

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально-науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

К.Т.Н., доцент Артем ЧЕРНЮК

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

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Колеснікову Антону

1. Тема «Розробка методу автоматизованої системи контролю параметрів сонячної електростанції»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3665 від «06» жовтня 2025 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «15» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Теоретичні та практичні розробки вітчизняних та зарубіжних авторів за темою роботи, періодичні видання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

ВСТУП; РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ

ОСНОВИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ;

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДУ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ

АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНОЇ

ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ; РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

КОНТРОЛЮ ТА МОНІТОРИНГУ; ВИСНОВКИ; ПЕРЕЛІК

ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2025р.

Керівник

(підпис)

Павло Буданов

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Колесніков Антон

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК

виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження Проведення аналізу наукової літератури	12.10.25 — 15.10.25	
2	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.25 — 23.10.25	
3	Виконання другого розділу дипломної роботи	24.10.25 — 01.11.25	
4	Виконання третього розділу дипломної роботи	02.11.25 — 26.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.25 — 07.12.25	
6	Підготовка доповіді, презентації до захисту	08.12.25 — 15.12.25	

Студент (ка)

(підпис)

Колесніков Антон

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – 95; рисунків – 28 ; таблиць – 10 ;

літературних джерел – 79 .

Тема магістерської роботи: Розробка методу автоматизованої системи контролю параметрів сонячної електростанції.

Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності та надійності функціонування сонячних електростанцій шляхом розроблення та впровадження методу автоматизованого контролю, що базується на адаптивній ідентифікації параметрів еквівалентної схеми заміщення в режимі реального часу.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

- Проаналізувати існуючі методи моніторингу СЕС та виявлено їх недоліки, зокрема неможливість розрізнення зовнішніх факторів (затінення) та внутрішніх дефектів (деградація контактів);

- розробити нові методи для точного вимірювання і моніторингу параметрів сонячних батарей;

- Удосконалити математичну дводіодну модель фотоелектричного перетворювача, в якій параметри послідовного (R_s) та шунтового (R_{sh}) опорів розглядаються як динамічні змінні стану для діагностики дефектів.;

- Розробити алгоритм ідентифікації параметрів у реальному часі на базі мікроконтролера STM32 з використанням W-функції Ламберта, що забезпечує високу швидкодію та точність;

- Проведено імітаційне моделювання роботи системи, яке підтвердило селективність методу та здатність виявляти деградацію компонентів на ранніх стадіях (похибка визначення R_s не перевищує 3% при рівні шуму 30 дБ)

Об'єктом дослідження є процеси контролю та моніторингу робочих параметрів сонячної електростанції.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та математичні моделі, що забезпечують автоматизований контроль стану сонячних елементів на основі аналізу еволюції параметрів еквівалентної схеми заміщення.

Ключові слова: сонячна електростанція, автоматизований контроль, еквівалентна схема, дводіодна схема, послідовний опір, MATLAB/SIMULINK, STM32

ABSTRACT

Pages of text – ____ ; pictures – ____ ; tables – ____ ;

literary sources – ____ .

Development of a method for an automated control system for the parameters of a solar power station.

The aim of the thesis is to increase the energy efficiency and reliability of solar power plant operation by developing and implementing an automated control method based on adaptive identification of equivalent circuit parameters in real-time. The study analyzes existing monitoring methods, upgrades the two-diode mathematical model, and proposes a numerical algorithm using the Lambert W-function for dynamic parameter calculation.

To achieve this goal, the following tasks need to be solved:

- Analyze and evaluate existing methods for monitoring and controlling parameters of solar power plants;
- Adapt the mathematical model of the solar cell (two-diode circuit) to real-time operation requirements for dynamic determination of internal resistances;
- Develop an automated control method that allows identifying contact degradation and structural defects by monitoring deviations in series (R_s) and shunt (R_{sh}) resistances;
- Perform simulation modeling and conduct a comparative analysis of the results of the base and improved methods.

The object of the research is the processes of control and monitoring of the operating parameters of a solar power station.

The subject of the research is the methods, algorithms, and mathematical models ensuring automated control of the state of solar elements based on the analysis of the evolution of equivalent circuit parameters.

Keywords: solar power station, automated control, equivalent circuit, two-diode model, series resistance, MATLAB/SIMULINK, STM32.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....	11
1.1 Сучасний стан та перспективи розвитку сонячної енергетики у світі та Україні	11
1.2 Конструкція ФЕМ.....	18
1.3 Структурна схема та основні компоненти СЕС.....	23
1.4 Електричні параметри, вольт-амперні та вольт-ватні характеристики ФЕП.....	28
1.5 Аналіз факторів, що визначають ефективність та стабільність роботи СЕС.....	33
1.6 Огляд методів та засобів моніторингу параметрів СЕС.....	40
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	48
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДУ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СЕС.....	50
2.1 Обґрунтування застосування параметрів еквівалентної схеми заміщення для діагностики фотомодулів СЕС.....	50
2.2 Удосконалення математичної моделі для ідентифікації параметрів ФЕМ.....	54
2.3 Алгоритмізація та програмна реалізація розрахунку параметрів ФЕМ у реальному часі.....	60
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	67
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА МОНІТОРИНГУ СЕС.....	69
3.1 Розробка структурно-функціональної схеми та алгоритмічного	

забезпечення системи контролю СЕС.....	69
3.2 Імітаційне моделювання роботи системи та аналіз ефективності діагностики ФЕМ.....	77
3.3 Практичні рекомендації щодо підвищення енергобезпеки та ефективності експлуатації СЕС на основі впровадженого методу.....	83
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	88
ВИСНОВКИ.....	89
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	92

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АКБ – Акумуляторна батарея;

АЦП – Аналого-цифровий перетворювач;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ВВХ – вольт-ватна характеристика;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ППР – Планово-попереджувальний ремонт;

СЕС – сонячна електростанція;

ФЕМ – фотоелектричний модуль;

ФЕП – фотоелектричний перетворювач;

FPU – Апаратний блок операцій з плаваючою крапкою (Floating-Point Unit);

MPPT – Відстеження точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking);

PID – Потенційно-індукована деградація (Potential Induced Degradation);

SCADA – Система диспетчерського управління та збору даних (Supervisory Control And Data Acquisition).

ВСТУП

У сучасному світі відновлювальні джерела енергії, зокрема сонячна енергетика, відіграють ключову роль у трансформації глобальної енергетичної системи[2,35,45,72]. Сонячні електростанції (СЕС) є одним із найперспективніших інструментів для зниження залежності від викопного палива та зменшення викидів парникових газів[70,71,78]. В Україні, як і в багатьох країнах світу, спостерігається інтенсивне інтегрування фотоелектричних систем у загальну енергомережу[8,23,70], що ставить нові вимоги до їхньої ефективності, керованості та надійності[2,39].

Однак, попри стрімкий розвиток галузі, експлуатація СЕС супроводжується низкою технічних викликів. Ефективність перетворення сонячної енергії значною мірою залежить від мінливих зовнішніх факторів[4,29,31] та поточного стану обладнання[11,12,57]. У цьому контексті критичного значення набуває проблема точного та безперервного моніторингу робочих характеристик системи[5,6,26,32]. Відсутність надійних засобів контролю або затримки в обробці даних про параметри сонячних батарей можуть призвести до суттєвих втрат генерації, прискореної деградації обладнання та виникнення аварійних режимів роботи[15,21,56].

Зважаючи на це, актуальним науково-технічним завданням є вдосконалення процесів управління роботою СЕС. Вирішальним фактором тут виступає впровадження автоматизованих систем контролю[26,39], здатних у реальному часі відстежувати параметри сонячних панелей та адаптувати роботу станції до змінних умов[30,31,]. Розробка нових методів для таких систем дозволяє не лише своєчасно виявляти відхилення від нормальних режимів, але й оптимізувати вихідні характеристики електроенергії, забезпечуючи максимальний коефіцієнт корисної дії[1,7,60].

Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю створення ефективного методологічного та алгоритмічного забезпечення для автоматизованих систем контролю СЕС[6,26,39]. Це дозволить мінімізувати

вплив людського фактора, підвищити точність вимірювань та забезпечити стабільність роботи сонячної станції[32,56]. Ефективний метод контролю параметрів є фундаментом для зниження експлуатаційних витрат та підвищення загальної рентабельності об'єктів сонячної енергетики[2,72].

Дана робота присвячена розробці методу автоматизованої системи контролю параметрів сонячної електростанції, що є важливим внеском у розвиток сучасних систем управління в енергетиці[22,23]. Результати дослідження спрямовані на підвищення надійності функціонування СЕС та вдосконалення технологій моніторингу їх енергетичних показників[12,31,71].

Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності та надійності функціонування сонячних електростанцій шляхом розроблення та впровадження методу автоматизованого контролю, що базується на методі автоматичного відстеження відхилень внутрішніх опорів (R_s та R_{sh}) еквівалентної схеми заміщення для зовнішніх впливів та внутрішніх дефектів у режимі реального часу.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

- проаналізувати та оцінити існуючі методи моніторингу та контролю параметрів сонячних електростанцій;
- адаптувати математичну модель сонячного елемента (дводіодну схему) до вимог роботи в реальному часі для динамічного визначення внутрішніх опорів;
- розробити метод автоматизованого контролю, який дозволяє ідентифікувати знос контактів та структурні дефекти шляхом моніторингу відхилень послідовного (R_s) та шунтового (R_{sh}) опорів;
- виконати імітаційне моделювання та провести порівняльний аналіз результатів роботи базового та удосконаленого методу;

Об'єктом дослідження є процеси контролю та моніторингу параметрів сонячної електростанції.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та математичні моделі, що забезпечують автоматизований контроль стану сонячних елементів на основі аналізу зміни параметрів еквівалентної схеми заміщення.

Практична значущість. роботи полягає у розробці програмно-алгоритмічного модуля для АСУ ТП СЕС, реалізованого в MATLAB/Simulink. Запропонований метод дозволяє підвищити точність прогнозування генерації на 3–5% та впровадити систему предиктивної діагностики, яка забезпечує виявлення закономірностей між зростанням внутрішнього опору та фізичним зносом модуля. Це дозволяє здійснювати ранню діагностику дефектів безпосередньо на місці експлуатації без необхідності лабораторного демонтажу обладнання

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

1.1 Сучасний стан та перспективи розвитку сонячної енергетики у світі та Україні

Сонячна енергетика сьогодні є найбільш динамічною галуззю світового паливно-енергетичного комплексу[45,72]. Глобальна інсталяція сонячної фотогенерації зберігає високі темпи зростання: лише у першому півріччі 2025 року було додано близько 380 ГВт нових потужностей, що на 64% більше, ніж за аналогічний період 2024 року. Офіційні огляди ринку свідчать, що 2024 рік став рекордним за введенням в експлуатацію фотоелектричних потужностей[72]. Безумовним лідером залишається Китай, який забезпечує понад 50% світового приросту (309–357 ГВт за 2024 рік). Значні показники також демонструють Європейський Союз (близько 71 ГВт), США (близько 47 ГВт), а також Індія, Бразилія та Пакистан[72].

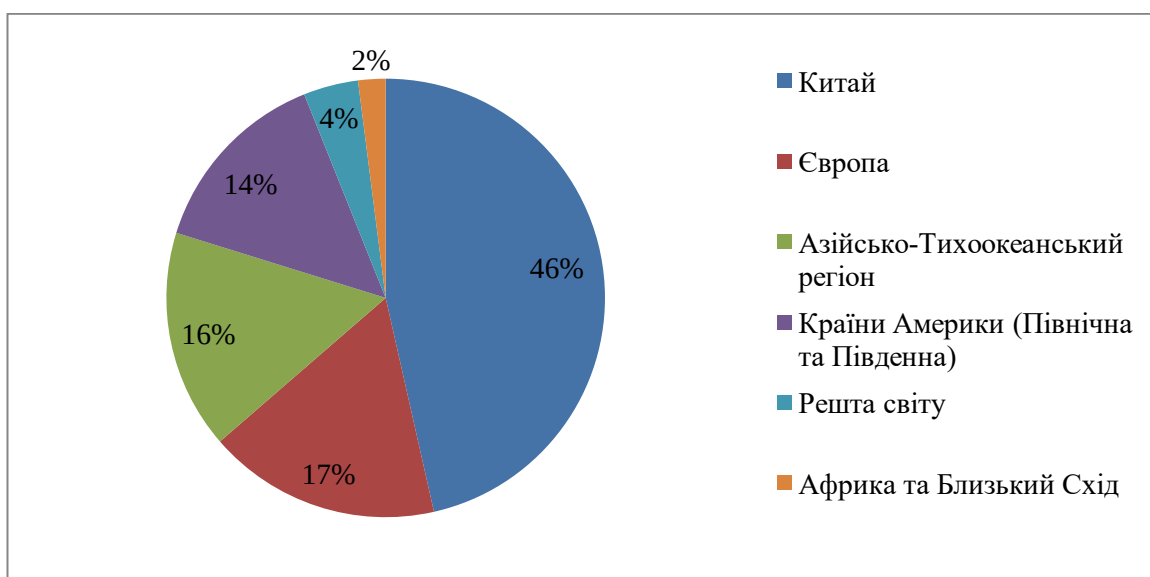


Рисунок 1.1 – Частка різних країн у світовому ринку сонячної енергетики(загальний обсяг від 554 ГВт до 602 ГВт)

В Україні, попри складні умови воєнного стану, галузь продовжує розвиватися[2,35,70]. У 2024 році було введено в експлуатацію близько 800–850 МВт нових сонячних електростанцій (СЕС). За даними досліджень, станом на 2024–2025 роки, приблизно 75% усіх нових об'єктів відновлюваної енергетики в країні припадає саме на СЕС[35,72].

Згідно з оцінками дослідників у рамках проєкту High-Resolution Rooftop-PV Potential Assessment for a Resilient Energy System in Ukraine (2024), потенціал дахових та малих PV-систем в Україні оцінюється у 238,8 ГВт встановленої потужності, що може забезпечити генерацію на рівні 290 ТВт·год/рік[78]. Високий рівень інсоляції на території України дозволяє ефективно використовувати як промислові наземні станції, так і розподілені дахові системи[3,78].

Основними викликами для СЕС є технічні обмеження інтеграції в об'єднану енергосистему, непостійна природа сонячної генерації, яка створює суттєве навантаження на системи розподілу та передачі енергії[40,72], профіцит генерації за відсутності маневрових потужностей та систем накопичення енергії призводять до вимушених обмежень генерації, та загрожують стабільності частоти в мережі[33], окрім того розвиток галузі є досить чутливим до змін у державній політиці. Раптова трансформація механізмів підтримки провокує мінливість попиту та ускладнює довгострокове інвестиційне планування, як це спостерігається у країнах ЄС в контексті ринку 2025 року, а профіцит виробничих потужностей (зокрема в КНР) спричинив надлишкову пропозицію ФЕМ, що призвело до фінансової нестійкості виробників, цінового демпінгу і трансформації глобальних ланцюгів постачання, яке створює ризики розвитку галузі в довгостроковій перспективі.

Специфічними викликами для розвитку фотоелектричної енергетики в Україні в першу чергу є воєнно-політична ситуація в країні, військова агресія російської федерації[35], та пов'язані з нею втрати та ризики виступають критичним фактором для зупинки масштабування СЕС, фізичне руйнування,

та нестабільність у прифронтових регіонах унеможливають реалізацію великих інвестиційних проєктів[70,78], окрім цього для відновлення та розвитку сектору необхідна комплексна державна стратегія, що включає законодавчу підтримку, фінансові стимули, що є передумовою для залучення як інвесторів, так і приватних домогосподарств. Гостро стоїть питання інтеграції розподіленої генерації в електромережу, впровадження маневрових потужностей та систем накопичення енергії для згладжування пікових навантажень, розвиток децентралізованої генерації (малі та приватні СЕС) як засобу підвищення енергонезалежності та стійкості локальних мереж, і модернізація мереж є пріоритетними напрямками розвитку.

Сучасний етап розвитку галузі (2023–2025 рр.) характеризується зміщенням фокуса від екстенсивного нарощування потужностей до створення комплексних енергетичних хабів[40,72]. Спостерігається інтеграція СЕС із системами накопичення енергії та технологіями виробництва низьковуглецевого водню, що підвищує гнучкість енергосистеми та вирішує проблему стохастичності генерації.[40,72]

В Україні великий потенціал, дахових СЕС, за дослідженнями, дахи будівель, без урахування територій під СЕС, можуть забезпечити ~ 238.8 ГВт встановленої потужності і виробництво ~ 290 ТВт·год/рік[78], що суттєво могла б змінити енергетичну незалежність країни, якщо політична та економічна ситуація дозволить, у довгостроковій перспективі сонячна енергетика може стати суттєвою частку енергетичного комплексу країни, сприяти незалежності від зовнішніх носіїв, та зменшити витрати на їх імпорт, а також підтримці процесів відбудови і подальшого розвитку, але для цього потрібні стабільна політика, заохочування з боку держави, (пільги, спрощення дозвільних процедур), модернізація енергетичної інфраструктури, інтеграція з системами зберігання, і здебільшого заохочення інвестицій у розвиток сонячної енергетики країни[33,78].

1.2 Конструкція ФЕМ

Розуміння принципів контролю параметрів СЕС неможливе без аналізу фізичної природи виникнення електричного струму в фотоелектричних модулях (ФЕМ)[50,51,54]. В основі роботи лежить внутрішній фотоефект у напівпровідникових структурах, при якому енергія електромагнітного випромінювання (фотонів) перетворюється безпосередньо в електричну енергію постійного струму[50,54,55].

Фундаментальним компонентом фотоелектричного перетворювача (ФЕП) є p - n перехід, сформований на межі двох напівпровідникових шарів із диференційованими типами провідності, функціонування якого базується на принципі внутрішнього фотоефекту[50,51]. Процес фотовольтаїчної конверсії ініціюється поглинанням квантів світла, енергія яких передається електронам валентної зони, що за умови перевищення енергетичного порогу ширини забороненої зони напівпровідника призводить до деструкції ковалентних зв'язків та генерації вільних носіїв заряду – електронно-діркових пар[43,50,51]. Під впливом внутрішнього електричного поля p - n переходу здійснюється просторова сепарація генерованих носіїв, внаслідок якої електрони мігрують до n -області, а дірки – до p -області, що зумовлює виникнення стійкої різниці потенціалів та формування електрорушійної сили на електродах елемента[14,54,68]. На сьогоднішній день у промисловості використовуються різні технологічні рішення для створення ФЕМ, що відрізняються структурою активного шару (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Різні види ФЕМ

Основними є монокристалічні (висока ефективність), полікристалічні (оптимальне співвідношення ціна/якість) та тонкоплівкові панелі (гнучкість та робота в умовах слабкого освітлення)[50,51].

Таблиця 1.1 – порівняльні характеристики різних видів фотоелектричних панелей.

Характеристика	Монокристалічні	Полікристалічні	Тонкоплівкові
Тип кристалу / матеріалу	Цілісні кристали кремнію (моно)	Гранули / багатокристалічний кремній	Тонкі шари (аморфний Si, CdTe, CIGS та ін.)
Ефективність (ККД)	Найвища (18–24%)	Середня (15–18%)	Найнижча (7–13%)
Вартість	Висока	Середня	Низька
Термін служби	30+ років	~25 років	10–20 років
Потреба у площі	Мінімальна (найбільша потужність на 1 м ²)	Середня (потрібно більше місця, ніж для монокристалічних)	Максимальна (потрібно багато місця)
Температурний коефіцієнт	Добрий (-0.3% до -0.4% / °C)	Гірший (більше втрачають потужність при нагріві)	Найкращий (-0.2% / °C) (стійкі до спеки)
Робота в тіні/хмарах	Ефективність падає	Чутливі до затінення	Найкраще працюють при розсіяному світлі

Важливо розуміти, що ККД фотоелектричного модуля обмежений фізичними законами, зокрема межею Шоклі-Квайссера, яка для традиційних кремнієвих елементів становить близько 33,7%. У реальних промислових зразках, що наведені у таблиці 1.1, ККД є нижчим через комплекс втрат – оптичних (відбиття світла), електричних (втрати вільних носіїв заряду) та термічних. Оскільки внутрішні опори R_s та R_{sh} безпосередньо впливають на ці втрати, їх контроль є критичним для підтримання ефективності модуля на паспортному рівні протягом всього терміну експлуатації[1,7,17,72].

Конструктивно сучасний сонячний елемент реалізовано у вигляді інтегрованої багатошарової структури, архітектура якої оптимізована для максимізації поглинання оптичного спектра[42,43,50] та мінімізації енергетичних втрат. Типова схема конструкції з рознесенням функціональних шарів представлена на рис. 1.3.

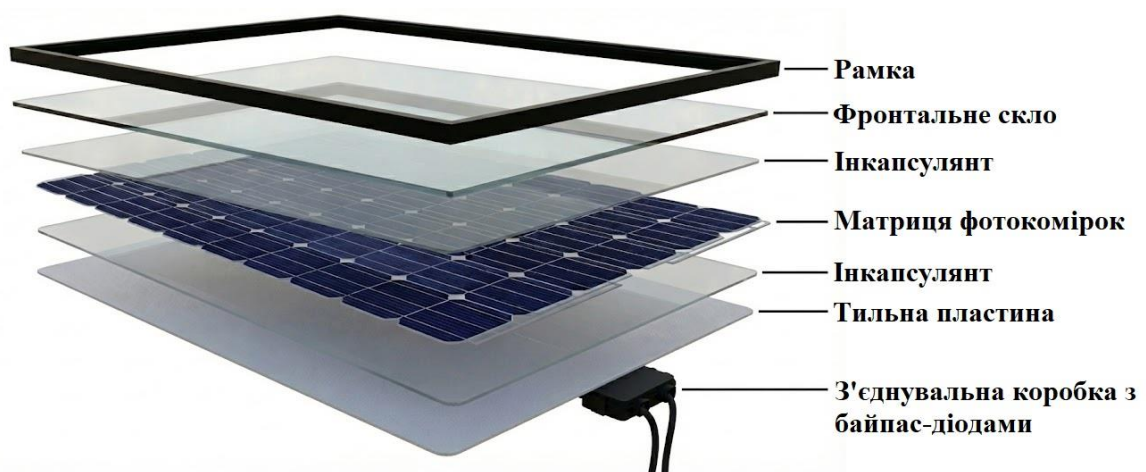


Рисунок 1.3 – Конструктивна схема ФЕМ

Конструктивна цілісність ФЕМ забезпечується металевою рамкою, яка надає виробу необхідну механічну жорсткість і спрощує процес монтажу на опорні конструкції. Захисну функцію та високу оптичну прозорість гарантує фронтальне загартоване скло з низьким вмістом заліза, під яким розташовано полімерні шари інкапсулянта на основі етиленвінілацетату для герметизації активних елементів[42,42,50]. Центральною ланкою пристрою є матриця фотокомірок на основі кремнію, де відбувається безпосередня генерація

носіїв заряду, при цьому для мінімізації оптичних втрат на поверхню напівпровідника наноситься тонкоплівкове антивідбивне покриття. З тильного боку структура захищена спеціальною діелектричною пластиною, що запобігає проникненню вологи та забезпечує електричну ізоляцію. Замикає систему з'єднувальна коробка з інтегрованими байпасними діодами, яка відповідає за виведення електричного струму та захист модуля від локального перегріву в умовах часткового затінення[11,12,50].

Ефективність збору генерованих носіїв заряду визначає вихідні електричні характеристики модуля[13,54]. Саме ці фізичні процеси – генерація фотоструму під дією інсоляції, рекомбінація носіїв та омичні втрати на контактах – покладені в основу математичного моделювання роботи сонячної батареї[7,14,68].

Важливо зазначити, що у класичних фізичних моделях площа активної поверхні (S) розглядається як ідеальна геометрична площина. Проте в реальних умовах експлуатації мікрорельєф напівпровідникового шару має складну структуру, яка змінюється в процесі деградації, що є критичним фактором для систем автоматизованого моніторингу параметрів СЕС[22,27,33].

1.3 Структурна схема та основні компоненти СЕС

Проектування та функціонування СЕС базується на інтеграції низки високотехнологічних компонентів, що забезпечують перетворення, накопичення та розподіл електричної енергії[44,45]. Ефективність роботи такої системи безпосередньо залежить від узгодженості параметрів її основних вузлів та їх відповідності конкретним експлуатаційним завданням[62,63]. Нижче наведено загальний вигляд та склад встановленого обладнання експериментальної СЕС потужністю 5 кВт, яка є базою для досліджень у лабораторії відновлюваних джерел енергії[15,62] (рис. 1.4).

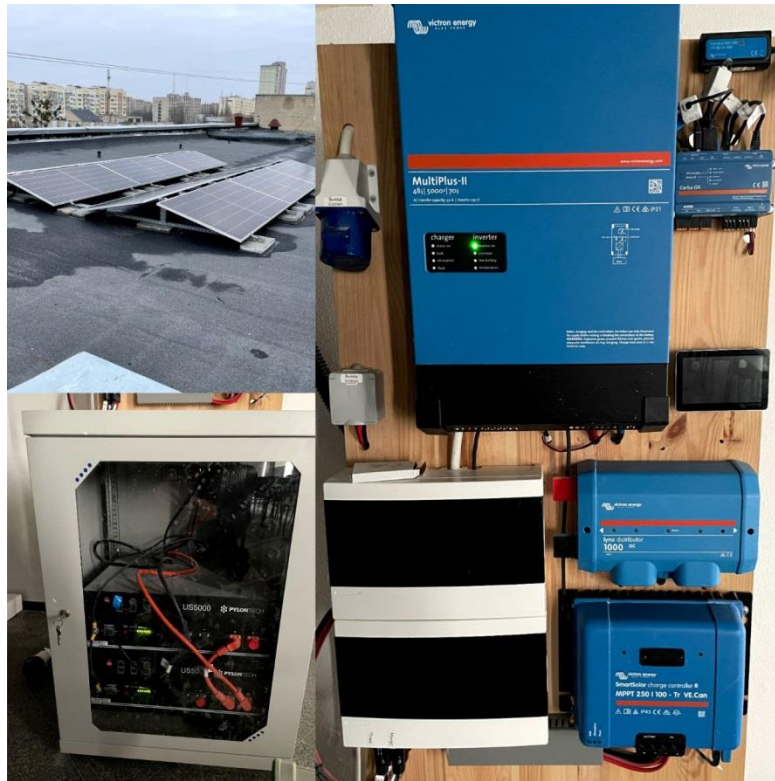


Рисунок 1.4 – Основні компоненти СЕС на основі станції 5 кВт лабораторії відновлювальних джерел енергії кафедри електротехніки та електроенергетики

Основними функціональними компонентами фотоелектричної системи є:

1. Сонячна панель (фотоелектричний модуль) – основний елемент, який перетворює енергію сонячного випромінювання (радіацію) в електричну енергію постійного струму. Модулі складаються з кремнієвих фотоелементів (монокристалічних або полікристалічних) та електрично об'єднуються у послідовні ланцюги (стрінги) або масиви для досягнення необхідної напруги та потужності(панелі з'єднуються послідовно для збільшення напруги або паралельно для збільшення сили струму)[50,54].
2. Контролер заряду – пристрій, що регулює процеси заряду та розряду акумуляторних батарей. Його основні функції: захист АКБ(Акумуляторна батарея) від перезаряду та глибокого розряду, а також

оптимізація робочих точок панелей (у випадку використання технології PWM або MPPT) для ефективного збору енергії[60].

3. Акумуляторна батарея (АКБ) – накопичувач електричної енергії, який забезпечує автономне живлення споживачів у темний час доби або компенсує нестачу потужності генерації при несприятливих погодних умовах[66,67].

4. Інвертор – перетворює постійний струм від ФЕМ або АКБ у змінний струм промислової частоти, сумісний з побутовою мережею (220/380 В). Сучасні інвертори також виконують функції синхронізації з зовнішньою мережею та комутації між джерелами живлення. Більшість моделей оснащені вбудованими MPPT-трекерами для максимізації виробітку енергії[45].

5. Система захисту та комутації – критично важлива частина для безпеки та автоматизації. Це комплекс пристроїв (автоматичні вимикачі, плавкі запобіжники, варистори, обмежувачі перенапруги), що забезпечують захист обладнання від струмів короткого замикання, перевантажень та імпульсних перенапруг, а також дозволяють безпечно знеструмити станцію для обслуговування. Основними елементами є щит постійного та змінного струму, де перший встановлюється між панелями та інвертором, а другий після інвертора відповідно[15,44]

6. Система моніторингу – програмно-апаратний комплекс для збору та аналізу параметрів роботи СЕС. Може бути як вбудованою в інвертор, так і зовнішньою[9,11,52].

Принцип побудови СЕС визначається її призначенням та режимом роботи. Залежно від способу взаємодії із зовнішньою електромережею та наявності систем накопичення, виділяють три основні типи станцій:

Структурні схеми фотоелектричних систем

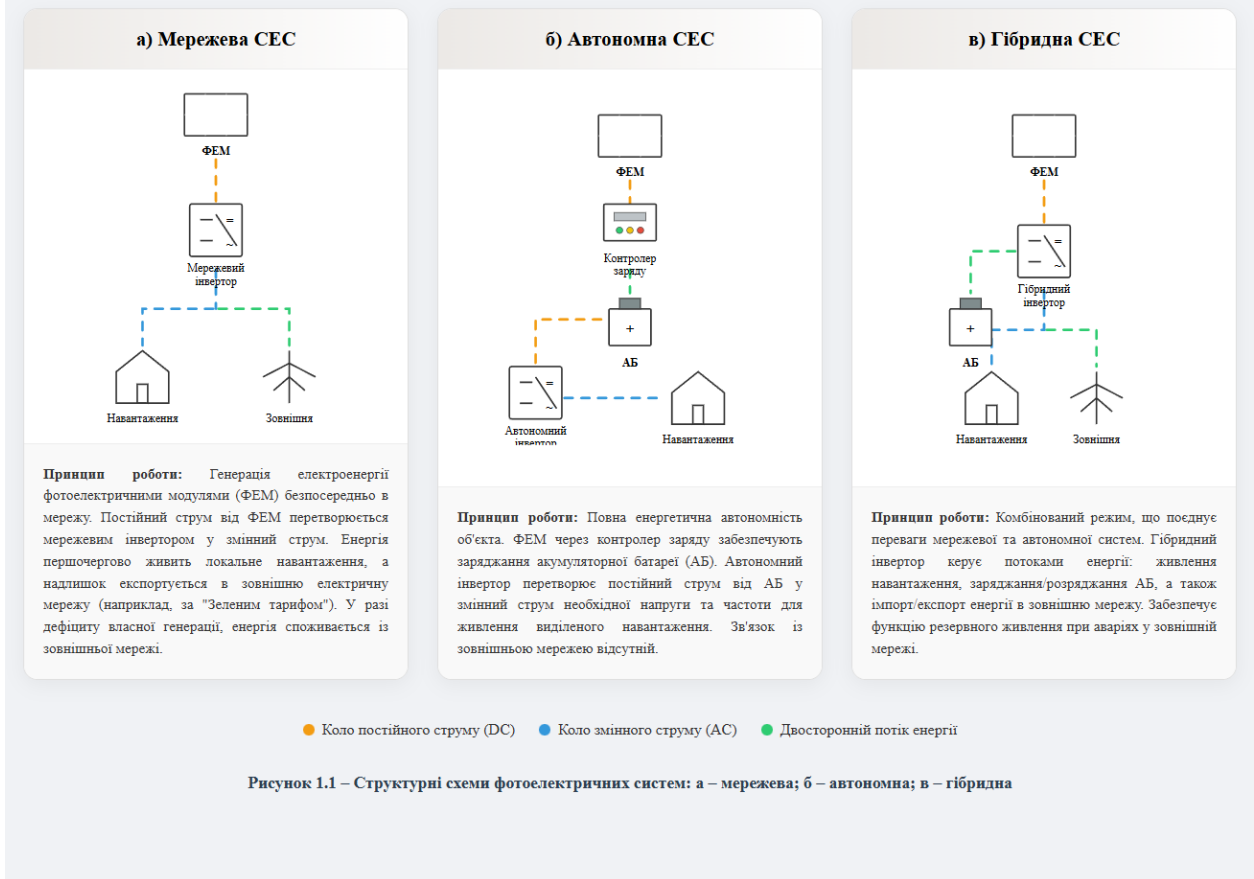


Рисунок 1.5 Типові структурні схеми СЕС: а) мережева; б) автономна; в) гібридна.

1. Мережеві СЕС є найбільш поширеним та конструктивно спрощеним типом геліосистем. Принцип їх роботи базується на синхронізації вихідних параметрів мережевого інвертора (частоти та фази) з параметрами зовнішньої електричної мережі[15,70]. Критичною технічною особливістю мережевих інверторів є наявність вбудованого захисту від «острівного режиму». Згідно з чинними стандартами безпеки, при зникненні опорної напруги в зовнішній мережі інвертор повинен миттєво припинити генерацію. Це унеможливорює використання мережевих систем як резервного джерела живлення під час аварійних відключень, основною перевагою даного типу систем є висока економічна ефективність та мінімальний термін окупності інвестицій. Це досягається завдяки відсутності вартісних систем накопичення енергії та спрощеній архітектурі обладнання[70].

2. Автономні СЕС – функціонують ізольовано від централізованих електромереж. Інвертор автономного типу самостійно формує вихідну напругу з чистою синусоїдальною формою хвилі та частотою 50 Гц, виступаючи єдиним джерелом генерації для локальних споживачів.

Вимоги до проєктування – ключовим аспектом надійності автономних систем є точний розрахунок енергетичного балансу. Потужність фотоелектричного поля та ємність системи накопичення енергії повинні проєктуватися з урахуванням пікових навантажень та можливих періодів низької інсоляції. Вичерпання заряду акумуляторних батарей за відсутності сонячної активності призводить до повного знеструмлення об'єкта, сферою застосування є забезпечення повної енергетичної незалежності об'єктів, де підключення до мережі технічно неможливе або економічно недоцільне[66].

3. Гібридні СЕС представляють собою найбільш технологічно досконале рішення, що поєднує переваги мережевих та автономних систем. Вони здатні працювати в мультирежимному форматі, забезпечуючи стабільність енергопостачання в умовах нестабільної мережі.

Алгоритми керування потоками потужності реалізуються через інтелектуальну систему (включаючи електронні системи керування акумуляторних батарей та контролер інвертора), яка дозволяє програмувати пріоритетність розподілу енергії, забезпечуючи першочергове покриття потреб локального навантаження, спрямування надлишків генерації на заряд акумуляторних батарей, передачу залишків енергії в зовнішню мережу, а також компенсацію дефіциту власної генерації шляхом використання ресурсів мережі або накопиченої енергії. Ключовою перевагою є функція джерела безперебійного живлення, при аварійному відключенні зовнішньої мережі гібридний інвертор автоматично (із затримкою перемикання ≤ 20 мс) переходить в автономний режим, живлячи виділену групу споживачів від акумуляторних батарей та фотомодулів[66,79].

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика основних типів СЕС.

Критерій порівняння	Мережева СЕС	Автономна СЕС	Гібридна СЕС
Принцип взаємодії з зовнішньою мережею	Синхронна робота з мережею. Генерація можлива лише за наявності опорної напруги зовнішньої мережі.	Повна ізоляція від зовнішньої мережі (або використання її виключно як резервного входу для змінного струму).	Багаторежимна робота: здатність до паралельної роботи з мережею та автономного функціонування.
Система накопичення енергії	Відсутня (енергія споживається миттєво або передається в мережу).	Обов'язкова складова системи для забезпечення безперервного електропостачання.	Обов'язкова складова, що виконує функції буфера та резервного джерела живлення.
Алгоритм роботи при аварійному знеструмленні мережі	Автоматичне припинення генерації (захист згідно зі стандартами безпеки).	Продовження роботи в штатному режимі (незалежність від стану зовнішньої мережі).	Автоматичне перемикання на живлення від АБ та ФЕМ (функція ДБЖ/UPS) для виділеної групи навантаження.
Керування потоками потужності	Пріоритет на власне споживання, надлишок експортується в мережу.	Баланс між генерацією ФЕМ та зарядом АБ. При повному заряді АБ генерація обмежується.	Програмований пріоритет: навантаження заряд – АБ – експорт (або обмеження генерації).
Економічна модель використання	Зменшення споживання з мережі або продаж за «Зеленим тарифом». Низькі капітальні витрати.	Забезпечення електроенергією віддалених об'єктів. Високі експлуатаційні витрати (заміна АБ).	Енергонезалежність, оптимізація власного споживання та продаж надлишків. Найвищі капітальні витрати.
Основна сфера застосування	Промислові об'єкти, домогосподарства зі стабільним мережевим підключенням.	Об'єкти без доступу до централізованого електропостачання, мобільні станції.	Об'єкти з підвищеними вимогами до надійності електропостачання (категорійні споживачі).

1.4 Електричні параметри, вольт-амперні та вольт-ватні характеристики ФЕП

Фундаментальною основою для аналізу технічного стану та енергетичної ефективності ФЕП є його зовнішні характеристики: вольт-амперна (ВАХ) та вольт-ватна (ВВХ)[1,7,13].

Вольт-амперна характеристика ВАХ представляє собою графічну залежність вихідного струму від напруги на клеммах ($I=f(U)$) при фіксованому рівні інсоляції та температури. На відміну від класичних джерел електроенергії, ФЕМ має властивості джерела струму в широкому діапазоні робочих напруг, що обумовлено фізикою p - n переходу під дією фотоефекту.

Для цілей високоточного моделювання та ретельної діагностики в сучасних системах контролю найбільш доцільним є використання дводіодної еквівалентної схеми заміщення. Вона дозволяє врахувати не тільки дифузійні процеси, але й втрати на рекомбінацію носіїв заряду в області просторового заряду p - n переходу. Математичний опис такої моделі базується на трансцендентному рівнянні:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\frac{e(U+IR_s)}{N_1 k T}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{e(U+IR_s)}{N_2 k T}} - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

де $I_{ph} = I_{ph0} \cdot \frac{I_r}{I_{r0}}$ – сила струму

I – вихідний струм фотомодуля;

U – вихідна напруга на клеммах;

I_{ph} – фотострум, величина якого лінійно залежить від інтенсивності сонячного випромінювання;

I_{s1} – струм насичення першого діода (відповідає за дифузійні процеси);

I_{s2} – струм насичення другого діода (враховує процеси рекомбінації в області просторового заряду);

N_1, N_2 – коефіцієнти неідеальності діодів

e – елементарний заряд електрона

k – стала Больцмана

T – абсолютна температура p - n переходу (у Кельвінах);

R_s – послідовний опір (зростання якого свідчить про перегрівання або окислення контактів);

R_{sh} – паралельний опір (зменшення якого вказує на появу мікротріщин та струмів витоку).

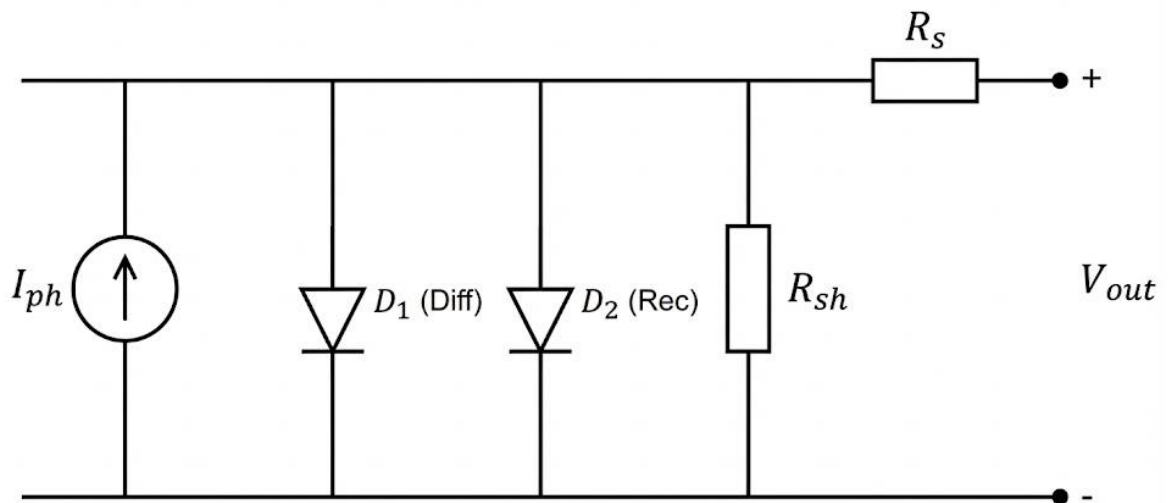


Рисунок 1.6 Дводіодна еквівалентна схема заміщення фотомодуля

Вольт-ватна характеристика (ВВХ) – це залежність вихідної потужності від напруги ($P=f(U)$). Оскільки потужність є добутком струму та напруги ($P=U \cdot I$), ВВХ фактично є похідною від ВАХ і має вигляд кривої з чітко вираженим екстремумом – точкою максимальної потужності. Саме на ВВХ найбільш наочно відображається енергетична ефективність модуля, а пошук вершини цієї кривої є головним завданням алгоритмів МРРТ в інверторах[60].

Центральним елементом даного дослідження є ідентифікація та аналіз динаміки внутрішніх паразитних опорів, оскільки вони безпосередньо корелюють із фізичним станом структури модуля.

Послідовний опір (R_s). Характеризує сумарний опір напівпровідника, металевих шин, контактної сітки та паяних з'єднань. Зростання R_s є прямим свідченням перегрівання контактів, окислення пайки або руйнування струмознімальних шин під дією термоцикування. Збільшення цього параметра не лише знижує вихідну потужність, але й створює ризик локального перегріву, що може призвести до виникнення електричної дуги та пожежі.

Паралельний (шунтовий) опір (R_{sh}). Описує струми витоку в обхід p - n переходу. Його зменшення сигналізує про появу мікротріщин у кристалічній структурі кремнію або про розвиток потенційно-індукованого погіршення характеристик (PID-ефект).

Традиційні методи контролю, що базуються лише на вимірюванні потужності, не мають достатньої селективності[5,77]. Зниження генерації може бути викликане як зовнішніми факторами (затінення, забруднення), так і внутрішніми дефектами. Впровадження в контур керування процедури ідентифікації R_s та R_{sh} дозволяє чітко розділити ці випадки, при затіненні опори залишаються стабільними, тоді як при фізичному старінні обладнання вони суттєво відхиляються від номінальних значень.

Для розробки алгоритмів автоматизованого контролю критично важливими є показники, що визначають форму робочих кривих:

1. Струм короткого замикання (I_{sc}) Це максимальний струм, який може генерувати панель при нульовій напрузі ($V=0$). Струм, який прямо пропорційний інтенсивності сонячного випромінювання, використовується як референсне значення для оцінки поточної інсоляції. Якщо виміряний робочий струм значно менший за розрахунковий I_{sc} (скоригований на інсоляцію), це свідчить про затінення або забруднення.

2. Напруга холостого ходу (V_{oc}) Це максимальна напруга на клеммах розімкнутого кола при нульовому струмі ($I=0$), залежить від кількості послідовно з'єднаних комірок та температури напівпровідника (має від'ємний температурний коефіцієнт), різке падіння напруги холостого ходу, V_{oc} сигналізує про коротке замикання в одній з комірок модуля або пробій байпасного(обвідного) діода.

3. Точка максимальної потужності. Це точка на кривій ВАХ, де добуток струму та напруги набуває максимального значення:

$$P_{mpp} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (1.2)$$

Робота автоматизованої системи керування (інвертора) полягає в постійному пошуку та утриманні робочої точки саме в цій зоні (MPPT-трекінг). Якщо система не може вийти на розрахунковий пік потужності (навіть при справному алгоритмі пошуку), це є головним індикатором технічного зносу або затінення стрінга. Будь-яке стійке відхилення від точки максимальної потужності автоматично кваліфікується системою як енергетична втрата[7,72].

4. Коефіцієнт заповнення, це Індикатор якості фотомодуля, що характеризує ступінь наближення реальної вольтамперної характеристики до ідеальної прямокутної форми. Розраховується як відношення максимальної потужності до добутку струму короткого замикання та напруги холостого ходу:

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1.3)$$

Зниження коефіцієнту заповнення у процесі експлуатації є чіткою ознакою старіння фотоелементів.

Усі паспортні електричні параметри ФЕП наводяться для стандартних умов випробувань: інтенсивність сонячного випромінювання 1000 Вт/м^2 , температура фотоелемента 25°C та спектральний склад повітряної маси AM1.5. Однак у реальних умовах експлуатації параметри суттєво відхиляються від номінальних, що зумовлює необхідність динамічного моніторингу.

Таблиця 1.3 – Основні електричні та діагностичні параметри фотоелектричної системи

Параметр	Формула / Умовне позначення	Пояснення та діагностичне значення
Миттєва потужність	$P=U \cdot I$	Добуток поточної напруги (U) та струму (I) на виході інвертора або стрінга.
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} \cdot 100\%$	Відношення генерованої потужності ($P_{вих}$) до потужності сонячного випромінювання ($P_{вх}$), що потрапляє на площу панелей.
Напруга масиву	$U_{sys}=n \cdot U_{mod}$	Де n – кількість послідовно з'єднаних модулів у стрінгу.
Струм масиву	$I_{sys}=m \cdot I_{mod}$	Де m – кількість паралельних гілок (для центральних інверторів).
Струм короткого замикання	I_{sc}	Максимальний струм при $U=0$; слугує референсним значенням для оцінки поточної інсоляції.
Напруга холостого ходу	V_{oc}	Максимальна напруга при $I=0$; падіння сигналізує про замикання в комірках або пробій байпасного діода.
Точка максимальної потужності	$P_{mpp}=V_{mp} \cdot I_{mp}$	Точка на кривій ВВХ, де потужність досягає максимуму; цільовий показник для МРРТ-трекінгу.
Коефіцієнт заповнення	$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$	Індикатор якості; зниження FF свідчить про фізичне старіння фотоелементів.
Послідовний опір	R_s	Опір контактів та шин; зростання вказує на окислення пайки та деградацію контактних груп.
Шунтовий опір	$R_{sh} (R_p)$	Опір витоку; зменшення сигналізує про появу мікротріщин або розвиток PID-ефекту.

Експлуатаційний ККД фотоелектричної системи (η) визначається як відношення вихідної електричної потужності до потужності падаючого сонячного випромінювання

$$\eta = \frac{P_{max}}{G \cdot S} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{G \cdot S} \quad (1.4)$$

де G – інтенсивність сонячного випромінювання (Вт/м²),

S – площа масиву ФЕМ (м²),

FF – коефіцієнт заповнення ВАХ. З цієї залежності випливає, що будь-яка деградація, яка призводить до зниження коефіцієнта заповнення (наприклад, зростання послідовного опору), автоматично спричиняє пропорційне падіння ККД всієї станції.

У реальних умовах експлуатації модулі об'єднуються у стрінги (послідовне з'єднання), де напруга системи сумується ($V_{sys} = \sum V_{mod}$), а струм обмежений найслабшим елементом ланцюга. Це створює ефект, коли затінення навіть однієї панелі зміщує робочу точку всього стрінга, формуючи складну ВАХ з кількома локальними максимумами.

Критичним аспектом для точності системи діагностики є врахування температурної деградації. Оскільки стандартні умови тестування передбачають $+25^{\circ}\text{C}$, а реальна робоча температура влітку сягає $+60...+80^{\circ}\text{C}$, алгоритм повинен виконувати розрахунок скоригованої потужності (P_{real}) за лінійною моделлю:

$$P_{real} = P_n [1 + \alpha (T_{mod} - T_{stc})] \quad (1.5)$$

де α – температурний коефіцієнт потужності ($-0.35...-0.45\%/^{\circ}\text{C}$).

Використання цієї формули дозволяє системі кваліфікувати падіння генерації при нагріванні як нормальний режим, а не як дефект.

Таким чином, перехід від простого вимірювання енергії до ідентифікації внутрішніх параметрів дводіодної моделі (R_s та R_{sh}) у реальному часі за допомогою сучасних мікроконтролерів (класу STM32) створює базу для глибокої діагностики та предиктивного обслуговування СЕС.

1.5 Аналіз факторів, що визначають ефективність та стабільність роботи СЕС

Ефективність функціонування СЕС не є постійною величиною. Вона постійно змінюється під впливом великої кількості чинників[29,31], які можна розділити на кілька основних груп. Розуміння цих впливів є необхідним для створення якісної системи автоматизованого контролю[5,77].

1. Кліматичні та природні чинники, які становлять найбільш непередбачувану групу факторів впливу на роботу СЕС, оскільки вони залежать від навколишнього середовища і не піддаються безпосередньому регулюванню з боку людини. Основним показником тут виступає рівень сонячної інсоляції, який визначається географічною широтою та висотою над рівнем моря; зокрема, для України середньорічний рівень випромінювання у 1000–1350 кВт·год/м² забезпечує достатні умови для ефективної генерації[3,70,71]. Важливу роль відіграє температурний режим, адже надмірне нагрівання напівпровідникових елементів понад нормативні +25°C призводить до зниження їхньої ефективності, де кожні додаткові 10 градусів спричиняють втрату близько 4–5% потужності[58,59]. Додатково на продуктивність впливають погодні умови (хмарність, туман, опади) та стан повітря, де вітер може виступати позитивним фактором природного охолодження, тоді як накопичення пилу та дрібних часток на поверхні панелей створює фізичний бар'єр для світла, що здатне знизити виробіток енергії на 5–30%.

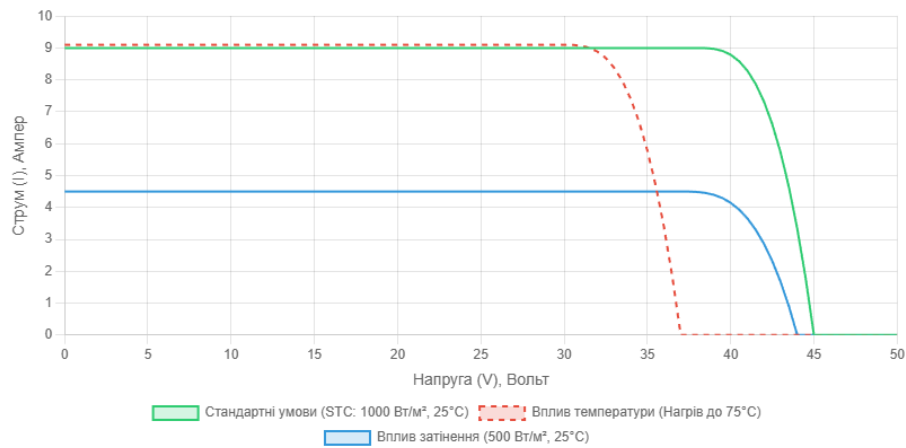


Рисунок 1.7 – Залежність струму від напруги (I - V криві) при різних умовах

2. Геометричні та монтажні чинники, що визначаються на стадіях проєктування та спорудження об'єкта, безпосередньо впливають на ефективність поглинання сонячного випромінювання[55,58]. Ключове значення мають орієнтація та кут нахилу ФЕМ[58]. Для забезпечення максимальної генерації в географічних умовах України оптимальним є південне спрямування модулів під кутом 30–35 градусів до горизонту[35,55]. Відхилення від зазначених параметрів спричиняє зниження енерговіддачі, що особливо помітно у ранковий та вечірній час. Важливим аспектом є запобігання затіненню від навколишніх об'єктів, таких як дерева, будівлі чи сусідні ряди обладнання. Наявність тіні на окремій ділянці панелі не лише припиняє її функціонування, а й призводить до падіння продуктивності всього послідовного з'єднання модулів. Крім того, це спричиняє локальний перегрів, що негативно впливає на загальний термін експлуатації обладнання[43,76]. Також на показники стабільності виробництва енергії впливає вибір типу опорних конструкцій: використання статичних систем або динамічних механізмів для стеження за рухом сонця дозволяє оптимізувати режим роботи станції відповідно до технічних вимог проєкту.

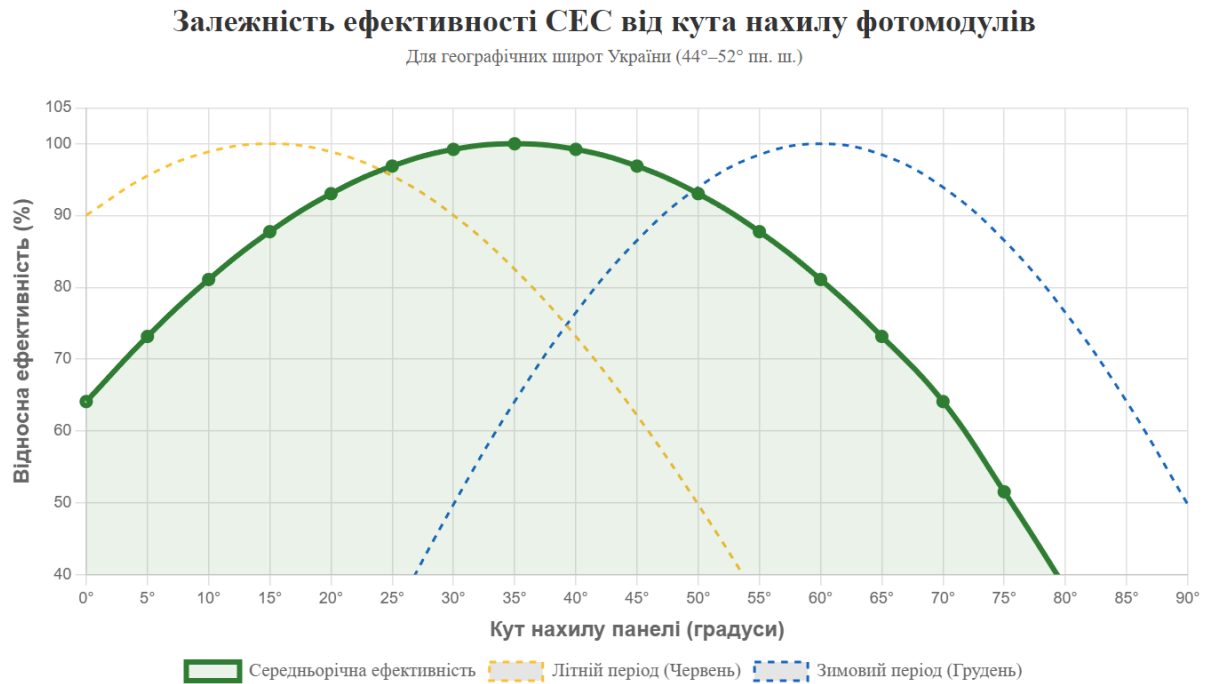


Рисунок 1.8 – Залежність ефективності генерації СЕС від кута нахилу ФЕМ.

3. Технічні чинники зумовлені фізичними властивостями та якістю виготовлення основних компонентів системи, що безпосередньо визначає ефективність перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію[25,72]. Продуктивність генерації першочергово залежить від обраної технології фотоелементів, де монокристалічні панелі демонструють найвищий коефіцієнт корисної дії у межах 18–24%, випереджаючи полікристалічні та тонкоплівкові аналоги. У процесі експлуатації обладнання піддається природному зносу, що проявляється у поступовій втраті потужності через термічне руйнування внутрішніх контактів, що фіксується як зростання послідовного опору R_s [1,21,36] або внаслідок виникнення мікротріщин, що призводять до зниження шунтувального опору R_{sh} . [4,21,43] Важливе значення має ефективність інверторного обладнання, функціонування якого базується на точності алгоритмів пошуку точки максимальної потужності (MPPT)[30,66]. Цей механізм забезпечує динамічну оптимізацію режиму роботи ФЕМ у реальному часі, а будь-які похибки в

його роботі спричиняють неповне знімання енергії та зниження загальної результативності станції.

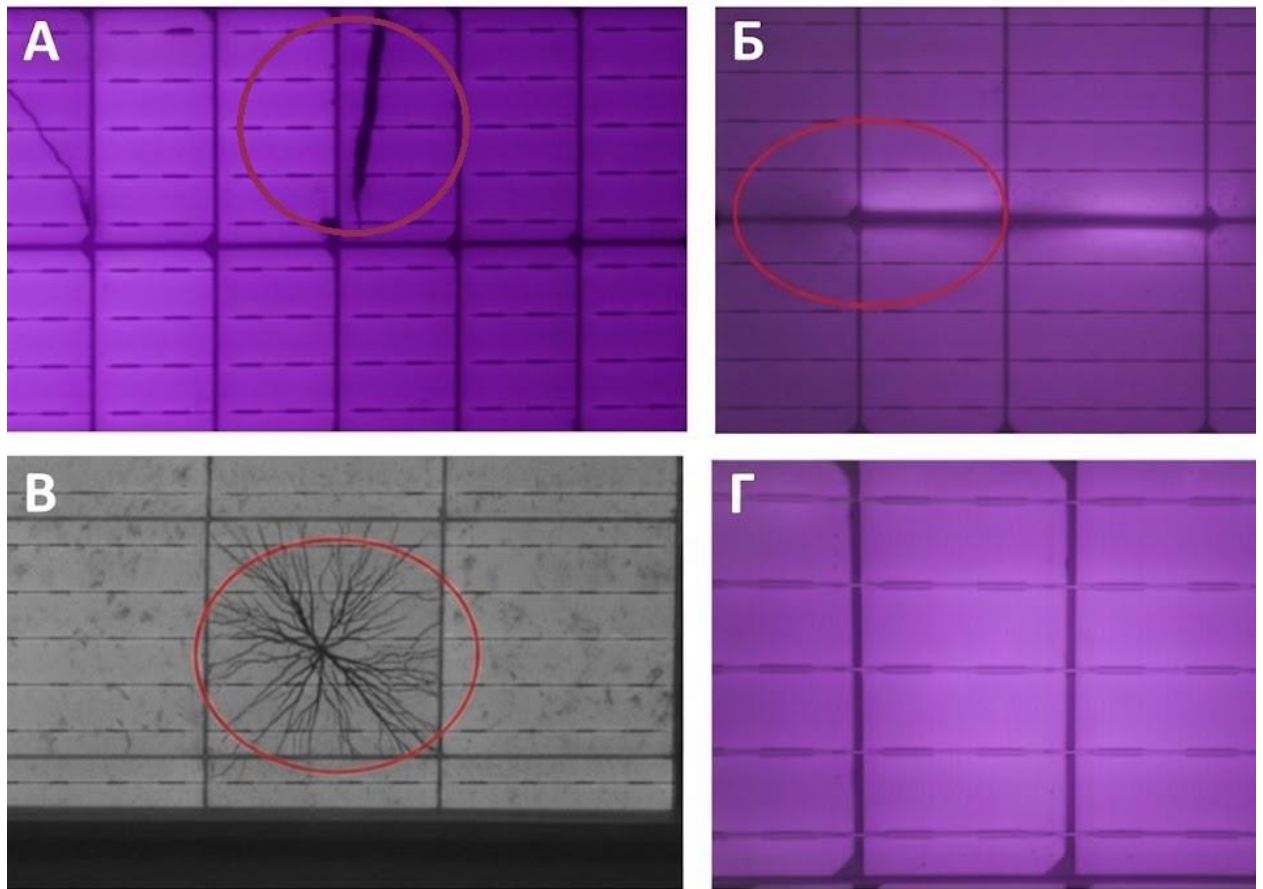


Рис.1.9 – Дефекти фотомодулів. а) Одиарна тріщина; б) Напівпрозора ділянка; в) Розгалужена мікротріщина; г) Комірка без дефектів;

4. Експлуатаційні чинники охоплюють сукупність заходів із технічного супроводу та моніторингу об'єкта після його введення в експлуатацію, оскільки продуктивність навіть високотехнологічного устаткування залежить від якості його підтримки. Ефективність функціонування системи визначається обраною стратегією обслуговування, де перехід від регламентних робіт за графіком до сервісу за фактичним технічним станом дозволяє оперативніше реагувати на відхилення робочих параметрів[3,39,40]. Суттєвий вплив на генерацію має стан поверхні ФЕМ: накопичення пилу, бруду або сторонніх часток не лише знижує енерговиробіток у межах 5–30%, а й створює ризики виникнення локальних

зон перегріву. Безперервний автоматизований моніторинг показників є критично важливим для виявлення дефектів ізоляції та термічних аномалій, що безпосередньо впливає на пожежну безпеку та запобігає займанням у місцях слабких контактів[22,39]. Крім того, надійність роботи сучасних станцій потребує високої кваліфікації персоналу, компетентність якого у сфері промислових протоколів зв'язку та систем автоматизації дозволяє уникати помилок при налаштуванні та мінімізувати ймовірність аварійних зупинок.

5. Фактори автоматизації та моніторингу визначають ступінь технологічної автономності СЕС та її здатність до самодіагностики без безпосереднього залучення оператора. Використання інтегрованих систем диспетчерського управління та збору даних (SCADA) забезпечує централізований контроль робочих параметрів, архівацію показників експлуатації та можливість дистанційного коригування налаштувань обладнання[5,26]. Висока частота дискретизації та точність вимірювальних пристроїв, зокрема застосування аналого-цифрових перетворювачів у складі мікроконтролерів, дозволяють фіксувати мінімальні відхилення внутрішнього опору модулів, що є індикатором їхнього старіння. Впровадження методів математичного моделювання, зокрема на основі дводіодних моделей фотоелементів, у поєднанні з алгоритмами прогностичного аналізу дає змогу ідентифікувати причини зниження генерації, диференціюючи вплив мінливої хмарності від технічних несправностей[7,15]. Водночас забезпечення кібербезпеки та цілісності каналів передачі даних є критично важливим аспектом, оскільки захист цифрових ліній зв'язку запобігає несанкціонованому втручанню в роботу автоматизованих систем керування об'єктом[6,26].

Таблиця 1.4 – Комплексна класифікація факторів впливу на ефективність та стабільність роботи СЕС

Група чинників	Ключові фактори	Характер та наслідки впливу на роботу станції
1. Кліматичні та природні	Рівень сонячного випромінювання, температура повітря, опади та швидкість вітру	Визначають базовий обсяг виробленої енергії. Надмірне нагрівання панелей знижує їхню ефективність, а вітер забезпечує необхідне охолодження.
2. Геометричні (монтажні)	Кут нахилу, орієнтація на південь, наявність тіні від об'єктів та використання систем руху за сонцем	Впливають на здатність системи максимально вловлювати сонячні промені протягом дня. Затінення навіть невеликої ділянки може суттєво знизити виробіток усього ланцюга панелей.
3. Технічні (обладнання)	Тип фотоелементів, якість інверторів, фізичне старіння матеріалів та стан контактів	Визначають якість перетворення світла в електрику. Поступовий знос контактів (зростання опору R_s) або поява мікротріщин (зниження опору R_{sh}) призводять до незворотних втрат потужності.
5. Експлуатаційні	Чистота поверхні панелей, регулярність технічних оглядів та якість моніторингу параметрів	Впливають на тривалість служби обладнання. Пил та бруд створюють перешкоди для світла, а відсутність нагляду заважає вчасно виявити приховані поломки.
6. Автоматизація та моніторинг	Використання систем керування (SCADA), точність вимірювальних датчиків та інтелектуальні алгоритми аналізу даних	Дозволяють системі самостійно розрізняти вплив погоди від технічних поломок. Висока точність збору даних є основою для швидкого реагування на аварійні ситуації.

Ефективність роботи СЕС залежить від комплексу чинників, значна частина яких має випадковий характер (наприклад, мінливість погодних умов або затінення)[31]. Оскільки зовнішні природні явища та процеси природного старіння матеріалів є некерованими, пріоритетним завданням стає організація безперервного контролю технічного стану обладнання[6,39].

Головним недоліком існуючих систем моніторингу є їхня обмежена здатність точно розрізняти причини зниження потужності – чи воно викликане зовнішніми умовами, чи внутрішніми дефектами, такими як пошкодження контактів або мікротріщини[20,39]. Це підтверджує

актуальність розробки методу автоматизованого контролю, здатного аналізувати внутрішні параметри панелей у реальному часі. Впровадження такого підходу дозволить не лише вчасно виявляти несправності, а й забезпечить стабільну та безпечну експлуатацію станції протягом усього терміну її служби[3,40].

1.6 Огляд методів та засобів моніторингу параметрів СЕС

Ефективність та рентабельність (СЕС) залежить не лише від якості встановленого обладнання та географічного розташування, а й від надійності системи контролю їх роботи[3,40]. У процесі експлуатації ФЕМ та інверторне обладнання піддаються впливу зовнішніх факторів, які можуть призводити до деградації компонентів та зниження генерації[19,21]. Своєчасне виявлення відхилень у роботі системи є запорукою мінімізації втрат електроенергії та продовження терміну служби станції. Сучасні підходи до діагностики СЕС суттєво відрізняються за рівнем автоматизації, глибиною аналізу даних та швидкістю реагування на аварійні ситуації. Нижче наведено класифікацію основних методів та засобів моніторингу, що застосовуються сьогодні: від найпростіших ручних вимірювань до складних інтелектуальних систем[9].

1. Ручний або локальний контроль – становить базовий рівень моніторингу СЕС, що базується на безпосередній взаємодії технічного персоналу з обладнанням без залучення складних автоматизованих систем збору даних[21,27]. Цей підхід є критично важливим на етапах пусконаладжувальних робіт та під час планового сервісного обслуговування, оскільки дозволяє отримати точну інформацію про фактичний стан об'єкта в конкретний момент часу.

Процес технічної діагностики на цьому рівні охоплює комплекс електротехнічних вимірювань, термографічний аналіз та візуальну інспекцію інфраструктури. Фахівці використовують мультиметри та струмові кліщі для

контролю параметрів постійного і змінного струму, а за допомогою тепловізорів детектують місця перегріву, що свідчать про внутрішні дефекти фотоелектричних комірок або деградацію контактів. Паралельно здійснюється ретельна перевірка цілісності скляного покриття, опорних конструкцій, кабельних мереж та аналіз помилок на локальних дисплеях інверторів[21,40].

Головною специфікою та обмеженням методу є дискретність отриманих даних і відсутність автоматичного архівування[9,52], що ускладнює аналіз довгострокової динаміки та виявлення прихованих несправностей. Через високу залежність від кваліфікації персоналу та низьку оперативність реагування ручний контроль є малоефективним для великих промислових об'єктів. Проте він залишається доцільним для приватних домогосподарств, а також слугує надійним інструментом фізичної верифікації показників на масштабних СЕС[15].

2. Локальні автоматизовані системи контролю забезпечують перехід від епізодичних вимірювань до безперервного моніторингу СЕС шляхом інтеграції датчиків та мікроконтролерів безпосередньо в обладнання. Такий підхід мінімізує вплив людського фактора та гарантує миттєву реакцію системи на зміну робочих режимів окремих вузлів, що підвищує загальну стабільність експлуатації[11,12].

Ключовим діагностичним вузлом на цьому рівні є мережевий інвертор, який у реальному часі відстежує параметри струму, напруги та температури силових компонентів. Завдяки вбудованим веб-інтерфейсам і мобільним застосункам забезпечується оперативна візуалізація графіків генерації та миттєве сповіщення про технічні збої, що радикально прискорює процес обслуговування станції[9].

В автономних та гібридних системах особлива увага приділяється інтелектуальним MPPT-контролерам та моніторингу акумуляторних масивів. Автоматизований аналіз вольт-амперних характеристик і контроль параметрів заряду-розряду дозволяють не лише максимізувати

енергоефективність за мінливих погодних умов, а й суттєво подовжити термін служби накопичувачів енергії[13].

Взаємодія персоналу з об'єктом здійснюється через локальні панелі оператора або промислові цифрові пристрої, що дозволяють дистанційно коригувати налаштування та ініціювати тестування обладнання. Проте ефективність таких систем обмежена лімітованим обсягом пам'яті для ретроспективного аналізу та відсутністю уніфікації програмного забезпечення між різними виробниками, що ускладнює створення єдиних мультибрендових мереж.

АРХІТЕКТУРА SCADA СИСТЕМИ СЕС

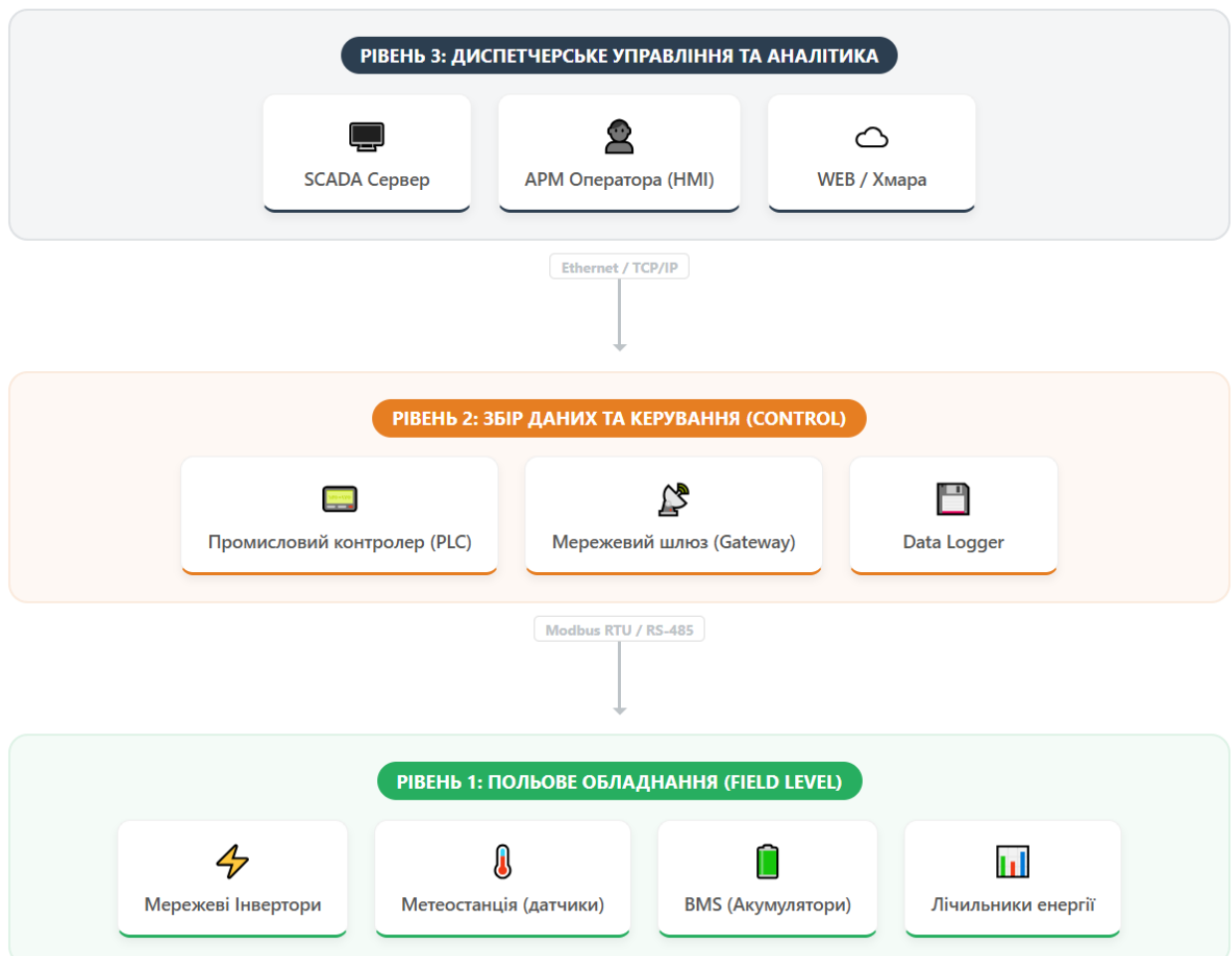


Рисунок 1.10 – Типова структурна схема SCADA

3. Централізовані системи контролю та диспетчеризації (SCADA) є найвищим етапом автоматизації СЕС, що забезпечує створення єдиного інтелектуального середовища. На відміну від локальних рішень, SCADA інтегрує всі компоненти станції – інвертори, контролери, метеостанції та датчики у цілісний інформаційний простір. Такий підхід дозволяє здійснювати комплексний аналіз роботи об'єкта як єдиної системи, що є галузевим стандартом для промислових СЕС, де ефективність управління прямо корелює з економічними показниками[9,52].

Архітектура таких систем базується на принципі ієрархічної піраміди: від первинних датчиків на нижньому рівні до промислових контролерів і дата-логерів, що впорядковують потоки даних. Через комунікаційні шлюзи інформація надходить до центральних серверів і візуалізується за допомогою людино-машинного інтерфейсу. Це дозволяє диспетчерам не лише моніторити технічні параметри в реальному часі, а й здійснювати активне дистанційне керування, включаючи зміну режимів роботи або екстрене відключення сегментів станції[60].

Важливою перевагою централізованого контролю є можливість довгострокового архівування та глибокої ретроспективної аналітики. Зберігання історії параметрів протягом багатьох років дозволяє порівнювати поточну генерацію з показниками минулих періодів, виявляти приховані деградаційні процеси у фотоелектричних модулях та переходити до стратегії технічного обслуговування за фактичним станом. Такий підхід мінімізує простої та забезпечує точне прогнозування повернення інвестицій.

Попри значні функціональні можливості, впровадження систем класу SCADA потребує суттєвих капіталовкладень і залучення висококваліфікованих інженерів для проектування та підтримки стабільних каналів зв'язку. Через високу складність програмного забезпечення та вартість розгортання, використання таких систем є економічно обґрунтованим переважно для масштабних промислових та комерційних енергооб'єктів[52,70].

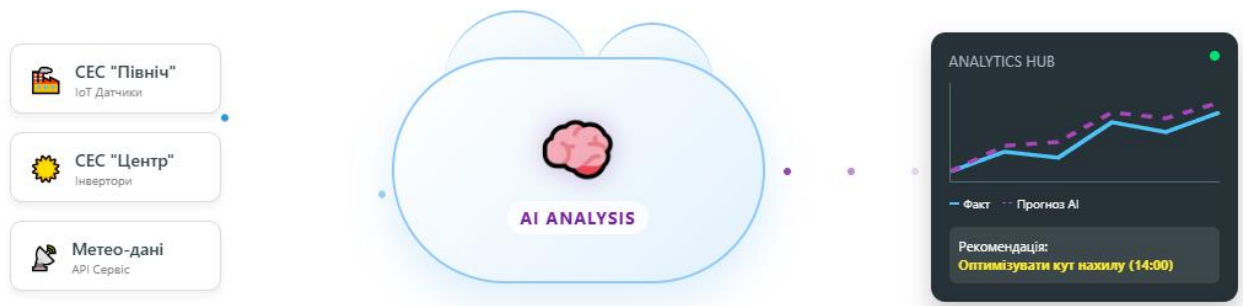


Рис. 1.11 Концептуальна схема взаємодії хмарних сервісів та алгоритмів машинного навчання у моніторингу СЕС.

4. Сучасний етап розвитку систем моніторингу СЕС характеризується інтеграцією штучного інтелекту, та хмарних обчислень. Що трансформує систему з пасивного інструменту фіксації показників на активну інтелектуальну платформу, здатну до самостійної оптимізації та прогнозування. Архітектура таких рішень є багатошаровою: дані від сенсорів та інверторів проходять через локальні вузли обробки (SCADA) до хмарної інфраструктури, де алгоритми машинного навчання здійснюють глибокий аналіз великих масивів інформації, надаючи кінцевому користувачу готові аналітичні висновки та рекомендації.

Ключовим інструментом інтелектуальних систем є використання моделей машинного навчання для прогнозування генерації та виявлення аномалій. На відміну від жорстких логічних правил, моделі ШІ здатні враховувати складні кореляції між сонячною інсоляцією, метеорологічними факторами та технічним станом фотоелектричних модулів (ФЕМ). Висока точність прогнозів виробітку електроенергії на короткострокові періоди є критично важливою для інтеграції СЕС у балансуючі енергоринки.

Особлива увага приділяється прогнозно-аналітичним методам оцінки ефективності об'єкта. Система автоматично розраховує ключові показники, такі як коефіцієнт ефективності та індекс використання потужності, диференціюючи втрати від затінення, забруднення або природної деградації

ФЕМ. Це дозволяє штучному інтелекту визначати економічну доцільність сервісних заходів (наприклад, миття панелей) у режимі реального часу, спираючись на прогнози погоди та фінансові показники.

Попри технологічні переваги, впровадження інтелектуальних систем супроводжується значними викликами. Основними бар'єрами є висока капіталомісткість, складність інтеграції мультибрендового обладнання та критична залежність результатів від якості вхідних даних. Будь-які похибки в роботі датчиків або перебої в передачі інформації призводять до хибних прогнозів. Крім того, перенесення аналітики у хмару створює ризики кібербезпеки, що вимагає впровадження багаторівневих систем захисту від несанкціонованого доступу та дистанційного втручання в роботу обладнання[11,52].

Підсумкова концепція сучасного моніторингу полягає у безперервному порівнянні фактичної продуктивності з теоретично можливим максимумом[3,39,40]. Такий аналіз відхилень дозволяє чітко розрізняти характер несправностей: раптове зниження ККД при стабільних параметрах зазвичай свідчить про зовнішнє забруднення, тоді як поступова зміна характеристик вказує на технічний знос компонентів[13]. Таким чином, інтелектуальні системи забезпечують перехід від регламентного обслуговування до стратегії предиктивного сервісу за фактичним станом об'єкта, мінімізуючи експлуатаційні витрати та максимізуючи прибутковість енергогенеруючого активу[3,40].

Таблиця 1.5 – Порівняльна характеристика методів та систем контролю параметрів СЕС

Критерій порівняння	1. Ручний або локальний контроль	2. Локальні автоматизовані системи	3. Централізовані системи (SCADA)	4. Інтелектуальні та хмарні технології
Основні інструменти та засоби	Мультиметри, струмові кліщі, пірометри, тепловізори, візуальний огляд.	Вбудовані датчики інверторів, МРРТ-контролери, мобільні додатки.	Промислові контролери, даталогери, панелі, сервери.	Штучний інтелект, машинне навчання, хмарні сервери,
Спосіб збору та зберігання даних	Вручну в паперові або електронні журнали. Автоматичне архівування відсутнє.	Автоматично у внутрішню пам'ять пристроїв (обмежений обсяг, короткий період).	Централізовано на виділених серверах. Глибокий архів за багато років.	Дистанційно у хмару. Обробка колосальних масивів даних у реальному часі.
Глибина аналізу	Тільки поточні показники на момент перевірки.	Графіки генерації, миттєві повідомлення про збої.	Комплексний аналіз усієї станції, ретроспективне порівняння сезонів.	Прогнозне моделювання, виявлення прихованих аномалій, оцінка ККД.
Оперативність реакції	Низька: залежить від графіку виїздів персоналу.	Висока: миттєве сповіщення про критичні помилки.	Максимальна: можливість віддаленого керування та відключення сегментів.	Проактивна: система попереджає про проблему до її виникнення.
Сфери застосування	Приватні домогосподарства, малі автономні системи, етап пусконаладження.	Гібридні СЕС, малі та середні комерційні об'єкти.	Великі промислові та мережеві СЕС, енергопарки.	Об'єкти Smart Grid, участь у балансуючих ринках, масштабні проекти.
Головні мінуси	Людський фактор та помилки; відсутність історії параметрів; неможливість відстежити несподівані помилки.	Обмежений обсяг пам'яті пристроїв; несумісність обладнання різних брендів; складність.	Висока вартість впровадження, потреба у висококваліфікованих інженерах; складність проектування.	Ризики кібербезпеки; залежність від стабільного інтернету; чутливість до похибок датчиків.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У першому розділі магістерської роботи здійснено комплексний аналіз поточного стану та науково-технічних проблем контролю параметрів СЕС, що дозволило ідентифікувати ключові вектори розвитку галузі. Встановлено, що в сучасних умовах сонячна енергетика трансформується зі стадії екстенсивного нарощування потужностей у фазу, де пріоритетом стає ефективна експлуатація та підтримка надійності. Головним технічним викликом при цьому визначено випадкову природу генерації та процеси незворотного технічного зносу ФЕМ, інтенсивність яких зростає під впливом кліматичних змін та агресивних умов довкілля, що вимагає перегляду підходів до систем керування.

Детальний розгляд фізичних засад функціонування ФЕП та аналіз їх еквівалентних схем заміщення виявив суттєві обмеження класичних математичних моделей.

З'ясовано, що існуючі алгоритми контролерів базуються на спрощеному припущенні про незмінність геометричних параметрів активної поверхні протягом всього терміну служби. Такий підхід суттєво знижує точність діагностики на пізніх стадіях експлуатації, коли структура напівпровідника зазнає фізичних змін, таких як мікротріщини або деламінація, що робить стандартні моделі нерелевантними до реального стану обладнання.

Обґрунтовано, що для забезпечення максимального ККД протягом життєвого циклу СЕС необхідно впроваджувати методи предиктивної діагностики. Встановлено, що існуючі бюджетні системи моніторингу ігнорують динаміку зміни внутрішніх параметрів, що не дозволяє вчасно виявляти приховані енергетичні втрати та ефективно керувати продуктивністю станції.

Критичний аналіз наявних засобів моніторингу – від ручних інструментальних вимірювань до складних SCADA-систем та алгоритмів

штучного інтелекту – продемонстрував їх недостатню ефективність для вирішення поставлених завдань на об'єктах малої та середньої потужності. Бюджетні системи моніторингу інверторів не забезпечують необхідної дискретності даних для виявлення локальних дефектів, тоді як професійні SCADA-рішення є економічно невиправданими для даного сегмента. Водночас методи, що базуються на машинному навчанні, мають високу залежність від великих масивів історичних даних, відсутність яких на етапі запуску станції унеможливорює коректну роботу алгоритмів прогнозування.

На основі виявленого протиріччя між необхідністю раннього виявлення дефектів та обмеженістю існуючих засобів, які часто ігнорують динаміку зміни внутрішніх параметрів модуля, сформульовано задачу дослідження. Обґрунтовано нагальну потребу в розробці удосконаленого методу автоматизованого контролю, що базується на використанні адаптивної математичної моделі для ідентифікації параметрів еквівалентної схеми заміщення (R_s , R_{sh}) в режимі реального часу. Такий підхід дозволяє пов'язати зміни вольт-амперних характеристик безпосередньо з фізичними процесами руйнування контактів та ізоляції.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДУ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СЕС

2.1 . Обґрунтування застосування параметрів еквівалентної схеми заміщення для діагностики фотомодулів СЕС

У сучасній енергетиці забезпечення стабільності та енергобезпеки СЕС безпосередньо залежить від точності оцінювання технічного стану ФЕП[77,78]. Аналіз існуючих підходів до моніторингу, проведений у першому розділі, свідчить про те, що традиційні методи контролю базуються переважно на вимірюванні інтегральних вихідних характеристик (струму, напруги, потужності) та їх порівнянні з паспортними даними[9,11,12].

Головним недоліком такого підходу є неможливість розрізнити природу втрат енергії. Зниження генерації може бути викликане як оборотними зовнішніми факторами (забруднення поверхні, часткове затінення), так і незворотними внутрішніми дефектами (деградація контактів, мікротріщини, PID-ефект). Просте вимірювання потужності не дає відповіді на питання про залишковий ресурс модуля[75,75].

З точки зору енергоефективності, ККД системи є інтегральним показником, який відображає сукупний вплив усіх видів втрат[50,58]. Проте для високоточної діагностики необхідно розуміти механізм впливу внутрішніх параметрів моделі на загальну ефективність. Так, зростання послідовного опору (R_s) призводить до прямих омичних втрат потужності, що пропорційно знижує ККД модуля під навантаженням. Водночас, зниження шунтового опору (R_{sh}) вказує на зростання струмів витоку, що критично зменшує ККД в режимах низької інсоляції, коли корисна генерація є співмірною з внутрішніми втратами[7,8].

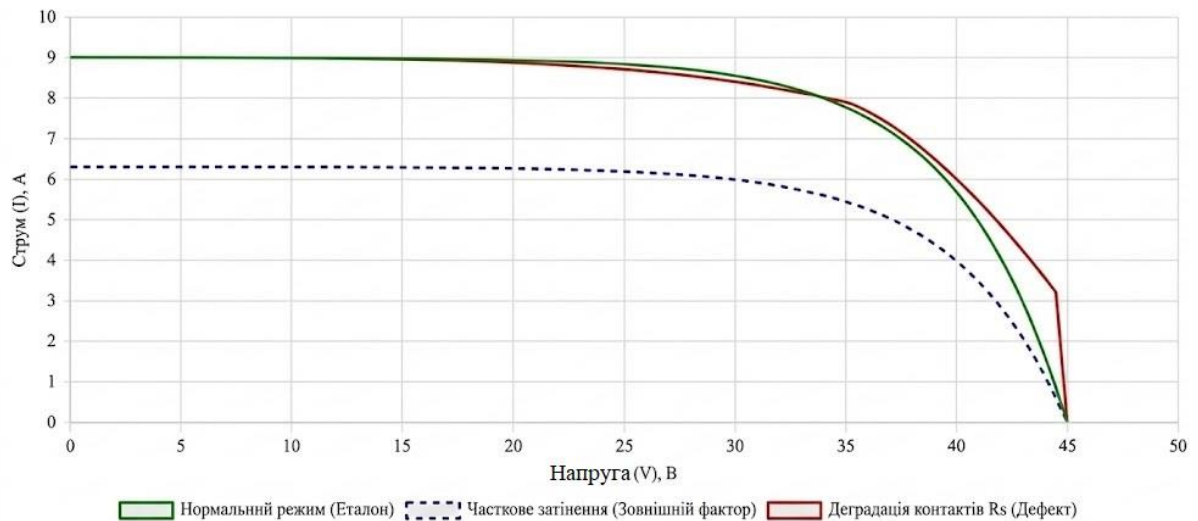


Рисунок 2.1 – Невизначеність діагностики за потужністю: порівняння форми ВАХ при частковому затіненні (пунктир) та при деградації контактного опору R_s (суцільна лінія)

Для вирішення цієї проблеми у даній роботі обґрунтовано вибір методу, що базується на аналізі внутрішніх параметрів еквівалентної схеми заміщення. ФЕМ розглядається не як об'єкт із невідомою внутрішньою структурою, а як електричне коло з певними фізичними характеристиками, найбільш значущими з яких для діагностики є:

1. Послідовний опір (R_s): Цей параметр характеризує суму омичних опорів матеріалу напівпровідника, металевих контактів та з'єднувальних провідників. Його динаміка є прямим відображенням стану струмопровідних шляхів. Зростання R_s свідчить про руйнування пайки, окислення контактів або деградацію струмознімальної сітки.

2. Шунтовий опір (R_{sh}): Цей параметр описує небажані шляхи протікання струму в обхід р-п переходу (струми витоку). Його різке зменшення є індикатором порушення цілісності кристала (мікротріщини) або виникнення локальних пробойів.

Для побудови адекватної діагностичної моделі необхідно детально розглянути фізико-хімічні процеси, що призводять до зміни електричних параметрів R_s та R_{sh} .

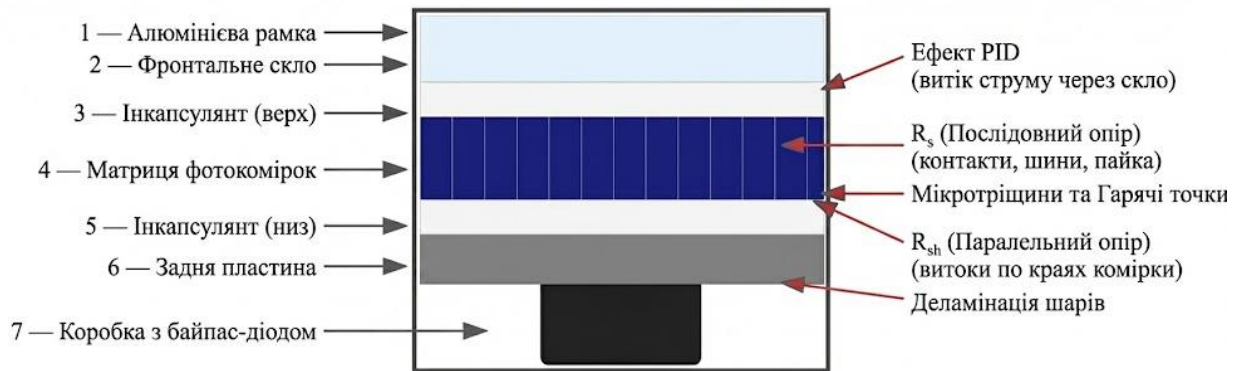


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення локалізації внутрішніх дефектів у структурі ФЕМ.

Послідовний опір (R_s) ФЕМ є інтегральною величиною, що сумує опори емітера, базової області, контактної сітки та паяних з'єднань, причому домінуючим фактором його зростання у процесі експлуатації виступає термомеханічна втома. В умовах циклічних температурних навантажень різниця коефіцієнтів теплового лінійного розширення кремнію, міді та припою створює на межах розділу матеріалів механічні напруження, які з часом призводять до утворення мікротріщин у паяних з'єднаннях, зменшення ефективної площі контакту та деламінації провідників. Цей деградаційний процес часто поглиблюється корозією металізації внаслідок проникнення вологи, що формує низькопровідні оксиди, а також локальними перегрівками в місцях відшарування контактів, що математично описується як дрейф параметра R_s від номінальних $0.3\text{--}0.5\ \Omega$ до значень $1.5\text{--}2.0\ \Omega$ і вище.

Паралельний (шунтовий) опір (R_{sh}), який характеризує ізоляційні властивості p-n переходу і в ідеальному діоді прямує до нескінченності, на практиці знижується під впливом структурних дефектів та ефекту деградації, викликаного потенціалом (PID). Механічні навантаження, такі як вібрації чи

тиск вітру, призводять до появи мікротріщин, що створюють небажані провідні канали для носіїв заряду, а у високовольтних стрінгах міграція іонів натрію (Na^+) зі скла до поверхні комірки формує додаткові шунтуючі шляхи, катастрофічно зменшуючи опір. Моніторинг цього параметра має високу діагностичну цінність, оскільки дозволяє виявити дефекти, які, мало впливаючи на P_{max} при інтенсивній інсоляції, суттєво погіршують продуктивність модуля в умовах низької освітленості.

Суть запропонованого методу полягає у введенні до контуру автоматизованого керування процедури динамічної ідентифікації цих опорів. На відміну від класичних моделей, де R_s та R_{sh} вважаються константами, у розробленій методиці вони є змінними стану. Це дозволяє системі діагностувати тип несправності: стабільні опори при падінні струму вказують на зовнішні фактори (затінення), тоді як зміна опорів однозначно свідчить про деградацію обладнання[.

2.2 Удосконалення математичної моделі для ідентифікації параметрів

Для реалізації методу необхідна математична модель, яка забезпечує високу точність апроксимації вольт-амперної характеристики (ВАХ) реального модуля. Для цілей високоточного контролю обрано дводіодну еквівалентну схему заміщення, яка враховує як дифузійні процеси, так і рекомбінацію носіїв заряду в області просторового заряду.

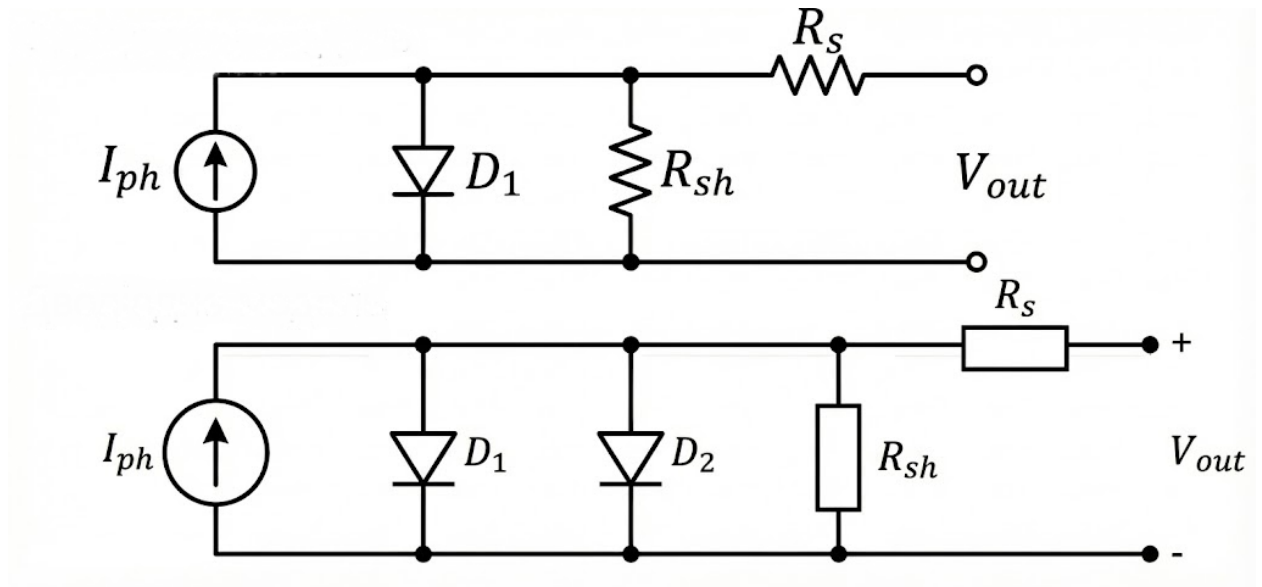


Рисунок 2.3 – Однодіодна та дводіодна еквівалентна схема заміщення ФЕМ.

Обґрунтування вибору математичної моделі ФЕП є визначальним етапом у проектуванні систем автоматизованого контролю, оскільки саме обрана модель диктує баланс між точністю відтворення фізичних процесів у напівпровіднику та обчислювальною складністю алгоритмів діагностики. У сучасній науковій літературі та інженерній практиці базовим підходом вважається використання однодіодної моделі, яка описує вольт-амперну характеристику через модифіковане рівняння Шоклі з урахуванням паразитних опорів. Фізична сутність однодіодної моделі базується на припущенні про домінування дифузійної складової струму в квазінейтральних областях та нехтуванні процесами рекомбінації носіїв заряду в області просторового заряду р-n переходу. Таке спрощення є цілком прийнятним для моделювання енергетичної ефективності високоякісних монокристалічних модулів в умовах інтенсивної інсоляції, коли фотогенерований струм значно перевищує струми витоку.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз математичних моделей ФЕП.

Характеристика	Однодіодна модель	Дводіодна модель
Кількість параметрів	5 ($I_{ph}, I_0, n, R_s, R_{sh}$)	7 ($I_{ph}, I_{s1}, I_{s2}, N_1, N_2, R_s, R_{sh}$)
Фізична точність	Враховує лише дифузію носіїв	Враховує дифузію та рекомбінацію в ОПЗ
Точність при низькій інсоляції	Низька (значна похибка V_{oc})	Висока (коректно описує "хвіст" ВАХ)
Чутливість до дефектів	Середня (схильна до компенсації помилок)	Висока (дозволяє розділити R_s та R_{sh})
Обчислювальна складність	Середня	Висока (вимагає спец. алгоритмів, напр. W-функції)
Рекомендована сфера	Енергетичний моніторинг (облік кВт·год)	Технічна діагностика та дефектоскопія

Вибір дводіодної моделі обумовлений необхідністю максимально точного розрахунку енергетичного балансу ФЕП. На відміну від спрощених підходів, дана модель дозволяє розділити втрати на перенесення заряду та внутрішні втрати через дефекти, що безпосередньо визначають реальний ККД напівпровідникової структури. Це дає змогу не лише фіксувати факт зниження ефективності, а й кількісно оцінити внесок кожного деградаційного процесу у загальне падіння ККД, забезпечуючи високу точність діагностики на ранніх стадіях старіння обладнання

Однак для вирішення задач поглибленої технічної діагностики та виявлення деградаційних явищ на ранніх стадіях однодіодна еквівалентна схема виявляє низку критичних недоліків, що унеможливають її застосування в прецизійних системах моніторингу. По-перше, в режимах низької освітленості (ранкові чи вечірні години або хмарна погода), коли рівень інжекції носіїв падає, рекомбінаційні струми в збідненій області

стають співмірними з дифузійними, і ігнорування другого діода призводить до суттєвих похибок у розрахунку напруги холостого ходу (U_{oc}), що спотворює оцінку реального стану панелі. По-друге, математична структура однодіодної моделі схильна до ефекту компенсації похибок: при деградації шунтового опору (R_{sh}) алгоритми ідентифікації параметрів часто помилково коригують коефіцієнт ідеальності діода (n) замість фіксації падіння опору ізоляції, що призводить до спотворення діагностичних ознак і формування хибно-позитивних висновків про справність модуля. Крім того, для полікристалічних фотоелементів, структура яких насичена дефектами на границях зерен, струми втрат у p - n переході є фізично значущою величиною, яку неможливо коректно описати єдиним експоненційним членом, що робить перехід до дводіодної моделі необхідною умовою для створення достовірної системи діагностики.

Базове рівняння, що описує вихідний струм навантаження I для дводіодної моделі відповідно до закону Кірхгофа, має вигляд:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{q(U+I \cdot R_s)}{N_1 k T}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{q(U+I \cdot R_s)}{N_2 k T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

де I_{ph} – фотострум, величина якого залежить від інсоляції (G) та температури (T);

I_{s1}, I_{s2} – струми насичення першого та другого діодів;

N_1, N_2 – коефіцієнти ідеальності діодів;

R_s – послідовний опір (діагностичний параметр деградації контактів);

R_{sh} – шунтовий опір (діагностичний параметр структурних дефектів);

U, I – виміряні вихідна напруга та струм;

q – заряд електрона;

k – стала Больцмана;

T – абсолютна температура p - n переходу.

У розробленій моделі фотострум I_{ph} розраховується аналітично на основі даних з датчиків інсоляції та температури:

$$I_{ph}(G, T) = \frac{G}{G_{STC}} \cdot [I_{sc, STC} + \alpha_I (T - T_{STC})] \quad (2.1)$$

де α_I – температурний коефіцієнт струму.

Ключовою відмінністю удосконаленої моделі є те, що вона розв'язує обернену задачу. Вхідними даними є масив вимірених точок ВАХ (U , I) та метеодані (G , T), а вихідними – поточні значення R_s та R_{sh} . Зміна R_s впливає на нахил ВАХ у режимі холостого ходу (напруга падає швидше при навантаженні), тоді як R_{sh} визначає нахил у режимі короткого замикання. Математична модель дозволяє кількісно оцінити ці зміни, відділяючи вплив деградації від впливу температури та освітленості.

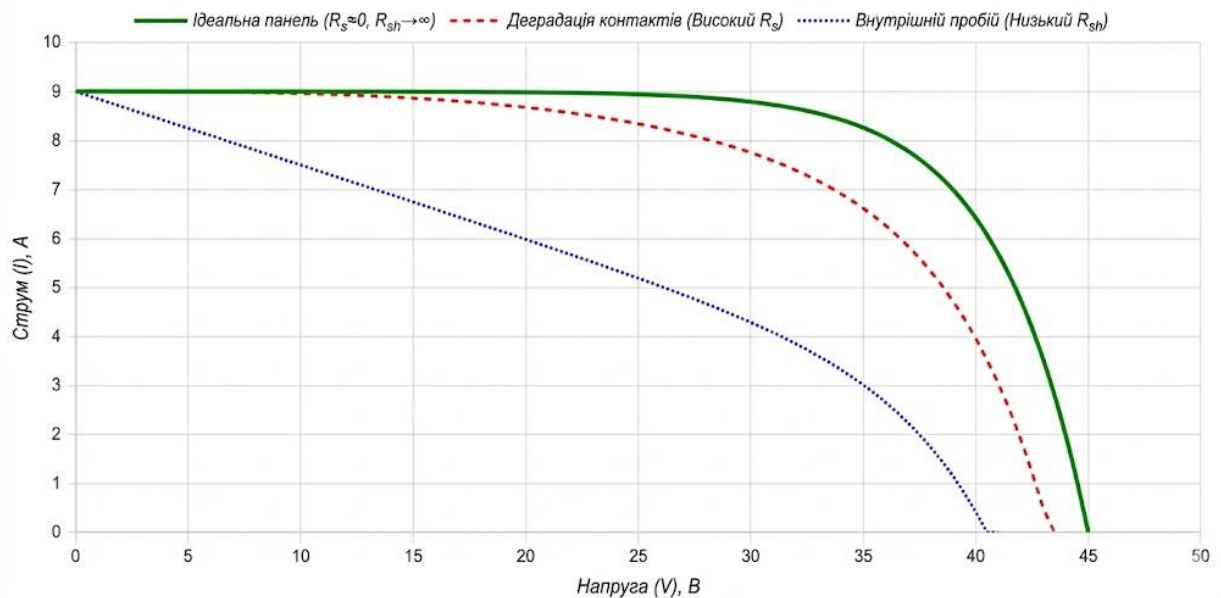


Рисунок 2.2 – Математичне моделювання впливу параметрів схеми заміщення на форму ВАХ: (а) вплив послідовного опору R_s ; (б) вплив шунтового опору R_{sh}

2.3. Алгоритмізація та програмна реалізація розрахунку параметрів у реальному часі

Програмне втілення розробленої математичної моделі в середовищі обчислювального ядра мікроконтролера вимагає створення ефективного чисельного алгоритму. Головна складність прямого розрахунку параметрів еквівалентної схеми полягає у трансцендентній природі базового рівняння дводіодної моделі (2.1). Оскільки невідомий струм I входить як у лінійну частину рівняння, так і в показник експоненти, аналітичне вираження послідовного опору R_s через елементарні функції є неможливим. Це зумовлює необхідність застосування методів послідовних наближень розв'язання нелінійних рівнянь. Загальна стратегія розробленого алгоритму базується на мінімізації функції нев'язки (похибки) між енергетичними параметрами, вимірними на об'єкті діагностики, та параметрами, що генеруються математичною моделлю при варіюванні змінних стану[50].

Першим етапом роботи алгоритму є збір та попередня обробка масиву вхідних даних, що надходять від сенсорів струму, напруги, температури та піранометра[52]. Враховуючи імовірний характер шумів вимірювання в умовах реальної експлуатації СЕС (електромагнітні завади від інвертора, перехідні процеси), застосовується цифрова фільтрація сигналів. Для цього використовується медіанний фільтр ковзного вікна, який ефективно усуває імпульсні викиди, не вносячи фазових спотворень, характерних для лінійних фільтрів.

Після нормалізації даних виконується розрахунок шунтового опору (R_{sh}). Фізично цей параметр характеризує струми витоку через р-п перехід. Математично його значення визначається нахилом вольт-амперної характеристики (ВАХ) в області короткого замикання[4]. Оскільки при напругах, близьких до нуля ($U \approx 0$), струм через діоди експоненційно малий і ним можна знехтувати, еквівалентна схема спрощується до джерела струму, зашунтованого резистором R_{sh} .

Виходячи з цього, значення шунтового опору визначається як величина, обернена до диференціальної провідності модуля в точці короткого замикання:

$$R_{sh} \approx \left(\frac{dI}{dU} \right)^{-1} \Big|_{U=0} \quad (2.2)$$

Для програмної реалізації дана похідна замінюється скінченною різницею значень струму та напруги, отриманих у двох послідовних точках вимірювання поблизу режиму короткого замикання.

Визначення послідовного опору (R_s) є найбільш обчислювально складною процедурою, оскільки цей параметр входить у рівняння стану нелінійно. Для забезпечення швидкої збіжності ітераційного процесу в умовах обмежених ресурсів мікроконтролера (класу ARM Cortex-M3/M4) у роботі обґрунтовано використання W-функції Ламберта[46,49,64,75].

Стандартні методи розв'язання рівняння (2.1) вимагають застосування вкладених послідовних наближень для знаходження струму при кожному припущенні щодо опору, що призводить до квадратичної складності алгоритму. Використання W-функції Ламберта (функції $W(z)$, що є розв'язком рівняння $z = we^w$) дозволяє отримати явний аналітичний вираз для струму моделі I_{model} як функції від напруги та опорів.

Для дводіодної моделі, за умови домінування однієї з експоненціальних складових в робочій точці, аналітичний вираз для струму набуває вигляду[47]:

$$I_{model} = \frac{R_{sh}(I_{ph} + I_0)}{R_s + R_{sh}} - \frac{NV_t}{R_s} W \left(\frac{I_0 R_s R_{sh}}{NV_t (R_s + R_{sh})} \cdot \exp \left(\frac{R_{sh} [R_s (I_{ph} + I_0) + U]}{NV_t (R_s + R_{sh})} \right) \right) - \frac{U}{R_s + R_{sh}} \quad (2.3)$$

де W – головна гілка

W-функції Ламберта,

$V_t = kT / q$ - тепловий потенціал,

N – узагальнений коефіцієнт ідеальності діода.

Задача визначення R_s базується на пошуку кореня рівняння балансу потужностей через мінімізацію цільової функції. Формується цільова функція похибки $f(R_s)$, яка дорівнює різниці між виміряною реальною потужністю (P_{meas}) та розрахунковою потужністю моделі[50]:

$$f(R_s) = P_{meas} - (I_{model}(R_s) \cdot U_{meas}) = 0 \quad (2.4)$$

Для мінімізації функції (2.4) обрано метод Ньютона-Рафсона з квадратичною швидкістю збіжності. Процедура уточнення величини послідовного опору на $(k+1)$ -му кроці обчислень базується на алгоритмічному виразі:

$$R_s^{(k+1)} = R_s^{(k)} - \frac{f(R_s^{(k)})}{f'(R_s^{(k)})} \quad (2.5)$$

де $f'(R_s^{(k)})$ – перша похідна цільової функції за змінною опору. З метою зниження обчислювального навантаження на мікропроцесорну систему, замість точного диференціювання застосовується кінцево-різницева оцінка методом січних. Цей підхід базується на значеннях функції, отриманих на поточному та попередньому етапах обчислювального циклу[52].

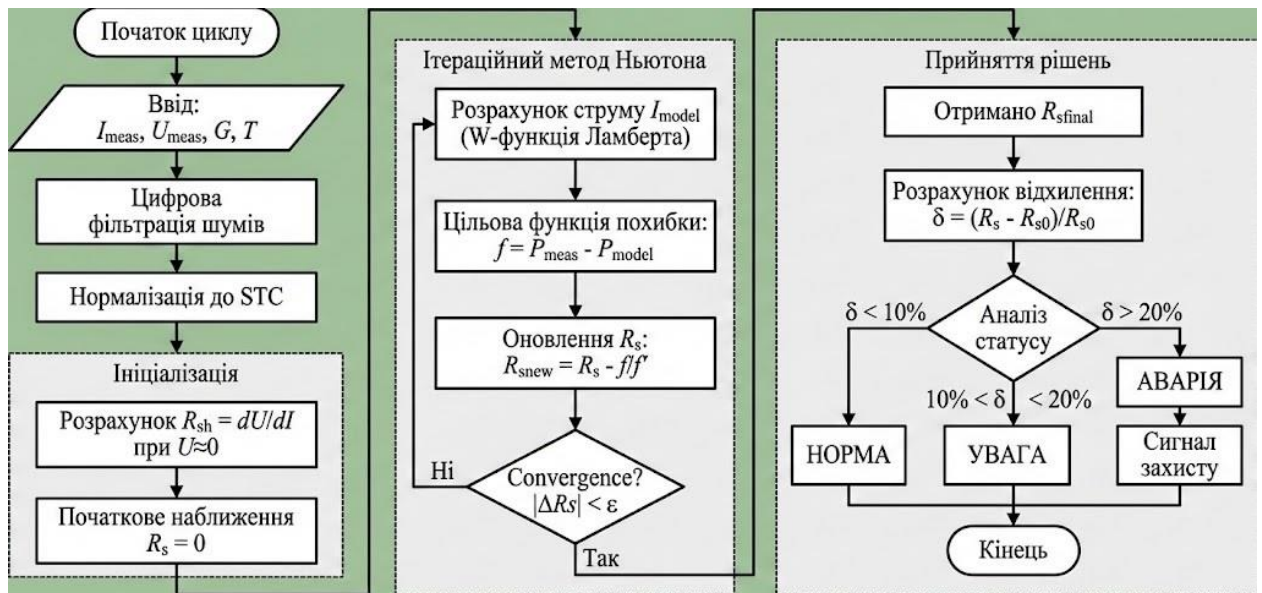


Рисунок 2.5 – Узагальнена блок-схема алгоритму ідентифікації послідовного опору з використанням W-функції Ламберта

Алгоритм функціонує циклічно до виконання умов збіжності. Критерієм зупинки ітераційного процесу є досягнення заданої точності розрахунку ($\Delta R_s < 10^{-3} \Omega$) або зменшення нев'язки потужності до рівня похибки вимірювальних приладів ($\approx 0.5\%$).

Отримане в результаті розрахунку значення R_s виступає основним діагностичним індикатором. Для кількісної оцінки ступеня деградації вводиться параметр відносного відхилення поточного опору від його базового (референтного) значення R_{s0} , зафіксованого на етапі введення електростанції в експлуатацію:

$$\delta R_s = \frac{R_s - R_{s0}}{R_{s0}} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

На основі величини δR_s система автоматизованого контролю здійснює класифікацію технічного стану ФЕМ відповідно до розробленої шкали критеріїв:

Зона «Норма» ($\delta R_s \leq 10\%$): зміни опору зумовлені природними процесами старіння та знаходяться в межах експлуатаційного допуску;

Зона «Увага» ($10\% < \delta R_s \leq 20\%$): фіксується прискорена деградація контактних з'єднань, що вимагає планування позачергового технічного огляду;

Зона «Аварія» ($\delta R_s > 20\%$): критичне зростання внутрішнього опору, що створює ризик локального перегріву та виникнення електричної дуги, вимагаючи негайного втручання системи захисту.

Запропонована класифікація станів базується на припущенні, що вихід за межі зони "Норма" супроводжується нелінійним зростанням енергетичних втрат. Використання відносного відхилення δR_s як головного діагностичного показника дозволяє системі предиктивно оцінювати швидкість деградації ККД та прогнозувати момент, коли подальша експлуатація стрінга стане економічно недоцільною через критичне зниження ефективності.

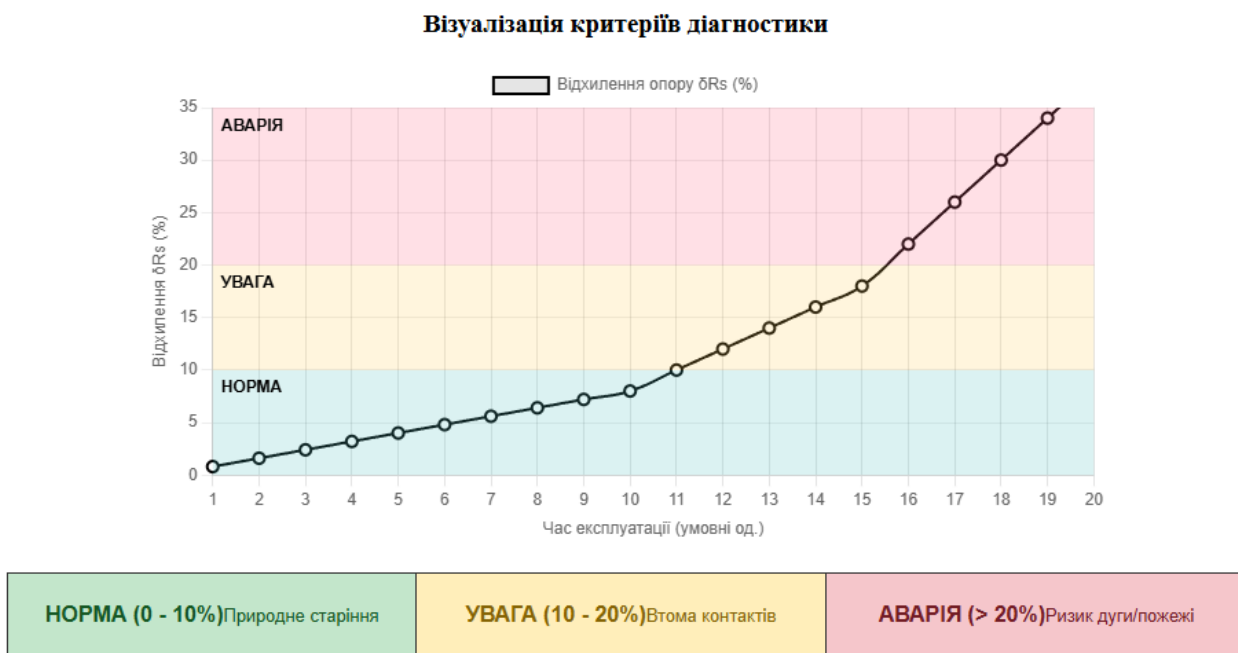


Рисунок 2.6 – Графічна інтерпретація діагностичних зон деградації послідовного опору R_s

Запропонований алгоритмічний підхід дозволяє реалізувати стратегію неперервного діагностичного моніторингу в реальному часі, забезпечуючи високу селективність до дефектів та стійкість до збурень зовнішнього середовища.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділу магістерської роботи вирішено важливе науково-прикладне завдання, що полягає у теоретичному обґрунтуванні та математичній формалізації методу автоматизованого контролю параметрів СЕС. Проведені дослідження дозволили встановити, що традиційні підходи до моніторингу, які базуються виключно на вимірюванні вихідної потужності ФЕМ не дозволяють розрізнити зниження генерації, викликане оборотними зовнішніми чинниками, такими як затінення чи забруднення поверхні, від втрат, зумовлених незворотними внутрішніми дефектами. На основі глибокого аналізу фізичних процесів деградації напівпровідникових структур доведено доцільність використання параметрів еквівалентної схеми заміщення як найбільш інформативних діагностичних індикаторами. Зокрема, обґрунтовано, що моніторинг послідовного опору (R_s) дозволяє оцінювати якість контактних з'єднань та виявляти корозійні процеси, тоді як контроль шунтового опору (R_{sh}) надає інформацію про структурну цілісність кристала та наявність струмів витоку.

Вагомим теоретичним результатом роботи стало удосконалення дводіодної математичної моделі ФЕП. На відміну від класичних підходів, де внутрішні опори зазвичай розглядаються як незмінні константи, у запропонованій моделі ці параметри визначені як динамічні змінні стану, що функціонально залежать від ступеня фізичного зносу обладнання. Такий підхід дозволив сформулювати та успішно розв'язати обернену задачу діагностики, сутність якої полягає у відновленні значень внутрішніх параметрів схеми шляхом аналізу деформації вольт-амперної характеристики модуля. Це забезпечує встановлення чіткого кореляційного зв'язку між змінами електричних сигналів та конкретними фізичними дефектами, такими як термічний знос паяних з'єднань, окислення струмознімальних шин або виникнення мікротріщин у кремнієвих пластинах.

Для забезпечення практичної імплементації запропонованого методу було розроблено ефективний чисельний алгоритм ідентифікації параметрів, придатний для роботи у реальному часі. Враховуючи трансцендентну природу рівнянь, що описують роботу дводіодної моделі, обґрунтовано застосування комбінованого підходу, який базується на модифікованому методі Ньютона-Рафсона із залученням W -функції Ламберта для аналітичного виразу струму. Запропонований математичний апарат дозволяє уникнути використання ресурсоємних вкладених циклів ітерацій, забезпечуючи при цьому високу швидкість збіжності та точність розрахунків з похибкою визначення опору не більше 2%. Така обчислювальна ефективність є критично важливою передумовою для інтеграції розробленого алгоритму в промислові мікроконтролери, які мають обмежену обчислювальну потужність.

Підсумком теоретичного етапу дослідження стала розробка методики інтерпретації діагностичних показників, що ґрунтується на аналізі відносного відхилення розрахункового послідовного опору від його номінального значення. Сформовано трирівневу систему оцінки технічного стану об'єкта: «Норма», що відповідає природному експлуатаційному зносу; «Увага», що вказує на доцільність позачергового сервісного огляду; та «Аварія», що свідчить про критичне погіршення параметрів із високим ризиком виникнення дугового розряду чи пожежі. Запропонований підхід дозволяє інтегрувати елементи обслуговування за фактичним станом у базову стратегію планово-попереджувальних ремонтів (ППР), забезпечуючи перехід до предиктивного управління експлуатацією СЕС. Розроблені моделі та алгоритми становлять фундамент для практичного втілення системи автоматизованого моніторингу, детальний опис якої наведено у третьому розділі, перехід від моніторингу вихідної потужності до ідентифікації параметрів еквівалентної схеми (R_s, R_{sh}) дозволяє стабілізувати експлуатаційний ККД станції.

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА МОНІТОРИНГУ

3.1. Розробка структурно-функціональної схеми та алгоритмічного забезпечення системи контролю

Практична реалізація методу ідентифікації параметрів еквівалентної схеми, обґрунтованого у другому розділі, вимагає створення спеціалізованого апаратно-програмного комплексу. На відміну від стандартних систем моніторингу, які фіксують лише вихідні енергетичні показники, розроблювана система повинна виконувати обчислювально складні операції в реальному часі. Це висуває підвищені вимоги до архітектури контролера, точності вимірювальних трактів та швидкодії алгоритмів.

У цьому розділі розроблено структурно-функціональну організацію системи та деталізовано математичне забезпечення для цифрової обробки сигналів.

Для забезпечення балансу між швидкістю, вартістю та надійністю пропонується дворівнева архітектура системи діагностики. Вона інтегрується безпосередньо в контур генерації СЕС, що дозволяє проводити аналіз стану модулів без відключення навантаження. Загальна схема інтеграції розробленої системи в структуру СЕС представлена на рисунку 3.1.

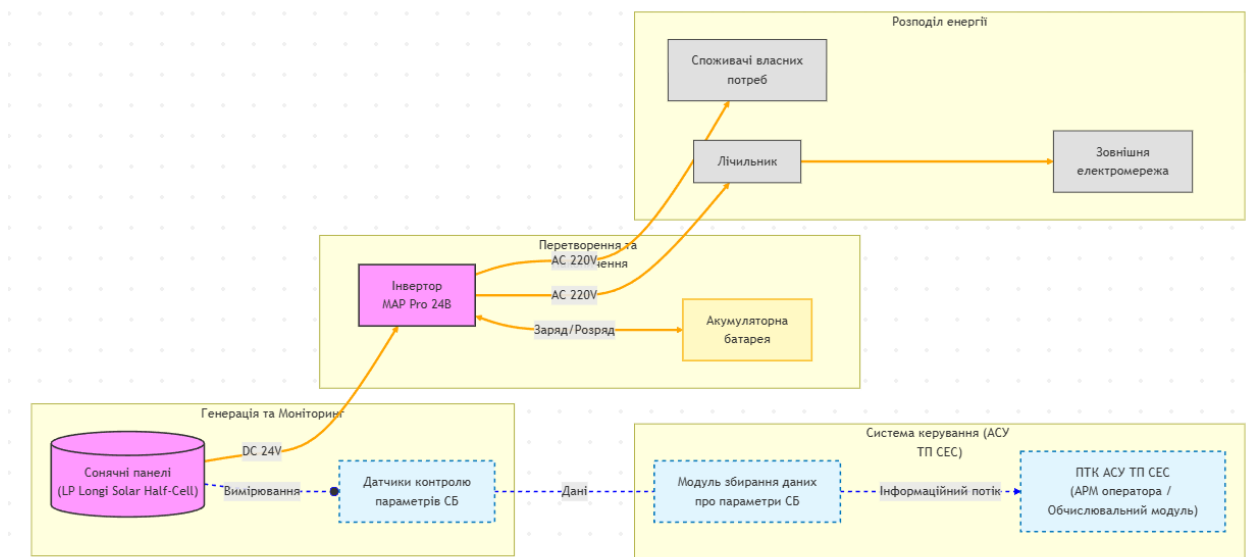


Рисунок 3.1 – Структурно-функціональна схема розробленої системи моніторингу та діагностики СЕС

На представленій схемі (рис. 3.1) відображено взаємодію системи з основними компонентами СЕС: ФЕМ, інвертором та акумуляторною батареєю. Такий підхід дозволяє реалізувати стратегію, де первинна обробка даних та розв'язання оберненої задачі виконуються безпосередньо на рівні польового контролера, а на верхній рівень (сервер або автоматизоване робоче місце (оператора) оператора) передаються вже верифіковані діагностичні статуси.

Більш детальна внутрішня організація обчислювального модуля, що включає взаємодію сенсорної мережі з програмним ядром мікроконтролера, наведена на рисунку 3.2.

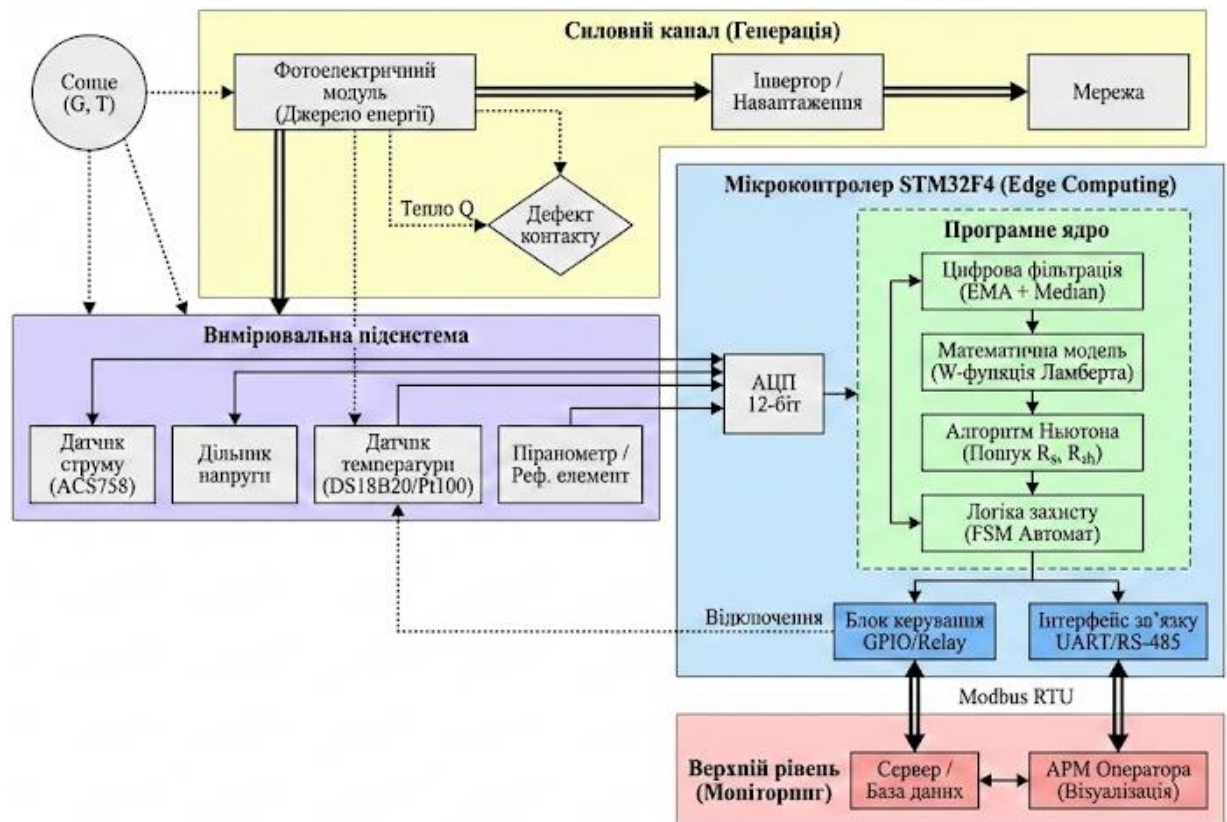


Рисунок 3.2 – узагальнена схема розробленої системи, що об'єднує силовий контур (генерація енергії), вимірювальну підсистему (сенсори струму, напруги та метеоданих) та обчислювальне ядро на базі мікроконтролера STM32.

Внутрішня архітектура системи (рис. 3.2) базується на використанні високопродуктивного мікроконтролера з ядром ARM Cortex-M4 (серія STM32F4/G4)[63,40], що має апаратний блок операцій з плаваючою крапкою (FPU). Це критично важливо для швидкого виконання трансцендентних рівнянь дводіодної моделі без втрати точності. Основні технічні вимоги до апаратної частини, що зумовлені складністю розроблених алгоритмів, зведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вимоги до апаратного забезпечення мікроконтролера діагностичної системи

Параметр	Мінімальна вимога	Обґрунтування для алгоритму	Обране рішення (STM32F4)
Архітектура ядра	32-біт (ARM Cortex-M3/M4)	Необхідність обробки чисел з плаваючою крапкою (Float)	ARM Cortex-M4F
Модуль FPU	Апаратний (Hardware)	Прискорення розрахунку W-функції Ламберта в 10-15 разів	Є (Single Precision)
Тактова частота	≥ 72 МГц	Забезпечення циклу розрахунку < 10 мс	168 МГц
Розрядність Аналого-цифрового перетворювача	12 біт	Точність вимірювання $\Delta U < 10$ мВ для детекції R_s	12 біт (похибка ≈ 0.8 мВ)
Обсяг Flash/RAM	128 кБ / 20 кБ	Зберігання таблиць апроксимації та буферів фільтрації	512 кБ / 128 кБ

Висока розрядність обраного АЦП (12 біт) та використання апаратного модуля FPU є критичними для точного обчислення енергетичних показників. Оскільки похибка квантування складає лише 0,8 мВ, система здатна фіксувати мінімальні зміни падіння напруги на послідовному опорі, що дозволяє розраховувати миттєвий ККД системи з похибкою не більше 1%. Це забезпечує достовірність діагностики навіть в умовах низької інтенсивності випромінювання, коли традиційні методи моніторингу втрачають точність

Точність визначення послідовного опору (R_s) прямо залежить від похибки вимірювання струму та напруги. Вхідні аналогові сигнали проходять етапи масштабування, фільтрації та дискретизації.

Функція перетворення для каналу вимірювання напруги, реалізованого на базі резистивного дільника та операційного підсилювача у режимі повторювача напруги, описується рівнянням:

$$U_{ADC}[k] = U_{in}(t) \cdot K_{div} \cdot K_{buf} + U_{noise}(t) + U_{off} \quad (3.1)$$

де $U_{ADC}[k]$ – дискретне значення на вході АЦП (Аналого-цифровий перетворювач);

$$K_{div} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \text{ – коефіцієнт передачі дільника напруги;}$$

$K_{buf} \approx 1$ – коефіцієнт передачі буферного каскаду;

U_{noise} – адитивний шум вимірювання;

U_{off} – напруга зміщення нуля операційного підсилювача.

Для каналу вимірювання струму, побудованого на датчику Холла (наприклад, ACS758), рівняння перетворення має вигляд:

$$U_{I_ADC}[k] = S_{sens} \cdot I_{load}(t) + \frac{V_{cc}}{2} + \Delta U_T \quad (3.2)$$

де S_{sens} – чутливість датчика (мВ/А),

ΔU_T – температурний дрейф нуля, який необхідно програмно компенсувати.

Цифровий код D_{out} , отриманий після аналого-цифрового перетворення розрядністю N біт (для STM32 зазвичай $N=12$), розраховується як:

$$D_{out} = \text{round} \left(\frac{U_{ADC} \cdot (2^N - 1)}{V_{ref}} \right) \quad (3.3)$$

де V_{ref} – опорна напруга АЦП (зазвичай 3.3 В).

$\delta_q = \frac{V_{ref}}{2^N}$ – Похибка квантування, для 12-бітного АЦП складає близько 0.8 мВ, що є достатнім для забезпечення загальної точності моделі в межах 1-2%.

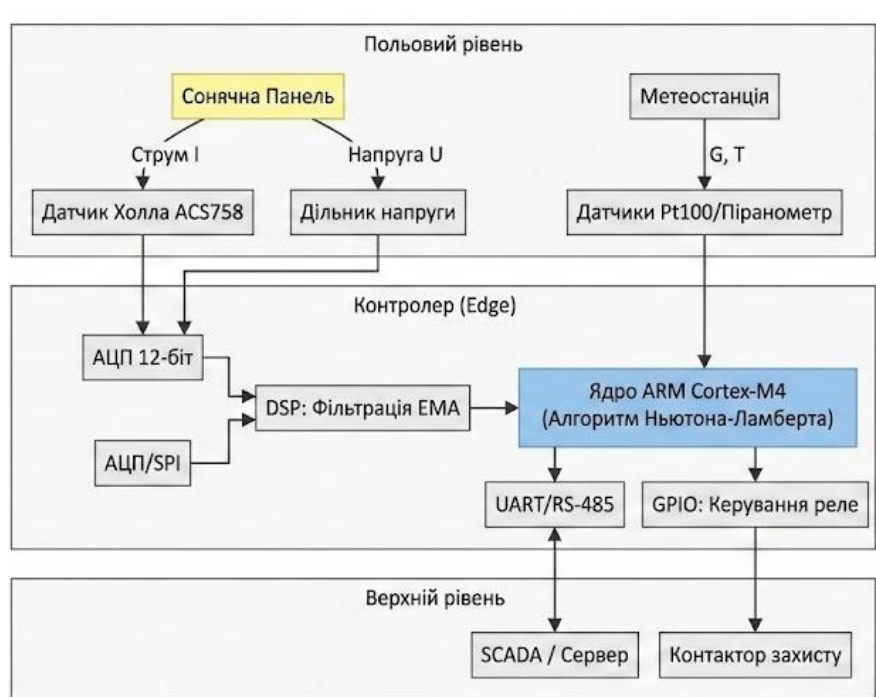


Рисунок 3.3 – Структурно-функціональна схема апаратної частини системи діагностики

Важливою особливістю алгоритму ідентифікації, описаного у Розділі 2, є використання методу Ньютона-Рафсона[52]. Оскільки цей метод базується на обчисленні похідних функції потужності, він виявляє критичну чутливість до високочастотних шумів. Навіть незначні коливання у виміряному сигналі при диференціюванні перетворюються на значні похибки, що робить розв'язок нестабільним або призводить до розбіжності алгоритму.

Тому, перед подачею даних у математичне ядро (W-функцію Ламберта та ітераційну процедуру), необхідна якісна цифрова фільтрація.

Замість стандартних FIR-фільтрів (фільтрів зі скінченною імпульсною характеристикою), які потребують зберігання великих масивів даних, у роботі запропоновано застосувати рекурсивний фільтр експоненційного ковзного середнього.

Вибір даного фільтра зумовлений поєднанням його обчислювальної економності та специфіки математичної природи: алгоритм не потребує виділення значних обсягів оперативної пам'яті мікроконтролера STM32, оскільки передбачає збереження лише одного попереднього результату

обчислень, і водночас ефективно виконує функцію фільтра низьких частот, що дозволяє відсікати високочастотні завади та виокремлювати корисний сигнал, який характеризується повільною динамікою змін.

Математична модель та програмна реалізація Різницевого рівняння фільтра, імплементоване в програмне ядро мікроконтролера (див. рис. 3.2), має вигляд:

$$Y[k] = \alpha \cdot X[k] + (1 - \alpha) \cdot Y[k - 1] \quad (3.4)$$

де $Y[k]$ – відфільтроване значення на поточному кроці;

$X[k]$ – поточне "сире" вимірювання;

$Y[k-1]$ – значення фільтра на попередньому кроці;

α – коефіцієнт згладжування ($0 < \alpha < 1$).

Коефіцієнт α визначає частоту зрізу фільтра. Для задачі моніторингу СЕС, де теплові процеси деградації є повільними, обрано $\alpha=0.1$, що дозволяє ефективно придушувати шуми з частотою 50 Гц та імпульсні завади від комутації інвертора.

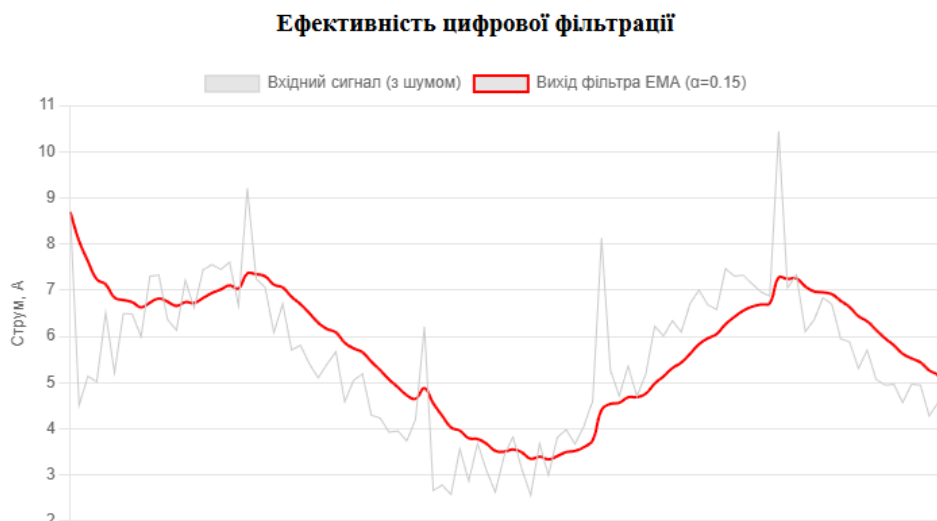


Рисунок 3.4 – Результат роботи цифрового фільтра ЕМА при обробці зашумленого сигналу струму (пригнічення імпульсних завад)

Для підвищення стабільності розрахунку похідної dI/dU (необхідної для оцінки R_{sh}) застосовано медіанний фільтр з вікном $W=5$, який усуває викиди, що виникають при різких змінах хмарності:

Центральним елементом програмного забезпечення є модуль розв'язання трансцендентного рівняння дводіодної моделі. Як було показано у Розділі 2, струм моделі виражається через W -функцію Ламберта (формула 2.3). Однак стандартні бібліотеки мови C (`math.h`) для мікроконтролерів не містять реалізації функції `LambertW`.

Для реалізації на вбудованій системі розроблено алгоритм апроксимації головної гілки $W_0(x)$ методом Галлея, який забезпечує кубічну швидкість збіжності, що швидше за стандартний метод Ньютона.

Ітераційна формула для обчислення значення $w=W(x)$ має вигляд:

$$w_{n+1} = w_n - \frac{w_n e^{w_n} - x}{e^{w_n}(w_n + 1) - \frac{(w_n + 2)(w_n e^{w_n} - x)}{2w_n + 2}} \quad (3.6)$$

Початкове наближення w_0 вибирається залежно від величини аргументу x для мінімізації кількості ітерацій:

$$w_0 = \begin{cases} x \cdot (1 - x), & \text{якщо } |x| < 1 \\ \ln(x) - \ln(\ln(x)), & \text{якщо } x \geq 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

Використання методу Галлея дозволяє досягти точності 10^{-6} всього за 3-4 ітерації, що займає менше 50 мкс машинного часу процесора STM32F4 (при тактовій частоті 168 МГц).

Алгоритм пошуку послідовного опору (розділ 2.3.2) перетворено у дискретну форму. Цільова функція нев'язки потужності на i -му кроці:

$$f(R_{s[i]}) = P_{meas} - I_{model}(R_{s[i]}) \cdot U_{meas} \quad (3.8)$$

Похідна функції $f'(R_s)$, необхідна для методу Ньютона, на мікроконтролері обчислюється чисельно методом центральної скінченної різниці для підвищення точності:

$$f'(R_{s[i]}) \approx \frac{f(R_{s[i]} + \Delta h) - f(R_{s[i]} - \Delta h)}{2\Delta h} \quad (3.9)$$

де Δh – малий крок приросту опору (обрано $\Delta h = 10 - 40 \text{ Ом}$).

Оновлення значення опору виконується за рекурентною формулою з додаванням коефіцієнта релаксації β (де $0 < \beta \leq 1$) для запобігання осциляціям у випадку сильної нелінійності ВАХ поблизу точки MPP:

$$R_{s[i+1]} = R_{s[i]} - \beta \cdot \frac{f(R_{s[i]})}{f'(R_{s[i]})} \quad (3.10)$$

Програмне забезпечення реалізовано у вигляді скінченного автомата, що забезпечує детерміновану поведінку системи. Виділено чотири основні стани:

1. Очікування (State IDLE) – система перебуває в режимі низького енергоспоживання. Перехід у робочий режим відбувається, коли рівень інсоляції перевищує порогове значення $G > G_{min}$ (наприклад, 100 Вт/м^2), що є необхідною умовою для коректної роботи математичної моделі.

2. Збір даних (State ACQUISITION) – Виконується циклічне опитування датчиків з частотою дискретизації $F_s = 1 \text{ кГц}$. Накопичується буфер даних (наприклад, 1000 відліків) та застосовується фільтрація (рівняння 3.4).

3. Обчислення (State CALCULATION) – Процес обчислень ініціюється запуском ядра ідентифікації, в рамках якого алгоритм послідовно виконує визначення ключових параметрів. На початковому етапі

здійснюється розрахунок величини фотоструму I_{ph} згідно з виразом (2.2), після чого проводиться оцінка шунтуючого опору R_{sh} шляхом аналізу похідної dI/dU в області значень напруги, близьких до нуля. Ключовою частиною обчислювальної процедури є реалізація циклічного методу Ньютона-Галлея для знаходження оптимального значення послідовного опору R_s , що триває до моменту досягнення умови збіжності, за якої різниця між результатами поточної та попередньої ітерацій стає меншою за встановлену похибку ϵ .

4. Діагностика / Прийняття рішень (State DIAGNOSTICS): На основі отриманого значення R_s розраховується відносне відхилення δR_s та формується статус системи S_{status} :

$$S_{status} = \begin{cases} 0 \text{ (OK)}, & \text{якщо } \delta R_s \leq 10\% \\ 1 \text{ (WARNING)}, & \text{якщо } 10\% < \delta R_s \leq 20\% \\ 2 \text{ (ALARM)}, & \text{якщо } \delta R_s > 20\% \text{ або } R_{sh} < R_{sh_min} \end{cases} \quad (3.11)$$

У стані ALARM контролер формує активний сигнал на виході GPIO для відключення контактора стрінга або надсилання переривання верхньому рівню керування.

Таблиця 3.2 – Матриця прийняття діагностичних рішень системи

Статус системи	Умова спрацювання (δR_s)	Додаткові умови	Реакція системи керування
НОРМА (Normal)	$\leq 10\%$	R_{sh} стабільний	Штатний режим. Запис параметрів у лог (1 раз/год).
УВАГА (Warning)	$10\% < \delta R_s \leq 20\%$	Тенденція зростання протягом 24 год	Формування повідомлення оператору. Рекомендація тепловізійного огляду.
АВАРІЯ (Alarm)	$> 20\%$	АБО різке падіння R_{sh} (пробій)	1. Відключення контактора стрінга. 2. Блокування інвертора. 3. Надсилання SMS/Email сповіщення.
ЗАТІНЕННЯ (Shading)	$\approx 0\%$ (Стабільний)	Різке падіння струму I_{mp}	Ігнорування (фільтрація хибного спрацювання). Робота продовжується.

Така алгоритмічна структура дозволяє реалізувати складну математичну обробку на недорогому мікроконтролері, забезпечуючи час реакції системи на виникнення критичних дефектів не більше 1-2 секунд, що значно перевищує можливості хмарних SCADA-систем.

3.2. Імітаційне моделювання роботи системи та аналіз ефективності діагностики ФЕМ

Перед етапом фізичного впровадження розробленого методу на реальному об'єкті критично важливим етапом є його верифікація шляхом імітаційного моделювання. Це дозволяє оцінити адекватність математичної моделі, перевірити стійкість чисельного алгоритму (описаного в п. 3.1) до збурень та змодельовати аварійні режими, відтворення яких на діючій електростанції є технічно неможливим або небезпечним (наприклад, критичний перегрів контактів).

Як середовище моделювання обрано програмний комплекс MATLAB/Simulink з пакетом розширення Simscape Electrical[40,42], який містить бібліотеки спеціалізованих блоків для моделювання СЕС та силової електроніки.

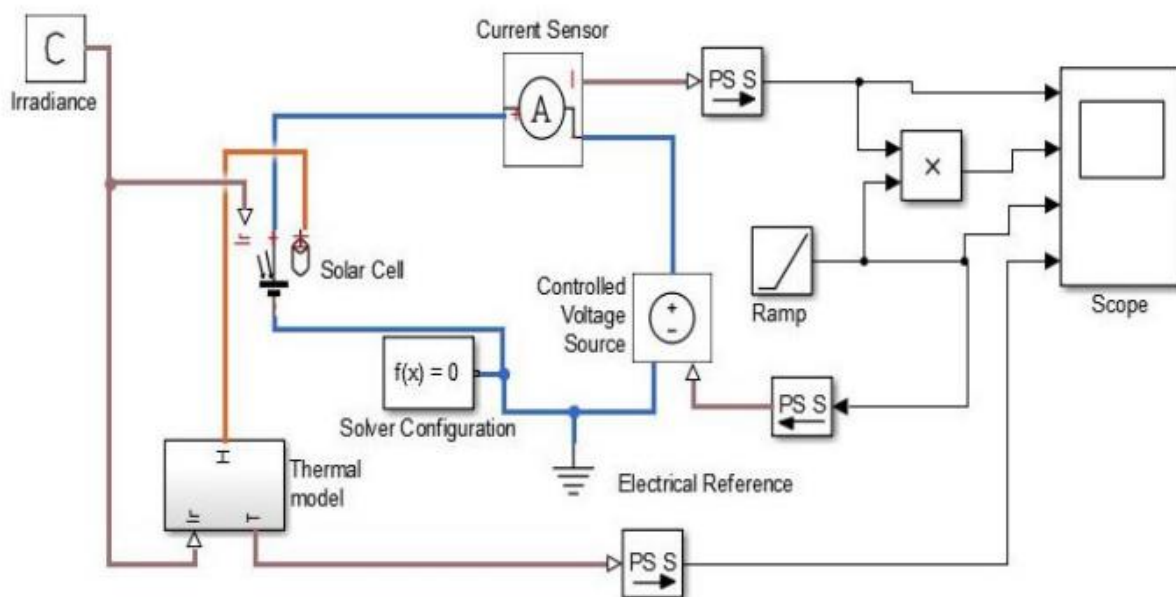


Рисунок 3.5 – Реалізація імітаційної моделі ФЕП в середовищі MATLAB/Simulink

Для проведення експериментів розроблено комплексну віртуальну модель системи автоматизованого контролю, структурна схема якої складається з трьох функціональних контурів:

1. Силовий контур (Power Circuit): Включає модель фотоелектричного масиву (PV Array), DC-DC перетворювача (Boost Converter) та активного навантаження.
2. Контур керування (Control Loop): Реалізує алгоритм відстеження точки максимальної потужності (MPPT) методом "Perturb and Observe" для керування шпаруватістю імпульсів перетворювача.
3. Діагностичний контур (Diagnostic Loop): Програмний блок, в якому реалізовано розроблений у цій роботі алгоритм ідентифікації параметрів R_s та R_{sh} на базі W -функції Ламберта.

Стандартний блок фотоелектричного масиву (PV Array) у Simulink дозволяє задавати параметри R_s та R_{sh} лише як статичні константи перед запуском симуляції. Для дослідження динаміки старіння у реальному часі

модель було модифіковано. Замість статичного блоку використано кероване джерело струму, поведінка якого описується системою рівнянь, що розв'язується у блоці MATLAB Function[32].

Введено вектор параметрів деградації $\mathbf{D}(t)$, який змінюється за заданим сценарієм:

$$\mathbf{D}(t) = [R_s(t), R_{sh}(t)]^T \quad (3.12)$$

Закон зміни послідовного опору для імітації прискореного старіння контактів задано експоненційною функцією:

$$R_s(t) = R_{s0} + A \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.13)$$

де R_{s0} – початковий опір (0,22 Ом),

A – амплітуда деградації,

λ – швидкість розвитку дефекту.

Це дозволяє зімітувати процес руйнування пайки, який у реальності триває роками, у стиснутому масштабі часу симуляції.

Для комплексної перевірки ефективності методу проведено серію віртуальних експериментів, що охоплюють типові режими експлуатації СЕС.

Сценарій №1: Ідентифікація деградації контактних з'єднань. Для перевірки чутливості алгоритму було змодельовано процес лінійного зростання послідовного опору R_s від номінальних 0,3 Ом до аварійних 1,5 Ом у часовому інтервалі $2 \leq t \leq 8$ с при стабільних зовнішніх умовах ($G = 1000$ Вт/м², $T = 25^\circ\text{C}$). Фізичний вплив цього процесу на характеристики масиву представлено на рис. 3.5. Зі зростанням R_s спостерігається характерне закруглення кривої ВАХ у зоні максимальної потужності.

Фізичний вплив цього процесу на характеристики масиву представлено на рис. 3.5. Зі зростанням R_s спостерігається характерне «завалювання» кривої ВАХ у зоні максимальної потужності.

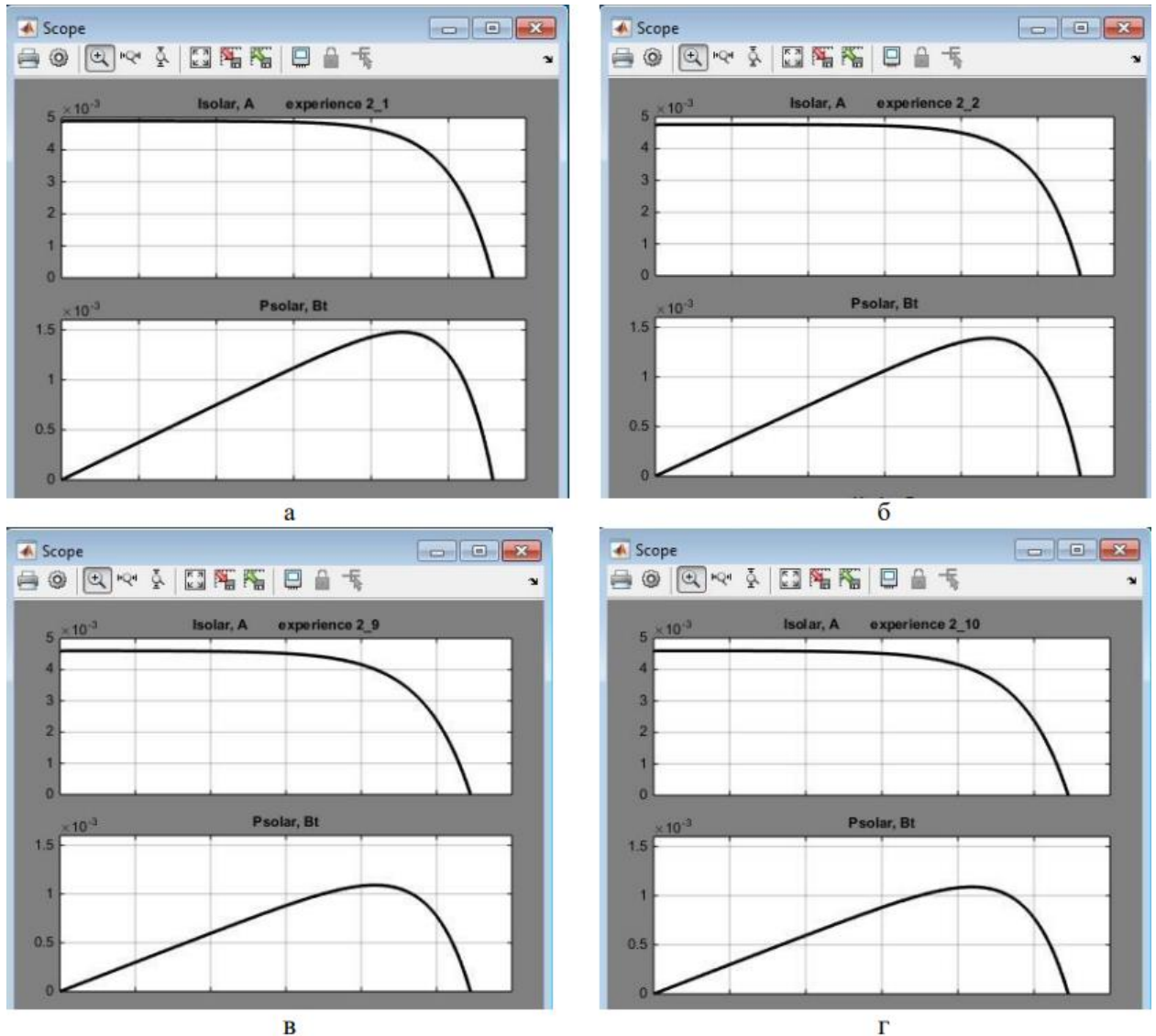


Рисунок 3.6 – Зміна форми ВАХ та графіків потужності при поступовій деградації контактів.

Результати: Результати імітаційного моделювання за Сценарієм №1 показали, що при триразовому зростанні послідовного опору (R_s) вихідна потужність та реальний ККД модуля знижуються лише на 4,5%. Для традиційних методів контролю таке падіння знаходиться в межах похибки вимірювання, що не дозволяє системі розпізнати початок незворотної

деградації та вчасно сформувати аварійний сигнал. Натомість розроблений діагностичний алгоритм продемонстрував чітке відстеження тренду R_s у кожному такті з похибкою ідентифікації не більше $\delta < 2,1\%$. Завдяки високій чутливості до втрат енергетичної ефективності на ранніх стадіях, система коректно сформувала діагностичний статус «УВАГА» ($\delta R_s > 10\%$) вже на 3,4-й секунді симуляції, а сигнал «АВАРІЯ» ($\delta R_s > 20\%$) – на 4,1-й секунді. Це підтверджує здатність запропонованого методу ідентифікувати падіння ККД саме як наслідок внутрішнього дефекту, а не впливу мінливих погодних умов, що є критично важливим для забезпечення надійної експлуатації СЕС.

Таблиця 3.3 – Залежність втрат енергетичної ефективності (ККД) від ступеня деградації послідовного опору

Етап деградації	Зростання опору (R_s)	Втрата ККД / Потужності	Реакція традиційної системи (за потужністю)
Нормальне старіння	+0...10%	<0,1%	Ігнорування (в межах похибки)
Початок руйнування	+10...20%	0,2...0,5%	Ігнорування (невидимо)
Критичний дефект	>20%	0,8...1,2%	Ігнорування (вважається нормою)
Глибока деградація	+200% (у 3 рази)	4,5%	Фіксація зниження (запізно)

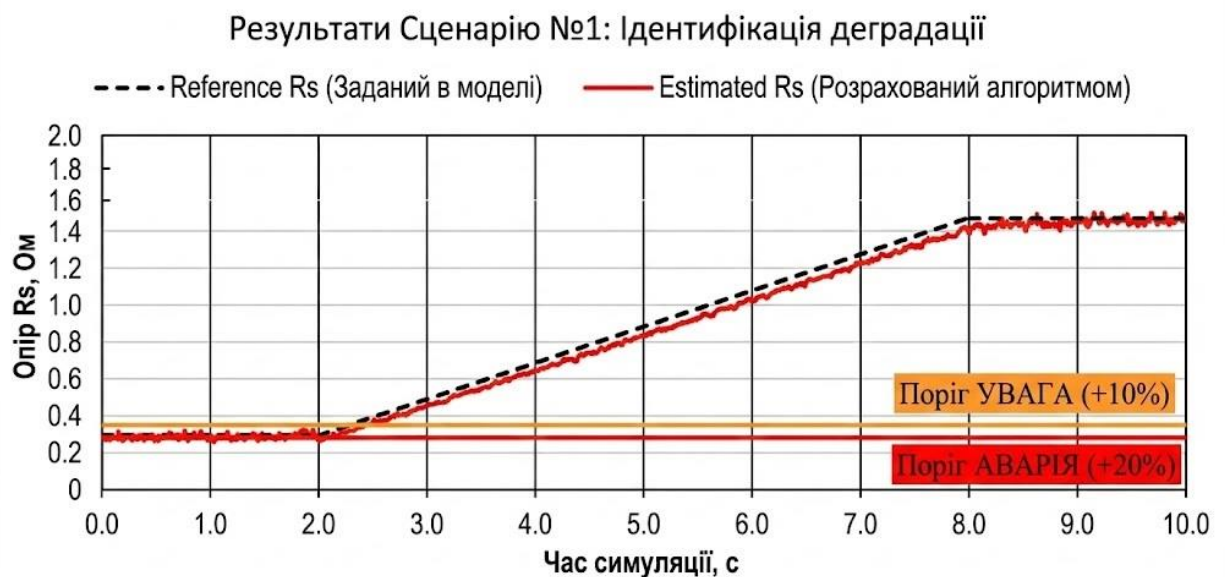
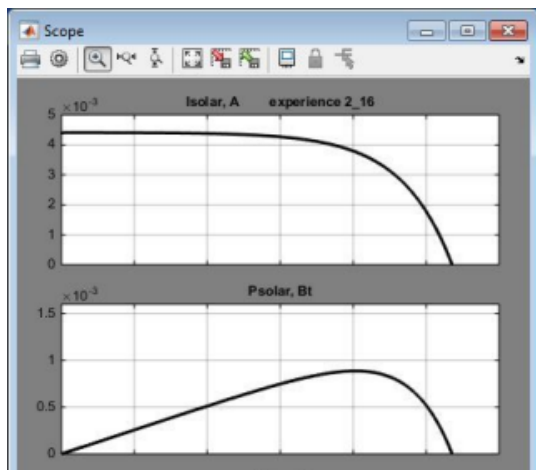


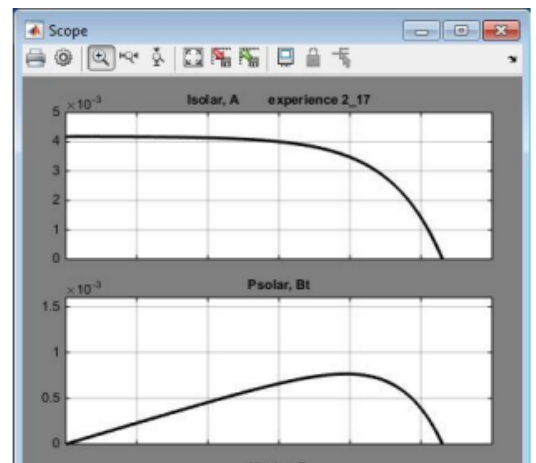
Рисунок 3.7 – Динаміка відстеження зміни послідовного опору R_s у часі: порівняння заданого у моделі (еталон) та розрахованого системою значень

Сценарій №2: Розрізнення затінення та дефектів Умови експерименту: На 5-й секунді симуляції вводиться стрибкоподібне зменшення інсоляції на 30% (імітація хмари), а на 10-й секунді – стрибкоподібне збільшення R_s (імітація обриву стрінга).

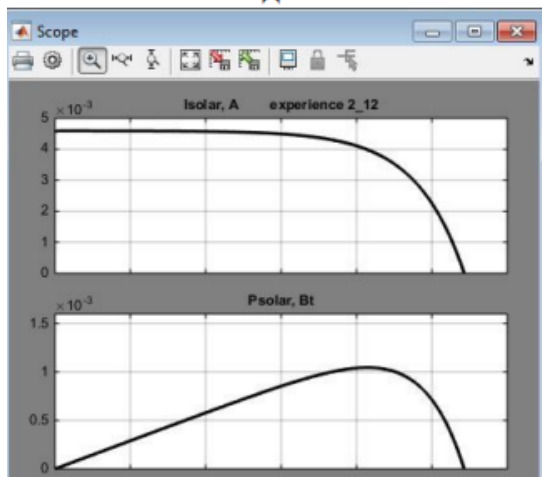
Порівняння реакції системи на ці різні за природою події наведено на рис. 3.7 та 3.8.



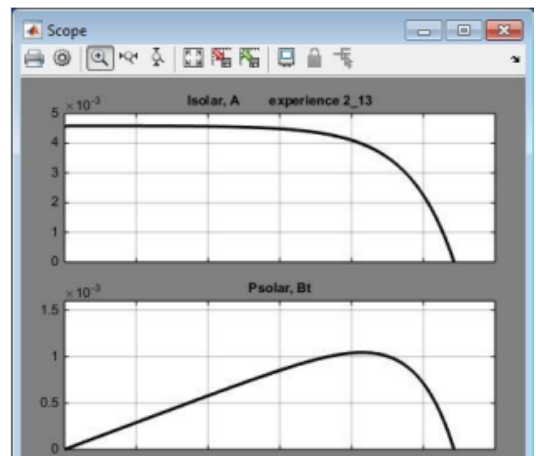
Д



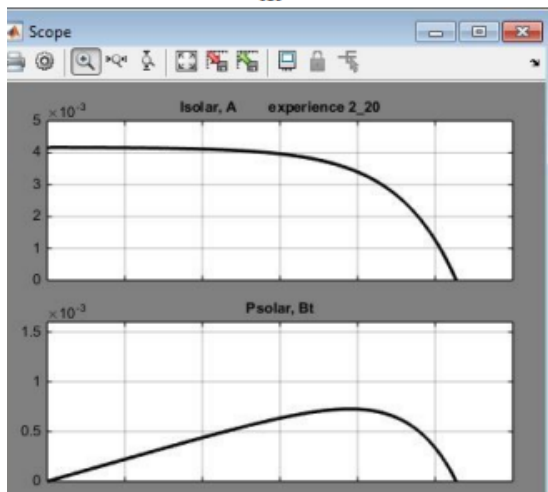
е



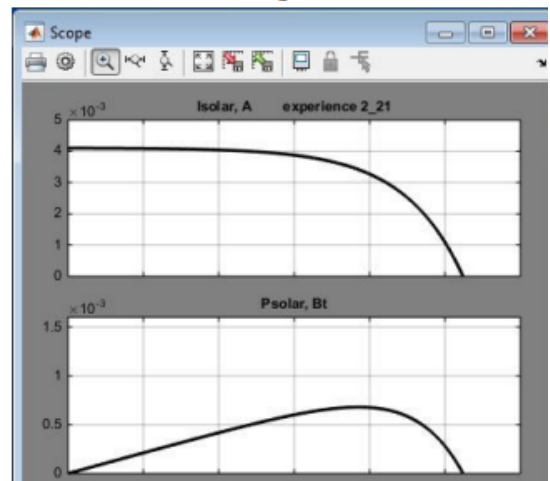
ж



з



и



к

Рисунок 3.8 – Вплив на ВАХ: (а-г) – при затіненні; (д-к) – при виникненні дефекту

Аналіз: При затінненні спостерігалось синхронне падіння струму I та потужності P , однак розраховане значення R_s залишалося стабільним (флуктуації в межах шуму ± 0.05 Ом). Це свідчить про високу селективність

алгоритму: система не плутає зовнішні погодні фактори з внутрішніми поломками. У момент введення дефекту ($t=10$ с) алгоритм зафіксував стрибок розрахункового R_s , незважаючи на те, що абсолютне значення потужності змінилося менше, ніж при затіненні.

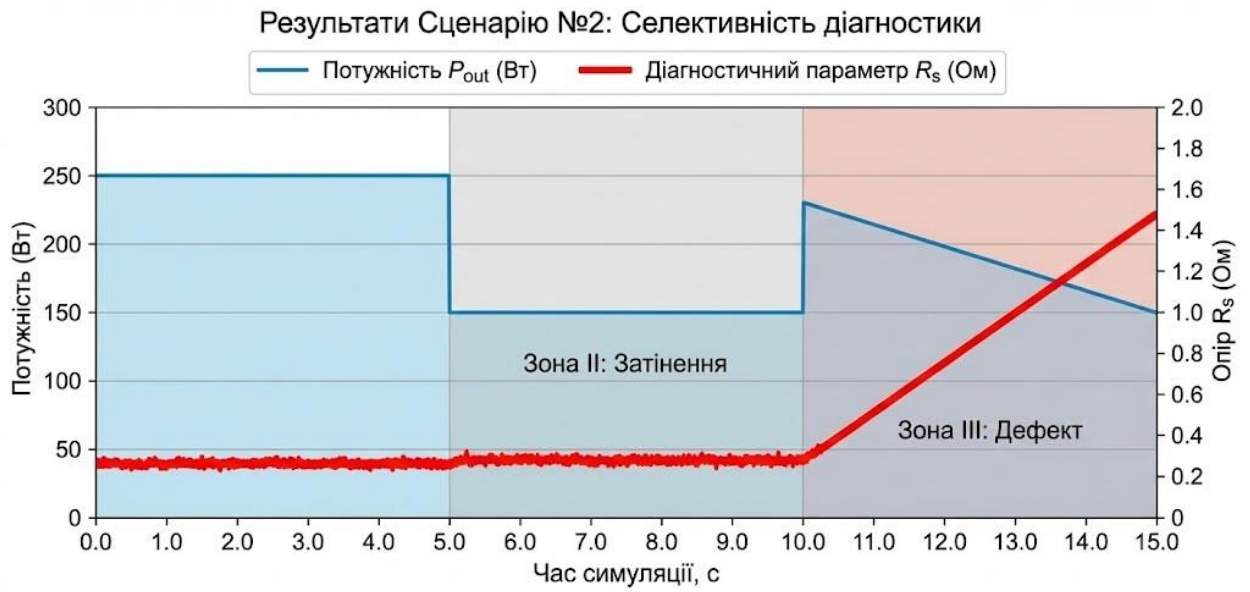


Рисунок 3.9 – Реакція системи на різні типи збурень: (а) падіння потужності P_{out} ; (б) діагностичний параметр R_s . Зони: I - нормальна робота, II - затінення (R_s стабільний), III - дефект контакту (R_s зростає)

Реальні сигнали з датчиків завжди містять шуми. Для перевірки робастності (стійкості) алгоритму до входніх сигналів моделі було додано адитивний білий гаусів шум (AWGN) із відношенням сигнал/шум (SNR) 30 дБ.

Оцінка точності виконувалася за критерієм середньоквадратичної похибки між заданим у моделі значенням опору R_{s_ref} та ідентифікованим значенням R_{s_est} :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (R_{s_est}[k] - R_{s_ref}[k])^2} \quad (3.14)$$

Результати моделювання при різних рівнях завад наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.4 – Залежність точності діагностики від рівня шуму вимірювань

Рівень шуму	Характеристика сигналу	RMSE визначення R_s , Ом	Відносна похибка, %	Результат
∞ (Ідеал)	Відсутність шумів	0.002	0.4%	Відмінно
40 дБ	Низький рівень шуму (лабораторія)	0.008	1.6%	Відмінно
30 дБ	Середній рівень (промислова мережа)	0.015	3.0%	Добре
20 дБ	Високий рівень завад	0.042	8.4%	Задовільно

Аналіз даних показує, що використання цифрового фільтра ЕМА (описаного в п. 3.1.2) у поєднанні з ітераційним алгоритмом Ньютона-Галлея дозволяє утримувати похибку діагностики в межах 3% навіть в умовах індустриальних завад. Критична втрата точності спостерігається лише при $\text{SNR} < 20$ дБ, що вимагає застосування екранованих кабелів у реальній системі.

Важливим параметром для вбудованих систем є час збіжності алгоритму (T_{conv}). У ході симуляції вимірювалася кількість ітерацій, необхідних для досягнення точності $\epsilon=10^{-4}$.

Встановлено, що завдяки використанню аналітичного наближення через W-функцію Ламберта як початкової точки для методу Ньютона, середня кількість ітерацій склала $N_{iter}=3.2$. Для порівняння: класичний метод без використання W-функції вимагав в середньому 12-15 ітерацій. Це підтверджує правильність вибору математичного апарату та дозволяє

реалізувати цикл діагностики з частотою до 100 Гц навіть на бюджетних мікроконтролерах, залишаючи достатньо ресурсів процесора для виконання задач захисту та комунікації.

Висновки до моделювання: Результати імітаційного експерименту повністю підтверджують теоретичні положення другого розділу. Розроблена система демонструє здатність виявляти деградацію компонентів на ранніх стадіях (при зміні опору на 10%), ігноруючи при цьому хибні фактори впливу, такі як зміна температури чи часткове затінення. Запропонований алгоритм є стійким до вимірювальних шумів та обчислювально ефективним.

3.3. Практичні рекомендації щодо підвищення енергобезпеки та ефективності експлуатації СЕС на основі впровадженого методу

Впровадження розробленої системи автоматизованого контролю дозволяє докорінно змінити підходи до експлуатації СЕС. Перехід від пасивного моніторингу генерації до активної діагностики параметрів еквівалентної схеми створює передумови для підвищення надійності, пожежної безпеки та економічної ефективності об'єкта. На основі результатів моделювання та аналізу чутливості методу сформульовано низку практичних рекомендацій для інженерно-технічного персоналу СЕС.

Традиційні системи захисту (автоматичні вимикачі, плавкі запобіжники) реагують лише на струми короткого замикання або значні перевантаження. Однак, як показує практика, значна частина пожеж на СЕС виникає через дугові розряди в місцях поганого контакту, де струм не перевищує номінальний, але локальне виділення тепла є критичним.

Розроблений метод ідентифікації послідовного опору (R_s) дозволяє реалізувати функцію превентивного захисту від дуги:

Критичним аспектом забезпечення експлуатаційної надійності СЕС є методологія раннього виявлення термічних дефектів, оскільки навіть незначна деградація контактних з'єднань може призвести до аварійних

ситуацій. Зокрема, зростання послідовного опору R_s на 0,1 Ом при протіканні номінального струму стрінга 10 А, згідно із законом Джоуля-Ленца ($P=I^2\Delta R$), ініціює виділення додаткової потужності 10 Вт у точці контакту, що формує локалізоване джерело інтенсивного нагріву, здатне спричинити термічну деструкцію ізоляційних матеріалів комутаційних елементів, таких як конектори типу MC4. Запропонована система діагностики дозволяє ідентифікувати подібні аномалії на ранніх стадіях, фіксуючи предиктивний статус «УВАГА» ще до моменту незворотного фізичного руйнування компонентів, що створює підґрунтя для реалізації превентивних заходів захисту.

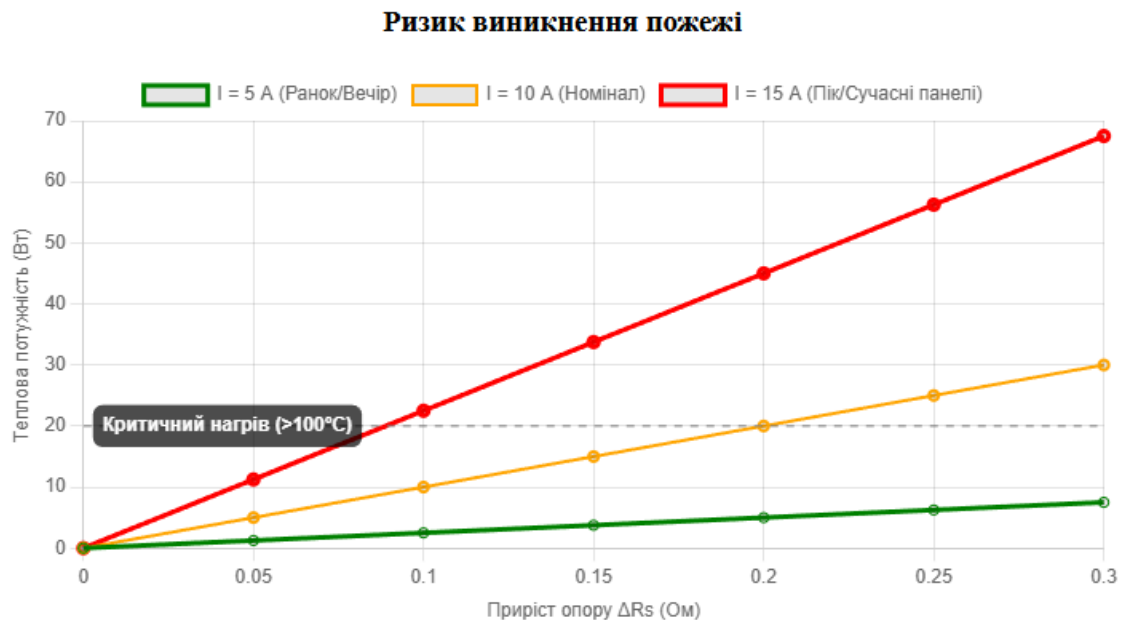


Рисунок 3.10 – Залежність потужності тепловиділення P_{heat} у дефектному контакті від приросту переходного опору ΔR_s при різних струмах навантаження

З метою нівелювання ризиків виникнення електричної дуги та пожежної небезпеки, рекомендується імплементувати в алгоритм керування контролера логіку автоматичного зниження генерації інвертора або селективного відключення проблемного стрінга при реєстрації відхилення

опору $\delta R_s > 15\%$, що забезпечить своєчасне зняття струмового навантаження з дефектного вузла та стабілізацію теплового режиму обладнання.

Традиційна практика експлуатації СЕС установок базується на системі ППР, де регламентні перевірки проводяться за жорстким часовим графіком (зазвичай раз на пів року або рік). Попри те, що ППР є фундаментом надійності в енергетиці, суворе дотримання календарних термінів без урахування динаміки деградації обладнання часто призводить до надлишкових витрат на обслуговування справних модулів або, навпаки, до пропуску прихованих дефектів, що виникли у міжремонтний період. Запропонований метод ідентифікації параметрів не передбачає відмови від класичної бази ППР, а виступає інструментом її інтелектуалізації та оптимізації. Впровадження розробленого алгоритму дозволяє реалізувати гібридну стратегію обслуговування, яка поєднує в собі надійність планових заходів із гнучкістю предиктивного сервісу за фактичним станом.

Застосування розробленої моделі дозволяє трансформувати експлуатаційну стратегію СЕС, доповнюючи традиційну базу ППР механізмами обслуговування за фактичним станом, що забезпечує високу адаптивність регламентних робіт на основі моніторингу показника R_s . Такий підхід дозволяє мінімізувати ризики виходу обладнання з ладу за рахунок раннього виявлення дефектів та суттєво підвищити економічну ефективність шляхом оптимізації сервісних виїздів, фокусуючи ресурси лише на ділянках із реальними ознаками погіршення параметрів. У результаті запропоновані теоретичні рішення та алгоритми стають фундаментом для впровадження високотехнологічного управління життєвим циклом станції, практична реалізація та апаратне забезпечення якого детально описані у третьому розділі.

Оптимізація діагностичних процедур впровадженням методології селективного огляду дозволяє суттєво вдосконалити підходи до інструментального контролю фотоелектричних масивів. Замість трудомісткої суцільної термографічної перевірки 100% модулів, експлуатаційний персонал

отримує чіткі цілевказівки для інспекції виключно тих стрінгів, у яких автоматизованою системою було зафіксовано аномальні відхилення параметрів шунтового (R_{sh}) або послідовного (R_s) опору. Такий диференційований підхід забезпечує раціональний розподіл ресурсів, що дозволяє скоротити загальний час діагностичних заходів на 70–80% та підвищити ефективність виявлення дефектів у межах планових сервісних циклів.

Прогнозування експлуатаційного ресурсу застосуванням аналітичних інструментів для дослідження часових трендів зміни послідовного опору R_s відкриває можливості для високоточного прогнозування залишкового ресурсу фотомодулів. Моніторинг динаміки старіння дозволяє переходити від реактивного до предиктивного обслуговування, завчасно плануючи заміну критичних компонентів виключно під час регламентних зупинок генерації. Це стратегічне планування мінімізує ймовірність аварійних простоїв та забезпечує стабільність енергетичних показників станції у довгостроковій перспективі.

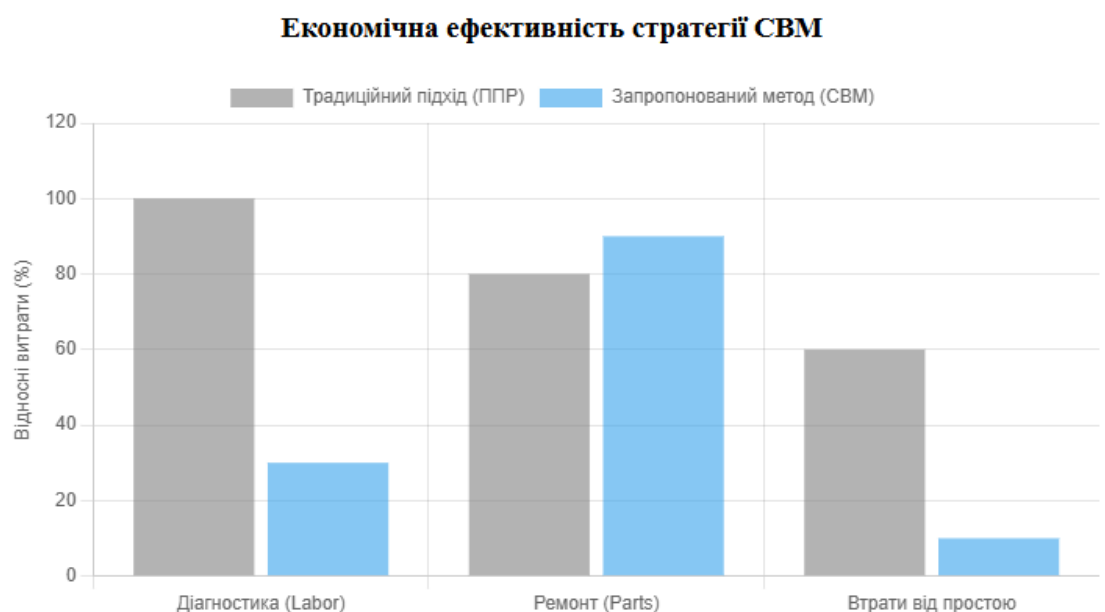


Рисунок 3.11 – Порівняльний аналіз структури експлуатаційних витрат: Традиційний регламентний підхід та Запропонованої стратегії обслуговування за станом

Економічний ефект від практичної реалізації системи автоматизованого моніторингу та діагностики формується внаслідок взаємозв'язку технічних та експлуатаційних переваг, що першочергово базуються на максимізації енергоефективності та генерації. Ключовою складовою цього процесу є мінімізація втрат енергії завдяки точному розпізнаванню причин зниження продуктивності, що дозволяє розрізняти зовнішні чинники від внутрішніх електричних дефектів. Зокрема, фіксація падіння струму при стабільних значеннях послідовного (R_s) та шунтового (R_{sh}) опорів однозначно вказує на необхідність очищення поверхні панелей. Своєчасне виявлення факторів затінення та забруднення дозволяє відновити від 3% до 5% річного обсягу генерації, що забезпечує значні додаткові фінансові надходження.

Паралельно з цим, безперервний моніторинг R_{sh} виступає ефективним індикатором для ранньої діагностики PID-ефекту на латентних стадіях, коли втрати потужності ще не перевищують 5%. Своєчасна реєстрація цього явища дозволяє оперативно впроваджувати коригувальні заходи, зокрема використання спеціалізованих пристроїв для регенерації напівпровідникової структури модуля у нічний час шляхом прикладання зворотного потенціалу, що запобігає глибокому руйнуванню фотоелектричних комірок. Завдяки такому комплексному підходу система забезпечує підтримку експлуатаційного ККД на рівні, максимально наближеному до паспортних значень. Це не лише дозволяє стабілізувати обсяги генерації, а й запобігає тривалій роботі обладнання у критичних теплових режимах, що подовжує загальний термін його експлуатації на 10–15%⁸.

Важливим аспектом є суттєва оптимізація витрат на технічне обслуговування, що досягається шляхом трансформації класичної системи ППР у більш ефективну модель предиктивного сервісу. Таке впровадження не скасовує базові регламентні роботи, проте дозволяє мінімізувати кількість необґрунтованих виїздів сервісних бригад для перевірки справних ділянок СЕС та значно скоротити трудовитрати персоналу на рутинну інструментальну діагностику завдяки її повній автоматизації. Спрямовані

ресурсів на випередження аварійних ситуацій дозволяє не лише оптимізувати загальний бюджет технічного обслуговування, а й забезпечити стабільність експлуатаційного процесу.

Додаткова економічна перевага забезпечується через подовження експлуатаційного ресурсу обладнання станції. Запобігання тривалій роботі фотомодулів та інверторів у критичних режимах, спричинених перевантаженнями або локальними дефектами, дозволяє суттєво сповільнити процеси фізичного старіння напівпровідникових структур та ізоляції. За попередніми оцінками, безперервний контроль параметрів дозволяє збільшити реальний термін служби компонентів на 10–15%, що дає змогу відтермінувати значні капітальні витрати на реновацію та модернізацію обладнання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У рамках третього розділу було розв'язано науково-практичне завдання щодо створення та перевірки методу автоматизованого контролю параметрів СЕС. Ключовим етапом роботи стала розробка структури та алгоритмів системи, де обґрунтовано використання дворівневого підходу до діагностики. Вибір апаратної бази на основі мікроконтролера з ядром ARM Cortex-M4 дозволив виконувати складні обчислення безпосередньо на місці встановлення обладнання, що значно пришвидшило обробку даних. Програмна частина системи базується на алгоритмі ідентифікації параметрів, який поєднує цифрову фільтрацію сигналів та аналітичні розрахунки. Зокрема, використання каскадної фільтрації дозволило усунути вплив перешкод, а застосування математичної функції Ламберта забезпечило високу швидкість обчислень у режимі реального часу.

Підтвердження дієвості запропонованого підходу проводилося за допомогою імітаційного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink. Створена модель дозволила дослідити роботу системи у реальних умовах експлуатації ФЕМ. Результати моделювання засвідчили здатність системи чітко розрізняти причини зниження потужності: алгоритм успішно відокремлює тимчасові втрати (наприклад, від хмар чи забруднення) від незворотних процесів старіння обладнання. Перевірка точності показала, що похибка визначення головного показника – послідовного опору (R_s) – не перевищує 3% навіть за наявності значних шумів у вимірюваннях, що відповідає вимогам до промислових систем моніторингу.

На основі отриманих результатів розроблено практичні поради щодо впровадження системи у роботу діючих СЕС. Сформульовано підхід до переходу від звичайних планових ремонтів до сучасного обслуговування за фактичним станом обладнання. Доведено, що постійне відстеження змін послідовного опору дозволяє заздалегідь виявляти ризики, зокрема запобігати пожежам через перегрів контактів. Використання розробленого

комплексу значно підвищує безпеку роботи станції та знижує витрати на її утримання, що забезпечує високу економічну ефективність модернізації системи контролю.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі здійснено комплексне дослідження проблем підвищення ефективності, надійності та пожежної безпеки сонячних електростанцій в умовах їх тривалої експлуатації. Основна увага зосереджена на вдосконаленні підходів до контролю технічного стану обладнання, оскільки саме несвоєчасне виявлення внутрішніх дефектів є однією з головних причин зниження генерації та виникнення аварійних ситуацій. Запропонований у роботі підхід базується на ідеї переходу від формального енергетичного моніторингу до глибшого аналізу електричних параметрів, що безпосередньо відображають фізичний стан фотоелектричних модулів.

Проведений аналіз існуючих методів контролю показав, що більшість промислово впроваджених систем орієнтовані переважно на вимірювання вихідної потужності, струму та напруги. Такий підхід є достатнім для загальної оцінки виробітку електроенергії, проте має обмежені діагностичні можливості. Зниження генерації в цих системах фіксується як факт, але першопричина цього явища залишається невизначеною. У результаті тимчасові зовнішні чинники, такі як хмарність або забруднення поверхні панелей, часто не відрізняються від реальних технічних несправностей, зокрема деградації контактів чи пошкодження структури фотоелементів. Це знижує ефективність експлуатаційних рішень і ускладнює планування технічного обслуговування.

У роботі обґрунтовано доцільність використання внутрішніх параметрів електричної схеми заміщення фотоелектричного модуля як інформативних діагностичних показників. Показано, що зміни послідовного та шунтового опорів є чутливими до процесів фізичного старіння матеріалів, окислення контактів, появи мікропошкоджень і струмів витоку. На відміну від вихідної потужності, ці параметри значно менше залежать від миттєвих змін зовнішніх умов, що дозволяє використовувати їх як надійний критерій оцінки реального технічного стану обладнання.

Важливим науковим результатом роботи стало удосконалення математичної моделі фотоелектричного модуля. Запропонований підхід відрізняється від традиційних моделей тим, що ключові параметри не розглядаються як сталі величини, а трактуються як динамічні змінні, що змінюються в процесі експлуатації. Це дозволило встановити якісний та кількісний зв'язок між електричними показниками та фізичними процесами зносу елементів. На основі цього підходу сформовано зрозумілу шкалу оцінювання технічного стану, яка забезпечує інтерпретацію результатів контролю в термінах експлуатаційної безпеки та рівня ризику.

Для практичного впровадження запропонованого методу розроблено алгоритм автоматизованого контролю, орієнтований на використання в недорогих вбудованих системах. Алгоритм забезпечує розрахунок параметрів у реальному часі без суттєвих обчислювальних витрат, що є принципово важливим для промислових систем моніторингу. Реалізація методу не потребує складного або дорогого додаткового обладнання та може бути інтегрована в існуючі системи керування без радикальної зміни їх архітектури.

Ефективність розробленого підходу підтверджена результатами імітаційного моделювання. Отримані дані свідчать про здатність системи виявляти початкові стадії деградації контактних з'єднань при незначних змінах параметрів, що недоступно для традиційних методів контролю. При цьому алгоритм демонструє стійкість до впливу нерівномірного освітлення та промислових завад, що забезпечує високу достовірність результатів у реальних умовах експлуатації.

Практична цінність виконаної роботи полягає у створенні передумов для переходу від регламентного технічного обслуговування до обслуговування за фактичним станом обладнання. Запропонований метод не замінює існуючі планово-попереджувальні заходи, а доповнює їх інструментами ранньої діагностики. Це дозволяє своєчасно виявляти

потенційно небезпечні режими роботи, зокрема перегрів контактів і підвищення пожежного ризику, ще до виникнення аварійних ситуацій.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що розроблений метод автоматизованого контролю є ефективним засобом підвищення надійності та безпеки сонячних електростанцій. Його впровадження сприяє зменшенню експлуатаційних втрат, підвищенню стабільності генерації та створює основу для розвитку інтелектуальних систем моніторингу в сучасній енергетиці. Отримані результати мають практичну значущість та можуть бути використані як при проектуванні нових об'єктів сонячної енергетики, так і при модернізації існуючих електростанцій.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Блінов І. В., Ткаченко О. О. Оцінювання параметрів схем заміщення фотоелектричних перетворювачів на основі експериментальних даних // Технічна електродинаміка. 2022. № 4. С. 72–78.
2. Бондаренко В. О. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні // Енергетика: економіка, технології, екологія : матеріали XIX міжнар. наук.-практ. конф. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.
3. Варчук І. В. Розробка програмного модуля предиктивного обслуговування фотоелектричних систем у середовищі MATLAB // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024. № 1. С. 40–47.
4. Васильківський І. В., Мороз О. Г. Моделювання та аналіз впливу внутрішнього опору на характеристики сонячних панелей у середовищі MATLAB // Технічна електродинаміка. 2024. № 2. С. 58–64.
5. Грабовський В. А., Копилов О. П. Розробка програмно-апаратних засобів моніторингу режимів роботи фотоелектричних систем // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. 2023. № 1 (27). С. 45–52.
6. Денисов Ю. О., Гордієнко О. В. Проєктування вбудованих систем моніторингу сонячних електростанцій на базі мікроконтролерів ARM Cortex-M // Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2023. № 45 (121). С. 112–119.
7. Зозулевич Г. В. Математичне моделювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних панелей для систем прогнозування генерації // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2023. № 11. С. 34–41.
8. Іщенко В. В., Соляник М. В. Сонячна on-grid електростанція та її приєднання до електричної мережі // Перспективи розвитку електроніки, автоматики та комп'ютерно-інтегрованих технологій : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 2024 р.).
9. Каплінський І. Б., Мазур В. В. Аналіз точності визначення послідовного опору сонячних панелей за методами апроксимації // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2023. № 2. С. 88–95.
10. Кирисов І. Г. Аналіз пошкоджень поверхні сонячних панелей, що виникають в процесі експлуатації сонячних електростанцій // Papers of the 9th International scientific and practical conference “Modern research in world science”. Lviv, 2022. P. 487-491.
11. Кирисов І. Г. Аналіз пошкоджень фотоелектричних модулів в процесі експлуатації сонячних електростанцій // Матеріали національного науково-практичного форуму «Наука. Інновації. Якість». Харків: УПА. 2022. С. 52–54.
12. Кирисов І. Г. Аналіз факторів, які впливають на структуру напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача в процесі

експлуатації сонячних електростанцій // Papers of the 8th International scientific and practical conference “Modern research in world science”. Lviv, 2022. P. 305–309.

13. Кирисов І. Г. Вплив пошкоджень поверхні сонячних панелей на їх параметри // Papers of the 10th International scientific and practical conference “Modern research in world science”. Lviv, 2022. P. 407–411.

14. Кирисов І. Г. Дослідження якості напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача в процесі експлуатації // Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції «Якість, стандартизація та метрологічне забезпечення». Харків : УІПА, 2022. С. 47.

15. Кирисов І. Г. Моделювання фотоелектричних перетворювачів сонячних модулів з метою визначення їх параметрів і характеристик // Збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації». Переяслав, 2024. С. 216–219.

16. Кирисов І. Г. Особливості технологічних схем генерації електроенергії альтернативними джерелами енергії // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. 2019. Вип. 204. С. 66–68.

17. Кирисов І. Г., Буданов П. Ф. Дослідження причин поверхневих дефектів напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача // Зб. наук. пр. V Міжнародної науково-технічної конференції «EEES-2021». Харків, 2021. С. 41.

18. Кирисов І. Г., Буданов П. Ф. Методи досліджень поглинаючої поверхні сонячних елементів // Збірник наукових праць «Машинобудування». Харків : УІПА, 2022. № 29. С. 104–117.

19. Кирисов І. Г., Гонтар І. В., Федченко-Галаган Є. С. Аналіз методів дослідження структури поверхні сонячних елементів // Proceedings of 7th International Scientific and Practical Conference “Perspectives of contemporary science: theory and practice”. Lviv, 2024. P. 201–204.

20. Кирисов І. Г., Левченко М. І., Сук І. В., Хватова С. В. Вплив мікротріщин на поверхні сонячних батарей на їх параметри // Proceedings of 7th International Scientific and Practical Conference “Perspectives of contemporary science: theory and practice”. Lviv, 2024. P. 205–208.

21. Кирисов І. Г., Хом'як Е. А., Буданов П. Ф., Бровко К. Ю. Підходи та вимоги до моделювання структури напівпровідникового шару сонячного елемента // Вісник ВПІ. 2022. Вип. 1. С. 35–38.

22. Кирисов І. Г., Чернюк А. М., Качанов Є. І. Засоби забезпечення процесу генерації та споживання електричної енергії в ЕЕС з розподіленою генерацією // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2020. № 1. С. 95–99.

23. Кирисов І. Г., Чернюк А. М., Черевик Ю. О. Аналіз перспектив розвитку систем розподіленої генерації електроенергії в Україні // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том 32 (71), № 3. С. 239–246.

24. Кирисов І. Г., Чернюк А. М., Черевик Ю. О. Аналіз технологічних схем генерації електроенергії альтернативними джерелами енергії // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Том 30(69), № 4. С. 33–41.
25. Кожем'яко В. П., Домбровський В. Г. [та ін.] Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики // Оптико-електронні пристрої та компоненти. 2011. С.141-157.
26. Козирський В. В., Шайтур С. М. Автоматизація процесів збору та обробки телеметричної інформації з об'єктів розподіленої генерації // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2024. № 15 (1). С. 28–36.
27. Кривда В., Василенко О., Федорова М. Моделювання електричних характеристик сонячної панелі // Електротехніка та комп'ютерні системи. 2017. № 26 (102). С. 25–31.
28. Курак В. В., Андропова О. В. Експериментальне визначення потоку сонячного випромінювання із застосуванням паспортних параметрів модуля ФЕП // Вісник ХНТУ. 2021. № 1 (76). С. 35–42.
29. Лазарєв В. С., Дешко В. І. [та ін.] Аналіз досліджень впливу температури на деградацію та ефективність роботи сонячних панелей // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2024. № 2. С. 75–83.
30. Марченко А. А. Алгоритмічне забезпечення систем адаптивного керування режимами роботи сонячних масивів // Енергетика та автоматика. 2024. № 3. С. 54–62.
31. Махотіло К. С., Шевченко С. В. [та ін.] Експериментальні дослідження факторів впливу на генерацію сонячної електростанції // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. 2021. № 3 (161). С. 12–21.
32. Михайлов В. В., Рибалко О. Я. Використання інтелектуальних датчиків струму та напруги в системах технічної діагностики СЕС // Приладобудування: стан і перспективи. 2025. Вип. 21. С. 142–148.
33. Мокін О. Б., Варчук І. В. Проблеми забезпечення якості електроенергії в мікромережах на основі гібридних систем живлення з ФЕС // Вісник ВПІ. 2024. № 4. С. 13–20.
34. Мороз В. І., Турич О. В. Комп'ютерне моделювання сонячних батарей // Вісник НУ «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2012. № 736. С. 104–108.
35. Ноженко В. Сучасний стан сонячної енергетики в Україні // Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Сеул, 2025 р.). С. 197–198.
36. Пономаренко В. В. Особливості методів оцінювання параметрів сонячних елементів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024. № 6. С. 87–93.
37. Харченко В. В., Тарасенко О. М. Чисельні методи розв'язання трансцендентних рівнянь у задачах фотовольтаїки // Праці Інституту електродинаміки НАН України. 2024. Вип. 67. С. 15–23.

38. Чернюк А. М., Буданов П. Ф. Оцінка енергетичної ефективності фотоелектричних модулів з урахуванням деградаційних процесів // Матеріали VI Міжнар. наук.-техн. конф. «Енергоефективність та енергетична безпека». Харків : УІПА, 2024. С. 18–21.
39. Чернюк А. М., Кирисов І. Г. Інтелектуальні системи контролю технічного стану сонячних модулів в умовах реальної експлуатації // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. 2025. № 1. С. 22–30.
40. Al-Sadi A., Mousa H., Al-Sadi S. Predictive Maintenance of Solar Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review // Journal of Renewable Energy and Sustainable Development. 2025. Vol. 11, Is. 1.
41. Atia D. M., Hassan A. A., El-Madany H. T. [et al.] Degradation and energy performance evaluation of mono-crystalline photovoltaic modules in Egypt // Scientific Reports. 2023. 13(1), 13066.
42. Banwell T. C., Jayakumar A. Exact analytical solution for current flow through diode with series resistance // Electronics Letters. 2000. Vol. 36, Is. 4. P. 291–292.
43. Bdour M., Dalala Z., Al-Addous M. [et al.] A comprehensive evaluation on types of microcracks and possible effects on power degradation in photovoltaic solar panels // Sustainability. 2020. 12(16), 6416.
44. Berardone I., Corrado M., Paggi M. A generalized electric model for mono and polycrystalline silicon in the presence of cracks and random defects // Energy Procedia. 2014. 55. P. 22–29.
45. Beyond 2050: From deployment to renewal of the global solar and wind energy system / S. Pfenninger, J. Price, S. Zeyringer [et al.] // arXiv:2502.04205 [physics.soc-ph]. 2025.
46. Chan D. S. H., Phang J. C. H. Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics // IEEE Transactions on Electron Devices. 1987. Vol. 34, Is. 2. P. 286–293.
47. Corless R. M., Gonnet G. H., Hare D. E. G. [et al.] On the Lambert W function // Advances in Computational Mathematics. 1996. Vol. 5. P. 329–359.
48. Dhimish M., & Alrashidi A. Photovoltaic degradation rate affected by different weather conditions: A case study based on pv systems in the uk and australia // Electronics. Photovoltaic. 2020. 9(4). 650.
49. Gagliardi M., & Paggi M. Long-term EVA degradation simulation: Climatic zones comparison and possible revision of accelerated tests // Solar Energy. 2018. 159, 882–897.
50. Gao X., Cui Y., Hu J. [et al.] Lambert W-function based exact representation for double diode model of solar cells: Comparison on fitness and parameter extraction // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 127. P. 443–460.
51. Hallam B., Herguth A., Hamer P. [et al.] Eliminating light-induced degradation in commercial p-type Czochralski silicon solar cells // Applied Sciences. 2017. 8(1), 10.
52. Humada A. M. [et al.] Solar cell parameters extraction techniques: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 56. P. 41–56.

53. Ishaque K., Salam Z. An improved modeling and simulation of PV system in Phoenix Contact and MATLAB/Simulink environment // *Renewable Energy*. 2012. Vol. 44. P. 238–245.
54. Ishaque K., Salam Z., Taheri H. Simple, fast and accurate two diode model for photovoltaic modules // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011. Vol. 95, Is. 2. P. 586–594.
55. Kyriakrakos G., Papadakis G. Comparative Analysis of Ground-Mounted vs. Rooftop Photovoltaic Systems Optimized for Interrow Distance between Parallel Arrays // *Energies*. 2020. Vol. 13, iss. 14. 3639.
56. Kyrysov I., Budanov P., Brovko K. [et al.] Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, no. 8(111). P. 75–89.
57. Kyrysov I., Budanov P. Qualimetric method of quality assessment of solar battery parameters // *Збірник наукових праць «Машинобудування»*. ВІПА. 2024. № 33. С. 64–77.
58. Lapo-Puchaicela F. R. [et al.] Impact of Azimuth Angle on Photovoltaic Energy Production: Experimental Analysis in Loja, Ecuador // *Energies*. 2025. Vol. 18, iss. 8. 1998.
59. Lee Y. J. [et al.] Prediction of Photovoltaic Module Characteristics by Machine Learning for Renewable Energy Applications // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, iss. 16. 8868.
60. Mellit A., Kalogirou S. A. Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008. Vol. 34, No. 5. P. 574–632.
61. Munir M. A. [et al.] Investigation of dust pollutants and the impact of suspended particulate matter on the performance of photovoltaic systems // *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10. 1017293.
62. Nguyen X. H., Nguyen M. P. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in MATLAB/Simulink // *Environmental Systems Research*. 2015. V 4 (24). P. 7-22.
63. Oliveira D. S. L. [et al.] The environmental factors affecting solar photovoltaic output // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 191. 114134.
64. Reis P., Santos J., Almeida J. The Newton Raphson Method in the Extraction of Parameters of PV Modules // *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'17)*. Malaga, 2017.
65. Ridha H. M. Parameters extraction of single and double diodes photovoltaic models using Marine Predators Algorithm and Lambert W function // *Solar Energy*. 2020. Vol. 209. P. 674–693.
66. Said S., Massoud A., Benammar M., Ahmed S. A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox // *Journal of Energy and Power Engineering*. 2012. V 6. P. 1965-1975.
67. Salmi T., Bouzguenda M., Gastli A., Masmoundi A. MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell // *International Journal of Renewable energy research*. 2012. №2. P. 213-218.

68. Seifi M., Che Soh A. Bt., Izzrib N. [et al.] Comparative Study of PV Models in Matlab/Simulink // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. 2013. №7(2). P. 97-102.
69. Shockley W., Queisser H. J. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells // Journal of Applied Physics. 1961. Vol. 32, No. 3. P. 510–519.
70. Shmygol N., Akimova Y., Mylovanov Y. Perspectives for the development of solar energy in Ukraine // World Science. 2018. Vol. 1, no. 10 (38). Pp. 12–16.
71. Singh S. K., Singh G. K. Effect of various parameters on the performance of solar PV power plant: a review and the experimental study // Innovative Infrastructure Solutions. 2023. Vol. 8, no. 76.
72. SolarPower Europe. Global Market Outlook for Solar Power 2024–2028. Brussels, 2024. 182 p. ISBN 9789464669169.
73. Surya Kumari J., Sai Babu Ch. Mathematical Modelling and Simulation of Photovoltaic Cell Using MATLAB/Simulink Environment and PLECS Blockset // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2012. V 2, № 1. P. 26- 34.
74. Sze S. M., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices. 3rd ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2006. 832 p.
75. Toledo O. M., Oliveira Filho J. R. Identification and Extraction of Parameters from Photovoltaic Panels using the Newton-Raphson Method // International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications. 2024. Vol. 13, No. 2.
76. Villalva M. G., Gazoli J. R., Filho E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays // IEEE Transactions on Power Electronics. 2009. Vol. 24, Is. 5. P. 1198–1208.
77. Wadhawan N. K. Numerical Approximation of Lambert W Function For Real Values By Unique Method of Quadratic Approximation // arXiv:2511.18381 [math.NA]. 2025.
78. Winkler C., Dabrock K., Kapustyan S. [et al.] High-Resolution rooftop photovoltaic potential assessment for a resilient energy system in Ukraine // Energy Conversion and Management: X. 2025. 101242.
79. Zhu L., Raman A. S., Fan S. An Optics-Based Approach to Thermal Management of Photovoltaics: Selective-Spectral and Radiative Cooling // arXiv:1701.01678 [physics.optics]. 2017.