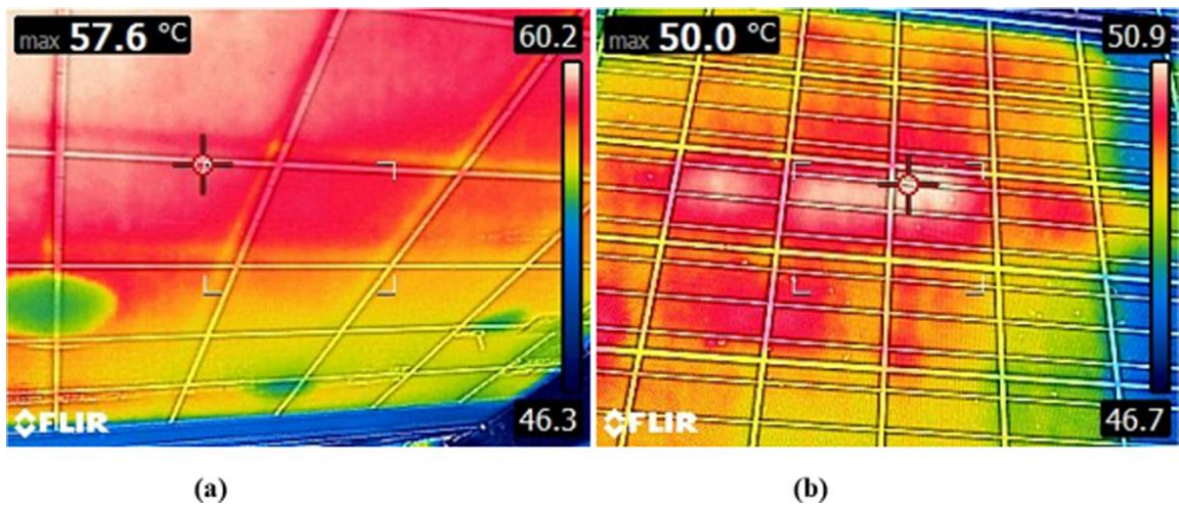


Рисунок 1.3. Інфрачервоні зображення бульбашок на фотоелектричному модулі видно на зворотній стороні (a) та на передній стороні (b).[12]

Пожовтіння/Потемніння або деламінування (Yellowing/Browning): Це оптична деградація матеріалу інкапсуляції, зазвичай етиленвінілацетату (EVA). Основною причиною є утворення оцтової кислоти внаслідок хімічної реакції між компонентами сонячних елементів та скла, а також тривалий вплив УФ-випромінювання, особливо при використанні неякісних матеріалів EVA. Цей процес призводить до високого поглинання світла в плівці EVA, що значно знижує вихідну потужність модуля. Запобігти деламінуванню можна шляхом вибору якісних модулів від перевірених виробників і контролю якості монтажу.



Рисунок. 1.4. Розшарування EVA - плівки: Біла ("молочна") частина [19]

Розшарування (Delamination): Відбувається, коли шари сонячної панелі, такі як інкапсулянт та задній лист, починають розділятися. Це явище порівнюють із "сендвічем, що розпадається". Розшарування дозволяє волозі та повітрю проникати всередину модуля, що призводить до корозії внутрішніх електричних компонентів, значного зниження виробництва енергії, утворення "гарячих точок" та потенційних електричних проблем, таких як короткі замикання або навіть ураження електричним струмом. Причинами можуть бути екстремальні погодні умови, такі як висока вологість, різкі коливання температур або сильні шторми, а також виробничі дефекти, неправильний монтаж або природне старіння матеріалів.



Рисунок 1.5. У плоских помутніннях під переднім склом можна помітити розшарування, які виглядають як бульбашки повітря. [21]

Викривлення/Згинання (Bending) та Полумки/Тріщини (Breakage/Cracks) : Фізичні пошкодження, такі як тріщини або відколи на склі, можуть бути точками входу для вологи. Мікротріщини (microcracks) –

це крихітні, часто невидимі неозброєним оком тріщини в сонячних елементах. Вони можуть виникати через температурний стрес (розширення та стиснення кремнію), град, сильні вітрові та снігові навантаження, а також пошкодження під час виробництва, транспортування або монтажу. Хоча вони можуть не призводити до негайного зниження продуктивності, з часом ці тріщини можуть розширюватися, підвищуючи електричний опір і утворюючи гарячі точки, що призводить до перегріву та зниження ефективності панелі. Вони також прискорюють процес старіння модуля.

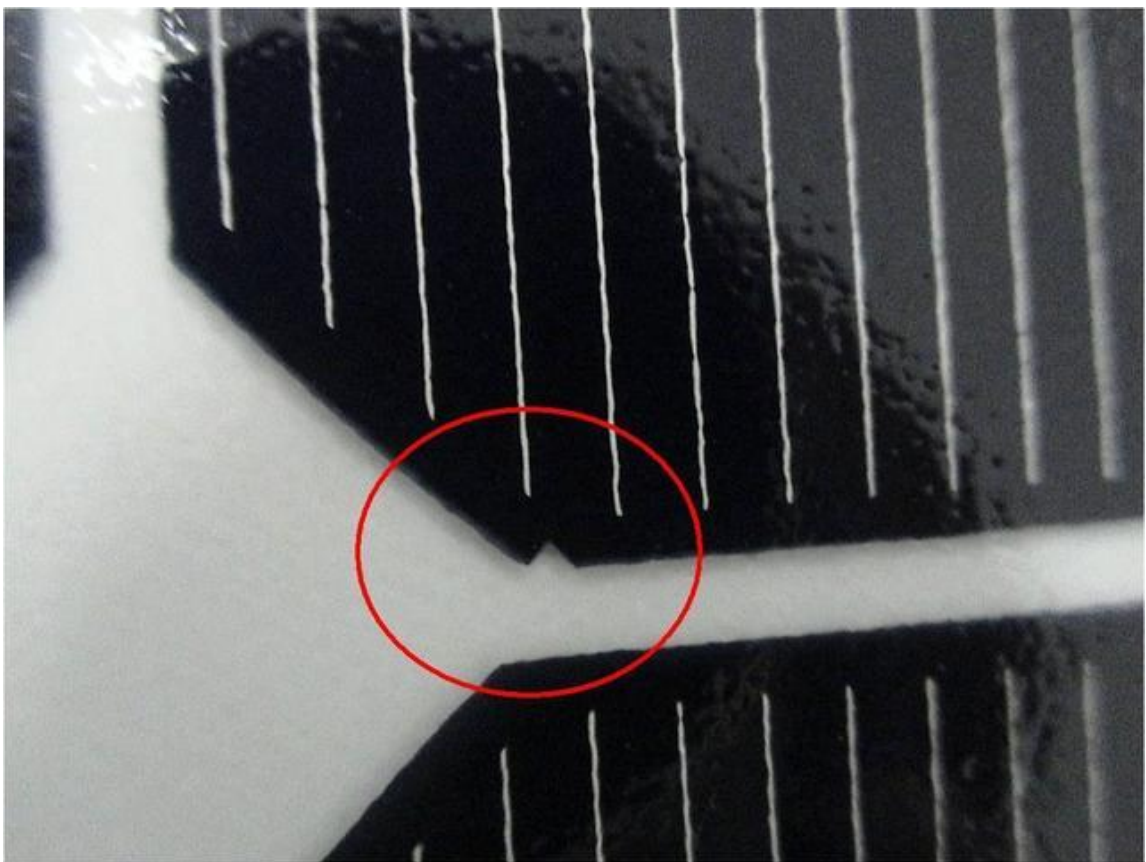


Рисунок. 1.6. Некритична тріщина фотоелемента [19]

Вигорання (Burning), Окислення (Oxidation), Подряпини (Scratches) та Неспіввісність (Misalignment): Ці дефекти також можуть бути виявлені візуально. Вигорання часто пов'язане з гарячими точками або несправностями розподільчої коробки. Окислення є наслідком впливу вологи та хімічних реакцій. Подряпини можуть впливати на оптичні властивості та

захисний шар модуля. Неспіввісність може бути пов'язана з проблемами під час виробництва або монтажу.

"Сліди равликів" (Snail Trails/Worm Marks): Це тонкі коричневі лінії, що з'являються на поверхні сонячних панелей, схожі на сліди равликів. Вони є наслідком складних хімічних та фізичних процесів, що починаються з хімічної реакції на шинах модуля, а потім тривалого фізичного навантаження, що призводить до утворення мікротріщин. Через ці мікрооріщини проникає волога, яка в присутності електричного поля, УФ-випромінювання та робочих температур викликає корозію. Міграція частинок срібла з контактів в інкапсулянт EVA та вторинні хімічні реакції з компонентами EVA (сірка, фосфор, хлор) призводять до знебарвлення. "Сліди равликів" знижують продуктивність панелі, зменшуючи відбиття світла та створюючи опір струму, що може призвести до утворення гарячих точок.



Рисунок 1.7. Сліди равлика, які можуть бути ознаками мікротріщин. [20]

1.2.2. Електричні та приховані дефекти

Окрім візуально помітних дефектів, існують також приховані проблеми, які вимагають спеціалізованих методів діагностики:

Деградація, спричинена потенціалом (Potential Induced Degradation - PID): PID виникає через високу різницю потенціалів між напівпровідниковим матеріалом (елементом) та іншими частинами модуля, такими як скло або алюмінієва рама. Ця різниця потенціалів створює струм витоку, що призводить до міграції негативних та позитивних іонів (наприклад, іонів натрію зі скла) до поверхні елемента. Це "забруднює" елемент, знижуючи його фотоелектричний ефект і призводячи до втрат потужності, які можуть досягати до 20%. Ефекти PID можуть бути непомітними протягом кількох місяців або навіть років. PID посилюється високою вологістю та температурою, а також залежить від положення модуля в стрінгу та конфігурації заземлення. Хімічний склад антиблікового покриття та скла також має значний вплив на виникнення PID. PID може бути оборотним або необоротним; необоротний PID спричинений електрохімічними реакціями, що викликають розшарування або електрокорозію.

Гарячі точки (Hot Spots): Гарячі точки – це локалізовані ділянки сонячної панелі, де температура значно підвищується. Це відбувається, коли один елемент у стрінгу виробляє менший струм (наприклад, через затінення, забруднення, структурні пошкодження або дефекти), змушуючи інші елементи в стрінгу працювати в режимі зворотного зміщення, розсіюючи енергію замість її генерації. Надмірне розсіювання потужності в невеликій області призводить до локального перегріву, що може спричинити руйнівні наслідки, такі як розтріскування елементів або скла, плавлення припою або деградацію сонячного елемента. У крайніх випадках це може призвести до самозаймання панелі. Гарячі точки рідко бувають стабільними і зазвичай посилюються, доки панель повністю не вийде з ладу.

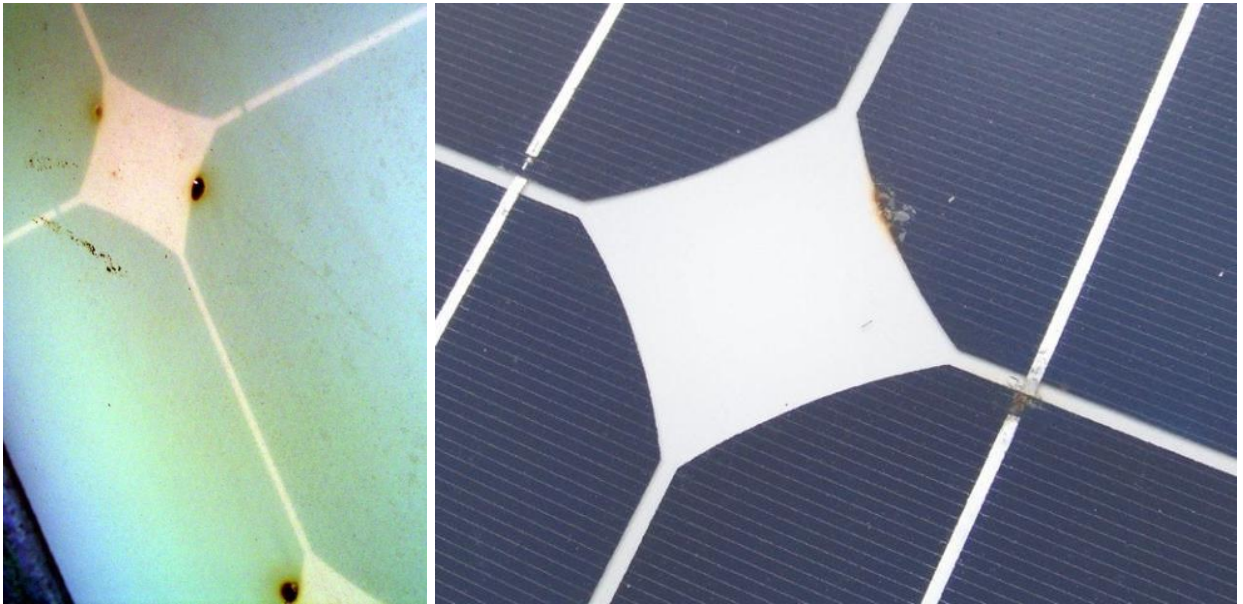


Рисунок. 1. 8. Точки вигорання в сонячних фотомодулях [19]

Відмова байпасного діода (Bypass Diode Failure): Байпасні діоди призначені для захисту сонячних елементів від затінення або пошкодження. Їхня відмова може призвести до утворення гарячих точок та значного зниження вихідної потужності. Поширені причини відмови включають перегрів діода через тривалу роботу в режимі провідності (наприклад, через постійне затінення або тріщини елементів), термічний пробій, а також ураження блискавкою. Відмова діода може призвести до деформації та вигорання розподільчої коробки.

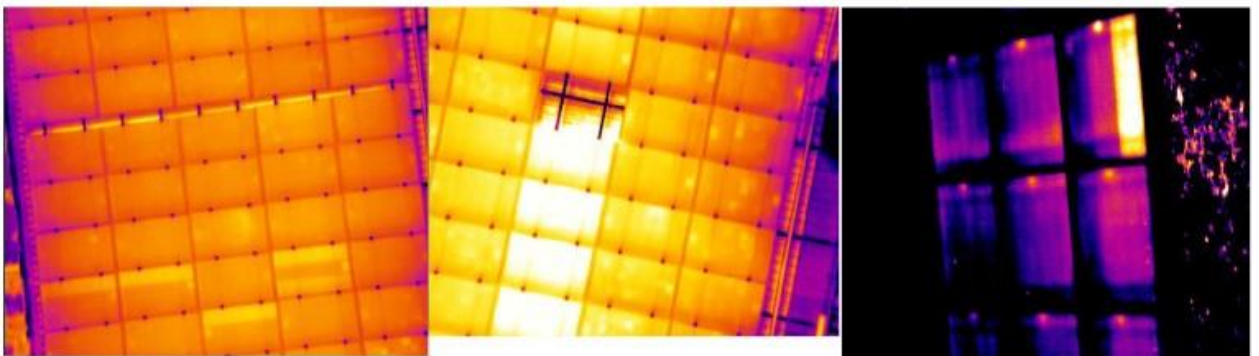


Рисунок 1.9 . (a) Численні, (b) відмови одного байпасу та (c) Повне відключення ланцюжка з порожнім модулем, що спостерігається з ІЧ-датчиком на деяких фотоелектричних станціях потужністю близько 1 МВт.[9]

Корозія (Corrosion): Корозія є значною проблемою, що виникає через вплив агресивних умов навколишнього середовища, таких як вологість, кислотні дощі, інтенсивне сонячне випромінювання, солоність повітря (особливо в прибережних районах) та атмосферні забруднювачі. Корозія електричних контактів може призвести до зниження ефективності перетворення сонячної енергії, а корозія рам або опор може скомпрометувати структурну цілісність. Це скорочує термін служби сонячних панелей та збільшує витрати на обслуговування та заміну.

Збільшення послідовного опору (R_s) та зменшення шунтуючого опору (R_{sh}): Ці зміни в електричних характеристиках модуля можуть бути спричинені деградацією контактів, корозією (через водяну пару), міграцією металу через p-n перехід або погіршенням антиблікового покриття. Ці зміни призводять до зниження вихідної потужності модуля.

Важливо зазначити, що деякі з найбільш критичних дефектів, такі як деградація, спричинена потенціалом (PID), відмова байпасних діодів, тріщини елементів та знебарвлення інкапсулянта, можуть призводити до значних втрат потужності, але для них не існує відповідних стандартних тестів у рамках стандартної кваліфікації та типових випробувань (IEC61215). Це означає, що ці "невидимі" або недостатньо перевірені дефекти можуть залишатися непоміченими, впливаючи на довгострокову продуктивність та фінансову життєздатність сонячних проектів. Тому, для повного розуміння стану ФЕ модулів, необхідно поєднувати різні методи діагностики, що дозволяють виявляти як видимі, так і приховані дефекти.

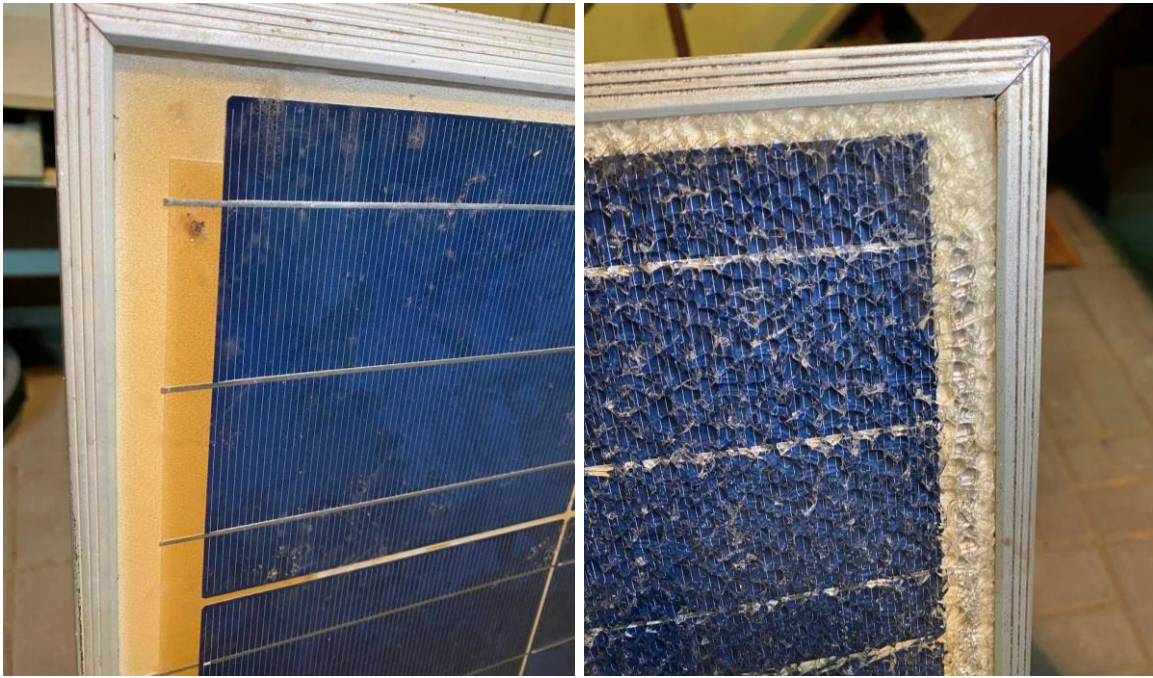


Рисунок 1.10 Браунінг некритичний дефект (ліворуч) та розстріскування скла, як критичний дефект(праворуч)

1.3. Огляд методів контролю та діагностики ФЕМ

Для забезпечення надійної та ефективної роботи фотоелектричних модулів застосовується низка методів контролю та діагностики. Ці методи дозволяють виявляти дефекти на різних стадіях – від виробництва до експлуатації – та оцінювати їхній вплив на продуктивність системи.

Візуальний огляд

Візуальний огляд (Visual Inspection) є фундаментальним і найпростішим методом діагностики ФЕ модулів. Він передбачає ретельний візуальний аналіз фізичного стану панелей та пов'язаного обладнання. Під час огляду шукають очевидні фізичні пошкодження, такі як деформації панелей або іншого обладнання, знебарвлення, іржу, ослаблені з'єднання або розбиті панелі. Також оцінюються зовнішні фактори, як-от пташиний послід, бруд чи затінення, що можуть впливати на продуктивність. Візуальний огляд дозволяє виявити такі дефекти, як бульбашки, пожовтіння, розшарування, тріщини елементів та "сліди равликів". Важливо документувати всі виявлені проблеми. Цей метод є першим кроком у визначенні загального стану ФЕ

системи та надає початкові рекомендації для подальших, більш глибоких інспекцій.

Інфрачервона термографія

Інфрачервона термографія (Infrared Thermography) – це неінвазивний метод, що використовує інфрачервону камеру для виявлення теплових аномалій на поверхні ФЕ модулів. Принцип роботи полягає в тому, що всі об'єкти випромінюють інфрачервоне випромінювання залежно від своєї температури. Термографічна камера виявляє це випромінювання та перетворює його на двовимірні зображення, що відображають розподіл температури. Надмірне тепло (гарячі точки) може вказувати на дефекти в елементах, проблеми з електричними з'єднаннями, часткове затінення, неспіввісність елементів або несправності байпасних діодів. Ці проблеми можуть призвести до зниження ефективності, втрати потужності та навіть ризику пожежі.

Термографія особливо цінна для великих сонячних електростанцій, де візуальний огляд або індивідуальні вимірювання напруги були б занадто трудомісткими. Аеротермографічне тестування за допомогою дронів дозволяє ефективно збирати дані на великих об'єктах, забезпечуючи точне виявлення проблем аж до окремого елемента. Перед проведенням сканування камеру необхідно відкалібрувати з урахуванням вологості, температури повітря, відстані та коефіцієнта випромінювання. Для отримання найкращих результатів рекомендується проводити вимірювання в ясний, сухий день з сонячним випромінюванням не менше 650 Вт/м^2 , бажано вранці або ввечері для кращої температурної диференціації. Термографія також корисна для перевірки розподільчих коробок, інверторів та інших компонентів електричної системи на наявність ослаблених з'єднань або спрацьованих запобіжників.

Характеристика кривої I-V

Вимірювання кривої I-V (I-V Curve Characterization) (струм-напруга) є фундаментальним методом для оцінки продуктивності та діагностики

деградації ФЕ модулів. Ця техніка передбачає вимірювання залежності струму (I) від напруги (V) на сонячній панелі за різних умов навантаження. Отримані дані використовуються для побудови кривої I - V , яка графічно відображає електричну поведінку модуля.

З кривої I - V можна визначити кілька ключових параметрів:

- Точка максимальної потужності (MPP): Точка на кривій, де добуток струму та напруги є максимальним, що вказує на оптимальний робочий режим панелі для виробництва енергії.
- Напруга холостого ходу (V_{oc}): Напруга на сонячній панелі, коли струм не протікає (розрив ланцюга).
- Струм короткого замикання (I_{sc}): Струм, що протікає через панель, коли напруга на ній дорівнює нулю (термінали закорочені).
- Коефіцієнт заповнення (Fill Factor - FF): Параметр, що вказує на якість сонячного елемента, розраховується як відношення максимальної потужності до добутку V_{oc} та I_{sc} .
- Ефективність: Міра того, наскільки ефективно сонячна панель перетворює сонячне світло на електричну енергію.

Застосування вимірювання кривої I - V включає перевірку належної роботи PV систем під час виробництва та встановлення, а також оцінку їхньої роботи під час обслуговування. Порівнюючи вимірну криву I - V з очікуваною (еталонною) кривою, технічні спеціалісти можуть виявляти внутрішні та зовнішні несправності, такі як пошкоджені сонячні елементи, затінені ділянки, підвищені температурні навантаження або несправні байпасні діоди. Цей метод надає неінвазивну діагностику продуктивності ФЕ модуля, що може запобігти дорогим та трудомістким ремонтам.

Електролюмінесцентне зображення

Електролюмінесцентне зображення (Electroluminescence Imaging - EL) є потужним діагностичним інструментом, що дозволяє виявляти приховані

дефекти в сонячних панелях, які не видно неозброєним оком. Принцип EL зображення полягає в тому, що при подачі електричного струму на сонячні елементи вони випромінюють слабе світіння. Це світіння вловлюється спеціальними камерами, виявляючи мікроскопічні тріщини, проблеми зі з'єднаннями та інші дефекти, подібно до рентгенівського знімка.

EL зображення може виявляти різноманітні дефекти, що суттєво впливають на продуктивність панелі, зокрема:

- Дефекти, пов'язані з виробництвом: Мікротріщини (тонкі темні лінії, що можуть спричинити 5-20% втрати потужності), розбиті елементи (повні темні ділянки, що призводять до 15-30% втрати потужності) та проблеми з паянням (плямисті візерунки, що викликають 10-25% втрати потужності).
- Пошкодження під час встановлення та впливу навколишнього середовища: Мікроскопічні тріщини, що утворюються під час транспортування та монтажу, а також стресові візерунки від неправильного монтажу або надмірного тиску. Деградація елементів від впливу погодних умов та термічних циклів також може відстежуватися за допомогою регулярного EL тестування.

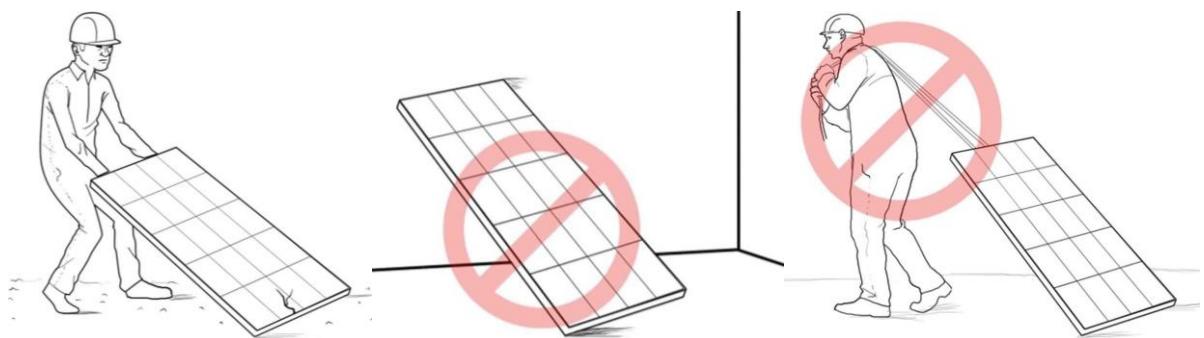


Рисунок 1.11. Неналежне транспортування та встановлення можуть пошкодити панель[33]

- Ключові візерунки для розпізнавання: "Павутинні візерунки" вказують на пошкодження від удару (наприклад, граду), паралельні лінії часто свідчать про виробничий стрес або неправильне поводження, а затемнення країв може вказувати на деградацію, спричинену потенціалом (PID).

Послідовність тестування EL включає підготовку (перевірка температури, забезпечення темряви, калібрування обладнання), налаштування панелі (відключення від системи, очищення, позиціонування, безпечне підключення живлення) та захоплення зображення (подача струму $0.7-1.0 \times I_{sc}$, налаштування камери, створення кількох зображень).

Ультразвукове тестування

Ультразвукове тестування (Ultrasonic Testing - UT) є неруйнівним методом контролю, що використовує високочастотні звукові хвилі для виявлення та вимірювання неоднорідностей у матеріалах без їх пошкодження. Принцип роботи UT полягає у введенні звукових хвиль у матеріал за допомогою ультразвукового перетворювача (датчика), який перетворює електричні імпульси на звукові хвилі та навпаки. Коли ці звукові хвилі зустрічають межу матеріалу або внутрішню неоднорідність (наприклад, тріщини, пористість, включення), вони відбиваються назад до датчика. Аналізуючи час повернення ехо та його амплітуду, можна отримати інформацію про внутрішню структуру об'єкта.

UT базується на принципах відбиття, заломлення та проникнення звуку. Відбиття відбувається, коли звукові хвилі стикаються з межею матеріалу або внутрішньою неоднорідністю. Заломлення – це зміна напрямку звукових хвиль, коли вони не перпендикулярні до поверхні. Проникнення дозволяє звуковим хвилям проходити крізь матеріали, передаючи енергію в інше середовище.

Застосування UT є багатогранним і включає виявлення внутрішніх дефектів, таких як тріщини, порожнечі та включення, а також вимірювання товщини матеріалів. У контексті ФЕ модулів, UT може використовуватися для виявлення тріщин елементів шляхом порівняння частотних сигналів здорового та несправного елемента. Зниження резонансної частоти вказує на дефектний елемент, а ширина смуги частот може вказувати на ступінь серйозності тріщини.

Сучасні технології значно розширюють можливості УТ. Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) дозволяє аналізувати дані ультразвукових тестів швидше та точніше, виявляючи закономірності та аномалії, які можуть бути пропущені людським оком. Автоматизація та робототехніка дозволяють проводити сканування у небезпечних або важкодоступних середовищах, забезпечуючи послідовні та повторювані результати. Передові методи УТ, такі як фазована решітка (PAUT), дифракція часу прольоту (TOFD) та захоплення повної матриці (FMC) з методом повного фокусування (TFM), забезпечують більш детальне зображення дефектів та підвищують надійність інспекцій.

Флеш-тестування

Флеш-тестування(Flash Testing), також відоме як тестування сонячним симулятором, є діагностичною процедурою, що використовується для визначення продуктивності фотоелектричних панелей в умовах високого струму та напруги. Тест передбачає застосування високоінтенсивного спалаху світла, що імітує спектральний розподіл сонячного світла, до сонячної панелі та вимірювання її реакції у вигляді напруги та струму.

Для проведення флеш-тесту необхідне спеціалізоване обладнання: сонячний світловий симулятор, система збору даних (мультиметр або реєстратор даних), генератор спалаху, тестові кабелі, обладнання для монтажу панелей та вимірювач освітленості. Під час тестування використовується високоякісний "еталонний модуль" з відомими характеристиками продуктивності (напруга холостого ходу, струм короткого замикання, точка максимальної потужності), який служить еталоном для порівняння. Обидва модулі піддаються однаковому спалаху світла, і їхні параметри вимірюються. Якщо продуктивність тестованого модуля знаходиться в межах очікуваного діапазону, це свідчить про його належне функціонування; відхилення можуть вказувати на несправність або деградацію.

Флеш-тест надає інформацію про напругу холостого ходу, струм короткого замикання, точку максимальної потужності та ефективність панелі. Однак, цей метод має обмеження: він надає лише "знімок" продуктивності панелі в конкретний момент часу і не може показати, як продуктивність змінюється з часом через фактори навколишнього середовища або деградацію. Він також не враховує вплив затінення або пилу. Крім того, результати флеш-тесту можуть бути маніпульовані виробниками, оскільки тестова машина конфігурується на основі еталонного модуля, що дозволяє налаштувати її для отримання бажаних даних. Тому для підтвердження якості та надійності даних рекомендується проводити незалежні флеш-тести на місці.

Тестування опору ізоляції

Тестування опору ізоляції (Insulation Resistance Testing), також відоме як мегомметр-тест (megger test), є поширеною перевіркою, що вимірює загальний опір між двома точками, розділеними електричною ізоляцією. Цей тест оцінює ефективність діелектрика або ізоляції в обмеженні потоку електричного струму.

Принцип тестування опору ізоляції полягає в подачі напруги та вимірюванні стаціонарного струму витоку, після чого напруга ділиться на струм ($R = V/I$). Якщо виміряний опір ізоляції відповідає або перевищує необхідне значення, тест вважається успішним. Для низькоомних вимірювань ізоляції може застосовуватися зворотний принцип: подається струм, вимірюється напруга, і напруга ділиться на струм.

Цей тест є критично важливим для перевірки якості ізоляції під час виробництва та протягом усього терміну служби продукту. Він допомагає виявляти струми витоку, що можуть бути небезпечними та призвести до травм або пошкоджень, а також забезпечує надійність електричного обладнання та допомагає визначити приблизний термін служби ізоляції. Тестування опору ізоляції допомагає виявити проблеми короткого замикання в ланцюзі.

Для досягнення комплексного розуміння стану ФЕ модулів, необхідно поєднувати різні діагностичні методи. Кожен метод надає унікальну інформацію про різні типи дефектів, і лише їхня комбінація дозволяє отримати повну картину. Наприклад, візуальний огляд може виявити поверхневі пошкодження, термографія – теплові аномалії, I-V криві – загальне зниження продуктивності, EL зображення – мікротріщини та проблеми з паянням, а тестування опору ізоляції – проблеми з електричною безпекою. Такий інтегрований підхід є ключовим для ефективного експрес-контролю та забезпечення довгострокової надійності сонячних енергетичних систем.

1.4. Утилізація і вторинне використання фотоелектричних модулів

Перехід до відновлювальної електрики створив бум у технології фотогальваніки (PV). Цей бум призводить до накопичення відходів PV, які повільно стають проблемою. За прогнозами Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), до 2050 року обсяг відходів ФЕ-модулів може досягти 78 мільйонів тонн. Це створює як екологічні виклики, так і можливості для повторного використання матеріалів та розвитку нових економічних секторів. Сучасні фотоелектричні модулі мають тривалий термін експлуатації — близько 25–30 років. Однак з часом виникає потреба їх виведення з експлуатації внаслідок зниження продуктивності, пошкоджень або заміни новішими моделями. У цьому контексті важливими є два ключові напрямки: утилізація та вторинне використання модулів. [22]

1.4.1. Утилізація фотоелектричних модулів

На сьогоднішній день розрізняють два види переробки PV-модулів – грубу і тонку. При першій мається на увазі витяг основних матеріалів модуля – алюмінію, міді, скла, а ось пластмаса просто спалюється. При тонкій переробці можливо вилучення всіх хімічних елементів. До складу сонячних модулів входить сировина, яку можна використовувати повторно. Так, в процентному співвідношенні панель з кристалічного кремнію – це 76% скла, 10% полімерних матеріалів, 8% алюмінію, 5% кремнієвих

напівпровідників, 1% міді, менш 0,1% срібла, олова і свинцю. Основа тонкоплівкових модулів – 89% (CIGS) і 97% (CdTe) скла. Є три основні методи утилізації (переробки) [22] :

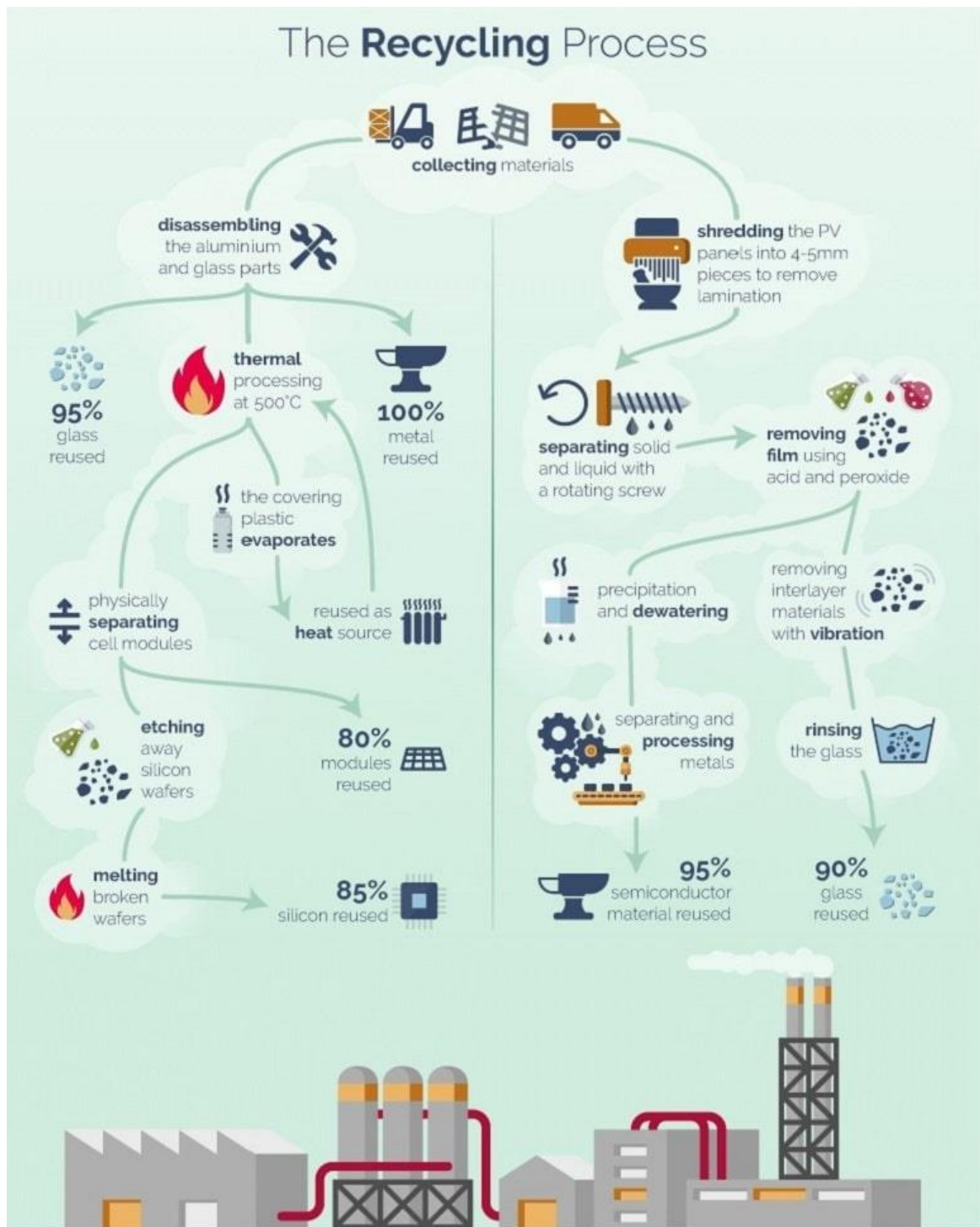


Рисунок 1.12. Процес переробки фотоелектричних модулів[22]

Механічна переробка - основний метод, що включає демонтаж алюмінієвих рам, подрібнення модуля та сортування матеріалів (скла,

пластмаси, металів). Переваги — це найбільш доступна і недорога технологія, недоліки — невеликий відсоток вилучення рідкісних матеріалів.

Хімічна обробка - дозволяє з високою точністю витягувати рідкісні метали наприклад срібло, олово, мідь, свинець та інші метали. За допомогою кислот та лугів виділяють високочисті компоненти. Метод ефективний, але вимагає високих витрат і є менш екологічно безпечним.

Термохімічне вилучення - полімерні шари (наприклад, EVA) видаляють за допомогою високотемпературної обробки. Це полегшує подальше сортування і вилучення інших компонентів, але має ризик викидів шкідливих газів, якщо процес неконтрольований.

Регенерація кремнію із сонячних елементів можна відновити для подальшого використання у нових фотоелементах, після хімічного очищення та перекристалізації. Така технологія перебуває в процесі комерційного вдосконалення.

Обсяг перероблених матеріалів до 2050 року зможе створити вторинний ринок вартістю понад 15 млрд доларів США. Розвиток технологій переробки може зменшити залежність від первинних джерел і забезпечити стратегічну автономність у сфері критичних матеріалів (особливо срібла та кремнію).

Сировинний потенціал та економічна вигода

до 2050 року з відпрацьованих модулів можна буде отримати:

- 60 мільйонів тонн скла;
- 6 мільйонів тонн алюмінію;
- 3 мільйони тонн кремнію;
- тисячі тонн срібла, міді, індію, телуру.

Економічна доцільність переробки зростає із розвитком технологій вилучення та підвищенням вартості рідкісних елементів на світовому ринку.

Без належної переробки запаси срібла будуть вичерпані, втраченими буде заготовлена енергія та інші матеріали з викинутими кристалічними

кремнієвими (с-Si) сонячними панелями. Отже, переробка с-Si сонячних панелей стане вирішальною у майбутньому. [23]

1.4.2. Вторинне використання модулів

Повторне використання модулів можливе, якщо вони ще здатні генерувати електроенергію, хоч і зниженою потужністю. Такі панелі можуть застосовуватись для автономного освітлення, резервного живлення, систем іригації та в інших малопотужних проєктах. Цей підхід дозволяє продовжити життєвий цикл модулів на 5–10 років, мінімізувати утворення відходів та знизити потребу у виробництві нових пристроїв. За оцінками IRENA, до 2050 року ринок утилізації ФЕ-модулів може забезпечити економічний прибуток до 15 мільярдів доларів США. Ефективна переробка матеріалів також дозволить зменшити залежність від первинних ресурсів, скоротити енергоспоживання на добування сировини та знизити загальний вуглецевий слід.[23]

Класифікація відпрацьованих ФЕ-модулів

- Регулярні відходи (regular loss) — модулі, які досягають кінця проєктного строку служби (~25–30 років).
- Дострокові відходи (early loss) — модулі, що виходять з ладу через виробничі дефекти, механічні пошкодження, деградацію тощо.

Серед основних викликів IRENA виокремлює:

- нестачу потужностей з переробки в більшості країн;
- недостатню економічну мотивацію;
- відсутність стандартизованих процесів демонтажу та сортування;
- недосконалу систему обліку та моніторингу модулів після експлуатації.

Утилізація та повторне використання ФЕ-модулів є не лише екологічною необхідністю, але й перспективною економічною галуззю. За належної підтримки з боку держави, бізнесу та наукових установ, ця сфера

може значно знизити екологічне навантаження енергетики, забезпечити нові робочі місця та сприяти формуванню сталого енергетичного циклу.

1.4.3. Приклади вторинного використання фотоелектричних модулів

Вторинно використані ФЕМ можуть бути інтегровані в:

- електричні та гібридні транспортні засоби, забезпечуючи додаткове джерело енергії та зменшуючи залежність від традиційних джерел енергії. Це сприяє зменшенню викидів та підвищенню ефективності використання енергії в транспортному секторі.
- живильні системи зрошення, теплиці та інше сільськогосподарське обладнання, що сприяє сталому розвитку сільського господарства та зменшенню впливу на навколишнє середовище.
- забезпечування енергією віддалені телекомунікаційні вежі та іншу інфраструктуру, що особливо важливо в районах без доступу до централізованої електромережі.
- застосовані для живлення автономних систем, таких як освітлення вуличних доріг, системи енергозабезпечення в віддалених районах та інші. Це дозволяє забезпечити енергією місця, де немає доступу до централізованої електромережі.
- будівельні конструкції, наприклад, у вигляді сонячних дахів або фасадів, що дозволяє зменшити споживання енергії та покращити енергоефективність будівель.
- навчальних закладах та дослідницьких установах для навчання студентів, проведення досліджень та експериментів, що сприяє розвитку науки та освіти.
- для створення маломасштабних енергетичних систем, таких як сонячні ферми або міні-електростанції, що дозволяє забезпечити енергією віддалені або важкодоступні райони.

- побутові пристрої, такі як сонячні зарядні станції, що дозволяє зменшити споживання електроенергії з централізованої мережі та знизити витрати на електроенергію.
- енергозберігаючих технологіях, таких як системи зберігання енергії або інтегровані енергетичні системи, що дозволяє підвищити ефективність використання енергії та зменшити її споживання.
- екологічних проектах, таких як відновлення екосистем або створення зелених зон, що сприяє збереженню біорізноманіття та покращенню якості навколишнього середовища.
- гуманітарних проектах, таких як забезпечення енергією біженців або постраждалих від стихійних лих, що дозволяє покращити умови їхнього життя та забезпечити базові потреби.
- інноваційних технологіях, таких як виробництво нових матеріалів або розробка нових енергетичних систем, що сприяє розвитку технологічного прогресу та інновацій.
- промисловості для забезпечення енергією виробничих процесів, що дозволяє знизити витрати на енергію та зменшити викиди вуглецю.
- транспортну інфраструктуру, наприклад, у вигляді сонячних панелей на зупинках громадського транспорту або на дорожніх знаках, що дозволяє зменшити споживання енергії з централізованої мережі та знизити витрати на електроенергію.
- енергетичних мережах для балансування навантаження та зберігання енергії, що дозволяє підвищити стабільність та ефективність енергетичних систем.
- навчальних закладах та дослідницьких установах для навчання студентів, проведення досліджень та експериментів, що сприяє розвитку науки та освіти.

- створення маломасштабних енергетичних систем, таких як сонячні ферми або міні-електростанції, що дозволяє забезпечити енергією віддалені або важкодоступні райони.
- побутові пристрої, такі як сонячні зарядні станції, що дозволяє зменшити споживання електроенергії з централізованої мережі та знизити витрати на електроенергію.
- енергозберігаючих технологіях, таких як системи зберігання енергії або інтегровані енергетичні системи, що дозволяє підвищити ефективність використання енергії та зменшити її споживання.
- екологічних проектах, таких як відновлення екосистем або створення зелених зон, що сприяє збереженню біорізноманіття та покращенню якості навколишнього середовища. [25]

1.4.4. Експлуатація та утилізація українських ФЕС

Україна має високий потенціал для сонячної енергетики — середньорічна інсоляція сягає 1235 кВт·год/м², що є одним із найкращих показників у Європі. Фотоелектричні станції (ФЕС) працюють ефективно більшу частину року, особливо у південних регіонах, таких як Одещина, Херсонщина, Запоріжжя, де зосереджено понад 60% усіх промислових ФЕС країни.

Інтенсивний розвиток ФЕС в Україні припав на період після 2010 року. До 2022 року встановлена потужність досягла 8062 МВт, що дозволило Україні зайняти 8 місце в Європі. Найбільшим об'єктом є Нікопольська ФЕС (246 МВт), а найефективнішою – трекерна станція «Солар парк Підгородне», де використання двовісних трекерів дозволяє підвищити вироблення електроенергії до 40% порівняно зі звичайними системами.

Після повномасштабного вторгнення Росії в 2022 році частина українських ФЕС зазнала масштабних руйнувань. За оцінками, близько 40%

об'єктів сонячної генерації у південних регіонах України було пошкоджено, зокрема через обстріли, пожежі та вибухи. Понад 950 МВт встановленої потужності перебувають на тимчасово окупованих територіях. Внаслідок цього виникла реальна потреба в утилізації великої кількості зруйнованих або пошкоджених фотоелектричних модулів.



Рисунок 1. 13 - Зруйнована сонячна електростанція (22 МВт) компанії Solar Generation у Миколаївській області [24]

Наразі в Україні відсутні спеціалізовані підприємства для комплексної переробки фотоелектричних модулів. У більшості випадків повторно використовуються лише алюмінієві рами, а інші компоненти (скло, пластик, електропровідні матеріали) захоронюються як промислові відходи. Це не лише екологічно шкідливо, а й економічно недоцільно, оскільки до 95% матеріалів ФЕМ можуть бути повторно використані у виробництві.

Очікується, що в період 2035–2048 років в Україні вийде з експлуатації значна кількість ФЕМ, оскільки більшість були встановлені після 2010 року, а їх середній термін служби складає 25–30 років. За підрахунками IRENA, кожен МВт встановленої потужності може генерувати 60–78 тонн відходів до завершення терміну служби. Це означає, що до 2048 року Україна може накопичити до 500 тис. тонн ФЕМ-відходів.

Науковці Університету Короля Данила та університету нафти та газу в межах проєкту Retrieve вперше в Україні провели детальний аналіз інсталюваного парку ФЕМ. За результатами дослідження, 68% модулів —

монокристалічні, 32% — полікристалічні. Найпоширенішими виробниками є Longi Solar (17%), JA Solar (16,5%) та RISEN (9,7%). Такі дані важливі для вибору технологій вторинного використання та організації переробки.

Експлуатаційні проблеми ФЕС також сприяють зростанню потреби в утилізації. Серед причин виведення ФЕМ з ладу — дефекти, отримані при монтажі, деградація матеріалів, вплив PID-ефекту, стихійні лиха та військові дії. У зв'язку з цим гостро постає потреба у законодавчому врегулюванні питань переробки, розробці стандартів та створенні інфраструктури для замкненого циклу використання фотоелементів.[24]

1.5. Існуючі засоби вимірювальної техніки для тестування модулів

На ринку представлений широкий спектр засобів вимірювальної техніки, призначених для діагностики та контролю фотоелектричних модулів. Вибір конкретного обладнання залежить від типу тестування, необхідної точності, масштабу системи та бюджету.

I-V Трейсери (I-V Curve Tracers)

I-V трейсери є ключовими інструментами для характеристики електричної продуктивності ФЕ модулів. Приклади включають:

- Solmetric PV Analyzer (PVA-1500T, PVA-1500HE): Ці пристрої широко використовуються для введення в експлуатацію, аудиту, експлуатації та обслуговування, а також усунення несправностей PV систем. Вони пропонують високу точність, найбільшу пропускну здатність вимірювань (до 400 вимірювань на годину при $V_{oc} \leq 1350V$) та великий дисплей з функціями усунення несправностей. PVA-1500T2 вимірює до 1500 В при 30 А (для модулів з ефективністю $<19\%$) або до 10 А (для модулів з ефективністю $\geq 19\%$), тоді як PVA-1500HE2 може вимірювати до 1500 В при 30 А незалежно від ефективності модуля. Вони мають базу даних з 70 000 PV модулів, бездротовий діапазон сенсора 300 футів та працюють через Wi-Fi з планшетом, ноутбуком.

- Fluke: Компанія Fluke також пропонує різні I-V трейсери та комплекти, наприклад, Fluke SOL-INS37-KIT (Solmetric PVA + 1537 Kit) та Fluke SOL-TI-27HZKIT (Solmetric PVA + TiS75 27Hz Kit), які поєднують I-V трасування з іншими діагностичними можливостями.

Тепловізори (Thermal Imagers)

Тепловізори використовуються для інфрачервоної термографії, виявляючи теплові аномалії, що вказують на дефекти.

- Fluke TiS55+: Цей тепловізор має інфрачервону роздільну здатність 256x192 пікселів (49 152 пікселів), поле зору 28x20°, ручне фокусування та маркер фокусування на 1 метр. Він оснащений технологією IR-Fusion (AutoBlend), що додає контекст видимих деталей до інфрачервоного зображення, та 3.5-дюймовим сенсорним дисплеєм. Діапазон вимірювання температури становить від -20°C до 550°C. Інші моделі Fluke включають TiS75+, Ti480 PRO, TiX580, RTi120, RSE300, які відрізняються роздільною здатністю, функціями та ціною.

- Megger Thermal Camera (TC3231): Цей тепловізор також використовується для виявлення потенційних проблем у PV масивах або в окремих компонентах.

Електролюмінесцентні камери (Electroluminescence Cameras) спеціально розроблені для EL зображення, що дозволяє виявляти мікроскопічні дефекти.

- Greateyes LumiSolarCell EL (серії ELSEi, ALEXi, LOTTEi, GE-VAC): Ці системи пропонують різні роздільні здатності (наприклад, 1024x1024 або 2048x2048 пікселів) та функціональності для EL та зворотного EL зображення. Вони сумісні з різними типами сонячних елементів (монокристалічний кремній, аморфний кремній, CIGS, HIT) та використовуються для ідентифікації мікротріщин, мертвих/розбитих елементів, неоднорідностей та домішок.

- BrightSpot Automation: Виробляє 24-мегапксельні EL камери, що використовуються в протоколах тестування.

- FlyThru: Пропонує системи PV-тестування, що включають високороздільну електролюмінесцентну інспекцію до 20 мегапкселів на модуль.

Тестери опору ізоляції (Insulation Resistance Testers / Meggers)

Мегометри використовуються для перевірки цілісності ізоляції ФЕ модулів та проводки.

- Hioki: Пропонує різні моделі, такі як Hioki IR4053, IR4056, IR4057, IR4058, IR4059, FT6031-03, які вимірюють опір ізоляції, PV опір ізоляції, струм витоку, напругу та ємність. Вони мають широкий діапазон тестової напруги (наприклад, від 250 В до 2.00 кВ для PV ізоляції та до 5.20 кВ для загальної ізоляції).

- Megger MIT2500: Багатофункціональний прилад, що включає вимірювання напруги, опору та ємності, але його основна функція – тестер опору ізоляції.

Флеш-тестери (Flash Testers / Sun Simulators)

Ці пристрої імітують сонячне світло для вимірювання вихідної потужності модулів в контрольованих умовах.

- MBJ та CaerusSys: Пропонують сонячні симулятори з рейтингом А+А+А+, що відповідають стандартам ІЕС 60904-9 Ed. 2 та 3. Вони мають великі активні зони (наприклад, до 1,360 x 2,640 мм), світлодіодні джерела світла з тривалим терміном служби (>10 мільйонів спалахів) та можливість тестування біфаціальних модулів.

- RenewSys: Використовує флеш-тестери для визначення продуктивності PV панелей, вимірюючи напругу холостого ходу, струм короткого замикання, точку максимальної потужності та ефективність.

- Solar panel line: Пропонує сонячні симулятори/I-V тестери з діапазоном опромінення 700-1300 Вт/м², точністю повторюваності ≤0.15% та можливістю автоматичного вимірювання кривих I-V та P-V.

Інші засоби вимірювальної техніки

- Сонячні струмові кліщі (Solar Clamp Meters): Такі як Megger DCM1500S або Fluke 393 FC, які вимірюють струм, напругу, опір та діод.
- Вимірювачі опромінення (Irradiance Sensors): Наприклад, Megger PVM210, Seaward Solar Survey 100/200R або Fluke IRR1-SOL, які вимірюють інтенсивність сонячного світла.
- Цифрові мультиметри (Digital Multimeters): Наприклад, Fluke 87VMAX-PVLEAD1 або 283FC/PV, для загальних електричних вимірювань.
- Комплекти тестових кабелів (Test Lead Kits): Такі як Megger PV4 або FLIR TA90, для безпечного та зручного підключення.

Вибір відповідних інструментів є вирішальним для точної та ефективної діагностики ФЕ модулів. Кожен інструмент надає унікальні дані, і їхнє комбіноване використання дозволяє отримати всебічну оцінку стану PV системи, виявити приховані дефекти та забезпечити довгострокову надійність.

1.6. Висновки до розділу 1

Аналіз стану питання експрес-контролю фотоелектричних модулів виявляє складну взаємодію між різноманітними технологіями, механізмами деградації та методами діагностики. Сучасний ринок ФЕ модулів пропонує широкий спектр рішень, від зрілих кристалічних технологій (монокристалічних та полікристалічних) до новітніх розробок, таких як тонкоплівкові, біфаціальні HJT, перовскітні та багатоперехідні елементи.

Кожен тип має свої унікальні переваги та недоліки з точки зору ефективності, вартості, температурної стабільності та довговічності, що вимагає ретельного аналізу при виборі для конкретних кліматичних умов та застосувань. Оптимальний вибір ФЕ модулів не є лінійним рішенням, а вимагає комплексного підходу, що враховує кліматичні умови, доступну площу, довгострокові експлуатаційні витрати та очікуваний термін служби. Це підкреслює важливість розробки нових матеріалів з кращими температурними характеристиками для підвищення загальної ефективності PV систем у різних кліматичних зонах.

Попри значний прогрес у технологіях, фотоелектричні модулі схильні до різноманітних дефектів, що можуть виникати як під час виробництва, так і в процесі експлуатації. Ці дефекти, включаючи візуальні (пожовтіння, розшарування, мікротріщини, "сліди равликів") та приховані (деградація, спричинена потенціалом (PID), гарячі точки, відмови байпасних діодів, корозія), можуть суттєво знижувати продуктивність та скорочувати термін служби модулів. Особливу увагу слід приділяти дефектам, для яких відсутні стандартні методи тестування, оскільки вони можуть залишатися непоміченими, але мати значний вплив на довгострокову ефективність системи.

Для ефективного експрес-контролю та діагностики ФЕ модулів критично важливим є застосування комплексного підходу, що поєднує різні методи тестування. Візуальний огляд, інфрачервона термографія, характеристика кривої I-V, електролюмінесцентне зображення, ультразвукове тестування, флеш-тестування та тестування опору ізоляції – кожен з цих методів надає унікальну інформацію про стан модуля. Комбіноване використання цих методів та відповідних засобів вимірювальної техніки дозволяє не лише виявляти дефекти на ранніх стадіях, але й точно оцінювати їхній вплив на продуктивність системи, що є запорукою своєчасного обслуговування та ремонту.

Інноваційні технології, такі як біфаціальні НІТ, перовскітні та багатоперехідні елементи, мають потенціал для подолання обмежень традиційних кремнієвих модулів, відкриваючи нові можливості для сонячної енергетики. Ці розробки свідчать про перехід до більш комплексних та адаптованих рішень, що враховують не лише ефективність, а й вартість, гнучкість та стійкість до різних умов експлуатації. Постійний моніторинг, своєчасна діагностика та проактивне обслуговування є ключовими для забезпечення довгострокової надійності, фінансової життєздатності та сталого розвитку фотоелектричних систем у сучасному енергетичному ландшафті.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ТА ПІДБІР ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

2.1. Вимоги до методики експрес-контролю вживаних ФЕМ

Ефективний експрес-контроль фотоелектричних модулів є запорукою їхньої довгострокової та надійної роботи. Цей розділ присвячений розробці ефективної методики експрес контролю придатності вживаних фотоелектричних модулів з метою їх вторинного використання. Обґрунтуванню вибору вимірювального обладнання, побудові схеми тестування та послідовності вимірювань, а також прикладу практичного застосування запропонованої методики. Для реалізації методики мають бути застосовані недорогі і доступні засоби вимірювальної техніки.

Методика експрес-контролю вживаних фотоелектричних модулів повинна відповідати низці ключових вимог, що забезпечують її ефективність, точність та практичну цінність.

По-перше, методика має бути швидкою та точною. Експрес-контроль за своєю суттю передбачає мінімальні часові витрати на проведення діагностики, що є критично важливим для великих сонячних електростанцій або для швидкої оцінки стану модулів на місці. Водночас, швидкість не повинна компрометувати точність вимірювань, оскільки від достовірності

отриманих даних залежить правильність прийняття рішень щодо подальшої експлуатації або ремонту модулів. Висока вірогідність контролю є обов'язковою.

По-друге, методика повинна бути неінвазивною. Це означає, що діагностика має проводитися без пошкодження модуля або його компонентів, що дозволяє зберегти цілісність обладнання та уникнути додаткових витрат на ремонт.

По-третє, методика має бути адаптованою до польових умов. Польові умови експлуатації ФЕМ можуть суттєво відрізнятись від стандартних тестових умов (STC), що впливає на вимірювані параметри. Тому методика повинна дозволяти проводити вимірювання в динамічному режимі з урахуванням побічних факторів, таких як інтенсивність сонячного випромінювання, температура навколишнього середовища, швидкість вітру та затінення. Це забезпечить більш реалістичну оцінку продуктивності модуля в умовах його фактичної експлуатації.

По-четверте, методика повинна відповідати існуючим стандартам та нормативним вимогам. Це включає дотримання міжнародних стандартів, таких як IEC 61215 (для кристалічного кремнію) та IEC 61646 (для тонкоплівкових модулів), що визначають вимоги до кваліфікації та типових випробувань. Також важливо враховувати стандарти безпеки, такі як IEC 61730-1 та IEC 61730-2, що стосуються конструкції та випробувань ФЕМ модулів для забезпечення безпечної електричної та механічної роботи. Для встановлених систем необхідно дотримуватися Національного електричного кодексу (NEC) та місцевих будівельних норм, що стосуються розмірів провідників, заземлення, пристроїв захисту від перевантаження та роз'єднувачів. Методика повинна включати критерії проходження/відмови, такі як деградація максимальної вихідної потужності (не більше 8% після тестової послідовності та не менше 90% від мінімального P_{max} після остаточного замочування світла), відсутність відкритих ланцюгів та основних

візуальних дефектів, а також відповідність вимогам до випробувань на ізоляцію та мокрий витік.

По-п'яте, методика має бути практичною та економічно вигідною. Вона повинна мінімізувати витрати на проведення оглядів та діагностики, уникаючи необхідності транспортування модулів до лабораторії та їх консервування. Це передбачає використання портативного, мініатюрного та багатофункціонального обладнання, яке є простим та зручним у користуванні.

Нарешті, методика повинна дозволяти оцінювати деградацію та залишковий ресурс вживаних модулів. Для довгостроково експлуатованих ФЕМ важливо знати не лише їхню поточну продуктивність, але й електричні втрати та падіння ККД, що виникли в процесі експлуатації. Це дозволить прогнозувати їхню подальшу поведінку та планувати заходи з обслуговування або заміни.

2.2. Методика проведення експрес-діагностики вживаних фотоелектричних модулів.

Алгоритм, описаний нижче створено на основі результатів наукової роботи, виконаної за участі авторки дипломної роботи у співпраці з фахівцями кафедри. Методика та підбір вимірювального обладнання були представлені у співавторстві на ХХІV Міжнародній науково-технічній конференції „ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи” , яка відбулася 13–14 травня 2025 р., у КПІ ім. Ігоря Сікорського. Це свідчить про практичну апробацію й наукову обґрунтованість викладених підходів.[32]

Алгоритм проведення експрес-діагностики фотоелектричних модулів є послідовним набором кроків, що дозволяє швидко та ефективно оцінити їхній стан та виявити можливі дефекти. Цей алгоритм інтегрує візуальні, електричні та теплові методи контролю для отримання всебічної картини.

Першим етапом є попередня підготовка та планування інспекції. Це включає збір усієї необхідної документації, такої як плани системи, однолінійні схеми, попередні звіти про інспекції, гарантійну інформацію та

технічні паспорти обладнання. Важливо також перевірити контактну інформацію клієнта та підтвердити дозволи на доступ до об'єкта. На цьому етапі створюються індивідуальні контрольні списки перевірок, адаптовані до конкретної системи та вимог клієнта. Рекомендується також переглянути історичні дані моніторингу, щоб виявити тенденції та потенційні проблеми до фізичної інспекції, а також переконатися, що всі необхідні програмні додатки та бази даних оновлені та доступні.

Другий крок – попереднє обстеження об'єкта. Це може бути зроблено віддалено за допомогою супутникових знімків або особисто. Метою є виявлення потенційних перешкод, таких як проблеми з доступом, затінення від навколишніх об'єктів (дерев, будівель) та екологічні фактори. На цьому етапі також ідентифікуються потенційні загрози безпеці, такі як повітряні лінії електропередач, нерівна місцевість або замкнуті простори. Важливо передбачити можливі діагностичні проблеми, виходячи з віку системи, її розташування та попередньої продуктивності, а також відомих режимів відмов для конкретних моделей інверторів.

Третій етап – проведення візуального огляду. Це фундаментальний крок, що передбачає ретельний візуальний аналіз фізичного стану панелей та пов'язаного обладнання. Під час огляду шукають очевидні фізичні пошкодження, такі як деформації панелей або іншого обладнання, знебарвлення, іржу, ослаблені з'єднання або розбиті панелі. Також оцінюються зовнішні фактори, як-от пташиний послід, бруд чи затінення, що можуть впливати на продуктивність. Важливо документувати всі виявлені проблеми.

Четвертий етап – електричне тестування. Цей крок виходить за рамки візуального огляду та заглиблюється в продуктивність електричних компонентів системи. Він може включати:

- Трасування кривої I-V (струм-напруга): Допомагає швидко виявити проблеми, такі як забруднені панелі, тріщини елементів або деградацію, спричинену потенціалом (PID), без необхідності

вимірювання вихідної потужності. Вимірюється напруга холостого ходу (V_{oc}) та струм короткого замикання (I_{sc}) за допомогою мультиметра, а потім розраховується вихідна потужність ($P=V \cdot I$).

- Тестування опору ізоляції та заземлення: Вимірюється опір ізоляції, що оточує електричні провідники, для виявлення деградації ізоляції, яка може призвести до замикань на землю, коротких замикань та небезпеки.
- Аналіз даних інвертора: Оцінюється продуктивність інвертора для виявлення проблем, таких як відсікання (clipping), помилки зв'язку або інші операційні проблеми.
- Електролюмінесцентне (EL) тестування: За необхідності проводиться для виявлення мікротріщин та пошкоджень елементів. Хоча це зазвичай робиться в лабораторії, сучасне обладнання дозволяє виконувати це на місці.
- Перевірка функціональності захисних роз'єднувачів та автоматичних вимикачів: Забезпечується їхня належна робота.
- Перевірка правильного моменту затягування всіх електричних з'єднань.
- Використання інших передових діагностичних інструментів: Таких як аналізатори якості електроенергії та тестери стрінгів, для виявлення прихованих електричних несправностей та проблем зі з'єднанням.

П'ятий етап – термографічне обстеження. Це швидкий та відносно простий метод діагностики, який може застосовуватися на працюючій сонячній станції без її зупинки. Тепловізійні виміри бажано робити у декількох варіантах: під час холостого ходу, у режимі короткого замикання та під час роботи у точці максимальної потужності. При обстеженні панелей на вулиці слід проводити заміри в сонячний та безхмарний день, з мінімальним рівнем освітленості 700 Вт/м^2 (або не менше 500 Вт/м^2). Кут між тепловізором та сонячною панеллю має бути наближеним до 90° , але не

меншим ніж 60° . Важливо уникати віддзеркалення від оточуючих предметів та будівель, включаючи самого оператора. Тепловізійне обстеження із задньої сторони сонячних панелей є більш точним, ніж з передньої. Термографія також дуже корисна при обстеженні контактів і діодних коробок для завчасного виявлення місць поганого контакту та запобігання можливій пожежі.

Шостий етап – документування та фотофіксація. Важливо належним чином документувати всі виявлені проблеми та робити фотографії електричних панелей, розподільчих коробок, інверторів та проводки.

Сьомий етап – аналіз та звітність. Зібрані дані аналізуються для виявлення тенденцій та потенційних проблем.

Кожен модуль після оцінки за вказаною методикою класифікується на одну з трьох категорій:

- А – повністю придатні до тривалого повторного використання,
- В – з частковою функціональністю (потребують ремонту або зниження класу застосування),
- С – непридатні, підлягають утилізації або переробці.

На основі отриманих результатів складається детальний звіт про стан системи та надаються рекомендації щодо обслуговування або ремонту.

Цей алгоритм забезпечує систематичний та всебічний підхід до експрес-діагностики ФЕ модулів, дозволяючи оперативно виявляти дефекти та підтримувати оптимальну продуктивність сонячних електростанцій. [32]

2.3. Підбір засобів вимірювальної техніки для реалізації експрес-контролю вживаних фотоелектричних модулів

Вибір вимірювального обладнання для експрес-контролю фотоелектричних модулів є критично важливим для забезпечення точності, ефективності та економічної доцільності діагностичних робіт. Обґрунтування

вибору базується на вимогах до методики, а також на функціональних можливостях та характеристиках доступних на ринку приладів.

Основним критерієм вибору є відповідність обладнання вимогам експрес-контролю, а саме: швидкість, точність та неінвазивність вимірювань. Прилади повинні забезпечувати високу вірогідність контролю та бути простими і зручними у користуванні, що особливо важливо для польових умов.

Для візуального огляду не потрібне спеціалізоване електронне обладнання, проте для документування дефектів та подальшого аналізу доцільно використовувати цифрові фото- та відеокамери, можливо, інтегровані в мобільні пристрої.

Цифровий тестер фотоелектричних модулів UNI-T UT673PV, дозволяє отримати значення максимальної потужності на виході фотоелектричних модулів, обладнаний MPPT трекером.

Цей портативний тестер дозволяє вимірювати максимальну потужність, пікову напругу та струм, напругу холостого ходу та струм короткого замикання сонячних панелей. Прилад оснащений MC4 конекторами та працює без батарей, живлячись безпосередньо від сонячної панелі. Діапазони вимірювань: потужність 5–800 Вт, струм 0–35 А, напруга 12–60 В.[26]



Рисунок 2.1. Цифровий тестер фотоелектричних модулів UNI-T UT673PV.[26]

Вимірювач інтенсивності сонячного випромінювання Solar Survey 200R, також обладнаний вимірювачем кута нахилу. Цей прилад вимірює інтенсивність сонячного випромінювання за допомогою сонячної референтної клітини, що забезпечує високу точність. Модель 200R обладнана вбудованим інклінометром для вимірювання кута нахилу даху, компасом для вимірювання орієнтації даху та термометром для вимірювання температури навколишнього повітря і модуля. Також є функція бездротового з'єднання з тестерами PV150/PV200 та вбудований логгер даних, який може вести журнал даних з USB-інтерфейсом для завантаження даних на ПК. Це дозволяє записувати рівень опромінення та температуру на інтервали, визначені користувачем, протягом декількох годин або днів. Зібрані дані потім можуть бути завантажені на ПК для аналізу або включення в звіти.[27]

Solar Survey 100/200R Series

The ultimate solar site-survey tool.



Рисунок 2.2. Вимірювач інтенсивності сонячного випромінювання Solar Survey 200R.[27]

Мобільні системи для тестування фотоелектричних модулів
MBJ Mobile Lab 5.0

Ця мобільна лабораторія поєднує в собі LED сонячний симулятор класу A+A+A+ (IEC 60904-9 Ed.3) та систему електролюмінесценції з роздільною здатністю до 30 Мп. Вона дозволяє проводити вимірювання потужності, IV-характеристик, тестування діодів, а також опціонально – випробування HiPot та заземлення. Система компактна та може бути інтегрована в різні транспортні засоби. [28]



Рисунок 2.3. Мобільна лабораторія MBJ Mobile Lab 5.0 [28]

HT Instruments PV CHECKS

Цей багатофункціональний пристрій дозволяє проводити автоматичні тести на ізоляцію (до 1000 В), напругу холостого ходу та струм короткого замикання (до 1000 В / 15 А), а також перевірку безпеки заземлення. Він відповідає вимогам стандарту IEC/EN62446 та забезпечує швидке та безпечно тестування фотоелектричних систем. [29]



Рисунок 2.4. Багатофункціональний пристрій HT Instruments PV CHECKs [29]

Sonel PVM-1021 Pro

Цей тестер призначений для комплексного тестування фотоелектричних систем, включаючи вимірювання напруги, струму, опору ізоляції та перевірку заземлення. Він оснащений великим дисплеєм та інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, що спрощує процес тестування.[30]



Рисунок 2.5. Тестер Sonel PVM-1021 Pro[30]

Фотоелектричні модулі YINGLI YL-230-240PT-29B

Фотоелектричні модулі, які підлягали обстеженню YINGLI YL235PT-29B є частиною серії YGE 60 Cell 40mm виробництва компанії Yingli Solar. Дана модель призначена для експлуатації у різноманітних кліматичних умовах, зокрема в Україні, оскільки характеризуються високою ефективністю, сертифікаціями та надійністю, що робить їх популярним вибором для сонячних електростанцій.

Оновні технічні параметри YL235PT-29B:

- Тип елементів: 60 полікристалічних кремнієвих осередків (156×156мм)
- Розміри модуля: 1650 × 990 × 40 мм
- Вага: 19,1 кг
- Скло: 3,2 мм загартоване низько-залізне
- Рама: анодований алюмінієвий сплав
- З'єднувальна коробка: IP65, з 3 байпасними діодами
- Кабелі: довжина 1100 мм, переріз 4 мм²
- Конектори: MC4 або сумісні [31]

Таблиця 1. Характеристики фотоелектричного модуля YINGLI YL-230-240PT-29B при стандартних умовах (1 000 Вт/м², 25°C, АМ 1.5) [31]

Параметр	Значення для YL235PT-29B
Максимальна потужність (P _{max})	235 Вт
Напруга при P _{max} (V _{mp})	29,5 В
Струм при P _{max} (I _{mp})	7,97 А
Напруга холостого ходу (V _{oc})	37,0 В
Струм короткого замикання (I _{sc})	8,54 А
Коефіцієнт потужності:	-0,45%/°C
Коефіцієнт напруги V _{oc} :	-0,33%/°C
Коефіцієнт струму I _{sc} :	+0,06%/°C
NOCT (робоча температура):	46 ± 2°C
Максимальна напруга системи:	1000 В DC
Допустимий зворотний струм:	15 А
Діапазон робочих температур:	від -40°C до +85°C
Максимальне навантаження (сніг/вітер):	5400/2400 Па
Стійкість до граду:	до 25 мм при швидкості 23 м/с

Обґрунтування вибору також включає економічну доцільність та мінімізацію витрат на установку та обслуговування. Використання багатофункціональних приладів та портативних рішень, що дозволяють

проводити діагностику безпосередньо на місці, сприяє економії часу та коштів.

2.4. Побудова схеми тестування і послідовність вимірювань

Побудова ефективної схеми тестування та визначення чіткої послідовності вимірювань є ключовими для отримання достовірних даних під час експрес-контролю фотоелектричних модулів. Це дозволяє систематизувати процес діагностики та забезпечити виявлення широкого спектра дефектів.

Побудова схеми тестування передбачає організацію робочого місця та підключення вимірювального обладнання до фотоелектричного модуля або стрінгу. Залежно від типу тестування, схема може варіюватися.

Для вимірювання напруги холостого ходу (V_{oc}) та струму короткого замикання (I_{sc}) за допомогою мультиметра, підключення здійснюється наступним чином:

- Для V_{oc} : позитивний (червоний) щуп мультиметра підключається до позитивної вихідної клеми сонячної панелі, а негативний (чорний) щуп – до негативної клеми. Мультиметр встановлюється на режим вимірювання напруги постійного струму.

- Для I_{sc} : мультиметр переводиться в положення вимірювання сили струму постійного струму. Позитивний щуп мультиметра підключається до плюсової клеми сонячної панелі, а негативний щуп – до плюсового проводу, який раніше був підключений до сонячної панелі. Важливо пам'ятати, що для вимірювання струму мультиметр потрібно підключити послідовно.

При підключенні сонячних панелей до інвертора або контролера заряду для тестування, необхідно дотримуватися полярності: "+" до "+" і "-" до "-". На інверторі знаходяться входи, позначені як "PV Input", куди підключаються відповідні дроти. Також важливо забезпечити правильну полярність при під'єднанні батарей до інвертора та підключити інвертор до мережі будинку

через виходи, позначені "AC Output" або "Grid", використовуючи автоматичний вимикач для захисту системи. При послідовному з'єднанні панелей, позитивна клема однієї панелі з'єднується з негативною клемою наступної, що підвищує загальну вихідну напругу. При паралельному з'єднанні з'єднуються всі позитивні та негативні клеми.

Послідовність вимірювань при діагностиці ФЕМ повинна бути логічною та систематичною, дозволяючи послідовно виявляти та локалізувати дефекти.

Загальна послідовність може включати:

1. Попередній візуальний огляд: Огляд всього обладнання та ізоляції на механічні пошкодження, забруднень, запиленості модулів, деформацій, знебарвлення, іржі, ослаблених з'єднань або розбитих панелей.
2. Вимірювання електричних параметрів:
 - Вимірювання напруги холостого ходу (V_{oc}) та струму короткого замикання (I_{sc}) для кожного модуля або стрінгу.
 - Вимірювання напруги та струму в точці максимальної потужності (MPPT).
 - Проведення ревізії контактних з'єднань та перевірка болтових з'єднань.
 - Вимірювання опору заземлення.
 - Тестування опору ізоляції.
3. Термографічне обстеження: Вимірювання температури фотоелектричних модулів та силової частини інвертора за допомогою тепловізора. Рекомендується проводити обстеження в сонячний та безхмарний день з мінімальним рівнем освітленості 700 Вт/м^2 (або 500 Вт/м^2), під кутом $60-90^\circ$ до поверхні панелі, уникаючи віддзеркалень. Обстеження із задньої сторони панелей є більш точним.
4. Електролюмінесцентне (EL) тестування: Застосовується для виявлення прихованих дефектів, таких як мікротріщини, які не видно неозброєним оком.

5. Внутрішнє очищення інвертора від пилу та бруду (як частина обслуговування, що може впливати на продуктивність).
6. Документування результатів: Запис усіх вимірних параметрів, виявлених дефектів та їх локалізації.

Важливо, що для опису поточного стану фотомодулів, особливо після їх довгострокової експлуатації, необхідне знання більш повного набору параметрів, які характеризують електричні втрати та падіння ККД в процесі експлуатації, а також поведінку ФМ в польових умовах, що значно відрізняються від стандартних тестових умов (STC). Польові умови можуть суттєво відхилятися від STC, тому вимірювання необхідно проводити в динамічному режимі з урахуванням побічних факторів.

2.5. Приклад практичного застосування методики

Практичне застосування методики експрес-контролю фотоелектричних модулів дозволяє оперативно оцінити стан сонячної електростанції, виявити деградовані або несправні елементи та прийняти обґрунтовані рішення щодо їх обслуговування або заміни. Це особливо актуально для вживаних ФЕМ, чия номінальна потужність може бути нижчою від заявленої, а ефективність – зниженою через різні фактори.

Розглянемо приклад застосування методики для діагностики деградованого фотоелектричного модуля на діючій сонячній електростанції.

Сценарій: На сонячній електростанції, що експлуатується вже 5 років, спостерігається зниження загальної вихідної потужності. Необхідно провести експрес-контроль для виявлення причини.

Застосування методики:

1. Попередня підготовка:
 - Збір документації: Отримано схеми підключення стрінгів, технічні паспорти модулів, попередні звіти про продуктивність (якщо є).

- Підготовка обладнання: Заряджено тепловізор, I-V трейсер, мультиметр, перевірено наявність вимірювача опромінення та тестових кабелів.
2. Візуальний огляд:
- Команда інженерів проводить ретельний візуальний огляд усіх модулів у стрінгу, де спостерігається зниження потужності.
 - Виявлено кілька модулів з ознаками пожовтіння інкапсулянта та невеликими бульбашками на поверхні. На одному з модулів помічено "сліди равликів". Фіксуються всі виявлені візуальні дефекти та їх локалізація.
3. Електричне тестування (I-V характеристика):
- Вимірювач опромінення встановлюється поруч з тестованим модулем для фіксації інтенсивності сонячного світла (наприклад, 850 Вт/м²).
 - За допомогою I-V трейсера проводиться вимірювання кривих струм-напруга для кожного модуля з візуальними дефектами, а також для кількох "здорових" модулів для порівняння.
 - Аналіз кривих I-V виявив, що модулі з пожовтінням та "слідами равликів" мають знижений коефіцієнт заповнення (FF) та максимальну потужність (MPP) порівняно зі "здоровими" модулями та заявленими характеристиками виробника. Це вказує на деградацію, що призводить до втрат потужності.
4. Інфрачервона термографія:
- Використовуючи тепловізор, проводиться сканування модулів, особливо тих, де виявлено візуальні дефекти та знижену продуктивність.
 - На модулі зі "слідами равликів" та на одному з пожовтілих модулів виявлено локальні гарячі точки (hot spots), що вказують на ділянки

перегріву. Це може бути наслідком мікротріщин або проблем з електричними з'єднаннями, що викликають підвищений опір.

- Також перевірено розподільчі коробки та байпасні діоди на наявність перегріву, що може свідчити про їхню несправність.

5. Електролюмінесцентне (EL) зображення (за необхідності, якщо є мобільне обладнання

- Для модулів з гарячими точками та "слідами равликів" проводиться EL-тестування.
- EL-зображення підтверджує наявність мікротріщин у сонячних елементах під "слідами равликів" та в ділянках гарячих точок, що є прихованою причиною зниження продуктивності.

6. Тестування опору ізоляції:

- Проводиться вимірювання опору ізоляції для стрінгів та окремих модулів, щоб переконатися у відсутності струмів витоку та проблем з електричною безпекою.

Результати та рекомендації: На основі проведеного експрес-контролю встановлено, що зниження потужності сонячної електростанції спричинене деградацією інкапсулянта (пожовтіння), утворенням "слідів равликів" та мікротріщин, що призводять до утворення гарячих точок. Рекомендовано замінити найбільш деградовані модулі та посилити моніторинг за модулями з менш вираженими дефектами. Також надано рекомендації щодо покращення вентиляції інвертора та перевірки його внутрішнього очищення.

Цей приклад демонструє, як інтегроване застосування візуальних, електричних та теплових методів експрес-контролю дозволяє швидко та ефективно діагностувати проблеми вживаних ФЕМ без необхідності демонтажу та транспортування до лабораторії, що значно економить час та кошти.

2.6. Висновки до розділу 2

Розділ 2 детально розглянув процес розробки методики експрес-контролю та підбору засобів вимірювальної техніки для фотоелектричних модулів, особливо вживаних. Було визначено ключові вимоги до такої методики, що включають швидкість, точність, неінвазивність, адаптованість до польових умов, відповідність стандартам та економічну доцільність.

Запропонований алгоритм неруйнівної експрес-діагностики показав, що кожен з них має власні переваги та недоліки, які взаємно доповнюють одне одного при оцінці стану фотоелектричних модулів у польових умовах. Найбільш ефективними для швидкої перевірки виявилися візуальна інспекція, вимірювання вольт-амперної характеристики (I-V), інфрачервоне тепловізійне обстеження та тестування ізоляційного опору — завдяки оптимальному поєднанню оперативності, мобільності, вартості та здатності виявляти ключові показники безпеки і технічної ефективності. Водночас метод електролюмінесцентного аналізу дозволяє отримати глибшу діагностичну інформацію, проте його використання обмежене в умовах швидкого виїзного обстеження. Основні критерії придатності модулів до повторної експлуатації включають як показники безпечності (зокрема, рівень опору ізоляції, відсутність серйозних механічних ушкоджень або зон перегріву), так і параметри ефективності — передусім ступінь зниження максимальної потужності (P_{max}) порівняно з номінальними характеристиками. Цей комплексний підхід дозволяє виявляти як очевидні фізичні пошкодження, так і приховані електричні та структурні дефекти, що суттєво впливають на продуктивність та довговічність модулів. [32]

Обґрунтування вибору вимірювального обладнання базувалося на функціональних можливостях приладів, їхній точності, портативності та здатності працювати в польових умовах. Були розглянуті I-V трейсери, тепловізори, EL-камери, тестери опору ізоляції, флеш-тестери, та інші засоби, що дозволяють отримати повний набір діагностичних даних.

Побудова схеми тестування та послідовність вимірювань підкреслили важливість правильного підключення обладнання та систематичного

виконання діагностичних кроків для забезпечення достовірності результатів. Особлива увага приділялася умовам проведення вимірювань, таким як інтенсивність сонячного випромінювання та кут огляду для термографії.

Приклад практичного застосування методики продемонстрував її ефективність у виявленні дефектів, таких як пожовтіння інкапсулянта, "сліди равликів" та мікротріщини, що призводять до утворення гарячих точок та зниження потужності.

РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОЗРОБЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ПРИДАТНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

3.1 Проведення експериментальних досліджень розробленої методики експрес-контролю придатності вживаних фотоелектричних модулів

Основна мета даної науково-дослідної роботи полягає у створенні та впровадженні ефективної методики оперативної перевірки технічного стану використаних фотоелектричних модулів з метою визначення їх відповідності умовам повторного застосування. Запропонований підхід має забезпечити виявлення елементів, що зберегли працездатність, сприяти зменшенню обсягів електронних відходів, скороченню витрат на діагностику та забезпеченню стабільності функціонування повторно введеного в експлуатацію обладнання.

В рамках експериментальної частини дослідження було здійснено аналіз партії модулів моделі YINGLI YL-230-240PT-29B, які попередньо експлуатувалися в умовах діючої сонячної електростанції. Дослідницька діяльність проводилась за умов впливу природного середовища, включаючи змінні метеорологічні та експлуатаційні фактори.

Ключові завдання, визначені у межах дослідження:

1. Розробити покрокову схему виконання експрес-контролю без пошкодження структури модулів;
2. Провести обґрунтований вибір вимірювальних засобів із врахуванням критичних показників — точності, мобільності та оперативності
3. Реалізувати практичне випробування методики на зазначеній моделі фотомодулів;
4. Порівняти отримані під час тестування електричні характеристики з номінальними даними виробника;
5. Здійснити класифікацію зразків залежно від ступеня деградації та рівня функціональності.

У процесі реалізації методики було використано комплекс неруйнівних діагностичних методів, зокрема:

- Візуальний аналіз з метою виявлення зовнішніх пошкоджень, тріщин, пошкоджень захисного скла чи ламінування;
- Тестування ізоляції, що дозволяє оцінити електричну безпеку;
- Інфрачервоне сканування, яке дає змогу ідентифікувати термічні дефекти, включаючи гарячі точки;
- Дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ), що забезпечує комплексну оцінку ефективності модуля;
- Електролюмінесцентна візуалізація як допоміжний інструмент для виявлення прихованих дефектів, мікротріщин або порушень внутрішньої структури.

Згідно з результатами контролю модулі було розподілено за технічним станом на три категорії:

- Категорія А — повністю функціональні модулі, придатні для подальшої експлуатації;
- Категорія В — частково функціональні модулі з відхиленнями від номінальних показників, які придатні до ремонту або використання в менш потужних системах;
- Категорія С — елементи з критичними пошкодженнями, що не підлягають подальшому використанню й мають бути передані на утилізацію чи вторинну переробку.

Експериментальні дослідження здійснювалися на відібраних фотоелектричних модулях, кожен з яких перевірявся на відповідність основним електричним характеристикам. Додатково використовувалася еталонна панель-свідок, яка дозволяла враховувати вплив метеорологічних умов (інсоляції та температури) під час вимірювання, а також нормування результатів до стандартних умов STC (1000 Вт/м², 25 °С, АМ 1.5). Для виконання вимірювань застосовувалися сучасні високоточні прилади, зокрема:

UNI-T UT673PV— цифровий тестер, який дозволяє швидко отримувати основні електричні параметри фотомодуля;

Solar Survey 200R — прилад для фіксації поточного рівня сонячної інсоляції та нормування отриманих даних відповідно до стандартних умов (STC);

MBJ Mobile Lab 5.0 — мобільна лабораторія для глибокої діагностики продуктивності з використанням електролюмінесценції та ВАХ-аналізу;

HT Instruments PV CHECKs — універсальний прилад для перевірки ізоляції, з'єднань та відповідності технічним параметрам;

Sonel PVM-1021 Pro — діагностичний прилад для комплексного аналізу продуктивності при змінних умовах освітлення та навантаження;

Еталонна панель-свідок, що слугувала для коригування результатів вимірювань з урахуванням поточних погодних умов

YL240PT-29b SERIES

ELECTRICAL PARAMETERS

Electrical parameters at STC (1,000 W/m², 25°C, AM 1.5 according to EN 60904-3)

Module type		YL230PT-29b	YL235PT-29b	YL240PT-29b
Power output	[W]	230.0	235.0	240.0
Power output production tolerances	[%]	+/- 3	+/- 3	+/- 3
Module efficiency	[%]	14.1	14.4	14.7
Voltage at Pmax, V _{mpp}	[V]	29.5	29.5	29.5
Current at Pmax, I _{mpp}	[A]	7.80	7.97	8.14
Open circuit voltage V _{oc}	[V]	37.0	37.0	37.5
Short circuit current I _{sc}	[A]	8.40	8.54	8.65
Limiting reverse current I _r	[A]		20	
Max. system voltage	[V]		1,000 VDC	

Рисунок 3.1. Паспортні параметри модулів YINGLI YL 230-240 PT-29B за STC.

Вимірювання проводились у денний період за сприятливих погодних умов, тобто за ясної безхмарної погоди. Інтенсивність сонячного випромінювання змінювалась у межах 207–890 Вт/м², а температура поверхні модулів коливалась між 47–51 °С. Паралельно фіксувалися кути нахилу панелей, що дало змогу врахувати вплив положення сонця на результати.

Для кожного зразка фіксувалися такі параметри:

Поточна інсоляція (Вт/м²); кут нахилу (°); V_{oc}, I_{sc}; V_{mpp}, I_{mpp}; Фактична потужність (P_{mpp}); температура модуля під час вимірювання.



Рисунок 3.2. Використання вимірювальних приладів під час експрес-контролю сонячних панелей. Цифровий тестер UNI-T UT673PV (справа) [26] та вимірювач інтенсивності сонячного випромінювання Solar Survey 200R (зліва) [27].



Рисунок 3.3. Використання вимірювальних приладів під час експрес-контролю панелі-свідка. Цифровий тестер UNI-T UT673PV (посередині) [26] , вимірювач інтенсивності сонячного випромінювання Solar Survey 200R (зліва) [27] та датчик температури поверхні сонячної панелі (справа).

Зібрані дані були зведені в таблицю, після чого здійснено нормування потужності до стандартних умов з використанням результатів панелі-свідка. Усі подальші розрахунки та графіки представлено в підрозділі 3.2.

3.2 Аналіз отриманих даних експрес-контролю фотоелектричних модулів

Дослідження експрес-контролю вживаних фотоелектричних модулів з метою їх вторинного використання є ключовим етапом у визначенні їх енергетичної ефективності. У даному розділі буде розглянуто експериментальне дослідження проведене згідно з розробленою методикою. Було здійснено обробку результатів, приведених до стандартних умов STC (1000 Вт/м², 25 °С) та подальший аналіз технічного стану використаних модулів.

У таблиці 3.1 представлені результати вимірювань сонячних панелей ,які проводилися з фіксацією низки важливих параметрів. Отримані результати, які включають показники інсоляції, кута нахилу, V_{oc} , I_{kz} , I_{mppt} і V_{mppt} , а також розраховані значення P_{mppt} та ΔP .

$$P_{mppt} = V_{mppt} \times I_{mppt}$$

Де P_{mppt} – фактична потужність(Вт), V_{mppt} - напруга в точці максимальної потужності(В), I_{mppt} – струм в точці максимальної потужності(А)

Наступним кроком оцінимо рівень деградації

$$\Delta P = (1 - P_{mppt} / P_{номін}) \cdot 100\%$$

Де ΔP - відносне відхилення потужності(%), P_{mppt} – фактична потужність(Вт), $P_{номін}$ – номінальна потужність, яка за технічними характеристиками дорівнює 235 Вт.

Таблиця 3.1. Результати вимірювань фотоелектричних модулів[32]

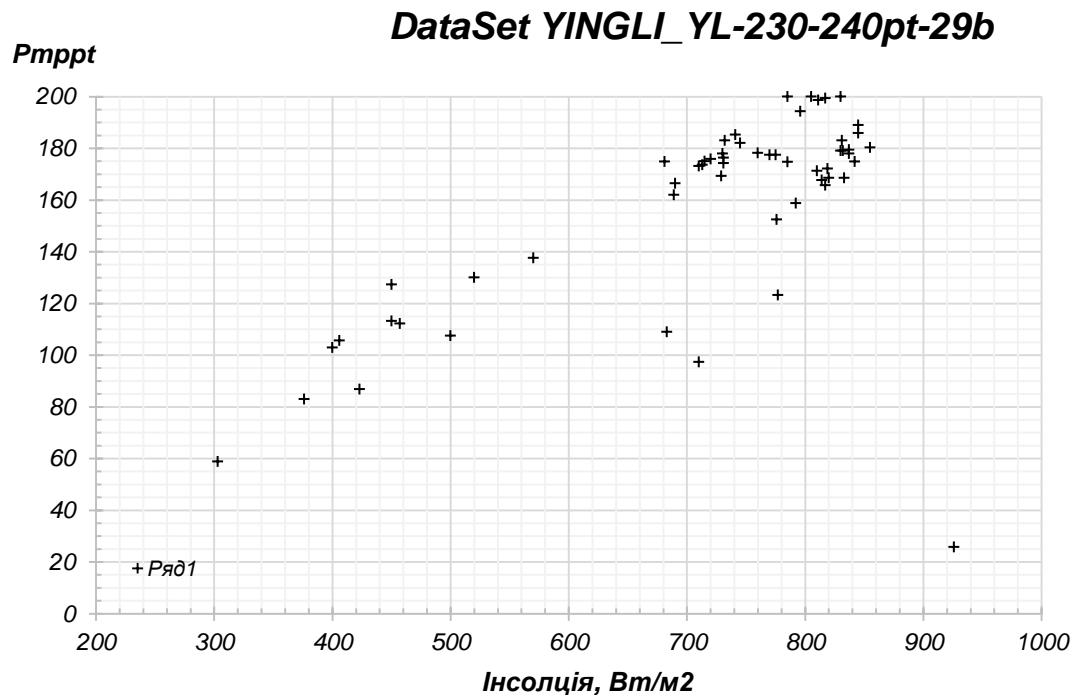
YINGLI_YL-230-240pt-29b								
№	Інсоляція Вт/м ²	Кут нахилу	V_{oc}	I_{kz}	P_{mppt}	I_{mppt}	V_{mppt}	$\Delta P, \%$
1	450	68	34	3,8	113,2	3,3	34,3	51,83
2	376	70	34,3	3,1	83	2,5	33,2	64,68

3	423	63	34,5	3,4	86,8	2,6	33,4	63,06
4	710	63	34,5	4,6	97,3	3,7	26,3	58,60
5	777	71	35,2	6,2	123,2	5,6	22	47,57
6	741	68	35,1	6,3	185,3	5,6	33,1	21,15
7	776	74	35,1	5,9	152,5	4,5	33,9	35,11
8	796	70	35,3	6,5	194,3	5,8	33,5	17,32
9	811	72	35,2	6,7	198,6	6	33,1	15,49
10	829	72	35,9	6,9	208,6	6,1	34,2	11,23
11	817	80	35,6	6,7	199,4	5,9	33,8	15,15
12	785	84	36	6,4	200	5,9	34	14,89
13	723	74	36	6,7	209,8	6,1	34,4	10,72
14	730	73	36	6,7	207,4	6,1	34	11,74
15	829	74	36,5	6,8	212,6	6,2	34,3	9,53
16	834	70	36,6	6,9	214,5	6,2	34,6	8,72
17	837	73	37	6,9	179,5	6,3	28,5	23,62
18	820	79	35,3	6,5	168,5	5	33,7	28,30
19	926	74	34,7	6,2	25,7	4,6	5,6	89,06
20	833	72	35,2	6,7	168,5	5	33,7	28,30
21	818	78	35,4	6,9	205,2	6,2	33,1	12,68
22	805	79	34,5	6,6	200	6,1	32,8	14,89
23	792	85	34,5	6,4	158,8	4,8	33,1	32,43
24	830	73	34,5	6,9	200	6,2	32,3	14,89
25	810	72	34,7	6,9	171,3	5,1	332,9	27,11
26	814	74	34,6	6,8	204,1	6,3	32,4	13,15
27	814	71	34,5	6,7	167,7	5,1	32,9	28,64

Таблиця 3.1. - Продовження таблиці

28	817	76	34,4	5,8	165,7	5,1	32,5	29,49
29	842	71	34,6	7	174,9	5,3	33	25,57
30	732	74	35,4	7	183	5,4	33,9	22,13
31	845	72	35,4	7	185,9	5,5	33,8	20,89
32	837	70	35,5	7	178	5,3	33,6	24,26
33	845	70	35,4	6,8	189	5,4	33,5	19,57
34	855	68	35,2	7,1	180,3	5,4	33,4	23,28
35	832	65	35,4	6,6	179,1	5,3	33,8	23,79
36	830	74	35,4	6,8	179,1	5,3	33,8	23,79
37	831	73	35,4	6,9	183	5,4	33,9	22,13
38	720	75	34,9	5,9	175,9	5,3	33,1	25,15
39	760	73	34,9	6,2	178,2	5,4	33	24,17
40	731	70	34,7	6,1	176,4	5,3	33,3	24,94
41	681	74	35	5,7	174,9	5,3	33	25,57
42	729	75	35,2	5,6	169,3	5,1	33,2	27,96
43	731	74	35	6,1	174,3	5,3	32,9	25,83

44	689	74	34,7	5,2	162	4,9	33,1	31,06
45	770	75	34,9	6,2	177,5	5,3	33,5	24,47
46	785	73	35,3	6,4	174,7	5,2	33,6	25,66
47	819	72	34,8	6,7	172,1	5,2	33,1	26,77
48	775	70	35,1	6,3	177,5	5,3	33,5	24,47
49	745	71	35,2	6,2	182	5,3	34	22,55
50	710	73	35,1	5,7	173,1	5,2	33,3	26,34
51	713	76	35,4	5,7	173,6	5,2	33,4	26,13
52	730	73	35,4	5,9	178	5,3	33,6	24,26
53	715	75	35,5	5,7	175	5,2	33,8	25,53
54	570	75	35,6	5	137,6	4	34,4	41,45
55	520	76	35,7	4,1	130	3,8	34,3	44,68
56	457	78	35,2	3,7	112,2	3,3	34	52,26
57	406	73	35,6	3,3	105,7	3,1	34,1	55,02
58	500	78	35,5	3,4	107,5	3,2	33,6	54,26
59	683	73	23,5	5,4	109	5	21,8	53,62
60	400	74	34,4	3,3	102,9	3,1	33,2	56,21
61	303	73	33,9	2	58,8	1,8	32,7	74,98
62	690	67	35,2	5,2	166,5	5	33,3	29,15
63	450	75	35	4	127,3	3,8	33,5	45,83



Графік 3.1. Залежність максимальної потужності (P_{mppt} , Вт) від інсоляції (Вт/м²)[32]

Аналіз даних представлених у таблиці 3.1 та на графіку залежності максимальної потужності (P_{mppt} , Вт) від інсоляції (Вт/м²) дозволяє виявити

вплив зовнішніх факторів на електричні параметри. По-перше можемо спостерігати пряму залежність електричних характеристик панелі від інсоляції. Тобто, зі зростанням інтенсивності сонячного випромінювання можемо спостерігати, як значно зростає струм короткого замикання (I_{kz}) та струм у точці максимальної потужності (I_{mppt}). Наприклад, при найнижчій інсоляції 303 Вт/м^2 (вимірювання №61) зафіксовано найменшу потужність 58.8 Вт , тоді як при інсоляції 834 Вт/м^2 (вимірювання №16), P_{mppt} досягає 214.5 Вт . Але так і повинно бути, оскільки більша кількість сонячної енергії генерує більшу кількість електричного струму.

Зміна напруги (V_{oc} та V_{mppt}) менш виражена до зміни інсоляції, але помітне зниження V_{mppt} (наприклад, вимірювання №5 - 22.0 В , №17 - 28.5 В , №19 - 5.6 В), при вищих рівнях інсоляції (777 Вт/м^2 , 837 Вт/м^2 , 926 Вт/м^2). Це свідчить про вплив підвищення температури панелі, оскільки нагрівання фотоелектричних комірок призводить до зниження їхньої робочої напруги.

Особливо яскраво це простежується у вимірюванні №19, де при найвищій інсоляції (926 Вт/м^2) зафіксовано аномально низькі V_{oc} (34.7 В) і V_{mppt} (5.6 В) та відповідно низьку P_{mppt} (25.7 Вт), що може бути ознакою значного перегріву або чогось іншого в роботі панелі.

Вплив кута нахилу на панель у вимірюваннях не є однозначним через коливання інсоляції. Представлені кути ($63-85^\circ$) є досить крутими проте, можна помітити, що найкращі показники P_{mppt} (близько $200-214 \text{ Вт}$) були досягнуті при кутах нахилу в діапазоні $68-74^\circ$ (вимірювання №10, 13, 15, 16). Це свідчить про те, що для умов, в яких проводилися вимірювання (сонячний день, безхмарне небо), ці кути виявилися найбільш ефективними для отримання сонячного випромінювання.

Розрахована зафіксована максимальна потужність (P_{mppt}) досягаючи свого максимуму в 214.5 Вт (вимірювання №16) при найвищій інсоляції (834 Вт/м^2 , вимірювання №5) та куті нахилу 70° . Це найбільш близьке значення до номінальної потужності 235 Вт , отримане в даних умовах.

Найменша потужність була зафіксована у вимірюванні №19(25.7 Вт) та №4(97.3 Вт) , при високій інсоляції (926 Вт/м² та 710 Вт/м²), що вказує низьку ефективність , але ці дані пояснюються тим що вимірювання проводилися на пошкоджених (розбитих) панелях.

Особливу увагу слід звернути на показник відхилення потужності (ΔP), який коливається в досить широкому діапазоні (8,72%-89,06%) і розрахований відносно номінальної потужності панелі 235 Вт. Найменше відхилення ΔP (8.72%) зафіксовано у вимірюванні №16 (P_{mppt} 214.5 Вт), що є найкращим показником ефективності в реальних умовах, враховуючи, що інсоляція (834 Вт/м²) була нижчою за STC (1000 Вт/м²). Високі значення ΔP (понад 40%) на початку вимірювань (№1-3) та у вимірюваннях з низькою інсоляцією (№54-61), пояснюються відмінністю умов вимірювання від Стандартних Тестових Умов (STC). Високі значення ΔP у вимірюваннях №4 (58.60%) та №19 (89.06%) є наслідком пошкоджень панелей, що вимірювалися. Ці цифри яскраво показують, наскільки суттєво фізичне пошкодження може вплинути на продуктивність сонячного модуля, роблячи його практично непридатним для ефективної генерації енергії.

Отримані результати вимірювань показують важливість врахувати не лише номінальні значення сонячних панелей, але й конкретних умов експлуатації та фізичного стану модулів для точної оцінки їхньої фактичної продуктивності.

Таблиця 3.2. Результати вимірювань панелі-свідка[32]

YINGLI_YL-230-240pt-29b									
№	Інсоляція Вт/м²	Кут нахилу	Voc	Iкз	P_{mppt}, свідок	I_{mppt}	V_{mppt}	t, C	ΔP, %
1	890	33	32,8	7,6	186,0	6,2	30,0	47	20,85
2	886	42	32,5	7,4	190,7	6,4	29,8	50	18,85
3	843	53	32,3	6,9	160,0	5,3	30,2	51	31,91
4	733	65	32,1	5,9	155,8	5,3	29,4	51	33,70
5	613	78	31,7	4,9	123,4	4,9	29,4	51	47,49
6	587	80	32,1	4,6	114,0	3,8	30,0	50	51,49
7	506	85	31,9	3,9	104,3	3,5	29,8	49	55,62
8	469	88	31,4	3,6	85,8	2,9	29,6	51	63,49

9	370	89	31,5	3,0	79,6	2,7	29,5	51	66,13
10	207	105	31,6	2,2	49,4	1,7	29,1	51	78,98

Дані представлені у таблиці 3.1(досліджувана панель) та таблиці 3.2

(панель-свідок) дозволяє виявити закономірність у роботі сонячних панелей . Оскільки вимірювання проводилися у сонячний день при безхмарному небі це забезпечило стабільні умови освітлення.

Порівнюючи дані обидвох таблиць , можна побачити пряму залежність між рівнем інсоляції та виробленою потужністю (P_{mppt}) та струмом (I_{kz} , I_{mppt}). Чим вища інтенсивність сонячного випромінювання, тим вищий струм і потужність. Це спостерігається як для досліджуваних панелей, так і для панелі-свідка.

Вплив на напругу (V_{oc} та V_{mppt}) : дані панелі-свідка підтверджують вплив температури, при зростанні температури панелі-свідка з 47°C до 51°C (№1 та №5), V_{oc} і V_{mppt} мають незначне зниження, незважаючи на зміну інсоляції, що є характерною поведінкою для кремнієвих модулів.

Вплив кута нахилу для панелі-свідка. Зі збільшенням кута нахилу (з 33° до 105°), P_{mppt} панелі-свідка знижується, оскільки інсоляція також зменшується (від 890 Вт/м^2 до 207 Вт/м^2). Це відображає , те що зі збільшенням кута нахилу (відхилення від оптимального) зменшується площа освітлення та відхилення потужності зростає.

Зростання $\Delta P\%$ прямо залежить від падіння P_{mppt} (максимальної потужності в точці максимальної потужності). Адже високе відхилення означає, що панель виробляє значно менше енергії, ніж могла б за ідеальних умов. Наприклад, P_{mppt} падає з $190,7 \text{ Вт}$ до $49,4 \text{ Вт}$, коли ΔP зростає з $18,85\%$ до $78,98\%$. Ці дані показують, наскільки критично важливими для ефективної роботи сонячної панелі є достатня інсоляція та оптимальний кут нахилу. Великі значення $\Delta P\%$ при низькій інсоляції та несприятливих кутах показують значні втрати потужності в таких умовах.

Порівняльний аналіз продуктивності (Досліджувані панелі та Панель-свідок) . Для точнішої оцінки стану досліджуваних панелей, необхідно

порівняти їхню продуктивність з панеллю-свідком, що працює в аналогічних умовах. Оскільки порівняння за інсоляцією та кутом нахилу для кожного вимірювання досліджуваних панелей та свідка не можливе (через різні набори даних), ми можемо виділити загальні тенденції та порівняти співвідношення P_{mppt} до інсоляції (що є показником ефективності) або шукати найближчі за умовами вимірювання.

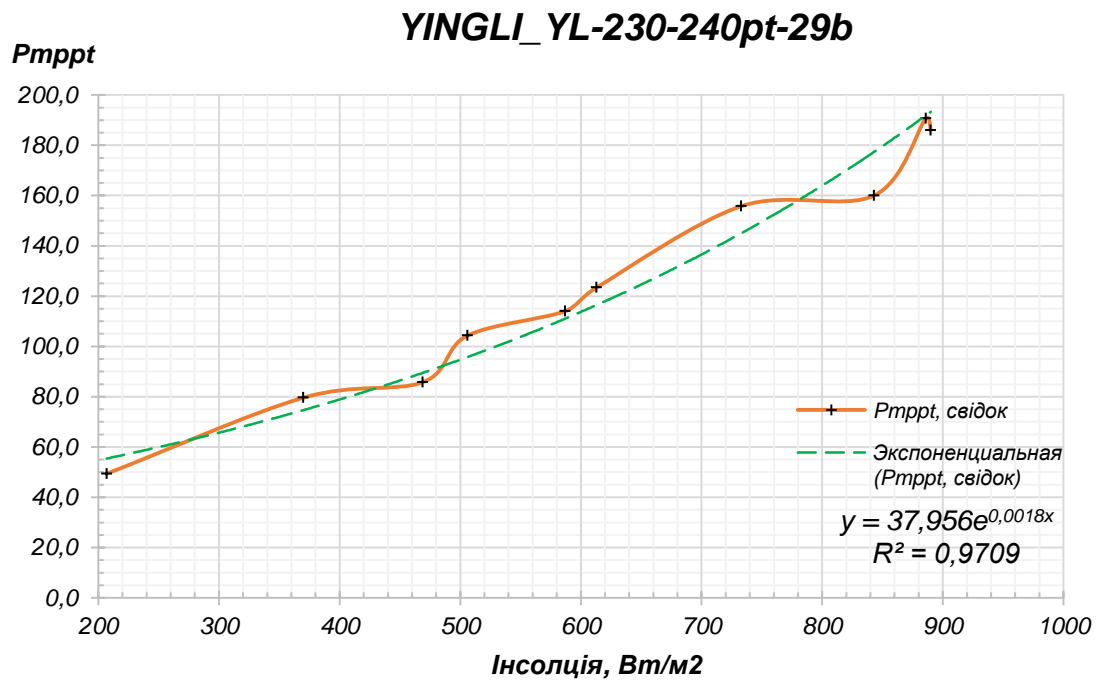
Наприклад, порівняємо панелі при інсоляції близько 700-800 Вт/м²: Досліджувані панелі (№8-16): При інсоляції 796-834 Вт/м² та кутах 70-74°, P_{mppt} коливається в межах 194.3-214.5 Вт. Це відповідає ΔP від 8.72% до 17.32%. Панель-свідок (№1-4): При інсоляції 733-890 Вт/м² та кутах 33-65°, P_{mppt} складає 155.8-190.7 Вт.

Навіть при нижчих кутах нахилу, продуктивність панелі-свідка дещо нижча, ніж у найкращих показників досліджуваних панелей при їхніх менш оптимальних кутах (68-74°). Це може вказувати на те, що досліджувана панель, за винятком пошкоджених, є більш новою/ефективною або менш деградованою в цілому, ніж панель-свідок. Це показує, що "високі" кути для досліджуваних панелей можуть бути оптимальними для місця встановлення.

Загальне відхилення (ΔP): більшість значень ΔP для досліджуваних панелей знаходиться у діапазоні 10-30%. Це відхилення є нормальним для реальних умов експлуатації, оскільки інсоляція (303-926 Вт/м²) значно нижча за стандартні 1000 Вт/м², а температура панелей (яка виміряна лише для свідка, для досліджуваних вона також була високою, близько 47-51°C) значно перевищує 25°C. Обидва ці фактори приводять до зменшення фактичної потужності порівняно з паспортною. Найменше відхилення ΔP (8.72%) у вимірюванні №16 (P_{mppt} 214.5 Вт при 834 Вт/м² інсоляції) підтверджує, що за сприятливих умов панель може наближуватися до своєї номінальної потужності.

Вплив температури на продуктивність: дані панелі-свідка (t близько 47-51°C) показують, що реальна робоча температура панелей на відкритому сонці значно перевищує 25°C STC. Це є однією з основних причин того, що

фактична P_{mppt} як досліджуваних панелей, так і панелі-свідка, завжди нижча за номінальну потужність, оскільки підвищення температури негативно впливає на ефективність фотоелектричного перетворення.



Графік 3.2. Залежність P_{mppt} панелі-свідка від інсоляції [32]
 Де e – це математична константа (число Ейлера).

37,956 – коефіцієнт, який відображає приблизну потужність панелі за умов, близьких до нульової інсоляції.

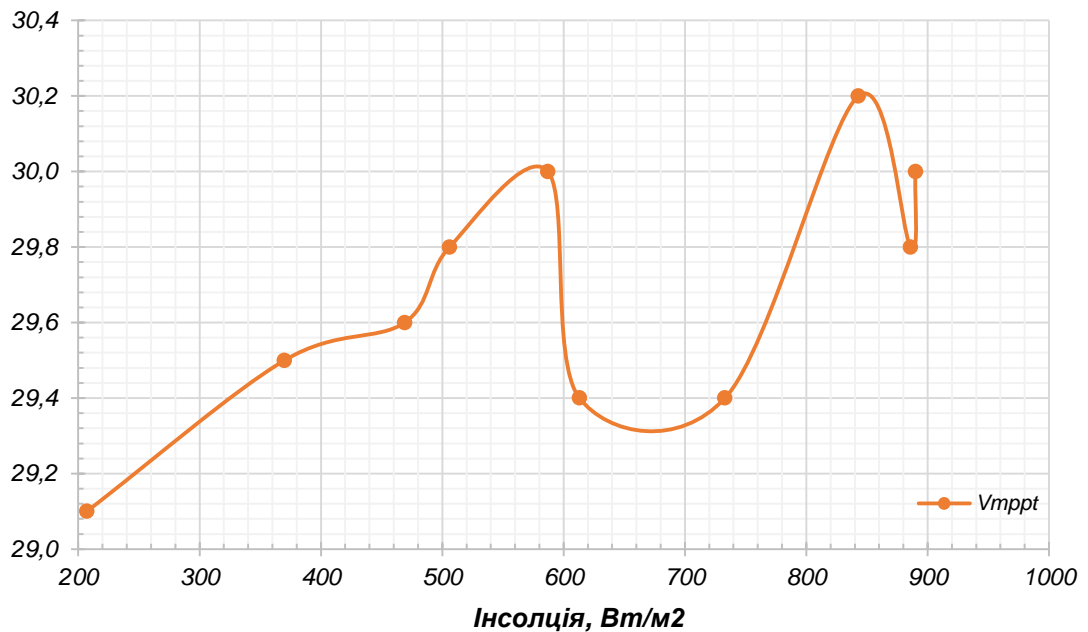
0,0018 – це коефіцієнт, який показує швидкість зростання потужності залежно від інсоляції.

$R^2 = 0,9709$ – коефіцієнт детермінації

R^2 показує, наскільки добре модель (лінія тренду) відповідає фактичним даним.

0,9709 (або 97,09%) є дуже високим, а це означає, що варіації у максимальній потужності (P_{mppt}) панелі-свідка пояснюється змінами інсоляції. На даному графіку чітко видно, що зі збільшенням інсоляції зростає і максимальна потужність, яку генерує панель-свідок. Що підтверджує основний принцип роботи сонячних панелей.

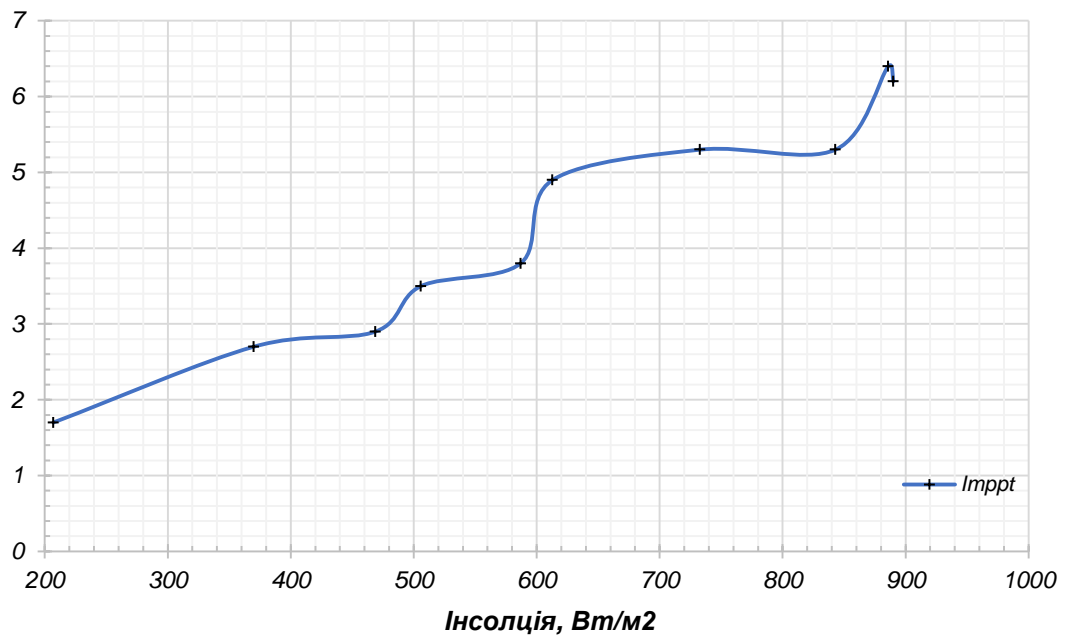
YINGLI_YL-230-240pt-29b



Графік 3.3. Залежність напруги в точці максимальної потужності (V_{mppt}) панелі-свідка від інсоляції[32]

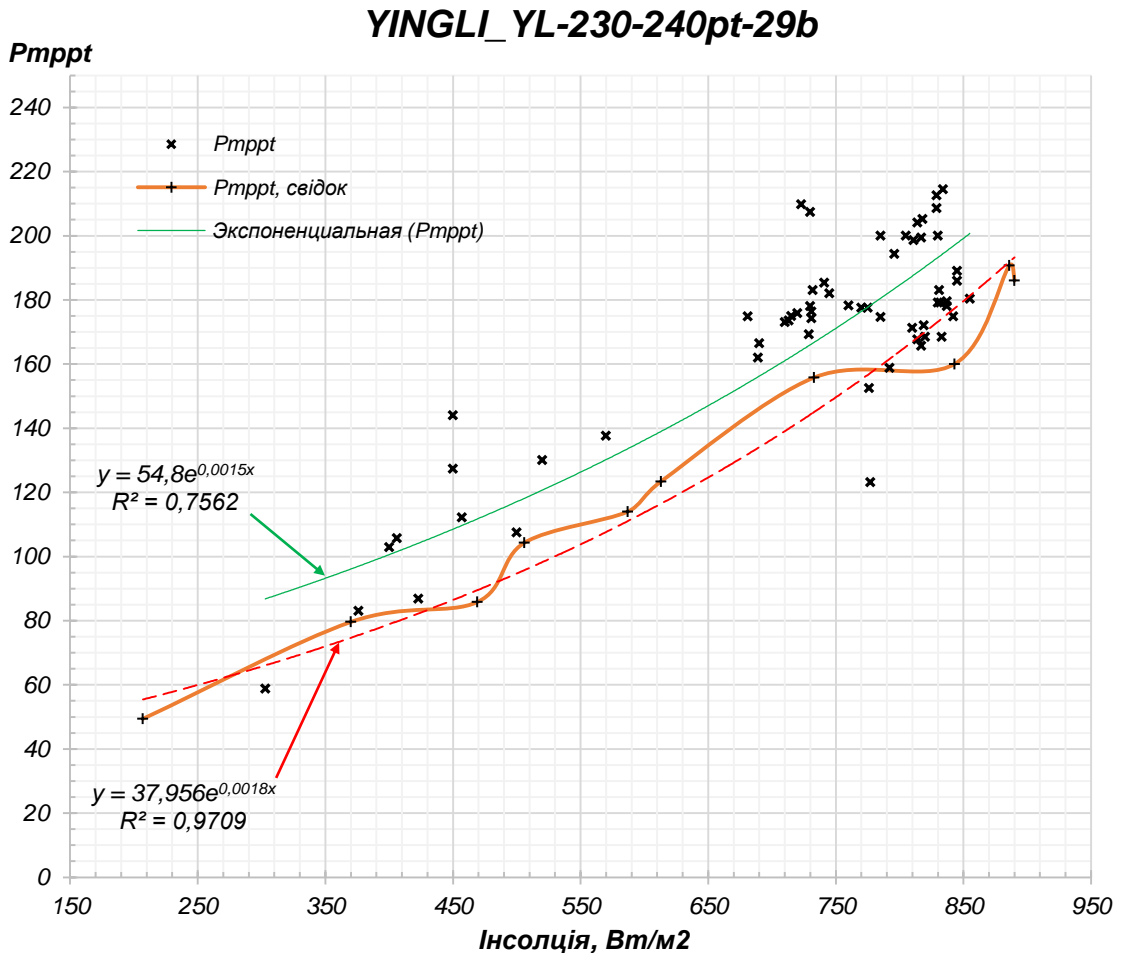
На графіку видно як V_{mppt} змінюється при різній інтенсивності сонячного випромінювання. На початку можемо бачити низьку інсоляцію (200-500 Вт/м²) з поступовим підвищенням V_{mppt} . Коли інсоляція 500-600 Вт/м², відбувається помітне зниження V_{mppt} , що пов'язане з підвищенням температури панелі, через що падає напруга. 600-8500 Вт/м², V_{mppt} знову зростає досягаючи піку біля 850 Вт/м². Після чого ще одне падіння, ймовірно через вплив температури або зміни кута, що приводить до зростання температури.

YINGLI_YL-230-240pt-29b



Графік 3.4. Залежність струму в точці максимальної потужності (I_{mppt}) панелі-свідка від інсоляції[32]

На даному графіку видно, як I_{mppt} змінюється при різних інтенсивностях сонячного випромінювання. Графік демонструє лінійну залежність: зі зростанням інсоляції струм I_{mppt} послідовно і майже прямолінійно зростає. Чим більше сонячного світла потрапляє на панель, тим більше фотонів поглинається і тим більше генерується струму. Хоча є невеликі "вигини" наприклад, між 500-600 Вт/м², загальна тенденція є чітким лінійним зростанням. Ці нерівності можуть бути пов'язані з особливостями вимірювання або незначним впливом інших факторів.



Графік 3. 5. Порівняння залежності максимальної потужності (P_{mppt}) досліджуваних сонячних панелей та панелі-свідка від інсоляції.[32]

На графіку чітко видно більшість чорних хрестиків (здорові панелі), які групуються у верхній частині графіка, особливо при вищій інсоляції (понад 650 Вт/м²). Це означає, що здорові досліджувані панелі генерують більшу потужність, ніж панель-свідок, за однакової або близької інсоляції. Також можемо побачити, що зелена лінія (досліджувані панелі) знаходиться вище помаранчевої лінії (панель-свідок) майже по всьому діапазону інсоляції. Це візуально підтверджує висновок, що досліджувані панелі (за винятком пошкоджених) працюють ефективніше, ніж панель-свідок. Це може бути пов'язано з тим, що свідок сам вже має певну деградацію або є менш ефективним модулем.

Точки, які значно відхиляються від основних ліній - це точка близько інсоляції 920 Вт/м² та P_{mppt} лише 25 Вт. Це вимірювання №19 (розбита

панель), яка демонструє катастрофічне падіння продуктивності. Також можна помітити іншу низьку точку (близько 700 Вт/м² інсоляції та P_{mppt} близько 90-100 Вт), що відповідає вимірюванню №4 (інша розбита панель).

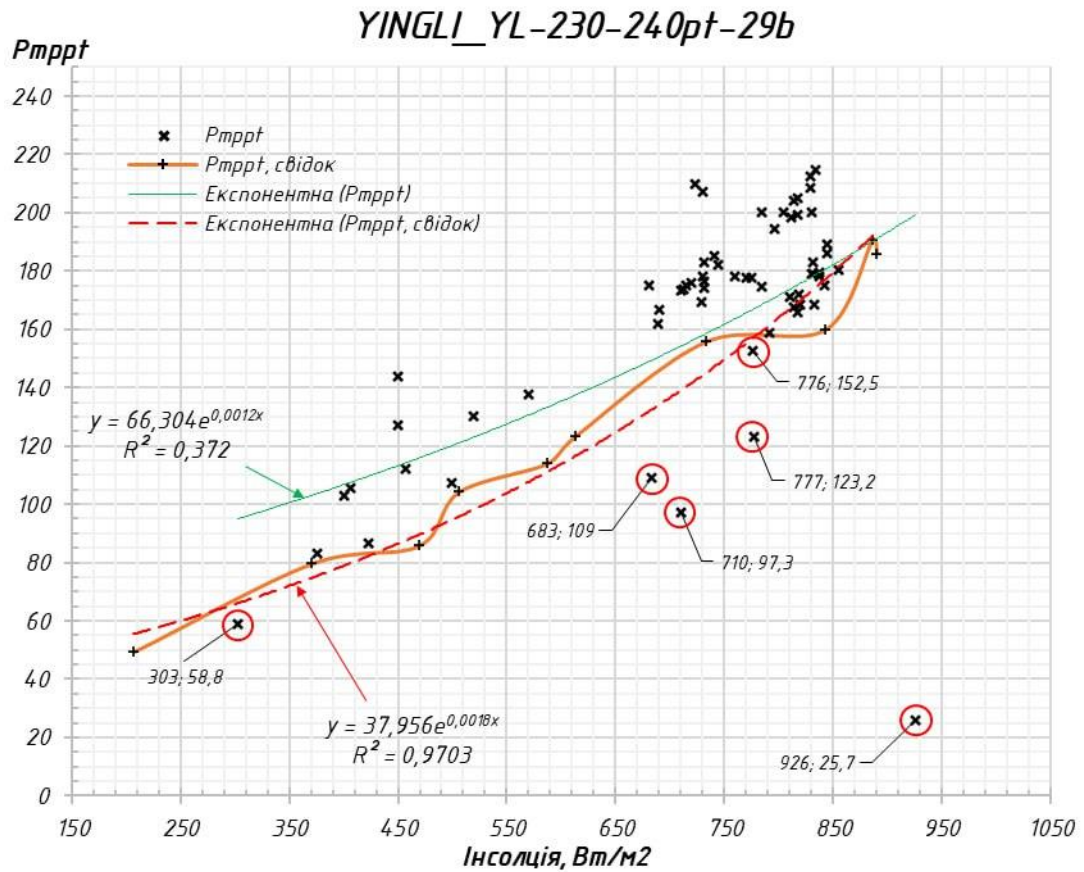


Рисунок 3.4. Ефективність сонячних панелей, порівняння досліджуваних модулів та панелі-свідка.[32]

Виділені ключові точки (червоні кружечки з хрестиком та підписами):

303; 58,8: Це вимірювання №61 (Інсоляція 303 Вт/м², P_{mppt} 58.8 Вт). В таблиці вказана як "здорова", але її "Деградація від свідка" була -25.96%. Ця точка підкреслює, що навіть здорові панелі можуть мати нижчу продуктивність, ніж свідок, за певних умов, або є менш ефективними на низькій інсоляції.

683; 109: Це вимірювання №59 (Інсоляція 683 Вт/м², P_{mppt} 109 Вт). З таблиці "Деградація від свідка" -20.67%. Ця точка показує значно нижчу продуктивність, що свідчить про її дефекти.

710; 97,3 (розбита панель): Вимірювання №4 (Інсоляція 710 Вт/м², Pmppt 97.3 Вт). Це одна з розбитих панелей, її значення значно нижче обох ліній.

776; 152,5 (здоровя): Це вимірювання №7 (Інсоляція 776 Вт/м², Pmppt 152.5 Вт). Її "Деградація від свідка" була -1.72%. Ця точка показує панель, яка працює майже на рівні свідка, але нижче середньої лінії здорових панелей.

777; 123,2 (здоровя): Це вимірювання №5 (Інсоляція 777 Вт/м², Pmppt 123.2 Вт). Її "Деградація від свідка" була -20.67%. Ще одна "здоровя" панель, яка працює гірше за свідок і значно нижче середньої лінії здорових панелей.

926; 25,7 (розбита панель): Вимірювання №19 (Інсоляція 926 Вт/м², Pmppt 25.7 Вт). Найочевидніший приклад деградації. Ця точка є доказом непридатності пошкоджених модулів, оскільки знаходиться далеко від будь-яких здорових значень.

3.3. Висновки до розділу 3

Проведений аналіз даних вимірювань сонячних панелей у сонячний день при безхмарному небі підтверджує високу ефективність застосування експрес-контролю для швидкої та об'єктивної оцінки стану фотоелектричних модулів. Також було продемонстровано залежність виробленої потужності від рівня інсоляції. Чим вища інсоляція, тим вищі струмові показники та максимальна потужність. Напругові характеристики більш чутливі до температури панелі, що підтверджується даними панелі-свідка та може пояснювати їх зниження при високій інсоляції.

Використання панелі-свідка стало критично важливим елементом аналізу. Порівняння з панеллю-свідком показує, що досліджувані панелі (за винятком пошкоджених), які працюють в ідентичних умовах навколишнього середовища, дозволило мінімізувати вплив інсоляції, температури та кута нахилу, демонструють дещо кращу продуктивність за аналогічних умов. Це

вказує на їхню відносно хорошу ефективність та дало змогу виявити здорові панелі у реальних умовах експлуатації, що вказує на їхню придатність.

Значні відхилення потужності (ΔP) від номінального значення 235 Вт у більшості випадків є нормальним явищем, що пояснюється проведенням вимірювань у реальних умовах, які відрізняються від Стандартних Тестових Умов (нижча інсоляція, значно вища температура).

Хоча вимірювання не ставили за мету пошук оптимального кута, дані експрес-контролю дозволили помітити, що для поточних умов вимірювань найбільша потужність була досягнута при кутах нахилу 68-74°, що є цінною інформацією для потенційної оптимізації кута встановлення.

Швидко та однозначно ідентифікувати фізично пошкоджені панелі є найбільш значущим результатом експрес-контролю. Ці модулі, наочно показують, що навіть за сприятливих умов освітлення, фізично пошкоджені панелі втрачають здатність ефективно виробляти електроенергію, що призводить до падіння потужності (деградація відносно свідка становила - 37.55% та -86.11% відповідно). Це підкреслює здатність експрес-контролю оперативно виявляти критичні несправності, які роблять модуль непридатним до експлуатації.

Результати вимірювань підкреслюють важливість врахування не лише номінальних характеристик сонячних панелей, але й конкретних умов експлуатації (інсоляція, температура, кут нахилу) та фізичного стану модулів для точної оцінки їхньої фактичної продуктивності.

Таким чином, експрес-контроль є високоефективним інструментом для моніторингу та діагностики сонячних панелей, дозволяючи не лише оцінити їхню поточну продуктивність у реальних умовах, але й точно виявити критичні несправності та потенційно деградовані модулі. Його застосування сприяє своєчасному виявленню проблем, мінімізації втрат генерації та оптимізації роботи сонячних електростанцій. Впровадження даного підходу

може значно зменшити витрати на обстеження та підвищити ефективність управління сонячними електростанціями.

ВИСНОВКИ

Під час виконання бакалаврської роботи було проаналізовано особливості експрес-контролю фотоелектричних модулів з урахуванням різноманітних технологій та методів діагностики. Розглянуто переваги й недоліки основних типів ФЕ модулів з позиції ефективності, довговічності та адаптивності до кліматичних умов. Особливу увагу приділено дефектам, які важко виявити стандартними методами, та комплексному підходу до їх діагностики. Акцент зроблено на необхідності впровадження інновацій та системного обслуговування для забезпечення стабільної роботи ФЕ систем у довгостроковій перспективі.

Другий розділ присвячено розробці методики експрес-контролю та підбору засобів неруйнівної діагностики ФЕ модулів, зокрема вживаних. Визначено ключові вимоги — швидкість, точність, мобільність, неінвазивність та відповідність стандартам. Аналіз показав, що комбінація візуального огляду, I-V вимірювання, тепловізійного обстеження та тестування ізоляції забезпечує ефективне виявлення основних дефектів. Метод електролюмінесценції дає глибший рівень діагностики, але не придатний для швидких перевірок. Вибір обладнання ґрунтувався на точності, портативності та відповідності умовам виїзного тестування.

Аналіз даних вимірювань за умов стабільної інсоляції підтвердив ефективність експрес-контролю для швидкої оцінки стану фотоелектричних модулів. Встановлено залежність потужності від інсоляції та температури: струм зростає зі збільшенням сонячного випромінювання, а напруга знижується при перегріві. Застосування панелі-свідка дозволило мінімізувати

вплив зовнішніх факторів і підвищити точність порівняння, підтвердивши працездатність частини модулів. Експрес-контроль також дозволив ідентифікувати фізично пошкоджені панелі. Метод продемонстрував високу ефективність у виявленні критичних дефектів і може значно підвищити якість моніторингу, зменшити витрати на діагностику та втрати генерації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. IRENA. End-of-Life Management for Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency, 2016.
2. Серета А. А. Аналіз технічного стану та перспектив повторного використання сонячних модулів // Відновлювана енергетика. – 2021. – №2. – С. 45–52.
3. Гуревич Т. Л. Методи діагностики фотоелектричних елементів у експлуатаційних умовах // Енергетика та електрифікація. – 2020. – №1. – С. 30–37.
4. Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels | American Solar Energy Society. *American Solar Energy Society*. URL: <https://ases.org/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/> (дата звернення: 16.05.2025).
5. Comprehensive Guide to Solar Panel Types. *Aurora Solar*. URL: <https://aurorasolar.com/blog/solar-panel-types-guide/> (дата звернення: 16.05.2025).
6. Photovoltaic module. *Enel Green Power, the platform dedicated to renewables* / *Enel Green Power*. URL: <https://www.enelgreenpower.com/learning-hub/renewable-energies/solar-energy/photovoltaic-module> (дата звернення: 17.05.2025).
7. What are the Disadvantages of Polycrystalline Solar Panels - BLOG - Tongwei Co., Ltd., *Tongwei Co., Ltd.,*. URL: <https://en.tongwei.cn/blog/69.html> (дата звернення: 18.05.2025).

8. Thin-Film Solar Panels: An In-Depth Guide | Types, Pros & Cons. *https://solarmagazine.com/solar-panels/thin-film-solar-panels/*. URL: <https://solarmagazine.com/solar-panels/thin-film-solar-panels/> (дата звернення: 19.05.2025).
9. Failures & Defects in PV Systems: Typical Methods for Detecting Defects and Failures. *Solar Energy Engineering - Learn Online*. URL: <https://www.study-solar.com/blog-article/failures-defects-in-pv-systems-typical-methods-for-detecting-defects-and-failures> (дата звернення: 19.05.2025).
10. Micro-Fractures in Solar Modules: Causes, Detection and Prevention | AJG United States. *Gallagher*. URL: <https://www.ajg.com/news-and-insights/micro-fractures-in-solar-modules-causes-detection-and-prevention/> (дата звернення: 20.05.2025).
11. Photovoltaic failure diagnosis using imaging techniques and electrical characterization | EPJ Photovoltaics. *EPJ Photovoltaics*. URL: https://www.epj-pv.org/articles/epjpv/full_html/2024/01/pv20240020/pv20240020.html (дата звернення: 20.05.2025).
12. Contributors to Wikimedia projects. Multi-junction solar cell - Wikipedia. *Wikipedia, the free encyclopedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-junction_solar_cell (дата звернення: 22.05.2025).
13. Perovskite solar cells - Knowledge and References | Taylor & Francis. *Taylor & Francis*. URL: https://taylorandfrancis.com/knowledge/Engineering_and_technology/Power_and_energy/Perovskite_solar_cells/ (дата звернення: 23.05.2025).
14. Hotspot Effect. *Cleaning & Maintenance Solutions for Solar Panels, Glass & More*. URL: <https://www.chemitek.pt/blog/hotspot-effect> (дата звернення: 24.05.2025).
15. Photovoltaic module. *Enel Green Power, the platform dedicated to renewables* | *Enel Green Power*. URL: <https://www.enelgreenpower.com/learning->

[hub/renewable-energies/solar-energy/photovoltaic-module](https://www.renewable-energies.com/solar-energy/photovoltaic-module) (дата звернення: 24.05.2025).

16. HIGH VOLTAGE INSULATION TESTER IR5051 | Hioki. *Hioki : Corporate / World-class Test & Measurement Equipment.* URL: https://www.hioki.com/global/products/pv/insulation-resistance/id_1266776 (дата звернення: 26.05.2025).

17. Коли необхідне сервісне обслуговування СЕС? | AVENSTON. *Авенстон.* URL: <https://avenston.com/articles/operation-and-maintenance-services/> (дата звернення: 26.05.2025).

18. chengjoseph. Explain solar junction box and its functions in detail. *Tycorun Batteries.* URL: <https://www.tycorun.com/blogs/news/solar-junction-box> (date of access: 26.05.2025).

19. «Типові дефекти сонячних батарей під час експлуатації», компанія «Правильне електроживлення», URL: <https://prel.prom.ua/a311557-yaki-braki-zustrichayutsya.html>

20. 11 поширених дефектів сонячних панелей і як їх уникнути. *WINAICO.* URL: <https://winaico.com/blog/common-solar-panel-defects/>

21. Схема помилки: розшарування . *SecondSol.* URL: <https://www.secondsol.com.ua/uk/blog/shema-pomylky-rozsharuvannia>

22. Чи є друге життя у сонячних панелей? *Avenston.* URL: <https://avenston.com/uk/blog/chi-ie-druhe-zhyttia-u-soniachnykh-paneli>

23. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. URL: <https://www.irena.org/Publications/2020/Feb/End-of-life-management-solar-photovoltaic-panels>

24. Видавництво EDP Sciences. Аналіз парку фотоелектричних модулів українських ФЕС: прогноз їх подальшої експлуатації та утилізації // Стаття №1 проєкту Retrieve. – Івано-Франківськ: Університет Короля Данила, 2025. – 9 с. URL: https://www.edpsciences.org/articles/epjconf/abs/2025/01/epjconf_retrieve2025_01001/epjconf_retrieve2025_01001.html

25. Звіт про ринок повторного використання фотоелектричних модулів: глобальний прогноз з 2025 по 2033 рік. URL: <https://www.irena.org/Publications/2025/03/Report-on-the-market-for-reuse-of-photovoltaic-modules-Global-forecast-2025-2033>
26. UT673PV – Solar MPPT Meter [Електронний ресурс] / UNI-T Ukraine. URL: <https://uni-t.ua/ru/catalog/ut673pv-solar-mppt-meter/>
27. Сонячна зйомка 200R – Вимірювач освітленості / У напрямку до моря. URL: <https://www.solar-lighting.com.ua/soniachna-ziomka-200r-vymiriuvach-osvitlenosti>
28. Мобільна лабораторія MBJ / MBJ Instruments. URL: <https://www.mbj-instruments.com.ua/mobilna-laboratoriia-mbj>
29. Пусконаладжувальні роботи та технічне обслуговування ПВЧЕКИ: Інструменти HT / HT Instruments. URL: <https://www.ht-instruments.com.ua/puskonalahodzhivalni-roboty-ta-tekhnichne-obslugovuvannia-pvcheky-instrumenty-ht>
30. PVM-1021 Pro. Set of meters for measuring photovoltaic installations / Sonel S.A. URL: <https://www.sonel.pl/en/pvm-1021-pro-set-of-meters-for-measuring-photovoltaic-installations>
31. YINGLI_YL-230-240pt-29b / Yingli Solar. – PDF-файл. – Режим доступу: <https://www.yinglisolar.com/wp-content/uploads/2023/01/YL-230-240pt-29b.pdf>
32. Розроблення методики та підбір засобів вимірювальної техніки для експрес-контролю вживаних фотоелектричних модулів з метою їх вторинного використання / Васечко В. Б., Яворський А. В., Диндин М. М. // XXIV Міжнародна науково-технічна конференція „ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 13 – 14 травня 2025 р., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна. – С. 435-438.
33. Навчальний курс. Встановлення фотоелектричних систем / проєкту «Просування енергоефективності та імплементації Директиви ЄС про енергоефективність в Україні», що виконується німецькою урядовою

компанією GIZ (GmbH) за дорученням урядів Німеччини та Швейцарії, 2023.
116 с.