

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем

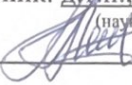
МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
«Причини деградації фотоелектричних модулів та виявлення їх під час експлуатації»

Виконав: студент 2-го курсу, групи 1ЕС-22м
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
освітня програма «Електричні станції»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

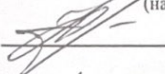

Греськов Д. О.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ЕСС
(науковий ступінь, учене звання, посада)


Лежнюк П. Д.
(прізвище та ініціали)

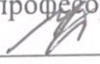
« 01 » 12 2023 р.

Опонент: к.т.н., доцент ЕСЕМ
(науковий ступінь, учене звання, посада)


Шимчук О. М.
(прізвище та ініціали)

« 01 » 12 2023 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.


« 04 » 12 2023 р.

Вінниця ВНТУ – 2023 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма – Електричні станції

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.

«18» вересня 2023р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____ Греськову Дмитру Олександровичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Причини деградації фотоелектричних модулів та виявлення їх під час експлуатації»

Керівник роботи д.т.н., проф. каф. ЕСС Лежнюк П. Д.
затверджений наказом вищого навчального закладу від 18.09.2023 року № 247

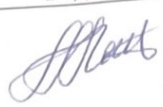

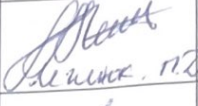
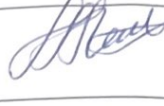


2. Термін подання студентом роботи 05 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи: Лежнюк, П. Д. Оцінювання деградації фотоелектричних станцій в задачі прогнозування генерування електроенергії : монографія / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, О. О. Рубаненко. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 190 с. Метод, спосіб і засоби оцінювання фактичного генерування фотоелектричних станцій з врахуванням їх деградації: науково-технічний звіт (остаточний) ВНТУ; кер. П. Д. Лежнюк. Вінниця, 2021. 199 с. № ДР 0121U113451.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1 Аналіз роботи фотоелектричних станцій в енергосистемі та функціонування їх елементів. 2 Виявлення деградації фотоелектричних модулів. 3 Використання програмно-апаратних комплексів для визначення технічного стану модуля. 4 Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.











5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Конструкція та характеристики фотоелектричних модулів. 2. Методи та засоби знаходження деградації фотоелектричних модулів. 3. Найпоширеніші дефекти фотоелектричних модулів. 4. Порівняння ВАХ модулів з різними дефектами. 5. Визначення технічного стану модулів за допомогою програмно-апаратного комплексу.

6. Консультанти розділів роботи

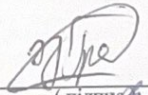
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Лежнюк П. Д. д.т.н., проф., професор кафедри ЕСС		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О. В., д.п.н., проф., завідувач каф. БЖДПБ		
Економічна частина	Остра Н. В., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		

7. Дата видачі завдання 18 вересня 2023 року

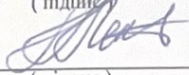
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Примітка
		початок	кінець	
1	Вступ. Опрацювання літературних джерел.	21.09.23	23.09.23	
2	Аналіз роботи фотоелектричних станцій в енергосистемі та функціонування їх елементів	24.09.23	29.09.23	
3	Виявлення деградації фотоелектричних модулів	30.09.23	10.10.23	
4	Використання програмно-апаратних комплексів для визначення технічного стану модуля	11.10.23	28.10.23	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.	29.10.23	05.11.23	
6	Економічна частина.	06.11.23	12.11.23	
7	Оформлення пояснювальної записки	13.11.23	21.11.23	
8	Оформлення презентації	22.11.23	27.11.23	
9	Перевірка МКР на плагіат. Попередній захист МКР.	28.11.23	01.12.23	
10	Опонування МКР	01.12.23	04.12.23	
	Захист МКР	Друга декада грудня		

Студент


(підпис)

Керівник роботи


(підпис)

Д. О. Греськов
(ініціали та прізвище)

П. Д. Лежнюк
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311.1

Греськов Дмитро Олександрович «Причини деградації фотоелектричних модулів та виявлення їх під час експлуатації». Магістерська кваліфікаційна робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Вінниця: ВНТУ. – 2023. – 96 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 28 назв; рис.: 38; табл. 16.

У магістерській кваліфікаційній роботі отримані шляхи виявлення деградації фотоелектричних модулів для визначення їхнього технічного стану з метою підвищення точності прогнозу генерування електроенергії фотоелектричною станцією. У загальній частині роботи досліджено функціонування ФЕС у енергосистемі, конструкцію та характеристики їх основних складових, зокрема фотоелектричного модуля. Розглянуто причини виникнення дефектів ФЕМ, методи їх знаходження та виконано порівняння вольт-амперних характеристик модулів з різними пошкодженнями. Проведено діагностику ФЕС, застосовуючи програмно-апаратний комплекс, який дозволяє визначати технічний стан ФЕМ і приймати рішення щодо їх подальшої експлуатації.

У розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» наведено технічні рішення щодо безпечного виконання роботи, гігієни праці та виробничої санітарії, здійснено розрахунок захисного заземлення для ФЕС, а також запропоновано заходи з підвищення безпеки роботи ФЕС в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.

В економічній частині виконано кошторисний розрахунок виїзду бригади для проведення планової діагностики ФЕС.

Ключові слова: фотоелектрична станція, технічний стан, деградація фотоелектричних модулів, дефекти фотоелектричних модулів, залишковий ресурс.

ABSTRACT

Hreskov Dmytro O. Causes of degradation of photovoltaic modules and their detection during operation. Master's qualification work in specialty 141 «Electric power, electrical engineering and electromechanics». – Vinnytsia: VNTU, 2023. – 96 pp.

In Ukrainian language. Bibliographer: 28 titles; fig.: 38; tabl. 16.

In the master's qualification work, the ways of detecting the degradation of photovoltaic modules to determine their technical condition in order to improve the accuracy of the forecast of electricity generation by a photovoltaic power plant were obtained. In the general part of the work, the functioning of PV power plants in the power system, the design and characteristics of their main components, in particular, the photovoltaic module, are investigated. The causes of PV module defects, methods of their detection, and a comparison of the volt-ampere characteristics of modules with different damages are considered. The PV system was diagnosed using a software and hardware complex that allows determining the technical condition of PV modules and making decisions on their further operation.

The section "Occupational Health and Safety in Emergency Situations" provides technical solutions for safe work performance, occupational health and safety, calculates the protective earthing for PV power plants, and proposes measures to improve the safety of PV power plants in the face of emergency threats.

In the economic part, the study estimates the cost of a team's visit to carry out routine diagnostics of the PV plant.

Keywords: photovoltaic power plant, technical condition, degradation of photovoltaic modules, defects of photovoltaic modules, residual life.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ	7
1.1 Особливості експлуатації фотоелектричних станцій в Україні та умови їх ефективної роботи	7
1.2 Принцип роботи та конструкція основних елементів фотоелектричної станції	10
1.3 Конструкція та характеристика фотоелектричних модулів	16
2 ВИЯВЛЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ	24
2.1 Методи та засоби знаходження деградації фотоелектричних модулів	24
2.2 Найпоширеніші дефекти фотоелектричних модулів	34
3 ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОДУЛЯ	41
3.1 Знаходження коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ	41
3.2 Визначення технічного стану ФЕС блок-схемою програмно- апаратного комплексу та знаходження коефіцієнтів-індикаторів	55
3.3 Процес діагностування фотоелектричних модулів за допомогою програмно-апаратного комплексу	61
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	65
4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта	65
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	66
4.2.1 Мікроклімат	66
4.2.2 Склад повітря робочої зони	67
4.2.3 Виробниче освітлення	68

4.2.4 Виробничий шум.....	70
4.3 Розрахунок захисного заземлення для фотоелектричної станції.....	71
4.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи фотоелектричної станції в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій	77
4.4.1 Дослідження безпеки роботи фотоелектричної станції в умовах іонізуючих випромінювань.....	78
4.4.2 Дослідження безпеки роботи фотоелектричної станції в умовах дії електромагнітного імпульсу	80
4.4.3 Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи фотоелектричної станції	83
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	85
5.1 Загальна інформація про кошторисний розрахунок.....	86
5.2 Кошторисний розрахунок заробітної плати	87
ВИСНОВКИ.....	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	93
ДОДАТКИ.....	97
Додаток А (обов'язковий) Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	98
Додаток Б (обов'язковий) Технічне завдання	99
Додаток В (довідниковий) Найпоширеніші дефекти ФЕМ, які були виявлені на ФЕС	103
Додаток Г (обов'язковий) Ілюстративна частина	113

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

EVA	Ethylene vinyl acetate (етиленвінілацетат)
ВАХ	Вольт-амперна характеристика
ВДЕ	Відновлювальні джерела енергії
ГДК	Граничнодопустимі концентрації
ЕМІ	Електромагнітний імпульс
ІВ	Іонізуюче випромінювання
КЗР	Коефіцієнт залишкового ресурсу
КПО	Коефіцієнт природної освітленості
ФЕМ	Фотоелектричний модуль
ФЕС	Фотоелектрична станція

ВСТУП

Розвиток та поширення фотоелектричних станцій (ФЕС) є одним з ключових напрямків у сфері відновлювальної енергетики та екологічної безпеки. З кожним роком фотоенергетика стає все більш привабливим та ефективним джерелом генерування електроенергії, відіграючи вагомий роль в енергосистемі. Зі збільшенням споживання електроенергії, необхідністю зниження негативного впливу енергетики на довкілля, підвищенням цін на енергоносії та, в результаті, потребою економії електроенергії та ресурсів актуальність розповсюдження та вдосконалення фотоелектричних станцій лише зростає.

Збільшення потужностей ФЕС впливає на процес балансування режимів енергосистеми, що в свою чергу, через їх нестабільність генерування створює суттєві проблеми.

Фотоелектричні станції як і всі електростанції планують погодинний графік вироблення електроенергії на наступну добу, який передається Гарантованому покупцеві для балансування потужності та електроенергії в Об'єднаній енергетичній системі України. Виробники електроенергії з відновлюваних джерел, щоб уникнути штрафних санкцій, повинні точно прогнозувати погодинний графік генерування на наступну добу. Точність цього прогнозу обмежується неточністю метеорологічних прогнозів і технічним станом фотоелектричних станцій. У випадку фотоелектричних станцій, технічна готовність для виконання заданого графіка виробництва залежить від стану фотоелектричних модулів (ФЕМ).

Протягом терміну служби ФЕМ піддаються впливу навколишнього середовища, наприклад сонячного світла, тепла і холоду, вологи і механічних навантажень. Ці фактори часто призводять до поступового зниження ефективності модулів, а в деяких випадках і до раптових несправностей.

Здатність точно прогнозувати вироблення електроенергії стає критично важливою для подальшого розвитку фотоелектричної промисловості. Двома

основними видами витрат є ефективність, з якої сонячне світло перетворюється в потужність і як ці відношення змінюються з плином часу. Точна кількісна оцінка зниження потужності з плином часу, також відома як швидкість деградації, має важливе значення для всіх зацікавлених сторін – інвесторів, споживачів і дослідників. У фінансовому відношенні деградація ФЕМ або системи однаково важлива, оскільки більш висока ступінь деградації безпосередньо перекладається в меншу потужність і, отже, знижує майбутні грошові потоки.

Метою даної магістерської роботи є дослідження причин виникнення дефектів фотоелектричних модулів, їхнього впливу на генерування електроенергії фотоелектричними станціями та виявлення деградації за допомогою програмно-апаратного комплексу, що базується на порівнянні даних, одержаних під час діагностування з ретроспективними та розрахунковими, які отримуються шляхом використання нейро-нечіткого моделювання.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі основні завдання:

- оцінювання функціонування фотоелектричних станцій в енергосистемі України;
- дослідження конструкції та принципу роботи ФЕС, а також будови й характеристики фотоелектричних модулів;
- аналіз методів виявлення деградації ФЕМ;
- встановлення найпоширеніших дефектів модулів з використанням статистики обстежень і даних пошкоджень ФЕМ;
- застосування блок-схеми програмно-апаратного комплексу для визначення технічного стану ФЕС;
- проведення діагностики ФЕМ за допомогою програмно-апаратного комплексу.

1 АНАЛІЗ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ

1.1 Особливості експлуатації фотоелектричних станцій в Україні та умови їх ефективної роботи

В енергобалансі всіх розвинених країн спостерігається збільшення відсотку відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Наприклад, у країнах Європейського Союзу у 2021 році 22 % спожитої електроенергії було отримано з відновлювальних джерел [1].

В Україні у 2021 році частка електроенергії, згенерованої з ВДЕ, досягла 8.1% або 12,8 ТВт·год, з яких 56% — за рахунок фотоелектричних станцій [2]. Вироблення електроенергії різними джерелами ВДЕ в Україні у відсотках показано на рисунку 1.1.

Вироблення електроенергії різними джерелами ВДЕ в Україні (2021 рік)

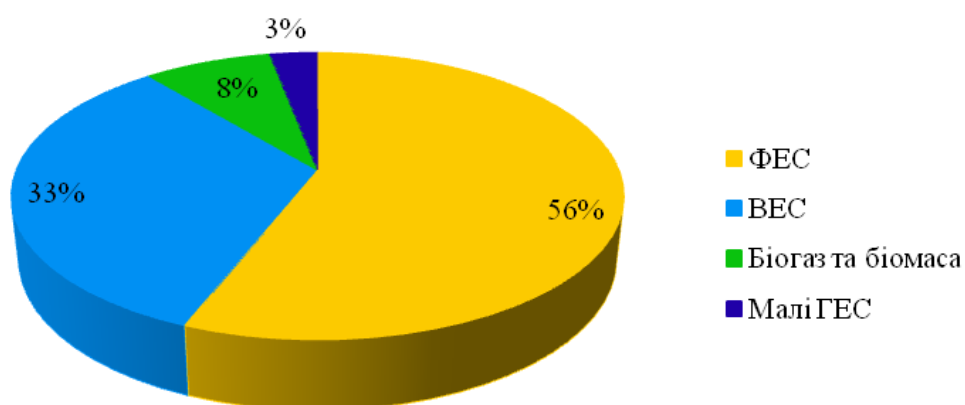


Рисунок 1.1 – Вироблення електроенергії різними джерелами ВДЕ в Україні

Застосування відновлюваних джерел енергії в електричних мережах (ЕМ), крім мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище та вирішення проблем, пов'язаних з відходами виробництва електроенергії,

призведе до наступних позитивних результатів: по-перше, суттєво підвищить ефективність використання первинних енергетичних ресурсів та, в майбутньому, знизить вартість електроенергії; по-друге, розвантажить як системоутворюючі, так і розподільні електричні мережі. Це, в свою чергу, допоможе зменшити ризики, пов'язані зі зростанням цін на первинні енергоносії. При цьому виникають технічні виклики, пов'язані з впливом ФЕС на планування, керування та розбудову електричних мереж.

Інтегрування фотоелектричних станцій в електричні мережі відкриває можливість створити модель, що ґрунтується на ринкових відносинах і спрямовану на узгоджене керування сумарним добовим графіком навантаження і генеруванням ФЕС. Взаємодія всіх учасників електроенергетичного ринку в рамках цієї моделі може приносити користь усім зацікавленим сторонам [3].

Власнику ФЕС це дозволяє отримати низку переваг, які до цього були йому недоступні:

- отримання плати за участь у програмах керування власним навантаженням та генеруванням ВДЕ;
- можливість продавати надлишки електроенергії, генерованої відновлюваним джерелом, енергопередавальним компаніям;
- можливість резервувати певну кількість електроенергії за довгостроковими контрактами;
- можливість оптимізувати власні витрати на основі оцінювання експлуатаційних витрат на генерування і вартості електроенергії, що закуповується безпосередньо у енергопостачальної компанії;
- можливість збільшення вартості активів.

Для енергопостачальної компанії такі переваги будуть виражатись у:

- поліпшенні контролю за комерційними ризиками;
- поліпшенні надійності електропостачання;
- покращенні білінгу.

Отже, всі учасники даного процесу отримують певні переваги, беручи участь у моделі розвитку електричних мереж і систем електропостачання.

Однак, разом з тим, слід відзначити, що поширення фотоелектричних станцій призводить до виникнення ряду технічних проблем:

- ускладнення керування режимами електричних мереж;
- можливість появи надлишкових потужностей та відповідних проблем із регулюванням частоти;
- реверсивні перетікання потужності в розподільних та високовольтних мережах;
- необхідність забезпечення стійкості роботи енергосистеми за відключення (або включення) великої кількості ФЕС;
- складність в обслуговуванні ліній з «активними споживачами» і установками відновлюваної енергії;
- поява в структурі електричних мереж відновлюваних джерел енергії, що мають імовірнісний характер генерування потужності;
- складність узгодження графіків генерування відновлюваних джерел енергії та електроспоживання;
- збільшення струмів короткого замикання, що може стати причиною заміни встановлених комутаційних апаратів, зміни уставок релейного захисту та протиаварійної автоматики;
- необхідність збереження роботи об'єктів електропостачання без відключення від мережі за низьких значень напруги і частоти [3].

Розміщення ФЕС у неоптимальному місці для приєднання до електромереж може оказувати негативний вплив на керування режимами. У наслідок нераціонального вибору місця встановлення ФЕС можуть виникати перенапруги й труднощі з регулюванням частоти [4-5].

Під час експлуатації визначається похибка як різниця між прогнозованою і фактично згенерованою ВДЕ електроенергією впродовж години, доби, місяця тощо. Якщо похибка перевищує допустиме значення, то гарантованим покупцем встановлюються відповідні штрафні санкції. На

величину санкцій впливає як не точний прогноз вироблення електроенергії ВДЕ, так і не точне визначення фактично виробленої ними електроенергії.

При дослідженні енергоефективності роботи джерел енергії з нерівномірним графіком виробництва, крім погодних умов, важливим фактором є оцінка їхнього технічного стану [6].

Тому важливо розуміти особливості функціонування ФЕС та їхніх основних складових.

1.2 Принцип роботи та конструкція основних елементів фотоелектричної станції

Сонячна енергія перетворюється в електричну за допомогою пристроїв, які називаються фотоперетворювачами. Цей процес відбувається у напівпровідникових сонячних елементах, виготовлених, наприклад, із кремнію. Шляхом з'єднання даних елементів у батареї можна створювати потужні фотоелектричні станції.

Для ефективної роботи сонячних елементів мають бути дотримано ряд умов:

- оптичний коефіцієнт поглинання активного шару напівпровідника має бути достатньо великим, щоб забезпечити поглинання значної частини енергії сонячного світла в межах товщини шару;

- електрони і дірки, що генеруються за опромінення, мають ефективно збиратися на контактних електродах з обох сторін активного шару;

- сонячний елемент повинен мати значний потенціальний енергетичний бар'єр у р-п переході;

- опір, увімкнений послідовно з сонячним елементом (виключаючи опір навантаження), має бути малим, щоб зменшити втрати потужності в процесі роботи;

- структура тонкої плівки має бути однорідною по всій активній області сонячного елемента, щоб виключити закорочування і вплив

шунтуючих опорів на характеристики елемента [7].

Існує різноманітність видів сонячних елементів, які можна класифікувати за технологією виробництва та використаними матеріалами.

Серед них:

1) сонячні елементи з кремнію:

- монокристалічні;
- полікристалічні;
- аморфні;

2) плівкові сонячні елементи:

- з використанням телуриду кадмію;
- з використанням селеніду міді-індію;
- полімерні.

Для виготовлення монокристалічних кремнієвих сонячних елементів використовують очищений кремній. Після того, як монокристал проходить стадію затвердіння, його розділяють на дуже тонкі пластини, товщиною, яка становитиме до 300 мікрометрів.

Вигляд монокристалічного кремнієвого сонячного елемента наведено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Монокристалічний кремнієвий сонячний елемент

Готові пластини з'єднують тонкою сіткою з електродів у батареї. Сонячні панелі, зібрані з цих елементів мають вигляд силіконових стільників, або осередків, які поєднуються в одну структуру. ККД даних батарей може досягати 24 % [8]. Процес їхнього виготовлення є технологічно складним та дорогим.

Середня площа, що її займає система у 1 кВт на основі монокристалічних панелей, становить 7 м². Застосування таких систем різноманітне, вони можуть використовуватися в міні котеджах, туристичних комплексах або на мегаватних фотоелектричних станціях [7].

Зазвичай монокристалічні модулі вбудовуються в алюмінієву рамку і захищаються протиударним склом. Колір монокристалічних фотоелементів може бути темно-синім або чорним. Вигляд такої панелі показано на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Панель із монокристалічних кремнієвих сонячних елементів

Полікристалічні сонячні елементи виготовляються на базі полікристалічного кремнію, який формується за допомогою методу

повільного охолодження – спрямованої кристалізації і розпиляного на пластини. Система потужністю 1 кВт на основі полікристалічних панелей у середньому займає площу 8,3 м².

Коштує цей вид панелей значно менше, ніж попередній. Також для виробництва потрібно менше енергії, а це ще раз сприяє зниженню вартості. Однак ККД таких батарей нижче – до 18 %. Це пов'язано з утвореннями всередині полікристала, які зменшують ефективність [7].

Вигляд полікристалічного кремнієвого сонячного елемента наведено на рисунку 1.4, а панелі – на рисунку 1.5.

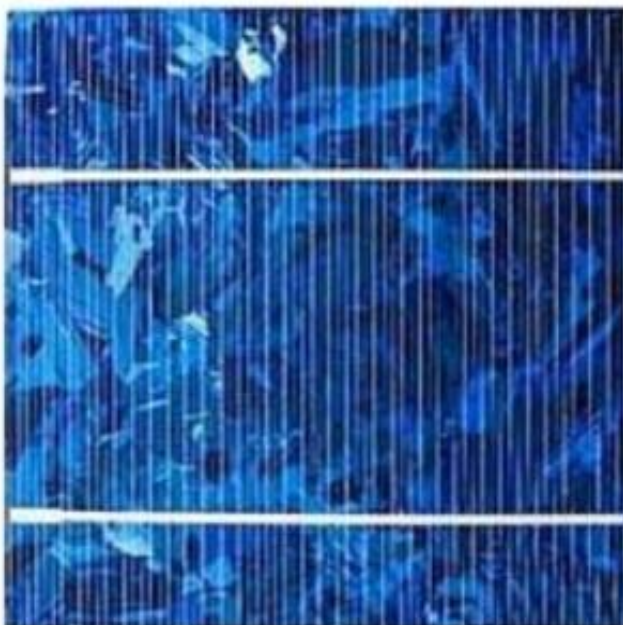


Рисунок 1.4 – Полікристалічний кремнієвий сонячний елемент



Рисунок 1.5 – Панель з полікристалічних кремнієвих сонячних елементів

Сонячні елементи з аморфного кремнію можна віднести як до кремнієвих (матеріал виготовлення – кремній), так і до плівкових, оскільки виготовлені вони за принципом виробництва плівкових батарей, проте з істотними відмінностями [7].

У цьому процесі використовується не кристалічний кремній, а речовина, відома як силан або кремневодень. Ця речовина наноситься на підкладку всередині сонячних батарей. ККД таких аморфних сонячних батарей набагато нижчий, становлячи від 5% до 12% (при теоретичному потенціалі 16%).

Проте ці сонячні елементи мають свої переваги, до яких входять:

- значно краще оптичне поглинання (у 20 разів);
- набагато більша ефективність в умовах відсутності прямого сонячного світла, наприклад, в похмурий день;
- гнучкість та еластичність панелей.

Вигляд сонячного елемента і панелі з аморфного кремнію наведено на рисунках 1.6 і 1.7 відповідно.

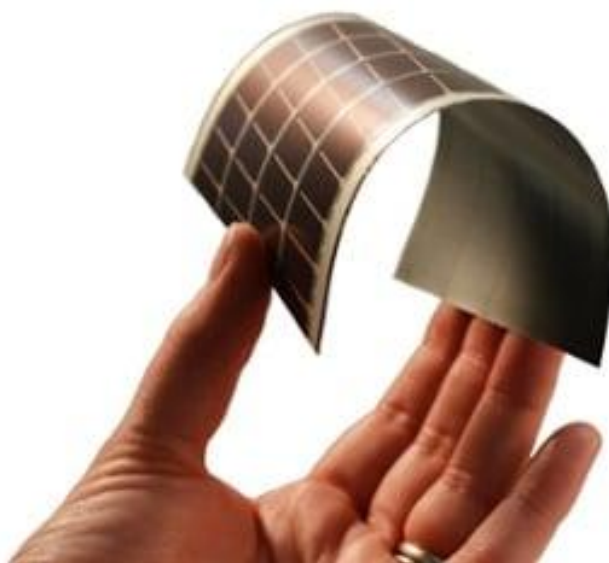


Рисунок 1.6 – Сонячний елемент з аморфного кремнію



Рисунок 1.7 – Сонячна панель з аморфного кремнію

Схеми фотоелектричних станцій включають в себе чотири основні складові:

- фотоелектричні панелі;
- контролер заряду;
- акумулятори;
- мережевий інвертор [9].

Принцип роботи фотоелектричної станції показано на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Принцип роботи фотоелектричної станції

Фотоелектричні панелі перетворюють сонячне світло в електричний струм за допомогою фотоефекту.

Контролер заряду необхідний для відстежування рівня генерування енергії та регулювання режиму роботи батареї.

Акумулятори потрібні для накопичення отриманої енергії й забезпечення підтримки стабільної роботи пристрою в темний час, коли сонячні батареї не активно виробляють електроенергію [9].

Інвертор перетворює згенерований панелями постійний електричний струм у змінний [10].

Основним елементом ФЕС є фотоелектричний модуль, який складається з сукупності фотоелектричних елементів (напівпровідникових пристроїв), що з'єднані між собою. Фотоелектричні панелі функціонують завдяки перетворенню сонячних променів в електричну енергію. Процес починає діяти після порушення електронів в кремнієвих осередках. Для цього застосовуються фотони світла від сонця.

1.3 Конструкція та характеристика фотоелектричних модулів

Фотоелектричний модуль, зовнішній вигляд якого показано на рисунку 1.9, складається з низки з'єднаних між собою фотоелементів, інкапсульованих в один блок [11].

Головна мета інкапсуляції набору електрично з'єднаних сонячних елементів – забезпечити їхній захист та їхні з'єднувальні дроти від зазвичай суворого зовнішнього середовища, в якому вони працюють. Ця необхідність також зумовлена тим, що напівпровідникові кристалічні фотокомірки відносно тонкі, схильні до механічних пошкоджень, якщо вони не захищені. Крім того, металева сітка на верхній поверхні комірок та шини, що з'єднують окремі комірки, можуть піддаватися корозії водою або водяним паром. Тому основними функціями інкапсуляції є запобігання механічних пошкоджень та корозії електричних контактів [12].



Рисунок 1.9 – Лицьова сторона фотоелектричного модуля

Існує різноманітність типів ФЕМ і їх структура зазвичай варіюється в залежності від типу сонячних елементів або призначення. Наприклад, об'ємні кремнієві ФЕМ, які служать для виробництва електроенергії та подачі її в енергосистему, зазвичай мають жорсткі скляні панелі на передній частині, у той час як аморфні кремнієві ФЕМ часто вкладаються в гнучкі конструкції.

Технології виробництва ФЕМ і матеріали постійно удосконалюються. Зусилля виробників та дослідників направлені на пошук нових підходів щодо збільшення ефективності фотоелектричних панелей, підвищення обсягу виробленої енергії з одиниці площі, покращення роботи при різних рівнях освітленості та температурних показників, а також збільшення стійкості до впливу чинників навколишнього середовища [13].

Термін служби об'ємних кремнієвих ФЕМ перевищує 20 років, що свідчить про надійність інкапсульованих модулів. Згідно зі стандартною гарантією, модуль зберігає 90% своєї номінальної потужності протягом перших 10 років та 80% своєї номінальної потужності протягом 25 років. У

разі банкрутства виробника фотомодулів, страхова компанія третьої сторони може гарантувати дійсність цих гарантій.

Більшість об'ємних кремнієвих ФЕМ, як показано на рисунку 1.10, складаються з прозорої верхньої поверхні, інкапсулятора, набору фотоелектричних комірок, тильної пластини та рамки навколо зовнішнього краю. В основному, верхня поверхня цих модулів виготовлена з скла, інкапсулятор виготовлений із етиленвінілацетату (EVA), а тильна поверхня виготовлена з полівінілфториду (PVF) - термопластичного фторполімерного матеріалу, який має високий рівень стійкості до атмосферних умов, міцність і низьку проникність для вологи й масла.

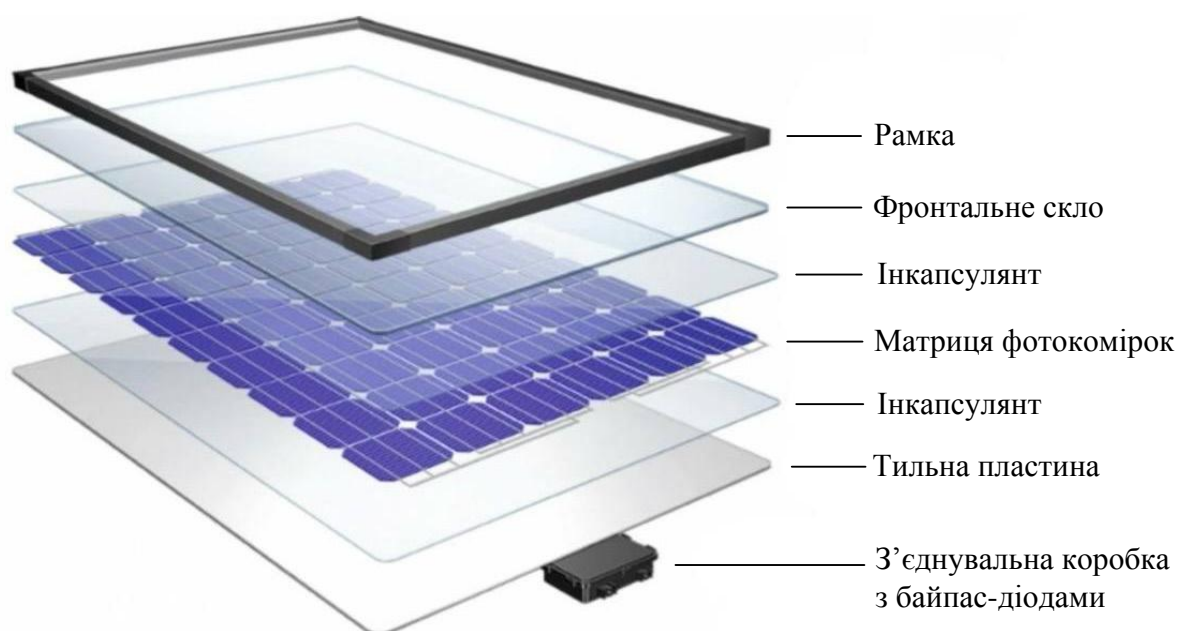


Рисунок 1.10 – Основні компоненти кремнієвого ФЕМ

Розглядаючи більш детально властивості матеріалів шарів, з яких складається типовий об'ємний кремнієвий ФЕМ, слід зазначити, що необхідно, щоб матеріал лицьової поверхні мав високий коефіцієнт пропускання світла в діапазоні довжин хвиль від 350 нм до 1200 нм. Крім того, коефіцієнт відбиття від лицьової поверхні повинен бути низьким. Відбиття сонячного випромінювання можна зменшити за допомогою

нанесення антивідбивного покриття на лицьову поверхню, проте дане покриття недостатньо міцне, щоб витримати умови, в яких експлуатуються більшість ФЕМ. Ще одним методом зменшення відбиття є створення текстури на поверхні, що надає їй шорсткості.

Крім властивостей відбиття та пропускання, матеріал лицьової поверхні повинен володіти також іншими характеристиками. Серед них необхідність бути непроникним для води, володіти високою ударостійкістю, стійкістю до впливу ультрафіолетового випромінювання на протязі тривалого періоду та мати низький термічний опір. Затримання води або водяної пари на ФЕМ може спричинити корозію металевих контактів та з'єднань, що в свою чергу суттєво скоротить термін служби модуля. Більшість модулів мають достатньо міцну передню поверхню та механічну жорсткість задньої поверхні для підтримки великої ваги модуля на кріпленнях. Матеріал для лицьової поверхні може бути вибраним з кількох варіантів, включаючи акрил, полімери та скло. Зазвичай використовується закалене скло з низьким вмістом заліза, оскільки воно є доступним за ціною, міцним, стійким, має високу прозорість, є непроникним для води та газів і має відмінні властивості самоочищення.

Інкапсулятор служить для створення зчеплення між фотокомірками, лицьовою поверхнею й тильною поверхнею модуля. Матеріал, який використовується для інкапсуляції, повинен мати стабільність при підвищеній температурі і стійкість до впливу ультрафіолетового випромінювання. Крім цього, він повинен бути оптично прозорим та мати низький тепловий опір для ефективного відводу тепла. Для цієї ролі найчастіше використовується етиленвінілацетат. EVA постачається у вигляді тонких листів, які вставляються між набором фотокомірок та лицьовою та тильною поверхнями. Потім цей "сендвіч" нагрівають до температури 150 °C, щоб полімеризувати EVA і з'єднати всі складові модуля разом.

Щільність упаковки фотокомірок впливає на вихідну потужність модуля, а також на його робочу температуру. Ця щільність залежить від

форми комірок, які використовуються: монокристалічні комірки можуть бути круглої або напівквадратної форми, у той час як полікристалічні комірки зазвичай мають квадратну форму. Саме квадратні комірки забезпечують високу щільність розміщення у модулі. Форма цих комірок, зазвичай, визначається технологією виробництва напівпровідникових пластин. Наприклад, монокристалічний кремній отримується шляхом кристалізації за методом Чохральського і спочатку має форму циліндричних заготовок, які потім розрізаються на круглі пластини. Для збільшення щільності розміщення, з цих циліндрів зазвичай вирізають краї та формують напівквадратні пластини комірок. У випадку полікристалічного матеріалу, він зразу відливається у тиглях з квадратною основою.

Тильна поверхня ФЕМ має володіти низьким тепловим опором і запобігати проникненню води або водяної пари. Зазвичай в більшості модулів для цього використовується тонкий полімерний лист, як правило, Tedlar. Однак існують ФЕМ, відомі як двосторонні модулі, призначені для прийому світла як з передньої, так і з задньої сторін ФЕМ. У випадку двосторонніх модулів обидві сторони повинні бути оптично прозорими.

Рамка або каркас є конструктивною складовою, яка використовується для окантовки модуля і, зазвичай, виготовляється з алюмінію. Конструкція каркаса повинна бути гладкою і не містити виступів, які можуть сприяти накопиченню води, пилу або інших речовин.

Кремнієвий ФЕМ складається з низки окремих комірок із послідовно-паралельним з'єднанням. Послідовне з'єднання (рисунок 1.11) використовується для підвищення напруги та потужності модуля [14].

У такому з'єднанні напруга від ФЕМ прямо пропорційна кількості послідовно з'єднаних комірок, а струм від ФЕМ залежить насамперед від розміру комірок. За AM1,5 і в оптимальних умовах нахилу щільність струму від комірки комерційного ФЕМ становить від 25 мА/см² до 38 мА/см². Монокристалічні фотокомірки часто мають розміри 15,6 × 15,6 см², що дає струм короткого замикання від комірок майже 6–9 А. Величини напруги

VMPP і VOC масштабуються відповідно до кількості послідовних з'єднаних комірок у серії, а струм ISC – відповідно кількості паралельних серій [12].

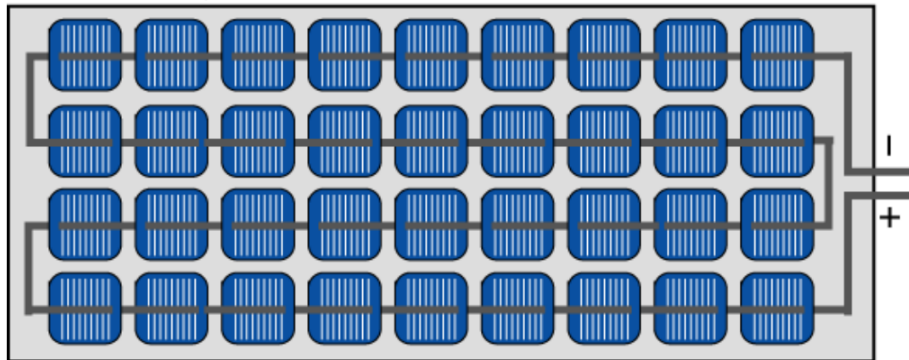


Рисунок 1.11 – Послідовне з'єднання фотоелектричних комірок у модулі

Якщо всі комірки модуля мають однакові електричні характеристики, і всі вони отримують однакову інсоляцію та температуру, то вони будуть працювати за однакового струму та напруги. В цьому випадку I-V крива ФЕМ має ту саму форму, що й окремі комірки за винятком того, що напруга та струм збільшуються лінійно пропорційно до s і p відповідно [12]. Напругу на навантаженні V та струм через навантаження I можна виразити через величини v_i , комірки як

$$V = vn_s, I = in_p \quad (1.1)$$

Еквівалентна схема заміщення ФЕМ виглядає, як показано на рисунку 1.12.

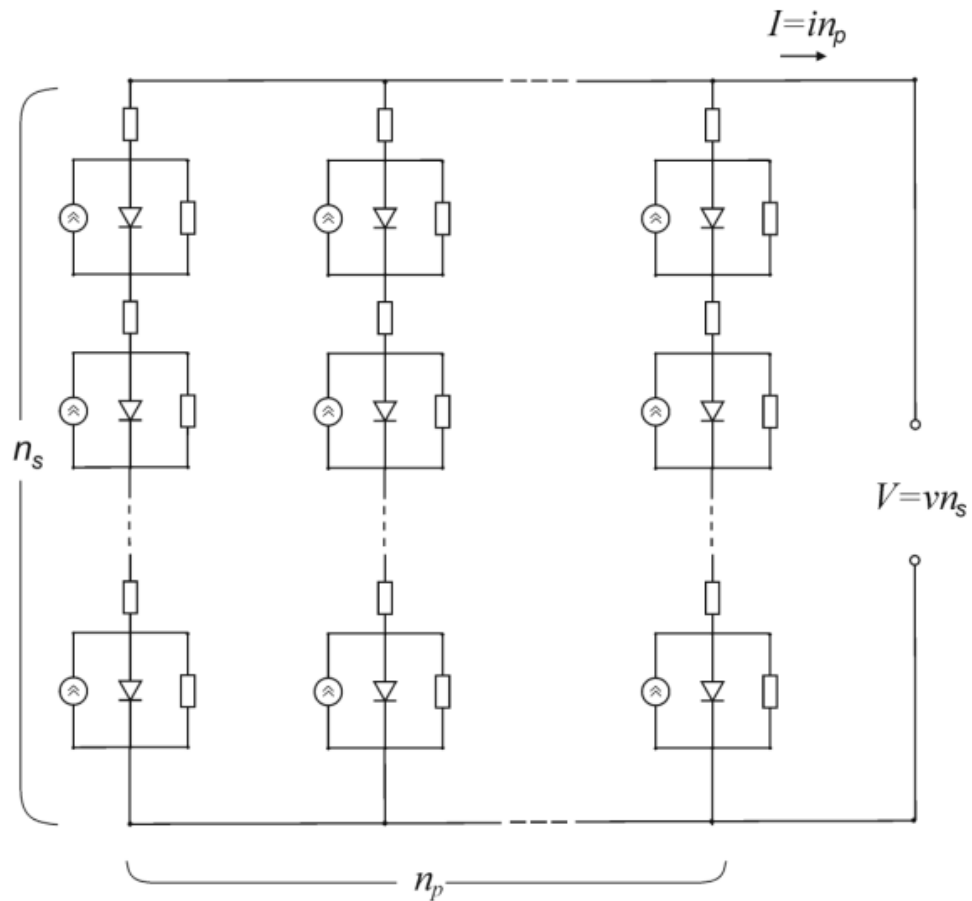


Рисунок 1.12 – Еквівалентна схема заміщення ФЕМ

Висновки до розділу 1

Досліджуючи особливості роботи фотоелектричних станцій у енергосистемі України спостерігається приріст частки електроенергії, згенерованої з ФЕС.

Інтеграція фотоелектричних станцій в електричні мережі несе за собою як і позитивні результати, так і ряд проблем. До переваг можна віднести екологічно чисте вироблення електроенергії, ефективне використання енергоресурсів, а також поліпшення надійності електропостачання, підтримку напруги та покращення якості електроенергії за умови розташування ФЕС у потрібному місці. Серед труднощів, які виникають при поширенні фотоелектричних станцій головним є нерівномірний графік генерування електроенергії, який призводить до ускладнення керуванням

режимами електричних мереж, ймовірної появи надлишкових потужностей і проблем з регулюванням частоти.

Наведено умови ефективного функціонування ФЕС. Розглянуто принцип роботи й будову основних складових фотоелектричної станції. Проведено аналіз видів сонячних елементів, їх переваг і недоліків. Досліджено конструкцію основного елемента ФЕС – фотоелектричного модуля та характеристики, яким він повинен відповідати. ФЕМ має володіти здатностями відбиття й пропускання, бути водонепроникним, володіти високою ударостійкістю, витримувати вплив ультрафіолетового випромінювання та мати низький термічний опір.

Нерівномірність вироблення електроенергії фотоелектричними станціями піддається впливу не лише метеорологічних умов, але й технічного стану їх обладнання. Тому точне прогнозування генерування ФЕС є неможливим без визначення їх технічного стану й урахування деградації модулів протягом періоду експлуатації.

2 ВИЯВЛЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

2.1 Методи та засоби знаходження деградації фотоелектричних модулів

Було проаналізовано дослідження, яке проводилось для ФЕС України та для фотоелектричної станції, яка розташована на даху електротехнічного факультету Західно-Чеського університету (Чеська Республіка (ЧР)) [15-16]. Станція було введена в експлуатацію в 2005 році. Дана станція складається зі 192 панелей (рисунок 2.1). Всі електричні і неелектричні параметри вимірюється з 10-хвилинним інтервалом. Кут нахилу панелей 45° . Тепловізійний контроль кожної панелі здійснювався 1 раз в рік планово.



Рисунок 2.1 – Досліджувана ФЕС в ЧР зовні

Одним з елементів ФЕС є інвертор. Ефективність інверторів, зазвичай, дуже висока, в основному завдяки їх конструкції, адже більшість з них працюють на силовій електроніці. Проте їхня ефективність залежить від навантаження, і вони досягають найкращих результатів при найбільшій потужності фотоелектричної системи. Багаторічні вимірювання показали, що інвертор залишатиметься у безвідмовному стані приблизно 8 років. Через це важливо частіше перевіряти, ремонтувати або замінювати інвертори. Заявлений термін служби ФЕС триває від 15 до 20 років, а інвертор є складовою частиною

з меншим терміном служби. Серед найпоширеніших типів несправностей виділяють несправності запобіжників, несправності мережі, що виникають через неякісність грозозахисту.

Якщо фотоелектрична система складається з декількох частин, потрібно використовувати з'єднувальну коробку. Фотоелектрична станція, що досліджувалась, складається з монокристалічних 192 панелей, типу Isofon I-150 розділених на 8 частин E1-E8, кожна частина містить 24 панелі, які розділені на три вітки з 8 модулями кожна.

У розподільній коробці знаходяться клеми підключення та запобіжники. Необхідно, щоб коробка з'єднання PV-масиву була виконана з класом захисту II й мала чітко розділені позитивні та негативні сторони всередині корпусу. Якщо з'єднувальна коробка розташована на відкритому повітрі, необхідно встановлювати захист IP 54 та стійкість до УФ. Запобіжники відгалуження захищають лінію від перевантаження в разі несправності. Він має бути придатним як для роботи на постійному струмі, так і для роботи зі змінним навантаженням. Розподільний щит розташований у тому ж приміщенні, що і інвертори. Розподільний щит містить електричні прилади, які використовуються для захисту, вимірювання, контролю електроустановок та лічильників електроенергії. Інші кабельні з'єднання з пристроями, наприклад вторинні шафи чи розетки, також містяться або в розподільному щитку або з'єднані з ним. Вони виготовлені з пластику або листової сталі. Дана розподільна шафа виготовлена зі ступенем захисту IP20, (проте у випадку зовнішнього використання або вологих приміщень потрібно обирати зі ступенем захисту IP67). Розподільний щит використовується для підключення обладнання до локальної мережі. Кабелі від фотоелектричної системи під'єднуються в розподільну коробку. Електричне підключення, виконане через розподільну коробку, відповідає усім технічним умовам, умовам підключення в мережу та чинним стандартам. Електричні з'єднувальні кабелі між окремими сонячними модулями та кабелями до з'єднувальної коробки або до інвертора

прокладені так, щоб запобігати можливим взаємним коротким замиканням і короткому замиканню на землю. Кабелі розташовані в спеціальній екранованій конструкції. Використано зовнішні кабелі з високою стійкістю до температури та ультрафіолетового випромінювання. Станція спроектована у такий спосіб, щоб максимально зменшити довжину ліній. Лінія підключення змінного струму з'єднує інвертор та мережі НН через лічильник електроенергії та захисні пристрої. У досліджуваній системі Си-кабелі типу СҮКУ використовуються для високострумівих з'єднань, а FTP-кабелі типу 4x2x0,5 - для слабкострумівих та передачі даних. Зовнішні кабелі прокладені на металевій кріпильній конструкції фотоелектричних панелей і розміщуються в кабельних лотках типу MARS. В будівлі кабелі прокладені в підвісних стелях, під штукатуркою та в ПВХ-смугах. Проте через певний період часу спостерігається пошкодження кабелів. ФЕС оснащена вимірювальним приладами, які дозволяють отримувати дані в процесі реального часу: основні метеорологічні фактори; глобальне сонячне опромінення; температуру ФЕМ; постійну, змінну напругу та струм; вихідну потужність (P, Q, S); коефіцієнт потужності; фазовий дисбаланс; спотворення гармонік (U, I) [15]. Під час вимірювання всі дані автоматично вивантажуються у файли в єдиному форматі, який можна обробити для поточного відображення на пристроях внутрішньої мережі університету. Перший вихідний інтерфейс використовується для підключення до комп'ютера. Другий вихідний інтерфейс підключений безпосередньо до блоку відображення, в якому вимірювана енергія множиться на кількість частин з ФЕМ (8х) і використовується для відображення величин – миттєвої потужності, енергії, що подається на добу, зменшення викидів CO₂.

З набутим досвідом експлуатації досліджуваних ФЕС в Україні та Чехії [6, 15] побудовано дерево пошкоджень для ФЕМ (рисунок 2.2) [17].

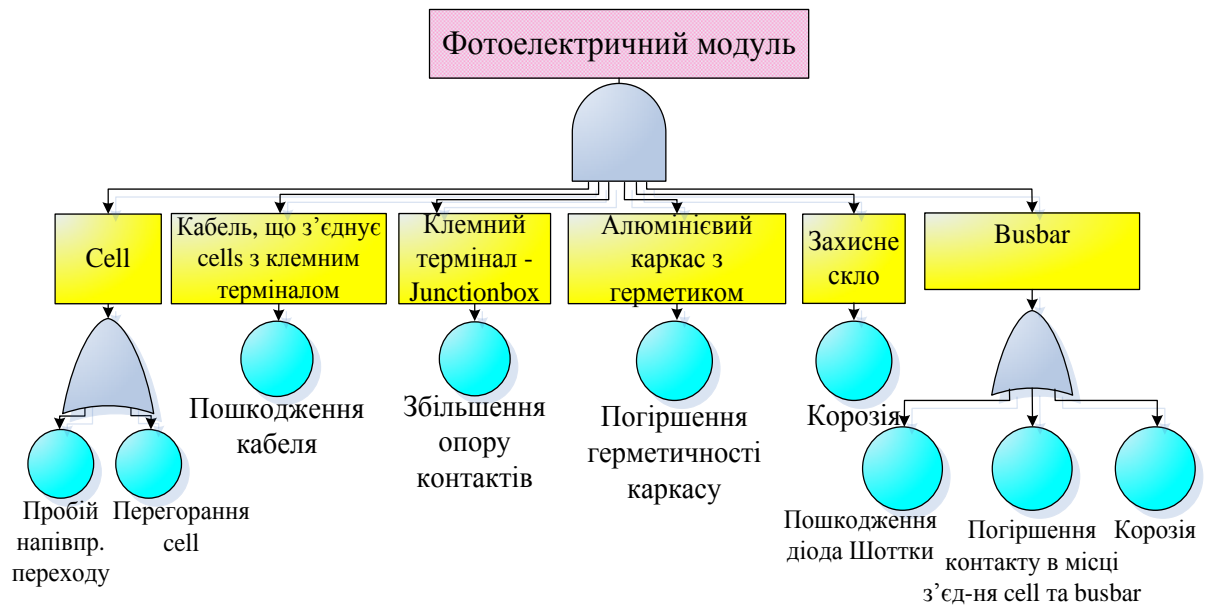


Рисунок 2.2 – Дерево пошкоджень фотоелектричного модуля

На протязі 15 річної експлуатації ФЕС періодично тестували за допомогою термокамери Flir Tk 355 та аналізатора вольт-амперних характеристик HT Solar IV-400. Вимірювання, проведені між 2004 і 2018 роками, не виявили жодних суттєвих аномалій, а первинна візуальна перевірка PV-масиву виявила початок деградаційних процесів [6].

У таблиці 2.1 коротко наведено щорічний прогрес деградації станції та річне виробництво електроенергії.

Таблиця 2.1 – Пошкодження ФЕС протягом року [15]

Рік	ФЕМ	Інвертори	Кабелі	Конструкція	Інші	Генерування електроенергії, %
2004	0	0	0	0	5	100
2005	0	0	0	0	0	101
2006	0	0	0	0	0	101
2007	0	0	0	0	1	102
2008	0	1	0	0	0	103
2009	0	0	0	0	0	101

Продовження таблиці 2.1

2010	0	0	0	0	0	103
2011	0	0	0	0	0	102
2012	0	0	0	0	0	101
2013	2	0	0	0	1	104
2014	2	0	0	1	0	100
2015	2	0	0	0	0	99
2016	2	0	0	0	2	99
2017	2	0	0	0	1	100
2018	2	0	0	0	1	99

За період досліджень спостерігались такі пошкодження: несправності інвертора відзначають лише на пошкодження запобіжників та несерйозні проблеми. 2 панелі несправні з 2013 року і мають одну дефектну комірку. Несправності в категорії «Інші» відповідають, як правило, проблемами з вимірювальною системою, за винятком однієї проблеми із захистом від блискавки в 2004 році.

У таблиці 2.2 наведені пошкодження, які були встановлені влітку 2019/2020 років ФЕМ. Цифри показують кількість пошкоджених панелей, а не кількість конкретних дефектів. Основною причиною пошкодження ФЕМ стала деградація cells, тому загальна кількість дефектних панелей дорівнює 116.

Таблиця 2.2 – Пошкодження ФЕМ

Вид пошкодження	Кількість		Причина
	-	%	
повітряне забруднення	128	39,7	пиловий шар та сліди деградації
деградація cells	117	27,2	зміна кольору
hotspot (гарячі точки)	37	8,5	локальний перегрів

Вид пошкодження	Кількість		Причина
	-	%	
мікротріщини	36	8,4	пошкодження
пошкодження металу	34	8,1	дефекти провідників
пошкодження шини (bus)	19	4,4	корозія пайки
«сліди равликів»	18	4,1	деградація матеріалу
низька прозорість	15	3,7	Пошкодження скла, (ethylene-vinyl acetate – EVA degradation) розпад етилен-вінілацетату
пожовтіння	9	2,1	EVA деградація
локальні забруднення	8	1,9	екскременти птахів
пошкодження з'єднувальної коробки	5	1,2	корозія і деградація cells
пошкодження з'єднань	3	0,9	перегрівання, корозія
волога в модулях	1	0,4	розшарування
пошкодження захисної плівки та скла	1	0,4	механічна дія

Починаючи з 2004 року щороку аналізуються всі 192 панелі [15]. Для первинної перевірки ФЕМ використовувалась Thermocamera Flir Tk 355. При детальній перевірці ФЕМ було виявлено 2 дефектні панелі. При послідовних випробувань до 2018 року не було виявлено прогресуючої деградації. Зразок термограми першої дефективної панелі (№ 84) за 2013 рік показано на рисунку 2.3. Дефектний ФЕМ розміщений в стрінгу № 4. Термограми за 2014 - 2018 роки не зазнавали змін.

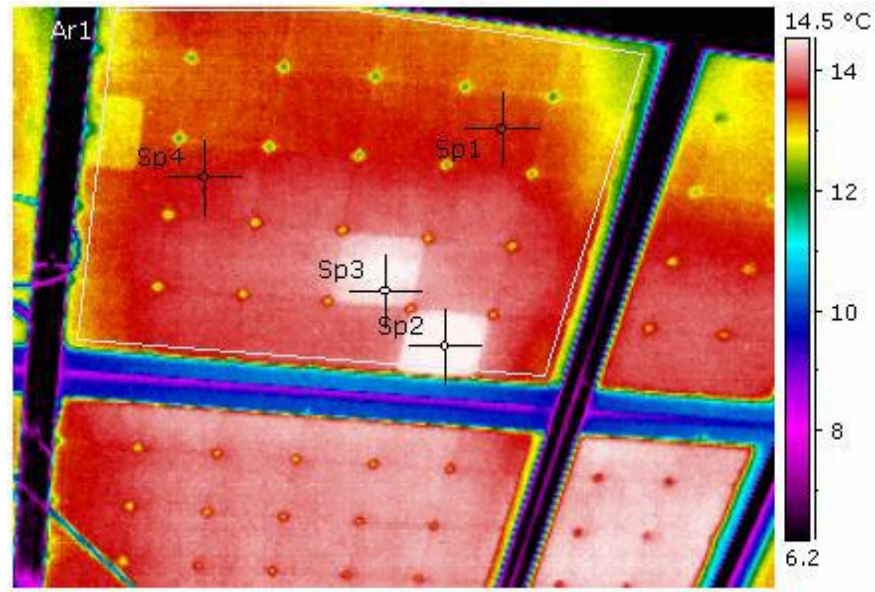


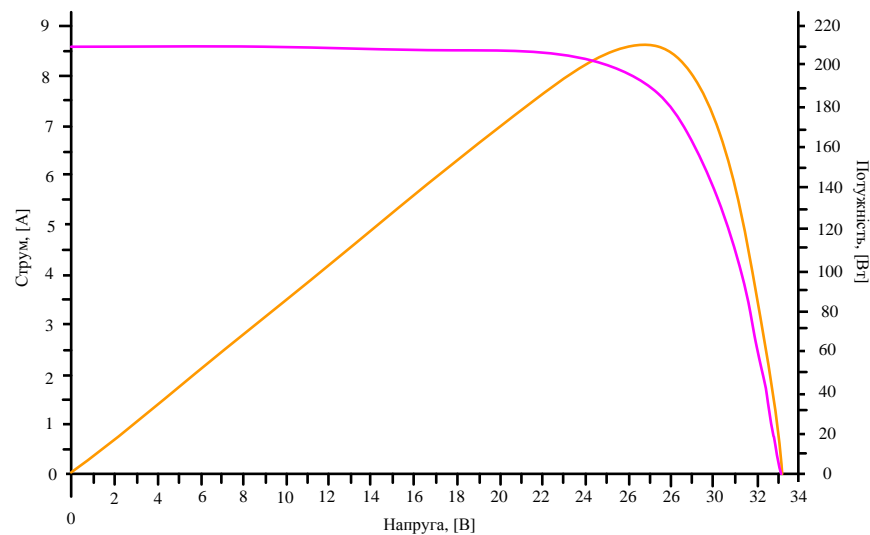
Рисунок 2.3 – Термограма панелі № 84

Кожну панель від'єднували від стрінгу й індивідуально вимірювали її характеристики за допомогою аналізатора характеристик VA Solar IV-400. Вольт-амперна характеристика непошкодженої панелі наведена на рисунку 2.4 а) (панель № 1, 2013). Саме в цьому прикладі були виявлені перші несправності ФЕМ фотоелектричної станції, що досліджувалась. Порівняння вольт-амперних характеристик непошкодженої та пошкоджених ФЕМ продемонстровано на рисунку 2.4 б). Результати вимірювань занесені до таблиці 2.3 [15].

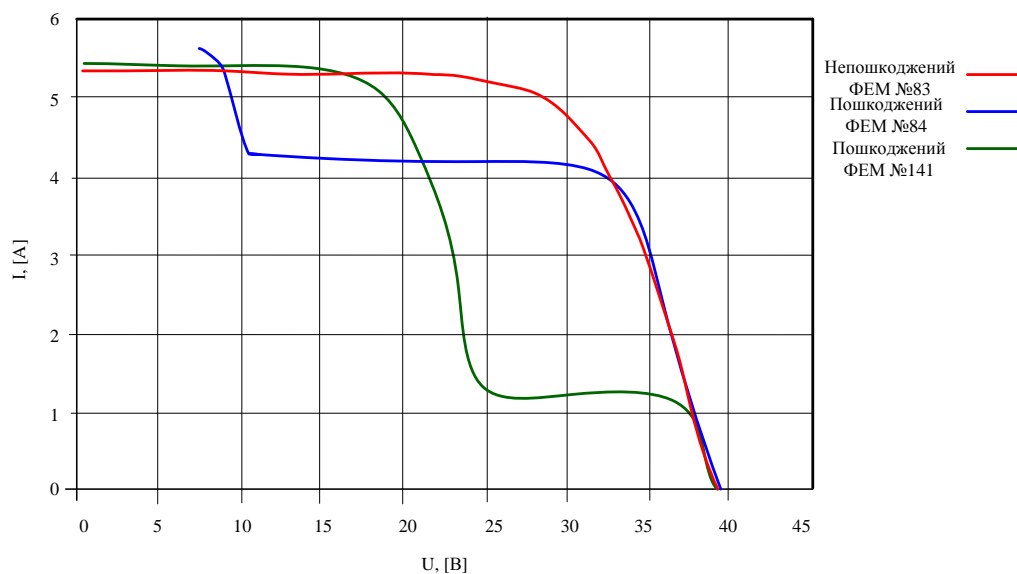
Таблиця 2.3 – Результати вимірювання параметрів непошкодженого ФЕМ № 83 та пошкоджених модулів № 84 і № 141

№ ФЕМ	P_m , [Вт]	U_{oc} , [В]	U_m , [В]	I_m , [А]	I_{sc} , [А]	I , [Вт·м ⁻²]	T , [°C]	FF, [%]
83	142,98	38,96	29,44	4,86	5,34	731,00	17,4	69
84	132,97	39,10	32,44	4,10	5,61	786,00	19,00	61
141	94,86	39,01	19,15	4,95	5,42	745,00	19,40	45

Де P_m , [Вт] – максимальна потужність; U_{oc} , [В] – напруга холостого ходу; U_m , [В] – напруга при якій ФЕМ генерує максимальну потужність; I_m , [А] – струм при якому ФЕМ генерує максимальну потужність; I_{sc} , [А] – струм короткого замикання; I – сонячне опромінення, [Вт·м⁻²]; T , [°С] – температура навколишнього середовища; Фактор заповнення (FF, %) – показник якості ФЕМ. Він визначається шляхом порівняння максимальної потужності з теоретичною потужністю, яка виводилася б як при напрузі розімкнутого контуру, так і при струмі короткого замикання. «Коефіцієнт заповнення», відомий під аббревіатурою «FF», є параметром, який разом з V_{oc} та I_{sc} визначає максимальну потужність сонячної батареї. FF визначається як відношення максимальної потужності сонячної батареї до добутку V_{oc} та I_{sc} [15].



а)



б)

Рисунок 2.4 – ВАХ: а) ФЕМ №1; б) ВАХ ФЕМ №83, №84, №141.

Червона крива відповідає непошкодженій панелі (ФЕМ № 83), зелена і синя криві – пошкодженим панелям відповідно (ФЕМ №84 і ФЕМ №141).

На сьогодні діагностування ФЕС здійснюється за методикою, яка складається з наступних етапів [18]:

1. Політ квадрокоптером з вбудованою тепловізійною камерою над фотоелектричними модулями та візуальний пошук температурних відхилень. При обстеженні фотоелектричних модулів індикаторною тепловізійною камерою на базі квадрокоптера є можливою ідентифікація температурних відхилень та фіксація місця їх розташування (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Визначення несправностей на ФЕМ за допомогою квадрокоптеру

2. Обстеження модулів зі зворотної сторони за допомогою тепловізора для фіксації температурних відхилень та детального аналізу температур, що дозволяє уникнути відблисків (рисунок 2.6).

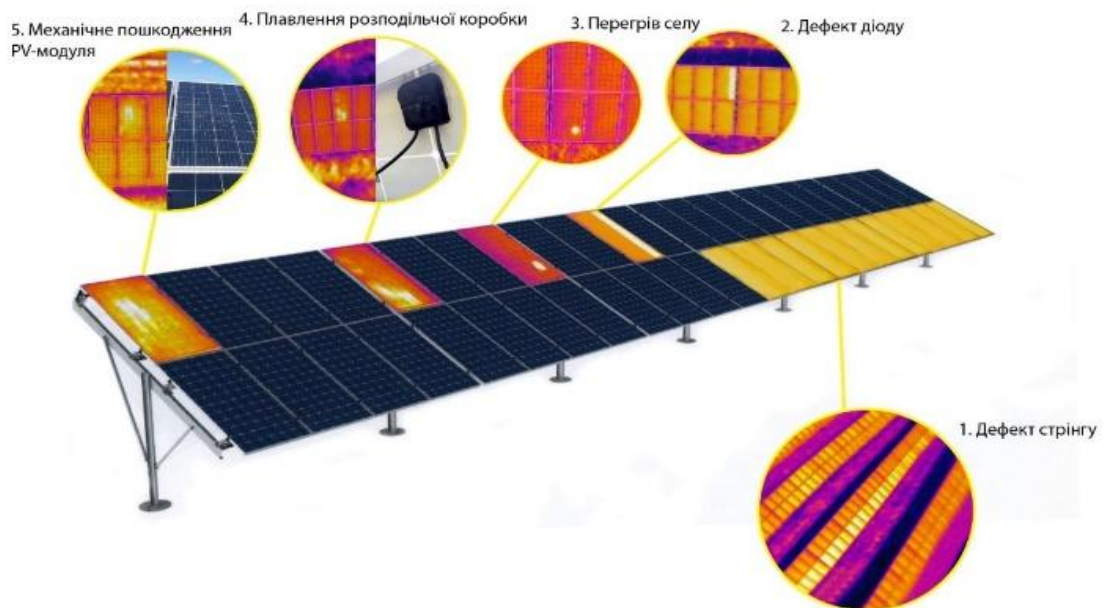


Рисунок 2.6 – Тепловізійне обстеження ФЕМ зі зворотної сторони
3. Зняття ВАХ для підтвердження дефекту.

4. При обстеженні фотоелектричних модулів різних виробників завжди ведеться статистика дефектності модулів. Фотоелектричні модулі різних виробників мають відмінні технології виробництва та особливості будови.

2.2 Найпоширеніші дефекти фотоелектричних модулів

До головних дефектів фотоелектричних модулів, що експлуатуються в електричних мережах енергосистем відносяться:

- розшарування та деградації cells (темні cells);
- дефект «Hotspot», пошкодження задньої EVA або пошкодження фронтального скла;
- мікро-тріщини;
- «сліди равликів»;
- забруднення.

Через дефекти в ФЕМ спостерігається зменшення виробленої електроенергії. Не всі виявлені пошкодження однаково впливають на технічний стан ФЕМ. Дефект може в майбутньому викликати серйозні проблеми, навіть, якщо наразі він є незначним. Для прикладу вплив незначного дефекту на ефективність роботи ФЕМ наведено на рисунку 2.7 шляхом порівняння двох ВАХ для непошкодженого та пошкодженого ФЕМ (дефект – «слід равлика», який охоплює приблизно 2 % площі ФЕМ).

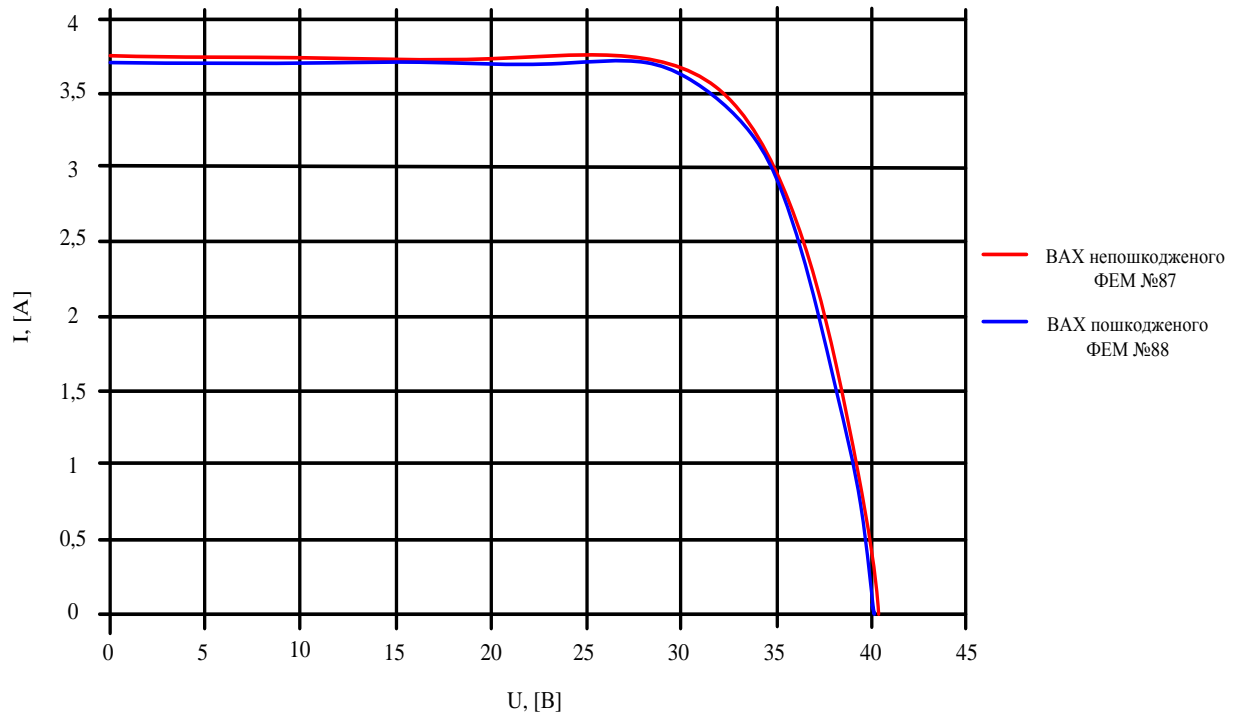


Рисунок 2.7 – ВАХ ФЕМ з дефектом «слід равлика» та місцеве забруднення

Інші несправності (hotspot, мікро-тріщини, дефект металізації і т. д.) мають більш значний вплив на ВАХ і становлять 29 % випадків на ФЕМ, які досліджувалися.

На рисунку 2.8 наведені ВАХ ФЕМ з виявленими дефектами і ВАХ непошкодженого ФЕМ (крива №1). Криві 2 та 3 показують ВАХ ФЕМ з дефектом «гарячі точки» (з дефектом одного cell), а криві 4 і 5 демонструють ВАХ ФЕМ з тим же дефектом, але з пошкодженими 2 cells, які з'єднані в незалежні стрінги. Криві 6 і 7 – ВАХ ФЕМ з дефектом мікро-тріщини в формі зірки, крива 8 – ВАХ ФЕМ з дефектом лінійна мікро-тріщина. Криві 9 і 10 ілюструють ВАХ ФЕМ з дефектом – з'єднання cells в окремих стрінгах [15].

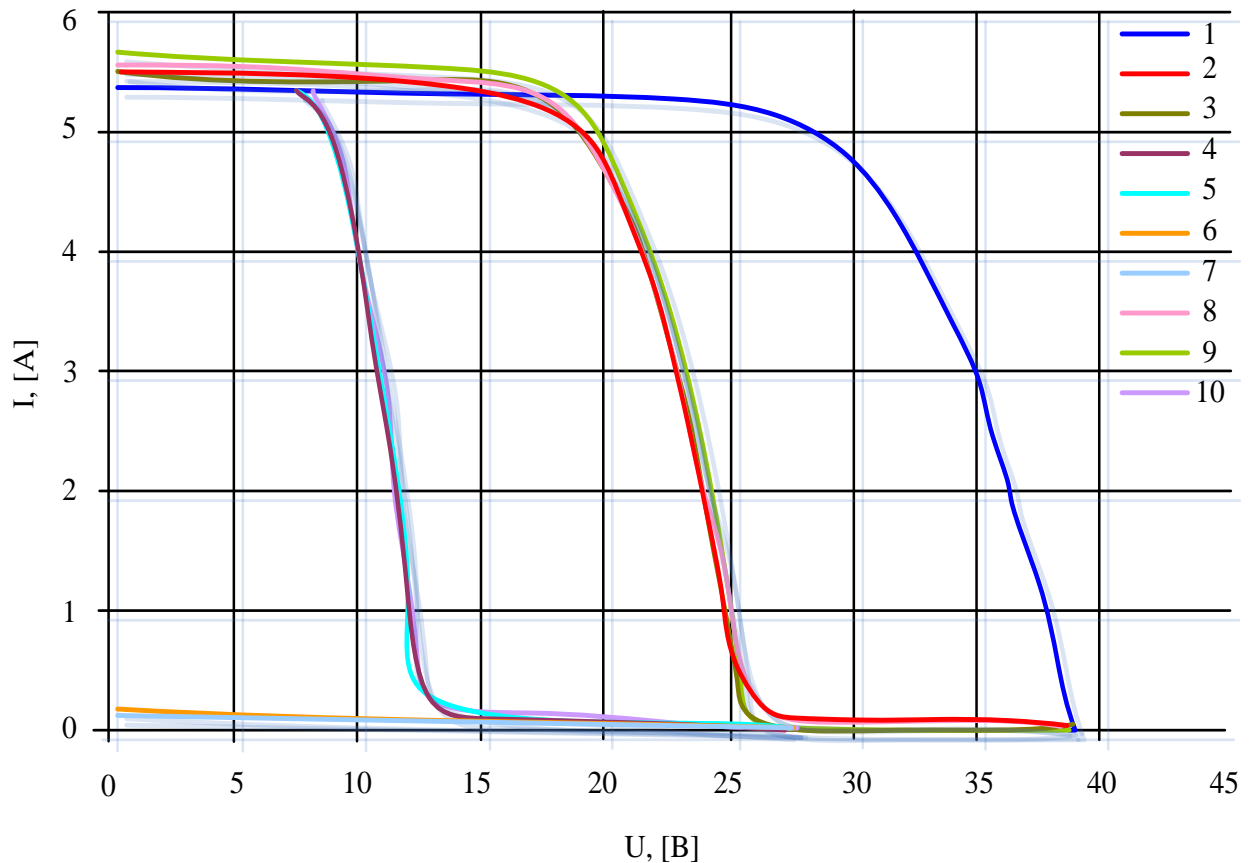


Рисунок 2.8 – ВАХ непошкодженого ФЕМ та ВАХ пошкоджених ФЕМ з різними дефектами

Класифікація дефектів ФЕМ [6, 15] :

1. Дефект стрінгу – повністю або частково непрацюючий електричний контур, який складається з послідовно з'єднаних фотоелектричних модулів. Основними причинами виходу стрінгів з ладу може бути пошкодження запобіжників, наявність замикань на землю або пошкодження конекторів, що з'єднують фотоелектричні модулі.

2. Дефект діоду – шунтуючий діод спрацьовує; втрачається близько 33% від потужності модуля. Основні причини спрацювання шунтуючого діоду: часткове або повне затінення фотоелектричного модуля; пошкоджені контакти, якими підключаються діоди.

3. Перегрів селу (Hotspot) – відбувається замикання на шині окремої ділянки модуля. При цьому увесь струм та напруга зосереджуються в одній

комірці, після чого може відбутись навіть загоряння фотоелектричного модуля. Однією з причин може бути розгерметизація модуля.

4. Плавлення розподільчої коробки – може виникати через неправильне підключення стрінгів або модулів, а також внаслідок дефекту діоду; як правило, спостерігається підвищена температура розподільчих коробок і, як наслідок, їх плавлення.

5. Механічне пошкодження PV-модуля – пошкодження захисного скла, що призводить до розгерметизації модуля. Рекомендується провести заміну таких модулів, щоб уникнути коротких замикань всередині модуля та на стрінгах взагалом.

Аналізуючи пошкоджуваності, для різних ФЕМ можна виділити одностипні дефекти: пошкодження cell (пробій напівпровідникового переходу, перегорання cell); пошкодження busbar (погіршення контакту в місці з'єднання cell з busbar та корозія провідного матеріалу); пошкодження клемного терміналу – junctionbox; пошкодження алюмінієвого каркасу (корозія алюмінію, вигинання каркасу, пересихання та розтріскування герметика та ущільнень); пошкодження захисного скла (розтріскування, абразивний вплив пилу у повітрі на прозорість скла) [19].

Старіння скла починається майже відразу ж після його виготовлення через вплив атмосфери. Вплив на поверхню скла поверхневих газів повітря, опади «кислих» дощів, що приводять до інтенсивного старіння скла, що неминуче призводить до зміни його властивостей, таких як прозорості та міцності.

На практиці ж волога, яка конденсується та тривало втримується на поверхні скла, інтенсифікує процес вилугування. Внаслідок цього відбувається руйнування кремній-кисневих зв'язків, що викликає збільшення пористості поверхні скла і ще більш активної її взаємодії з атмосферою. У кінцевому підсумку даний процес стає незворотним.

До таблиці 2.4 занесені основні пошкодження елементів ФЕМ [15].

Таблиця 2.4 – Пошкодження елементів ФЕМ

Елемент ФЕМ	Вид пошкодження	Результат	Параметр*		Пошкоджуваність, од.; в.о.; %**
cell	пробій напівпровідникового переходу	понад нормоване зменшення опору фотодіода в зворотному напрямку – зменшення опору села	Опір фотодіода, Ом	k ₁ , в.о.	101 од.; 0,034 в.о.; 3,36%
	перегорання селу	обрив з'єднувальних провідників (плоскої шини busbar), які з'єднують cell в ФЕМ	Опір проводів, Ом		
busbar	погіршення контакту в місці з'єднання cell та busbar	зростання температури в місці контакту та зменшення струму	Температура, °C Струм, А	k ₂ , в.о.	43 од.; 0,014 в.о.; 1,43%
	корозія	зменшення струму, нагрівання busbar	Струм, А		
	пошкодження діода Шоттки (пробій)	нагрів	Температура, °C Струм, А		
клемний термінал – junctionbox	збільшення опору контактів	нагрів	Температура, °C Струм, А	k ₃ , в.о.	2504 од.; 0,833 в.о.; 83,3%

Елемент ФЕМ	Вид пошкодження	Результат	Параметр*		Пошкодженість, од.; в.о.; %**
алюмінієвий каркас з герметиком	погіршення герметичності каркасу	нагрів, волога в середині ФЕМ	Температура, °С Струм, А	k ₄ , в.о.	54 од.; 0,018 в.о.; 1,8%
захисне скло	погіршення герметичності каркасу	нагрів, волога в середині ФЕМ	Температура, °С Струм, А	k ₅ , в.о.	80 од.; 0,027 в.о.; 2,66%
кабель, що з'єднує cells з клемним терміналом	пошкодження кабелю	ізоляція та опір коннектора	Опір ізоляції, МОм Температура, °С	k ₆ , в.о.	225 од.; 0,075 в.о.; 7,48%

Висновки до розділу 2

В даному розділі досліджено принципи виявлення деградації фотоелектричних модулів та різновиди їхніх дефектів.

На сучасному етапі діагностики фотоелектричних станцій важливо використовувати комплексний підхід, що включає в себе ряд етапів. Зокрема, застосування квадрокоптера з вбудованою тепловізійною камерою для пошуку температурних відхилень та обстеження модулів грає важливу роль у виявленні пошкоджень. Для підтвердження дефектів проводяться зняття вольт-амперних характеристик.

Аналізуючи статистику дефектів і дерево пошкоджень ФЕМ, можна виділити найпоширеніші дефекти, до яких відносяться розшарування та деградації cells, «гарячі точки», «сліди равликів», забруднення, пошкодження з'єднувальної коробки, пошкодження скла та захисної плівки. Ці дефекти можуть призводити до зменшення виробленої електроенергії та по-різному впливають на технічний стан модулів. Здійснено порівняння ВАХ різних дефектів ФЕМ.

Отже, детальний аналіз і систематичне виявлення дефектів важливі для забезпечення ефективності функціонування фотоелектричних станцій. Для уникнення фінансових покарань, а також стабільної і прогнозованої роботи ФЕС необхідно визначати їх технічний стан та враховувати різні темпи деградації для різних ФЕМ.

3 ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОДУЛЯ

3.1 Знаходження коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ

Через те що пошкодження кожного вузла ФЕМ, занесеного до таблиці 2.4, призводить до пошкодження всього модуля, то коефіцієнт загального залишкового ресурсу визначається наступним виразом [20-21]:

$$k_{pec} = \prod_{\tau=1}^v k_{\tau}^{p_{\tau}}, \quad (3.1)$$

де k_{τ} – коефіцієнт залишкового ресурсу ФЕМ по τ -му діагностичному параметру (приймаємо, що кожний керований діагностичний параметр, такий як струм, напруга, температура, опір ізоляції й інші мають вплив на залишковий ресурс елементів модулів за мультиплікативним виразом (3.1), а кожний з діагностичних параметрів $k_1 - k_6$ впливає на коефіцієнт загального залишкового ресурсу всього ФЕМ), τ – τ -тий діагностичний параметр, v – число діагностичних параметрів згідно з кількістю вузлів, p_{τ} – ймовірність коливань значень контрольованого параметра від нормованого гранично допустимого значення цього параметра:

$$p_{\tau} = \frac{y_{\tau}}{m_2}, \quad (3.2)$$

де y_{τ} – число відхилень контрольованого параметра від нормованого гранично допустимого значення даного параметра, що були знайдені шляхом контролю τ -го діагностичного параметра у загальній кількості знайдених відхилень контрольованих параметрів від нормованого гранично

допустимого значення, m_2 – загальне число виявлених відхилень контрольованих діагностичних параметрів від їх нормованих гранично допустимих значень.

На рисунку 3.1 показана структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ.

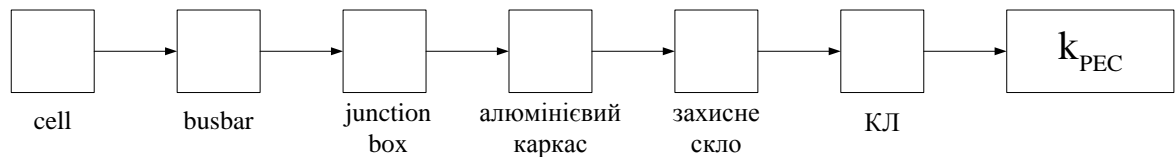


Рисунок 3.1 – Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ

Згідно з виразом (3.1) коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ обчислюється за виразом:

$$k_{\text{заг.рес}} = k_1^{P_{k1}} \cdot k_2^{P_{k2}} \cdot k_3^{P_{k3}} \cdot k_4^{P_{k4}} \cdot k_5^{P_{k5}} \cdot k_6^{P_{k6}}, \quad (3.3)$$

де $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ – відомі в момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу за відповідними діагностичними параметрами, $p_{k1}, p_{k2}, p_{k3}, p_{k4}, p_{k5}, p_{k6}$ – ймовірності пошкоджень вузлів ФЕМ, знайдених за допомогою контролю діагностичних параметрів з врахуванням загального числа пошкоджень.

Для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ використовувались параметри, за кожним з яких можна отримати висновок про стан ФЕМ, але ніякий з цих параметрів не в загальному описує технічний стан, він лише показує певні зміни технічного стану ФЕМ. На даному ступені розвитку сьогочасного комп'ютерного забезпечення застосування для вирішення поставленого завдання методів теорії нечітких множин не являється складним завданням. Це дозволяє брати до уваги значення різних діагностичних параметрів при діагностуванні ФЕМ і

створювати базу правил їх взаємодії. Використовуючи MATLAB створена модель коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ. Для цієї мети створено й скореговано вибірку навчальних даних, за якими отримано аналітичну залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від діагностичних параметрів у вигляді поліному. Дану залежність можна використати у програмному забезпеченні сучасних мікропроцесорних пристроїв діагностування ФЕМ.

Формування початкових навчальних даних було у такий спосіб: для шести вхідних параметрів моделі, що змінювались випадково від 0 до 1, було сформульовано коефіцієнт загального залишкового ресурсу фотоелектричного модуля. Для легшого керування даними та зменшення похибки навчання моделі, спрощення поточних розрахунків у MATLAB початкові параметри моделі спрощувались до відносних одиниць їх відхилення від норми. Шість вхідних параметрів моделі – коефіцієнти залишкового ресурсу деталей та вузлів ФЕМ, що залежать від поточних значень десяти діагностичних параметрів. Число параметрів може бути більшою [17]. Фрагмент навчальної вибірки занесений до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Фрагмент результатів розрахунків коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ

$k_1, \text{в.о.}$	$k_2, \text{в.о.}$	$k_3, \text{в.о.}$	$k_4, \text{в.о.}$	$k_5, \text{в.о.}$	$k_6, \text{в.о.}$	$k_{\text{ресФЕМ}}, \text{в.о.}$
0,01	0,099	0,01	0,099	0,01	0,099	0,013431
0,02	0,098	0,02	0,098	0,02	0,098	0,022028
...
0,93	0,93	0,007	0,93	0,93	0,93	0,245720543

З наміром наближення параметрів математичної моделі з реальними умовами експлуатації потрібно опитати фахівців, які експлуатують, діагностують і ремонтують ФЕМ. Отриману від цих фахівців інформацію враховано під час створення тестової вибірки даних.

Похибка навчання нейро-нечіткої моделі за навчальною вибіркою даних становила $\delta_n=1,7\%$ (0,017 в.о.). Отже нульове значення коефіцієнту залишкового ресурсу за будь-яким з цих діагностичних параметрів зменшує значення загального залишкового ресурсу модуля до нуля.

До повної таблиці 3.1 входять 534 розглянутих варіантів вибірок діагностичних параметрів і відповідних їм значень загального залишкового ресурсу ФЕМ. Дані, відкориговані експертами були використані як навчальні дані під час моделювання в системі MATLAB. Для цього застосовувався пакет Fuzzy Logic Toolbox. Завдяки редактору ANFIS Editor (Edit – редактор, Adaptive Network of Fuzzy Inference of the System – адаптивна мережа системи нечіткого висновку) з використанням гібридного навчального алгоритму та за допомогою алгоритму нечіткого висновку Сугено було одержано нейро-нечітку модель коефіцієнта залишкового ресурсу модуля (з використанням методу субкластеризації) [15].

Завантаження даних в ANFIS редакторі MATLAB показано на рисунку 3.2.

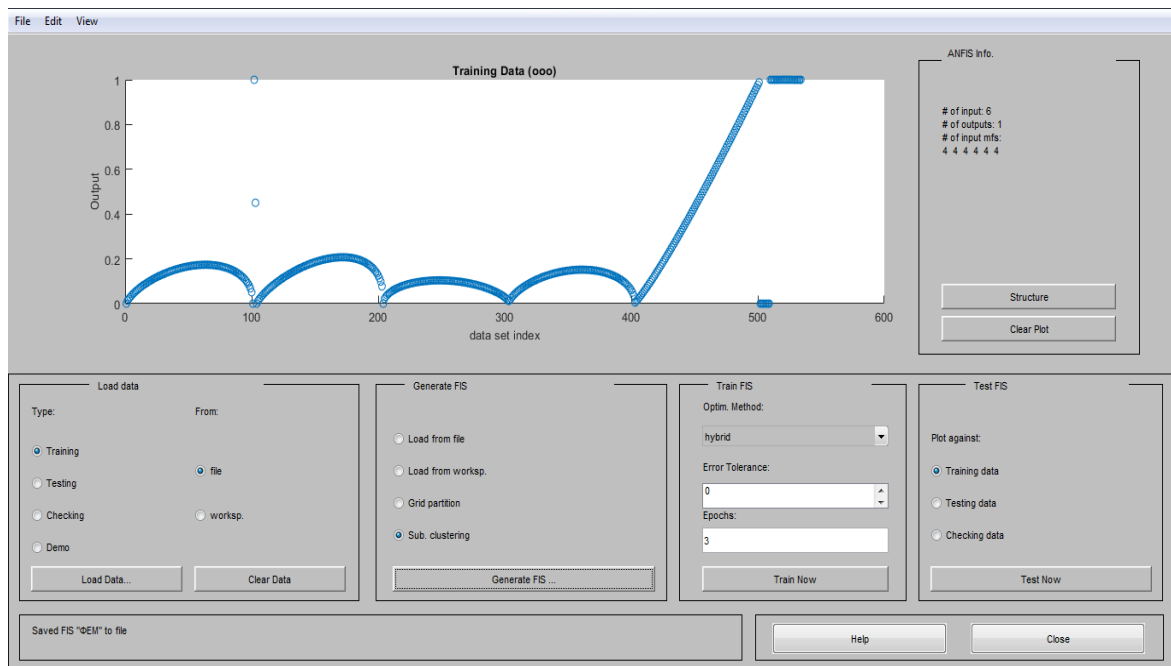


Рисунок 3.2 – Завантаження даних в ANFIS редакторі MATLAB
Структура здобутої нейро-мережі показана на рисунку 3.3.

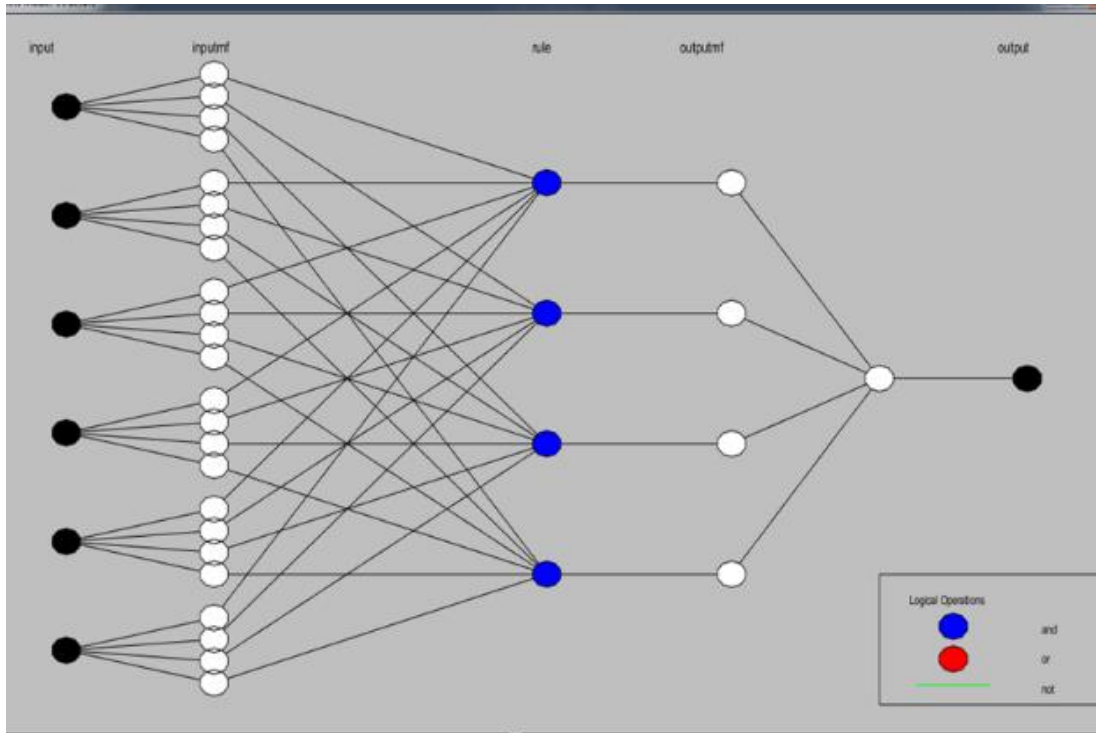


Рисунок 3.3 – Отримана структура нейро-мережі

У кожній вхідній змінній нейро-моделі застосовувались лінгвістичні терми з гаусовими функціями належності у кількості чотирьох, що були вибрані за критерієм мінімальної похибки навчання моделі:

$$k_{\text{pec.i1}} = f(x_{i1}; \sigma_{i1}; c_{i1}) = e^{-\frac{(x_{i1} - c_{i1})^2}{2\sigma_{i1}^2}}, \quad (3.4)$$

де σ_{i1} і c_{i1} – числові параметри, σ_{i1}^2 у теорії ймовірності йменується дисперсією розподілу, а другий параметр c_{i1} називається математичним сподіванням, i_1 – вхідний параметр нейро-нечіткої моделі, що відповідає діагностичному параметру, x_{i1} – число i_1 – го вхідного параметра моделі: $x_1=k_1$; $x_2=k_2$; $x_3=k_3$; $x_4=k_4$; $x_5=k_5$; $x_6=k_6$.

В таких термах, як: «нормальне» (стан ФЕМ – справний) величина діагностичного параметра – відповідно його коефіцієнт залишкового

ресурсу (КЗР). Величина даних коефіцієнтів змінюються від 1 в.о. (ФЕМ справна) до 0 в.о. (ФЕМ справний). Величина КЗР об'єднані в множини: нормальні значення діагностичних параметрів (КЗР $\in 1..0.76$), стан модуля з невеликими відхиленнями діагностичних параметрів (КЗР $\in 0.75..0.51$), передаварійний (КЗР $\in 0.5..0.26$) – з передаварійними відхиленнями діагностичних параметрів, аварійний (КЗР $\in 0.26..0$) – з аварійними відхиленнями діагностичних параметрів [15].

Щоб визначити коефіцієнт загальнозалишкового ресурсу слід скористатися нечіткою нелінійною авторегресійною моделлю коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ.

Дана модель встановлює нечітке нелінійне перетворення поміж значеннями коефіцієнтів залишкового ресурсу за діагностичними параметрами та загальним коефіцієнтом залишкового ресурсу ФЕМ:

$$k_{ресФЕМ} = F(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6) , \quad (3.5)$$

де F – нечітке функціональне перетворення.

Математичною моделлю коефіцієнта загального залишкового ресурсу являється система логічних рівнянь:

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{ЯКЩО } k_1 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_2 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_3 \in \text{"нормальне"} \\
 \text{ТА } k_4 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_5 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_6 \in \text{"нормальне"} \\
 \text{ТО } k_{\text{ресФЕМ}} = a_{11} \cdot k_1 + a_{12} \cdot k_2 + a_{13} \cdot k_3 + a_{14} \cdot k_4 + a_{15} \cdot k_5 + a_{16} \cdot k_6 \\
 \text{ЯКЩО } k_1 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_2 \in \text{"незначне відхилення"} \\
 \text{ТА } k_3 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_4 \in \text{"незначне відхилення"} \\
 \text{ТА } k_5 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_6 \in \text{"незначне відхилення"} \\
 \text{ТО } k_{\text{ресФЕМ}} = a_{21} \cdot k_1 + a_{22} \cdot k_2 + a_{23} \cdot k_3 + a_{24} \cdot k_4 + a_{25} \cdot k_5 + a_{26} \cdot k_6 \\
 \text{ЯКЩО } k_1 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_2 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_3 \in \text{"передаварійне"} \\
 \text{ТА } k_4 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_5 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_6 \in \text{"передаварійне"} \\
 \text{ТО } k_{\text{ресФЕМ}} = a_{31} \cdot k_1 + a_{32} \cdot k_2 + a_{33} \cdot k_3 + a_{34} \cdot k_4 + a_{35} \cdot k_5 + a_{36} \cdot k_6 \\
 \text{ЯКЩО } k_1 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_2 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_3 \in \text{"аварійне"} \\
 \text{ТА } k_4 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_5 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_6 \in \text{"аварійне"} \\
 \text{ТО } k_{\text{ресФЕМ}} = a_{41} \cdot k_1 + a_{42} \cdot k_2 + a_{43} \cdot k_3 + a_{44} \cdot k_4 + a_{45} \cdot k_5 + a_{46} \cdot k_6 \\
 \dots
 \end{array} \right\} \quad (3.6)$$

Вихом моделі $k_{\text{рес.ФЕМ}}$ є зрівноважена сума висновків бази правил, що записані у вигляді системи логічних рівнянь.

$$k_{\text{ресФЕМ}} = \sum_{j_2=1}^{m_3} w_{j_2} \left(a_{j_2 1} \cdot k_1 + a_{j_2 2} \cdot k_2 + a_{j_2 3} \cdot k_3 + a_{j_2 4} \cdot k_4 + a_{j_2 5} \cdot k_5 + a_{j_2 6} \cdot k_6 + c_{j_2} \right) \quad (3.7)$$

де $0 \leq w_{j_2} \leq 1$ – ступінь виконання (вага) j_2 -го правила, що визначається відповідністю реальних видозмін діагностичних параметрів модуля, які відображені у j_2 -му правилі. Налаштування моделі являє собою визначення параметрів функцій належності й рівнянь висновку.

Для об'єднання налаштування та адаптації розробленої структури моделі до реальних параметрів конкретної ФЕМ модель виконується у вигляді адаптивної нейро-нечіткої багатошарової мережі прямого розповсюдження ANFIS. ANFIS – це найпростіша мережа прямого розповсюдження, що містить адаптивні вузли. При використанні правил навчання, параметри цих вузлів регулюються таким чином, щоб

мінімізувати похибку між реальним виходом моделі $k_{\text{рес.ФЕМ}}$ та реальним коефіцієнтом загального залишкового ресурсу $k_{\text{ресФЕМ. ФЕМ}}$:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{k_3=0}^{N_1-1} (k_{\text{рес.ФЕМ } k_3} - k_{\text{заг.ФЕМ } k_3})^2} \rightarrow \min, \quad (3.8)$$

де N_1 – рядки в навчальній вибірці, k_3 – номер рядка у навчальній вибірці, беручи початок з рядка із порядковим номером «0». Застосовується гібридний навчальний алгоритм, у якому кожна епоха складається з прямого та зворотного оптимізаційних розрахунків.

Для скорочення періоду навчання нейро-нечіткої моделі в системі комп'ютерної математики MATLAB користуються методом субкластеризації, тобто об'єднанням об'єктів у групи за підставою ідентичних ознак для об'єктів однієї групи та не ідентичних ознак між групами.

При кластеризації об'єкти розбиваються на певні підмножини (кластери), в яких об'єкти менш подібні з об'єктами з інших кластерів, ніж між собою. У матричному просторі «однаковість» зазвичай визначають через відстань. Відстань можна розрахувати як між початковими об'єктами (рядками матриці), так між цими об'єктами й прототипом кластерів. Здебільшого координати прототипів є невідомими й вони виявляються водночас із розбиттям даних на кластери. Застосовувались наступні параметри методу кластеризації: рівень впливу вхідних змінних (Range of influence) – 0,99; коефіцієнт послаблення (Squash factor) – 1,5; коефіцієнт, що встановлює, у яку кількість разів потенціал даної точки має бути вищим, ніж потенціал центру першого кластера для того, щоб центром одного з кластерів була встановлена точка, що розглядається (Accept radio) – 0,5; коефіцієнт, який встановлює, в скільки разів потенціал даної точки повинен бути меншим за потенціал центру першого кластера, щоб ця точка була виключена з ймовірних центрів кластерів (Reject radio) – 0.15 [15].

Через це, для прикладу, в подальшому моделюванні для коефіцієнта залишкового ресурсу $k_{\text{рес ФЕМ}}$ діагностичного параметра k_1 першого правила значення гаусової функції належності взято такі значення параметрів: $\delta_{k1} = 0,3650$ в.о., $C_{k1} = 0,9951$ в.о. Для навчання мережі застосовувався гібридний алгоритм навчання.

Середньоквадратична похибка навчання після тридцяти епох навчання склала 0.0128 в.о. (на тестовій виборці 0,041 в.о.).

Підсумком навчання стали одержані параметри гаусових функцій належності, які надалі застосовувались при створенні нейро-нечіткої моделі ФЕМ.

Враховуючи проведені ітераційні обчислювальні експерименти, сформульовано вектор параметрів функцій належності й одержано математичну модель коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ для розглянутого прикладу (таблиця 3.2).

На рисунку 3.3 видно частину віконної заставки редактора адаптивної мережі системи нечіткого висновку (ANFIS Editor) пакету Fuzzy Logic Toolbox системи комп'ютерної математики MATLAB [6].

До даної структури нейро-нечіткої моделі ФЕМ входить шість входів та один вихід.

До кожного з шести входів входять чотири терми. Іншими словами кожна з множин можливих значень вхідних параметрів моделі розділяється умовно на чотири підмножини: «нормальні» значення вхідного параметра, «незначні відхилення» значення вхідного параметра, «передаварійні» значення вхідного параметра, «аварійні» значення вхідного параметра [15].

Побудована нейро-нечітка модель Сугено має такі характеристики: ступінь приналежності кожного зі значень вхідного параметра до відповідної цьому параметру множини значень, яка визначається гаусовою функцією належності; модель необхідна для знаходження числового значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу фотоелектричного модуля, тому має один вихід [15].

Модель дає змогу визначити коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ залежно від значень вхідних параметрів – коефіцієнтів залишкових ресурсів за кожним з контрольованих діагностичних параметрів.

Дана мережа складається з шести входів, одного виходу й передбачає використання алгоритму нечіткого висновку Сугено:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{ЯКЩО } k_1 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_2 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_3 \in \text{"нормальне"} \\
 \text{ТА } k_4 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_5 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_6 \in \text{"нормальне"} \\
 \text{ТО } k_{\text{рес ФЕМ}} = 1,048 \cdot k_1 - 0,0492 \cdot k_2 - 0,1529 \cdot k_3 + 0 \cdot k_4 + \\
 + 1,02 \cdot k_5 - 0,006532 \cdot k_6 + 0,8857; \\
 \text{ЯКЩО } k_1 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТА } k_2 \in \text{"незначне відхилення"} \\
 \text{ТА } k_3 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_4 \in \text{"незначне відхилення"} \\
 \text{ТА } k_5 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТА } k_6 \in \text{"незначне відхилення"} \\
 \text{ТО } k_{\text{рес ФЕМ}} = 0,53 \cdot k_1 + 1,01 \cdot k_2 + 0,34 \cdot k_3 + 0,1000 \cdot k_4 - \\
 - 0,84 \cdot k_5 - 0,15 \cdot k_6 + 0,00238; \\
 \text{ЯКЩО } k_1 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } k_2 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } k_3 \in \text{"передаварійне"} \\
 \text{ТА } k_4 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } k_5 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } k_6 \in \text{"передаварійне"} \\
 \text{ТО } k_{\text{рес ФЕМ}} = 0,01 \cdot k_1 + 0,13 \cdot k_2 + 0,91 \cdot k_3 + 0,05 \cdot k_4 - 0,05 \cdot k_5 + \\
 - 0,03 \cdot k_6 - 0,01155; \\
 \text{ЯКЩО } k_1 \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_2 \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_3 \in \text{"аварійне"} \\
 \text{ТА } k_4 \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_5 \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_6 \in \text{"аварійне"} \\
 \text{ТО } k_{\text{рес ФЕМ}} = 0,1698 \cdot k_1 + 0,0389 \cdot k_2 + 0,2309 \cdot k_3 + 0,145 \cdot k_4 + 0,15k_5 + \\
 + 0,2731 \cdot k_6 - 0,00890.
 \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів дорівнюватиме 0,5 в.о., то значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ буде рівним 0,332 в.о., якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів дорівнюватиме 1 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ (з похибкою 2%) стане 0,98 в.о., якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів дорівнюватиме 0 в.о., то значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ (з похибкою 0,5%) теж відповідатиме 0 в.о. (рисунки 3.4 – 3.6).

Таблиця 3.2 – Параметри функції належності.

Вхідні параметри моделі	Найменування терму (нечіткої множини значень вхідних параметрів)	Номер правила	Параметри функцій належності	
			δ	C
k ₁	нормальні	1	0,35	0,21
	незначні відхилення	2	0,35	0,78
	передаварійні	3	0,35	0,81
	аварійні	4	0,35	0,91
k ₂	нормальні	1	0,35	0,21
	незначні відхилення	2	0,35	0,78
	передаварійні	3	0,35	0,81
	аварійні	4	0,35	0,93
k ₃	нормальні	1	0,35	0,022
	незначні відхилення	2	0,35	0,21
	передаварійні	3	0,35	0,81
	аварійні	4	0,35	0,93
k ₄	нормальні	1	0,35	0,019
	незначні відхилення	2	0,35	0,079
	передаварійні	3	0,35	0,078
	аварійні	4	0,35	0,93
k ₅	нормальні	1	0,35	0,21
	незначні відхилення	2	0,35	0,078
	передаварійні	3	0,35	0,081
	аварійні	4	0,35	0,93
k ₆	нормальні	1	0,35	0,019
	незначні відхилення	2	0,349	0,019
	передаварійні	3	0,35	0,079
	аварійні	4	0,35	0,93

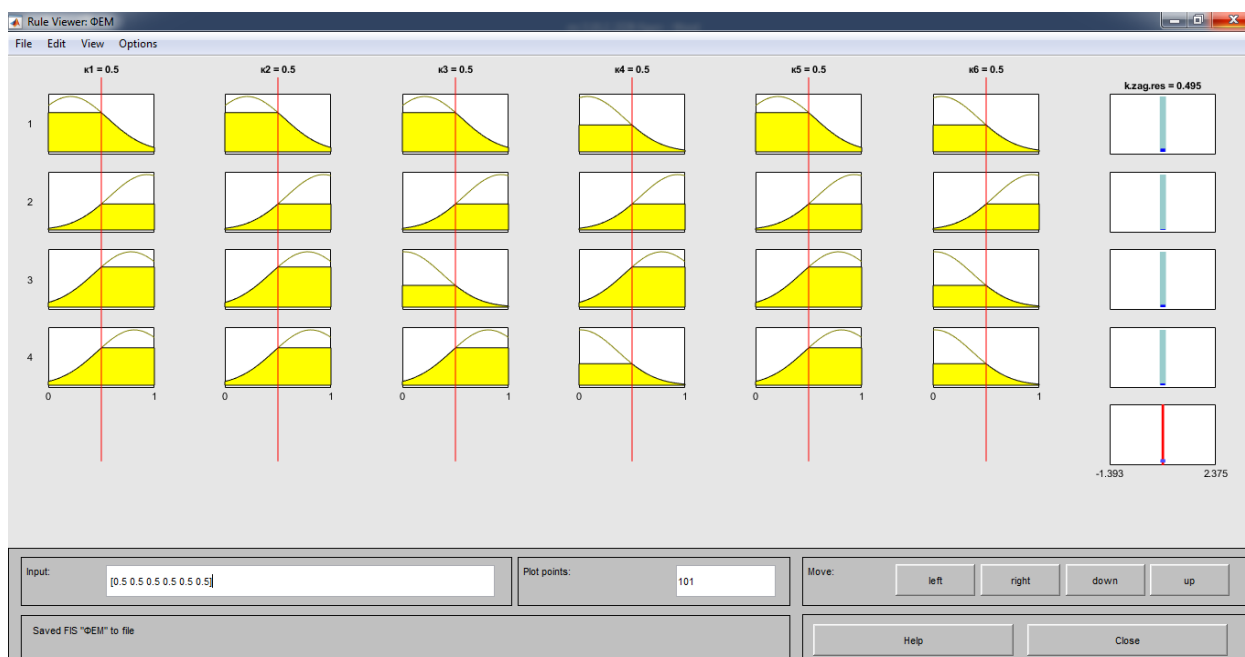


Рисунок 3.4 – Коефіцієнт залишкового ресурсу ФЕМ при значеннях всіх вхідних параметрів 0.5 в.о.

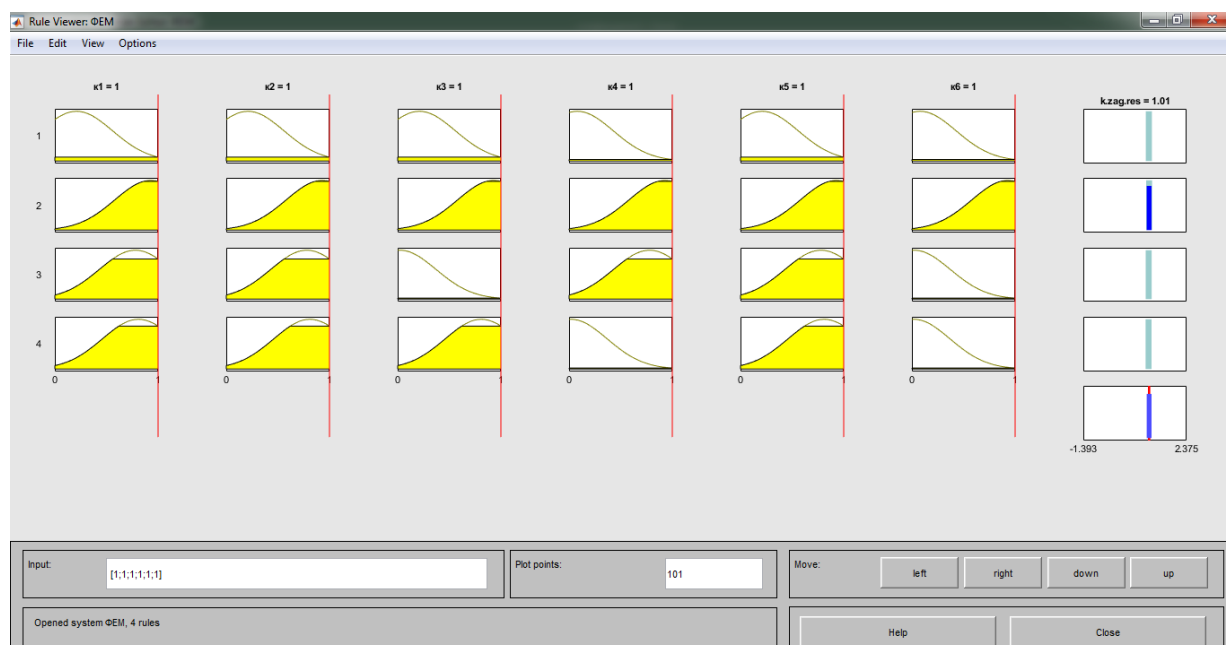


Рисунок 3.5 – Коефіцієнт залишкового ресурсу ФЕМ при значеннях всіх вхідних параметрів 1 в.о.

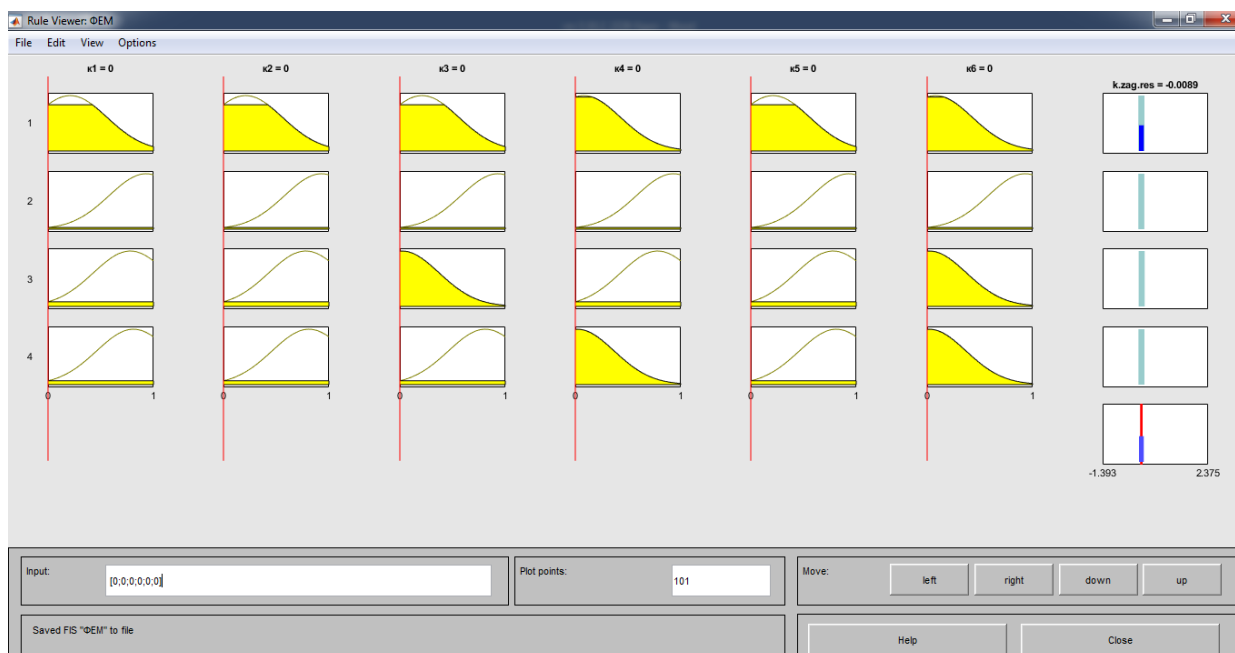


Рисунок 3.6 – Коефіцієнт залишкового ресурсу ФЕМ при значеннях усіх вхідних параметрів 0 в.о.

Графіки поверхонь залежностей вихідного параметра створеної моделі від сукупності вхідних параметрів доводять їхню складність. Графіки продемонстровано на рисунках 3.7 – 3.11.

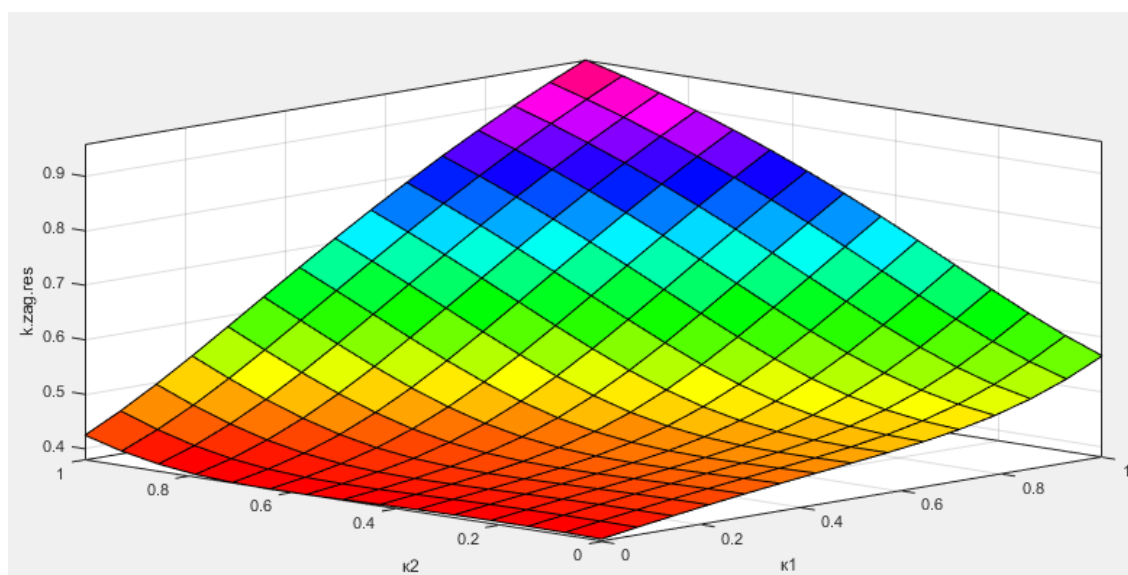


Рисунок 3.7 – Графік залежності коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від k_1 та k_2 .

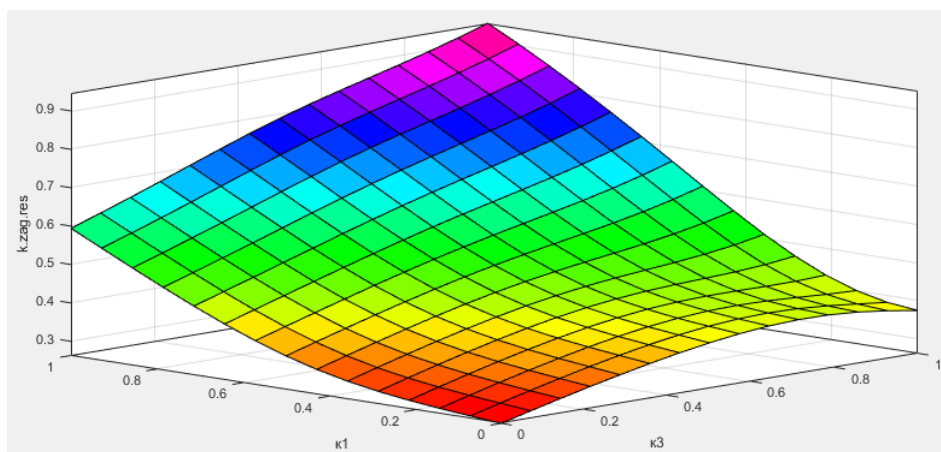


Рисунок 3.8 – Графік залежності коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від k_1 та k_3 .

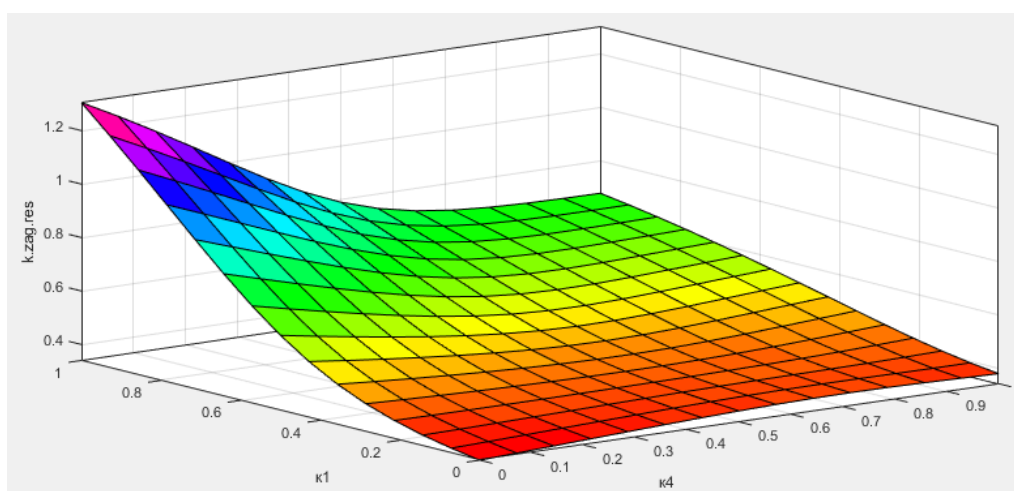


Рисунок 3.9 – Графік залежності коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від k_1 та k_4 .

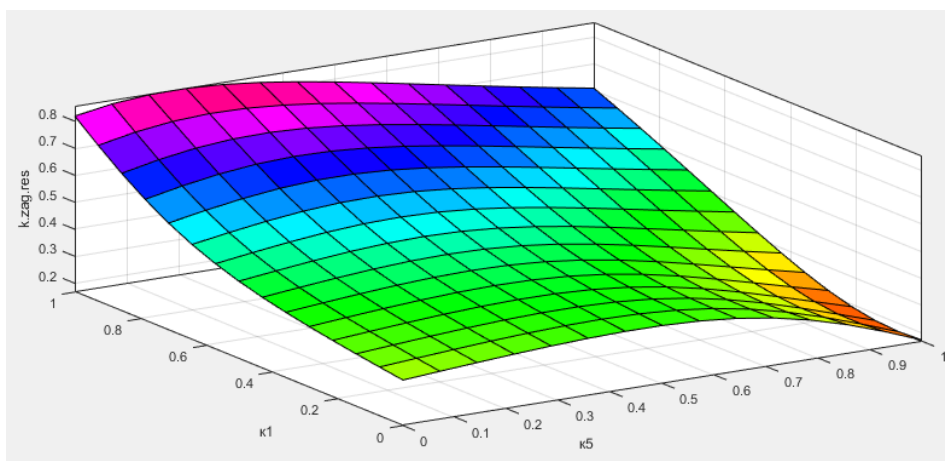


Рисунок 3.10 – Графік залежності коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від k_1 та k_5 .

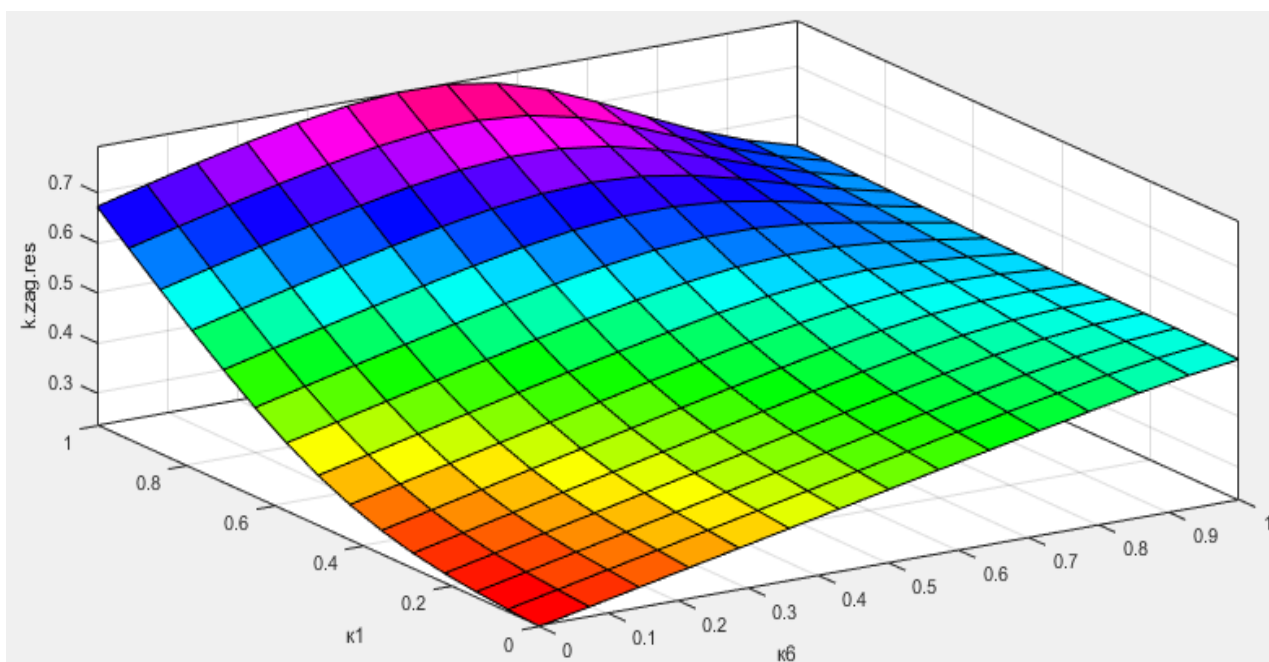


Рисунок 3.11 – Графік залежності коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від k_1 та k_6 .

3.2 Визначення технічного стану ФЕС блок-схемою програмно-апаратного комплексу та знаходження коефіцієнтів-індикаторів

З швидкими темпами збільшення встановленої потужності ФЕС з'являються нові проблеми, які потрібно негайно вирішувати.

Серед даних проблем них виділяються: гарантування надійності електропостачання; потреба у виявленні пошкоджень обладнання ФЕС та прогнозуванні їх виникнення; планування ремонтів та заміни пошкодженого обладнання; балансування потужності в ЕЕС.

Отже, постає задача підтримки енергоефективності установок, які гарантуватимуть очікуваний рівень генерування електроенергії, водночас також, є необхідність контролю за їх роботою, для уникнення можливих відключень, які можуть призвести до понаднормованого відхилення планового значення генерування від поточного [6].

Виокремлюються три способи діагностування пошкоджень:

1) методом візуального огляду, що потребує значних витрат часу та зусиль;

2) за допомогою обробки зображень (поділяється на термографію, електролюмінесценцію та УФ-флуоресценцію, що передбачає використання безпілотних технологій та іноді вимагає відключення станції від мережі);

3) за аналізом електричних вимірювань, який можна отримати за допомогою встановленої системи моніторингу [15].

В двох перших способах використовуються ретроспективні дані для формування моделі поточного стану ФЕМ.

Також необхідно брати до уваги обмеження диспетчера на потужність генерування ФЕС, тобто потужність ФЕС задає диспетчер і вона зазвичай не працює на максимум.

З цього слідує те, що інвертори не працюють у режимі відстеження максимальної потужності, а намагаються досягти оптимального значення генерування, яке встановлене диспетчером.

Тому максимальне значення потужності (MPPT), що використовується в літературі для виявлення пошкоджень, не може використовуватися при виявленні технічного стану для ФЕС, які підключені до мережі і мають пристрої відстежування MPPT.

Методологія визначення технічного стану ФЕС блок-схемою програмно-апаратного комплексу та знаходження коефіцієнтів-індикаторів складається з двох етапів, як показано на рисунку 3.12.

1. Моделювання математичної моделі процесу функціонування ФЕС (з урахуванням визначення зони нечутливості, формування нейро-нечіткої моделі генерування) за основою ретроспективних даних про роботу ФЕС.

2. Моніторинг та прогнозування, коли система працює в режимі реального часу, контролюючи технічний стан ФЕМ, з метою знаходження та діагностування появи дефектів або несправностей [22].

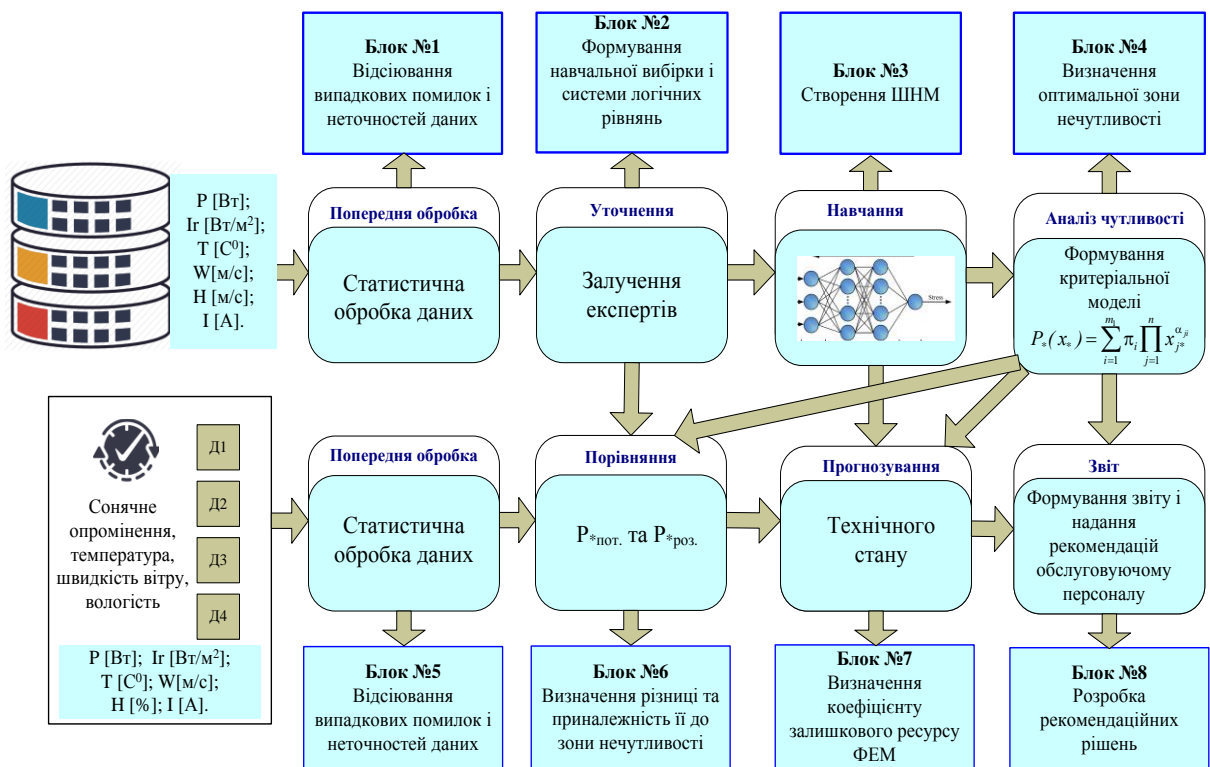


Рисунок 3.12 – Блок-схема визначення технічного стану ФЕС програмно-апаратним комплексом

Коефіцієнти-індикатори вказують на аномальну роботу ФЕМ у стрінгу і фактично сигналізують на появу проблеми в роботі стрінгу, а врахування їх чутливості до зміни метеорологічних контрольованих

факторів виключає помилкові рішення. Алгоритм розрахунку коефіцієнтів-індикаторів має наступний вигляд [22]:

1. Визначається різниця у відсотках між середнім значенням струму стрінгів $I_{\text{сеп.смп.}}$ і теперішнім значенням струму генерування конкретного досліджуваного стрінгу $I_{\text{смп.}i}$:

$$k_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{\text{сеп.смп.}} - I_{\text{смп.}i})}{I_{\text{сеп.смп.}}} \cdot 100. \quad (3.10)$$

2. Знаходиться максимальна різниця між середнім значенням струму стрінгів $I_{\text{сеп.смп.}}$ та поточним значенням струму генерування конкретного досліджуваного стрінгу $I_{\text{смп.}i}$ (у відсотках):

$$k_2 = \max \frac{(I_{\text{сеп.смп.}} - I_{\text{смп.}i})}{I_{\text{сеп.смп.}}} \cdot 100. \quad (3.11)$$

3. Визначається дисперсія середнього значення струму всіх стрінгів $I_{\text{сеп.смп.}i}$ і дисперсія струму стрінга $I_{\text{смп.}i}$:

$$k_3 = \sum_{i=1}^n (I_{\text{смп.}i} - \overline{I_{\text{смп.}}}), \quad (3.12)$$

$$k_4 = \sum_{i=1}^n (I_{\text{сеп.смп.}i} - \overline{I_{\text{сеп.смп.}}}). \quad (3.13)$$

4. Обчислюється різниця у відсотках між середнім струмом всіх стрінгів $I_{\text{сеп.смп.}}^{\text{tmax}(I_{\text{сеп.смп.}})}$ та струмом стрінгу $I_{\text{смп.}i}^{\text{tmax}(I_{\text{смп.}i})}$ у момент максимального генерування:

$$k_5 = \frac{I_{cep.cmp.}^{t_{max}(I_{cep.cmp.})} - I_{cmp.i}^{t_{max}(I_{cmp.i})}}{I_{cep.cmp.}^{t_{max}(I_{cep.cmp.})}} . \quad (3.14)$$

Різницею у відсотках між середнім значенням струму всіх стрінгів $I_{cep.cmp.}^{t_{min}(I_{cep.cmp.})}$ та струмом стрінгу $I_{cmp.i}^{t_{min}(I_{cmp.i})}$ в точці (момент) мінімального генерування буде:

$$k_5 = \frac{I_{cep.cmp.}^{t_{min}(I_{cep.cmp.})} - I_{cmp.i}^{t_{min}(I_{cmp.i})}}{I_{cep.cmp.}^{t_{min}(I_{cep.cmp.})}} . \quad (3.15)$$

Приклади виявлення за допомогою програмно-апаратного комплексу пошкоджень на ФЕС продемонстровані на рисунках 3.13 та 3.14

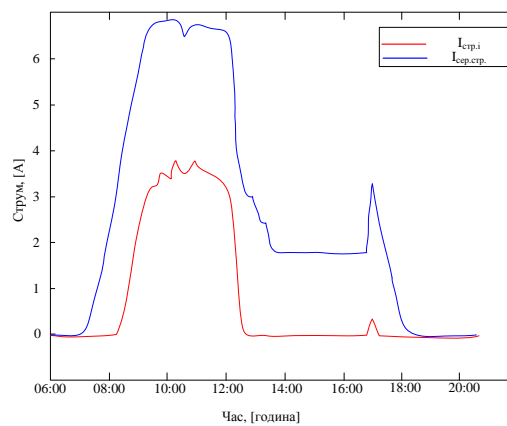


Рисунок 3.13 – Несправність давача струму

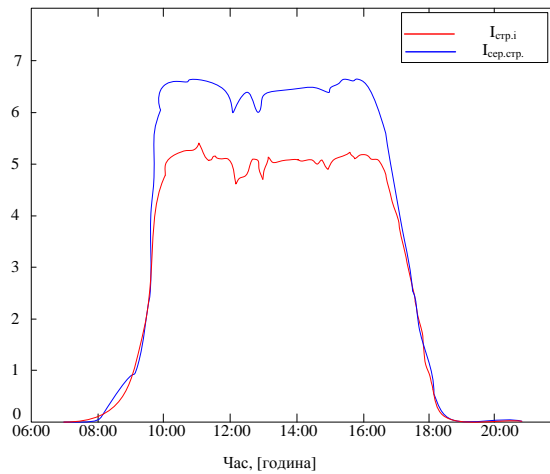


Рисунок 3.14 – Наявність «гарячих точок»

Принцип дії запропонованого комплексу має наступний вигляд (рисунок 3.12). Збирається інформація про значення потужності генерування станції та струмах стрінгів при певних метеорологічних факторах (Блок 1), відбувається порівняння поточних значень метеорологічних факторів з ретроспективними (Блок 5), формується множина таких наборів, за яких метеорологічні фактори не виходять з зони нечутливості, межі якої визначені критеріальним методом (Блок 4). Відбувається порівняння поточного значення потужності з ретроспективним, при однакових чи наближених метеорологічних факторах з сформованої множини (Блок 6). Для проведення додаткової перевірки та виключення похибки, пропонується також потужність генерування порівнювати з розрахунковим значенням, визначеним з використанням нейро-нечіткої мережі (Блок 3) (навчальна вибірка і система логічних рівнянь завчасно коригується експертами для врахування особливостей роботи конкретної станції (Блок 2)). Якщо поточне значення не відповідає ретроспективному й розрахунковому, потрібно робити додаткові дослідження, тобто розраховувати коефіцієнти-індикатори для локалізації області пошуку пошкодженої панелі та визначення коефіцієнту залишкового ресурсу (Блок 7), що дасть змогу ідентифікувати стан панелі (Блок 8) та спрогнозувати розвиток дефекту [15].

3.3 Процес діагностування фотоелектричних модулів за допомогою програмно-апаратного комплексу

Виконано експериментальне дослідження, використовуючи програмно-апаратний комплекс. Об'єктом дослідження були ФЕМ на ФЕС, встановленій на даху навчального корпусу факультету електроенергетики та електромеханіки ВНТУ (рисунок 3.15) та ФЕМ, встановлені на стендах навчально-дослідної лабораторії кафедри електричних станцій та систем ВНТУ.



Рисунок 3.15 – Вигляд досліджуваної дахової ФЕС

За допомогою тестера електробезпеки сонячних установок SEAWARD PV150 формується база даних для побудови й порівняння різних ВАХ. Робота тестера показана на рисунку 3.16.



Рисунок 3.16 – Збір даних для оцінювання ефективності генерування електроенергії даховою ФЕС

Інформація передається на ноутбук, де вона піддається обробці за допомогою програми для виявлення та діагностування дефектів чи несправностей. Графіки вольт-амперних характеристик для ФЕМ виводяться на екран для візуального аналізу. Подальше використання даних включає в себе визначення коефіцієнтів залишкового ресурсу, а також

розрахунок коефіцієнтів-індикаторів аномальної роботи ФЕМ. На основі отриманих результатів приймається рішення щодо доцільності подальшої експлуатації ФЕМ, визначається можливість їх відновлення або повної заміни. Прилади виявлених дефектів ФЕМ наведені у додатку В.

Апаратна частина комплексу визначення технічного стану ФЕС (рисунок 3.17) дозволяє виконувати перевірку контактних з'єднань ФЕС і від ФЕС до інвертора з лічильником електроенергії за допомогою приладу Актаком АММ6015 (вимірник опору). Використовуючи тепловізор OWON Ti332 і пірометр Venetech GM1250 здійснюється обстеження ФЕМ на предмет пошкоджень, що проявляються областями з температурою, вищою за температуру справних ФЕМ.



Рисунок 3.17 – Апаратна частина комплексу визначення технічного стану ФЕС

Платформа з апаратною частиною може транспортуватись прямо до ФЕС для її обслідування.

Висновки до розділу 3

Нерівномірність генерації електроенергії фотоелектричними станціями залежить не тільки від погодних умов, але й від технічного стану обладнання ФЕС. У зв'язку з впровадженням процедури компенсації гарантованому покупцю частки вартості небалансів електроенергії для виробників ВДЕ, проблема стабільної генерації є актуальною.

У даному розділі запропоновано використовувати метод діагностування фотоелектричних модулів в умовах неповноти початкових даних. У цьому методі застосовується нейро-нечітке моделювання для визначення поточного значення коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ. В залежності від отриманого результату, можна зробити висновок про стан модуля (справний, з незначними відхиленнями параметрів, передаварійний, аварійний) та досягти зменшення похибки у прогнозуванні такого стану. Це дозволяє виявляти забруднення ФЕМ, порушення роботи датчиків і пошкодження самого ФЕМ, такі як дефекти «гарячих точок» та інші.

Користуючись програмно-апаратним комплексом можна виконувати перевірку контактних з'єднань ФЕС і визначати, чи опори контактних з'єднань знаходяться в допустимих межах. В ході обстежень формується база даних для побудови вольт-амперних характеристик модулів, а також знаходяться коефіцієнти залишкового ресурсу і коефіцієнти аномальної роботи з метою визначення міри працездатності ФЕМ.

На прикладі показано процес діагностування ФЕМ за допомогою програмно-апаратного комплексу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Гарантоване Конституцією України право всіх громадян України на належні безпечні та здорові умови праці стосується і робіт, пов'язаних з проведенням діагностування технічного стану фотоелектричних станцій.

Одним з ключових питань забезпечення електробезпеки персоналу фотоелектричної станції є надійне захисне заземлення, при якому опір заземлювального пристрою розтіканню струму або напруга дотику при замиканні фази на заземлені частини електроустановок не перевищують допустимих значень [23].

Враховуючи те, що для мінімізації ризику професійного захворювання та травматизму працівників, які займаються питаннями експлуатації ФЕС, пов'язаних з діагностикою їх стану в темпі процесу вимагається вирішення цілого комплексу питань з охорони праці, тому сформулюємо основні задачі даного розділу.

1. Навести технічні рішення щодо безпечного виконання роботи під час моніторингу технічного стану ФЕС.
2. Розробити технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії.
3. Виконати розрахунок захисного заземлення для ФЕС.
4. Навести норми пожежної безпеки для приміщення на території ФЕС.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

Розглянемо потенційно небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які діють на інженерів-електриків у приміщенні лабораторії з діагностування ФЕС.

Лабораторія живиться чотирипровідною трифазною мережею, величина напруги в якій складає 220 В (380 В). Тому лабораторія відноситься до категорії умов з небезпеки електротравматизму – без

підвищеної небезпеки.

При живленні споживачів струму від чотирипровідної трифазної мережі з глухозаземленою нейтраллю при напрузі до 1000 В використовується занулення – навмисне електричне з'єднання нормально неструмоведучих елементів устаткування із заземленим нульовим проводом. При зануленні пробій на корпус призводить до короткого замикання (К.З.) фази (коло: нульовий провідник – фаза – фазний провідник – корпус споживача – нульовий провідник). Спрацьовує захист від короткого замикання (автомат з струмовим захистом чи плавкі запобіжники) – і пошкоджений споживач відключається від мережі. Вимоги нормативів до занулення: повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. ($3 \div 1,25$) залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового провідника і достатня його провідність – за рахунок вибору достатнього перерізу нульового провідника та використання повторних заземлювачів нульового провідника [23].

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення [24].

Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт, Ia

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Легка	23-25	40-60	0,1
Холодний	Ia	22-24	40-60	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено:

1. Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні оптимальних параметрів мікроклімату не повинні бути більше ніж на 2°C за діапазон норм.

2. Якщо температура поверхонь вище або нижче оптимальної температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше їм.

3. Для забезпечення нормованих значень руху кисню проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Робочою зоною вважається простір, який обмежений огорожуючими конструкціями виробничих приміщень, що мають висоту 2 м над рівнем підлоги або площини, на яких знаходяться місця постійного або непостійного перебування працюючих. Склад повітря робочої зони залежить від складу атмосферного повітря і впливу на нього ряду шкідливих виробничих факторів, утворених в процесі трудової діяльності людини. Склад повітря залишається постійним. Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [24]. Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК показані в

таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб. м		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу вказує на необхідність у вживанні заходів по очищенню від нього. Тому необхідно здійснювати наступні заходи:

- очищувати пил якнайчастіше;
- щодня протирати гарячі поверхні.

Планувати прибирання так, щоб вони приходилось на час, коли устаткування виключене.

4.2.3 Виробниче освітлення

В залежності від джерела світла промислове освітлення поділяється на природне та штучне освітлення.

Природне освітлення – освітленість приміщень світлом неба (прямого або відображеного), яке проникає через світлові пройми в зовнішніх огорожених конструкціях. По своєму спектральному складу воно є найбільш сприятливим. Природне освітлення характеризується коефіцієнтом природної освітленості КПО (e_n). Коефіцієнтом природної освітленості – відношення природного освітлення, яке створюється в деякій точці заданої площини всередині приміщення світлом неба, до значення зовнішньої горизонтальної освітленості. КПО при природному та суміщеному освітленню [24].

Характеристика зорової роботи при виконанні - роботи високої точності;

Розряд - III;

Підрозряд зорової роботи - б;

Контраст об'єкту розпізнавання - середній;

Характеристика фону - темний;

Бокове КПО, %:

- природне 2,0;

- суміщене 1,2.

Основною величиною для розрахунку і нормування природного освітлення є коефіцієнт природної освітленості (КПО). Прийняте роздільне нормування КЕО для бічного і верхнього освітлення. Ті місця, що освітлюється тільки бічним світлом, нормується мінімальне значення КПО в межах робочої зони, що повинно бути забезпечене в точках, найбільше віддалених від вікна. Нормовані значення КПО для будинків визначаються за формулою:

$$e_n = e_n \cdot m_n, \quad (4.1)$$

де e_n – значення КПО для будинків;

m_n – коефіцієнт сонячності клімату – 0,85, вікна зорієнтовані на захід.

Природне: $e_n = 2,0 \cdot 0,85 = 1,7 \%$,

суміщене: $e_n = 1,2 \cdot 0,85 = 1 \%$.

Штучне освітлення використовується двох систем: загальне або комбіноване. Загальне освітлення – освітлення, при якому світильники розміщуються у верхній зоні приміщення рівномірно або пристосувальне до розташування обладнання. Комбіноване освітлення – додаткове освітлення, при якому до загального освітлення додається ще й місцеве. Місьцеве освітлення – освітлення, яке створюється світильниками, які концентрують

світловий потік безпосередньо на робочих місцях [24].

Штучне освітлення, лк:

загальне – 300 лк;

комбіноване – 1000 лк.

4.2.4 Виробничий шум

Рівень звука вимірюється в децибелах і визначається по формулі:

$$L = 20 \cdot \lg \left(\frac{P}{P_0} \right) = 20 \cdot \lg \left(\frac{U}{U_0} \right) \quad (4.2)$$

де L – рівень шуму, дБ;

P – звуковий тиск, Па;

U_0 – коливальна швидкість, $5 \cdot 10^{-8}$ м/с;

P_0 – нульове значення звукового тиску на нижньому порозі чутності в октавній смузі зі середньгеометричною частотою 1000 Гц, умовно прийняте рівним $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки».

У таблиці 4.3 показані допустимі рівні звукового тиску для робочого місця.

Таблиця 4.3 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньогометричними частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Теоретичні роботи та обробка даних	86	71	61	54	49	45	42	40	38

Шум порушує нормальну роботу шлунка, особливо впливає на центральну нервову систему. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація» [24].

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

4.3 Розрахунок захисного заземлення для фотоелектричної станції

Захисту підлягають фотоелектричні панелі. Кліматична зона – III; ґрунт – глина; склад – однорідний; вологість – мала. Виконання мережі – з глухо заземленою нейтраллю. Напруга мережі – 380/220 В. Кутова сталь з шириною сторін $B_k = 40 \times 40$ мм. Довжина вертикальних заземлювачів $l_B = 2$ м. Відстань між вертикальними заземлювачами $a = 3$ м. Глибина

закладання вертикальних заземлювачів $H_0 = 0,7$ м. З'єднувальна стрічка – смуга шириною $B_c = 40 \times 4$ мм. Опір розтіканню струму в природному заземлювачі $R_{п.з.} = 15$ Ом.

Методику розрахунку взято в [23]. Для проведення розрахунків захисного заземлення використано програмне забезпечення Mathcad.

Згідно з ПУЕ допустиме значення опору розтікання струму в заземлювальній пристрої $R_d \leq 4$ Ом.

Обчислюємо розрахунковий питомий опір глини для III кліматичної зони:

$$\rho_{розр} = \rho \cdot K_c, \quad (4.3)$$

де $\rho = 40$ Ом·м, $K_c = 1,5$.

$$\rho_{розр} = 40 \cdot 1,5 = 60 \text{ (Ом·м)}.$$

Визначаємо H – відстань між поверхнею землі та серединою вертикального заземлювача:

$$H = H_0 + \frac{l_B}{2} \quad (4.4)$$

$$H = 0,7 + \frac{2}{2} = 1,7 \text{ (м)}.$$

Знаходимо опір розтікання струму в одному вертикальному заземлювачі:

$$R_B = \frac{\rho_{розр}}{2 \cdot \pi \cdot l_B} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_B}{d_{екв}} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4H + l_B}{4H - l_B} \right), \quad (4.5)$$

де $d_{\text{екв}} = 0,95 \cdot B_{\text{к}} = 0,95 \cdot 0,04 = 0,038$ (м)

$$R_{\text{В}} = \frac{60}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 2}{0,038} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,7 + 2}{4 \cdot 1,7 - 2} \right) = 23,68 \text{ (Ом)}.$$

Розраховуємо опір розтікання струму штучного заземлення, враховуючи, що штучні та природні заземлювачі з'єднані паралельно і їх загальний опір не перевищує $R_{\text{д}} = 4$ Ом.

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{д}} \cdot R_{\text{п.з.}}}{R_{\text{д}} + R_{\text{п.з.}}} \quad (4.6)$$

$$R_{\text{ш}} = \frac{4 \cdot 15}{15 + 4} = 5,455 \text{ (Ом)}.$$

Обчислюємо орієнтовне число вертикальних заземлювачів при $\eta_{\text{В}} = 1$:

$$n_{\text{оп}} = \frac{R_{\text{В}}}{R_{\text{ш}} \cdot \eta_{\text{В}}} \quad (4.7)$$

$$n_{\text{оп}} = \frac{23,68}{5,455 \cdot 1} \approx 5 \text{ (шт)}.$$

З таблиці 4.4 визначаємо коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів, розташованих по контуру.

$$\frac{a}{l_{\text{В}}} = \frac{3}{2} = 1,5, \quad n = 0,6$$

Таблиця 4.4 – Значення коефіцієнта використання вертикальних заземлювачів η_B , розташованих по контуру.

Відношення відстані між електродами до їх довжини $\frac{a}{l_B}$	Кількість заземлювачів n							
	4	8	12	16	20	40	60	100
1	0,66	0,56	0,5	0,47	0,44	0,41	0,39	0,36
2	0,76	0,68	0,65	0,63	0,61	0,58	0,55	0,52
3	0,84	0,77	0,73	0,7	0,68	0,66	0,64	0,62

Розраховуємо потрібну кількість вертикальних заземлювачів з врахуванням η_B :

$$n = \frac{n_{OP}}{\eta_B} \quad (4.8)$$

$$n = \frac{5}{0,6} \approx 8$$

Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму $R_{розр.в.}$ у вертикальних заземлювачах при $n = 5$ шт:

$$R_{розр.в.} = \frac{R_B}{n \cdot \eta_B} \quad (4.9)$$

$$R_{розр.в.} = \frac{23,68}{8 \cdot 0,6} = 5,455 \text{ (Ом)}.$$

Знаходимо довжину з'єднувальної смуги:

$$L_c = 1,05 \cdot a \cdot n \quad (4.10)$$

$$L_c = 1,05 \cdot 3 \cdot 8 = 22,792 \text{ (м)}.$$

Схема розміщення заземлювача в ґрунті наведена на рисунку 4.1.

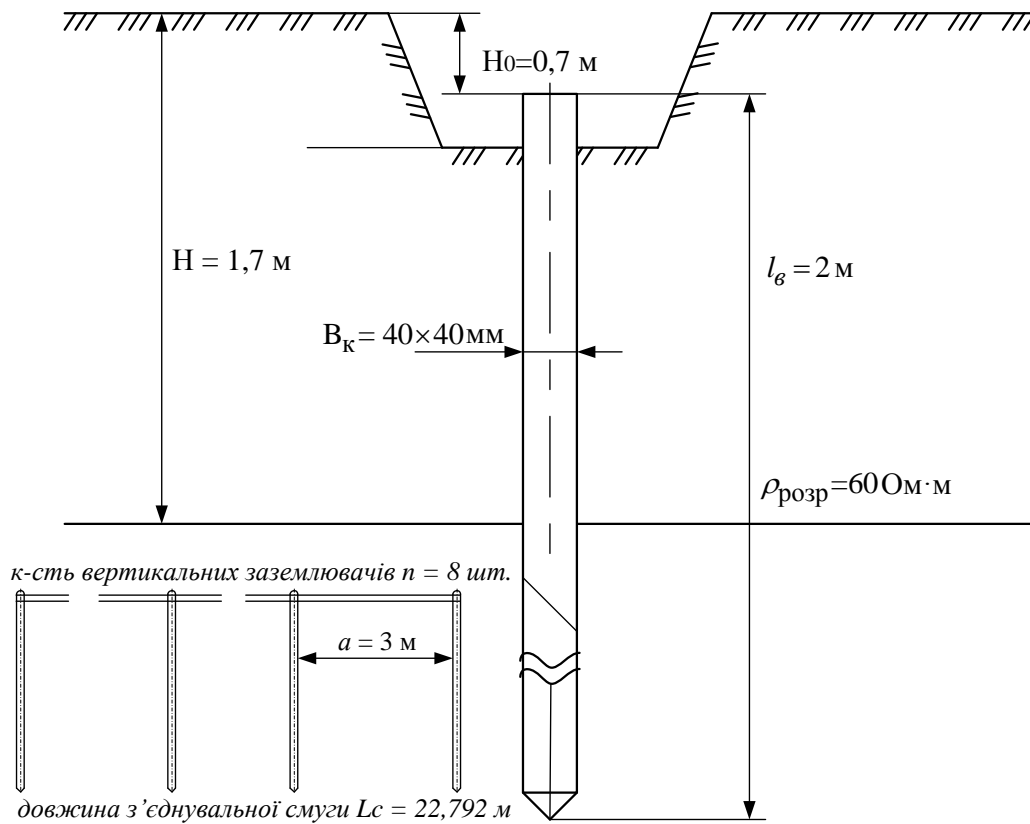


Рисунок 4.1 – Схема розміщення заземлювача в ґрунті

Визначаємо опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі:

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho_{\text{розр}}}{2 \cdot \pi \cdot L_c} \cdot \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot L_c^2}{H_0 \cdot B_c} \quad (4.11)$$

$$R_{\Gamma} = \frac{60}{2 \cdot 3,14 \cdot 22,792} \cdot \ln \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 22,792^2}{0,7 \cdot 0,04} = 4,888 \approx 5 \text{ (Ом)}.$$

Обчислюємо коефіцієнт використання горизонтального заземлювача.

За таблицею 4.5 при $\frac{a}{l_B} = 1,5$, $n = 8$ отримуємо $\eta_\Gamma = 0,39$.

Таблиця 4.5 – Значення коефіцієнта використання горизонтального стрічкового електрода η_Γ , який з'єднає вертикальні заземлювачі, розташовані по контуру.

$\frac{a}{l_B}$	Кількість заземлювачів n									
	4	6	8	10	12	16	20	40	60	100
1	0,45	0,4	0,36	0,34	0,32	0,3	0,27	0,22	0,2	0,19
2	0,55	0,48	0,43	0,4	0,38	0,35	0,32	0,29	0,27	0,23
3	0,7	0,64	0,6	0,56	0,54	0,5	0,45	0,39	0,36	0,33

Знаходимо опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі з врахуванням η_Γ :

$$R_{\text{розр.г.}} = \frac{R_\Gamma}{\eta_\Gamma} \quad (4.12)$$

$$R_{\text{розр.г.}} = \frac{5}{0,39} = 12,821 \text{ (Ом)}.$$

Визначаємо опір розтікання струму в горизонтальних та вертикальних заземлювачах:

$$R_{\text{розр.}} = \frac{R_{\text{розр.в.}} \cdot R_{\text{розр.г.}}}{R_{\text{розр.в.}} + R_{\text{розр.г.}}} \quad (4.13)$$

$$R_{\text{розр.}} = \frac{5,455 \cdot 12,821}{5,455 + 12,821} = 3,821 \text{ (Ом)}.$$

Розраховуємо загальний опір розтікання струму в штучному та природному заземлювачах:

$$R_{\text{заг.}} = \frac{R_{\text{розр.}} \cdot R_{\text{п.з.}}}{R_{\text{розр.}} + R_{\text{п.з.}}} \quad (4.14)$$

$$R_{\text{заг.}} = \frac{3,827 \cdot 15}{3,827 + 15} = 3,049 \text{ (Ом)}.$$

Отже, $R_{\text{заг.}} < R_{\text{д}}$, тому одержане загальнорозрахункове значення опору розтікання струму в природному та штучному заземлювачах відповідає вимогам ПУЕ, ПТЕ та ПТБ.

4.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи фотоелектричної станції в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Безпека роботи об'єктів електроенергетики у надзвичайних ситуаціях є важливою особливо під час повномасштабної війни з точки зору роботи промислового комплексу та обороноздатності держави. Для забезпечення надійної роботи ліній електропередач необхідно забезпечувати її захист різними пристроями в залежності від виду впливів.

На безпеку роботи ФЕС можуть вплинути надзвичайні ситуації, які виникають внаслідок техногенних явищ. Зокрема до них належить дія іонізуючого випромінювання (ІВ). Тривала і безперервна дія радіації на електронне обладнання при радіоактивному зараженні приводить до необоротної зміни електричних параметрів елементів електронної техніки і виходу її з ладу.

Серед загрозливих чинників надзвичайних ситуацій особливо великий вплив на ФЕС має вплив електромагнітного імпульсу (ЕМІ). Він може призвести до загорання чутливих електричних та електронних елементів, а також до серйозних порушень в контрольних пристроях. Електромагнітний імпульс пробиває ізоляцію, випалює елементи мікросхем, викликає коротке замикання. Ці наслідки в подальшому призводять до пожеж. Саме тому є необхідність запобіганню впливу цього фактору на обладнання ФЕС.

Враховуючи потенційну небезпеку, яку можуть спричинити ІВ та ЕМІ, важливо працювати над розробкою та впровадженням ефективних заходів захисту.

4.4.1 Дослідження безпеки роботи фотоелектричної станції в умовах дії іонізуючих випромінювань

Іонізуюче випромінювання або іонізуюча радіація включає потоки електромагнітних хвиль або частинок речовини, які при взаємодії з речовиною здатні утворювати в ній іони.

Проведемо дослідження стійкості роботи ФЕС в такій послідовності:

1. Визначаємо елементи від яких залежить функціонування системи електропостачання з потрібною якістю.
2. Визначаємо граничні значення експозиційних доз ($D_{гр}$, Р) і заносимо до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Граничні значення експозиційних доз елементів ФЕС

№	Блоки	Елементи ФЕС	$D_{гр, i}, P$	$D_{гр}, P$
1	Блок генерування	Фотоелектричні модулі	10^5	10^3
		Напівпровідники	10^5	
		Діелектричні матеріали	10^{10}	
2	Блок управління	Інвертор	10^5	
		Сенсори	10^4	
3	Блок моніторингу	Мікросхеми	10^5	
		Діоди	10^4	
		Резистори	10^3	
		Транзистори	10^4	

По мінімальному значенні $D_{гр}$, визначимо межу стійкості приладу в цілому по системі електропостачання: $D_{гр} = 10^3$.

За формулою 4.15 визначимо можливу дозу опромінення [25]:

$$D_M = \frac{2 \cdot P_{1max} \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{K_{noc}}, \quad (4.15)$$

$$D_M = \frac{2 \cdot 2,1 \cdot (\sqrt{8760} - \sqrt{1})}{1} = 388,9 \text{ (P)}$$

де P_{1max} – максимальне значення рівня радіації (2,1 P/год), яке очікується на об'єкті через встановлений час $t_k = 8760$ годин (1 рік); K_{noc} – коефіцієнт послаблення, ($K_{noc} = 1$);

Допустимий рівень радіації в умовах експлуатації:

$$P_{гр} = \frac{D_{гр} \cdot K_{noc}}{2 \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}, \quad (4.16)$$

$$P_{zp} = \frac{10^3 \cdot 1}{2 \cdot (\sqrt{8760} - \sqrt{1})} = 5,4 \text{ (Р/год)}$$

Оскільки $p_{zp} > p_{1max}$ ($5,4 \text{ Р/год} > 4,18 \text{ Р/год}$) та $D_{zp} > D_m$ ($10^3 \text{ Р} > 388,9 \text{ Р}$), то робота фотоелектричної станції буде безпечною в заданих умовах і нема потреби вживати заходів щодо підвищення безпеки її роботи.

4.4.2 Дослідження безпеки роботи фотоелектричної станції в умовах дії електромагнітного імпульсу

При оцінці впливу електромагнітного імпульсу на струмопровідні елементи, важливо враховувати, що ЕМІ мають горизонтальну та вертикальну складові напруженості електричного поля. Тому необхідно визначати значення напруги на вертикальних та горизонтальних ділянках ліній, зокрема на 1 – блоку генерування, 2 – блоку управління та 3 – блоку моніторингу.

За критерієм стійкості роботи електронних, енергетичних систем або окремих їх елементів в умовах дії електромагнітного імпульсу можна прийняти коефіцієнт безпеки [25].

$$K_{БВ(\Gamma)} = 20 \lg \frac{U_D}{U_{B(\Gamma)}} \geq 40, \quad (4.17)$$

де U_D – допустиме коливання напруги живлення, В; $U_{B(\Gamma)}$ – напруга, наведена за рахунок електромагнітних випромінювань, В.

Задовільними можна вважати умови, коли $K_B \geq 40$ дБ.

Початковими умовами оцінки стійкості є:

1. Вертикальна складова напруженості електромагнітного поля $E_B = 11 \text{ кВ/м}$.
2. Напруга живлення блоків $U_{ж}$, В:

- для блоку генерування 12,6 В;
- для блоку управління 399 В;
- для блоку моніторингу 231 В.

Послідовно виконуємо оцінку стійкості.

1. Знаходимо горизонтальну складову напруженості електричного поля:

$$E_{\Gamma} = E_B \cdot 10^{-3}, \quad (4.18)$$

$$E_{\Gamma} = 10 \cdot 10^{-3} = 0,01 (\text{кВ/м}).$$

2. Визначаємо для кожної складової максимальну довжину вертикальних і горизонтальних струмопровідних частин (l_B, l_{Γ} , м):

$$l_{B1} = 0,2 \text{ м}; l_{B2} = 0,15 \text{ м}; l_{B3} = 0,1 \text{ м};$$

$$l_{\Gamma1} = 0,3 \text{ м}; l_{\Gamma2} = 0,1 \text{ м}; l_{\Gamma3} = 0,25 \text{ м}.$$

3. Визначаємо напруги наводок у струмопровідних частинах:

$$U_B = E_{\Gamma} \cdot l_B, \quad (4.19)$$

$$U_B = 10 \cdot 0,2 = 2 \text{ (В)}$$

$$U_{\Gamma} = E_B \cdot l_{\Gamma} \quad (4.20)$$

$$U_{\Gamma} = 10000 \cdot 0,3 = 3000 \text{ (В)}$$

4. Визначаємо допустиму напругу живлення:

$$U_{\partial} = U_{\text{Ж}} \cdot \frac{U_{\text{Ж}}}{100} \cdot N; \quad (4.21)$$

$$U_{\partial} = 12 + \frac{12}{100} \cdot 5 = 12,6 \text{ (В)},$$

де $U_{\mathcal{J}}$ – напруга живлення; N – допустимі коливання.

5. Визначаємо коефіцієнти безпеки:

$$K_{BB} = 20 \cdot \lg \frac{12,6}{2} = 15,99 \text{ (дБ)};$$

$$K_{BG} = 20 \cdot \lg \frac{12,6}{3000} = -47,54 \text{ (дБ)}.$$

Оскільки коефіцієнти безпеки $K_{BB} < 40$ дБ і $K_{BG} < 40$ дБ, то робота ФЕС в умовах дії ЕМІ не буде безпечною. Результати розрахунку для всіх блоків занесено до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Результати дослідження безпеки роботи ФЕС в умовах дії електромагнітного імпульсу

Блоки	$U_{\mathcal{J}}$, В	$E_{\mathcal{B}}$, В/м	$E_{\mathcal{Г}}$, В/м	$U_{\mathcal{B}}$, В	$U_{\mathcal{Г}}$, В	K_{BB} , дБ	K_{BG} , дБ
Блок генерування	12,6	10000	10	2	3000	15,99	-47,54
Блок управління	399	10000	10	1,5	1000	48,5	-7,98
Блок моніторингу	231	10000	10	1	2500	47,27	-20,69

Отже, під час впливу електромагнітного випромінювання, робота ФЕС не є безпечною. У зв'язку з цим, для забезпечення безпеки роботи фотоелектричної станції важливо прийняти заходи захисту.

4.4.3 Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи фотоелектричної станції

Найбільш ефективним заходом з підвищення безпеки роботи ФЕС є екранування її елементів.

Розрахунок товщини сталевго екрана здійснюється за формулою [25]:

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}}, \quad (4.22)$$

де $A = 40 - K_{Bmin}$ – необхідне гасіння в екрані, дБ;
 $f = 15000$ – власна частота сталевго екрана, Гц.

Розрахунок товщини сталевго екрана для блоку генерування:

$$A = 40 - (-47,54) = 87,54 \text{ (дБ)},$$

$$t = \frac{87,54}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,137 \text{ (см)}.$$

Результати розрахунків для всіх блоків показано в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 - Результати розрахунків захисного екрану для всіх блоків

№	Блок елементів ФЕС	A, дБ	t, см
1	Блок генерування	87,54	0,137
2	Блок управління	47,98	0,08
3	Блок моніторингу	60,69	0,1

Для забезпечення безпеки роботи фотоелектричної станції під час дії

ЕМІ, необхідно встановити захисний екран зі сталі. Також потрібно встановити швидкодіючий пристрій вимкнення. Ці заходи допоможуть забезпечити безпеку роботи ФЕС навіть в умовах впливу на неї електромагнітного імпульсу, забезпечуючи її нормальне функціонування.

Висновки до розділу 4

У даному розділі обґрунтована важливість охорони праці під час діагностування технічного стану фотоелектричних станцій.

Розглянуто умови безпечної роботи персоналу у приміщенні лабораторії діагностування технічного стану ФЕС. Запропоновано технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, серед яких забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні, нормалізація складу повітря, освітлення та рівня звуку.

Виконано розрахунок захисного заземлення для фотоелектричної станції. Запропоновано заходи з підвищення безпеки роботи ФЕС в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій, зокрема електромагнітного імпульсу.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Фотоелектричні станції є одним з важливих елементів в балансі потужності та електроенергії електроенергетичних систем, тому важливо розуміти, якість та кількість електроенергії, яку вони можуть генерувати, і як це розподіляється в часі. Однією з причин непостійного виробництва фотоелектричних станцій є їх технічний стан, зокрема, поступова деградація фотоелектричних модулів.

Для ефективної участі фотоелектричних станцій у балансуванні потужності та електроенергії в електроенергетичних системах необхідно враховувати їх поточний технічний стан та перспективи щодо можливості вироблення електроенергії в заданому обсязі. Інвестори також зацікавлені в плануванні виробітку електроенергії та ефективності витрат на ремонт фотоелектричних станцій.

Програмно-апаратний комплекс дозволяє перевірити контактні з'єднання фотоелектричних станцій і визначити, чи опори контактних з'єднань знаходяться в допустимих межах. При необхідності формується база даних за допомогою квадрокоптера. Обстеження фотоелектричних модулів за допомогою тепловізора і пірометра дозволяє виявити дефекти, які проявляються областями з температурою, вищою за температуру справних фотоелектричних модулів. Виявлені дефекти елементів модулів детально досліджуються. На підставі отриманих результатів приймається рішення щодо доцільності подальшої експлуатації фотоелектричних модулів та визначається можливість їх відновлення або повної заміни [20].

Отже, важливо розглянути кошторисну вартість виїзду бригади, яка здійснюватиме планову діагностику обладнання фотоелектричної станції.

5.1 Загальна інформація про кошторисний розрахунок

Кошторисна вартість будівництва (ремонту) – це сума грошових коштів, необхідних для його здійснення у відповідності з проектною документацією. Кошторисна вартість є основою для визначення розміру капітальних вкладень, фінансування будівництва, розрахунків за виконані підрядні (будівельно-монтажні) роботи тощо. Виходячи з кошторисної вартості, ведеться облік і звітність, проводиться оцінка діяльності будівельно-монтажних організацій і замовників, а також формується балансова вартість введення в дію основних фондів побудованих будівель і споруд [26].

Для визначення кошторисної вартості необхідно мати проект і робочу документацію, у складі яких приймаються параметри будівель, споруд, їх частин та конструктивних елементів, у тому числі: креслення, відомості обсягів будівельних і монтажних робіт, специфікації і відомості на обладнання, основні рішення з організації, прийняті в проекті будівництва, пояснювальні записки до вказаних матеріалів. Також діючі кошторисні нормативи, відпускні ціни на устаткування, меблі та інвентар.

Кошторисні нормативи – це узагальнена назва комплексу кошторисних норм, цін, що об'єднуються в окремі збірники. Разом з правилами і положеннями, що містять необхідні вимоги з виконання будівельних робіт, вони використовуються для визначення кошторисної вартості будівництва та реконструкції будівель і споруд, розширення і технічного переоснащення підприємств всіх галузей народного господарства.

Кошторисною нормою називається сукупність ресурсів (витрат праці робітників будівництва, часу роботи будівельних машин, потреби в матеріалах, виробих і конструкціях і т.д.), встановлена на прийнятий еквівалент будівельних, монтажних або інших робіт.

Головна функція кошторисних норм – визначити нормативну кількість ресурсів, необхідних для виконання відповідного виду робіт, як основи для наступного переходу до вартісних показників [27].

5.2 Кошторисний розрахунок заробітної плати

Заробітна плата визначається шляхом безпосереднього розрахунку, виходячи з потрібної кількості працівників, їх кваліфікації, прийнятої системи оплати праці [28]. На підставі періодичності проведення обслуговування ФЕС (таблиця 5.1) визначаються річні витрати на оплату праці персоналу відділу діагностики, що обслуговує ФЕС.

Розрахунок заробітної плати здійснюється на основі єдиних тарифних ставок і окладів, які визначаються виходячи з мінімальної заробітної плати. Розрахунок приведено для бригади у кількості 3-х осіб (2-х інженерів та провідного інженера) з урахуванням виїзду у відрядження на 5 робочих днів, зважаючи на адміністративні витрати, амортизаційні витрати на транспорт та проживання персоналу.

Вартість 1 години праці інженера та провідного інженера визначимо за формулою [28]:

$$З = \left(\frac{T_m}{t_m} \cdot K_N \right) \cdot (1 + K_{II}) \quad (5.1)$$

де T_m – мінімальний розмір оплати праці робітника 6700 грн/міс.; t_m – середньомісячна норма робочого часу 164,17 год; K_N – тарифний коефіцієнт розряду; K_{II} – розмір премії 25%.

$$З_{інжV} = \left(\frac{6700}{164,17} \cdot 3,29 \right) \cdot (1 + 0,25) = 167,84 \text{ (грн/год);}$$

$$Z_{\text{пров.інжV}} = \left(\frac{6700}{164,17} \cdot 3,94 \right) \cdot (1 + 0,25) = 200,1 \text{ (грн/год)}.$$

Таблиця 5.1 – Норми часу для діагностичного огляду

Вид ремонту	Періодичність проведення обстежень	Склад бригади	Норма часу, людина-година
Профілактичне обстеження обладнання	2 рази в рік	інженер – 1(V); інженер – 1(V); провідний інженер – 1(V).	8 год/день

Обстеження стану фотоелектричних модулів ФЕС проводиться за допомогою квадрокоптера, оснащеного вбудованою тепловізійною камерою. Під час діагностики фотоелектричних модулів індикаторною тепловізійною камерою, яка вбудована в квадрокоптер, можна виявити температурні відхилення і точно визначити місце їх розташування. Огляд обладнання проводиться 2 рази на рік згідно договору про експлуатацію з замовником, та при виникненні аварійної ситуації.

Для розрахунку витрат на обслуговування ФЕС за рік скористаємося формулою:

$$Z_{\text{ПОО}} = Z_{\text{нгод}} \cdot T_n \cdot T_\delta \cdot T_{\text{об}} \quad (5.2)$$

де T_δ – кількість днів у відрядженні;

T_n – кількість робочих годин, (ПОО – 8 год);

$T_{\text{об}}$ – періодичність проведення обслуговування (2 рази на рік).

Обчислимо витрати заробітної плати на плановий огляд обладнання ФЕС:

$$Z_{\text{ПОО}} = (Z_{\text{інж}} + Z_{\text{інж}} + Z_{\text{пров.інж}}) \cdot T_n \cdot T_{\text{д}} \cdot T_{\text{об}} = (167,84 + 167,84 + 200,1) \cdot 8 \cdot 5 \cdot 2 = 42862,4 \text{ (грн)}.$$

Кваліфіковані фахівці, які відповідають за обслуговування ФЕС, регулярно проводять огляд в їх догляді знаходящихя об'єктів для забезпечення їх ефективної роботи. У випадку виявлення будь-яких несправностей, здійснюється ремонт або заміна обладнання.

Виїзд бригади у відрядження на 5 робочих днів з урахуванням амортизаційних витрат на транспорт, проживання персоналу та адміністративних витрат показано у загальному кошторисному розрахунку на рік у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Загальний кошторисний розрахунок обслуговування ФЕС

Показники	Вартість (2 обстеження/рік)
Заробітня плата, грн	42862,4
Добові, 670 грн/день	20100
Адміністративні витрати, 1000 грн/день	30000
Витрати на проживання персоналу, 800 грн/доба	24000
Амортизаційні витрати на транспорт з врахуванням палива, грн	3000
Загальна вартість (без урахування ПДВ), грн/рік	119962

Висновки до розділу 5

У даному розділі виконано кошторисний розрахунок виїзду бригади для проведення планової діагностики фотоелектричної станції. Загальні витрати на профілактичне обстеження ФЕС складають 119962 грн/рік.

Діагностування дозволяє виявляти дефекти фотоелектричних модулів, визначати міру їх важкості, враховувати різні темпи деградації та приймати рішення про відновлення або заміну ФЕМ. Це дає змогу достовірно прогнозувати генерування ФЕС, а також раціонально планувати обсяги і терміни ремонтних робіт.

ВИСНОВКИ

У роботі досліджено причини виникнення дефектів фотоелектричних модулів та одержані шляхи виявлення їх деградації й визначення технічного стану з метою підвищення точності прогнозування вироблення електроенергії фотоелектричною станцією.

Сформовано позитивні й негативні наслідки інтеграції ФЕС в електричні мережі. Розглянуто умови ефективної роботи ФЕС, серед яких забезпечення великого оптичного коефіцієнта поглинання сонячного світла активним шаром напівпровідника, однорідність структури тонкої плівки по всій активній зоні фотоелемента, низький опір, послідовно увімкнений з сонячним елементом для зменшення втрат потужності в процесі роботи.

Проведено аналіз конструкції основних компонентів ФЕС та їх принципу дії. Описано переваги й недоліки різних видів ФЕМ. Показано будову фотоелектричного модуля й наведено вимоги до його характеристик, зокрема висока здатність пропускання й відбиття, ударостійкість, водонепроникність, стійкість до впливу ультрафіолетового випромінювання тощо.

Достовірне прогнозування генерування електроенергії фотоелектричними станціями неможливе без оцінки їх технічного стану й урахування деградації ФЕМ протягом експлуатації. Тому проведено дослідження методів виявлення пошкоджень ФЕМ, а також різновидів дефектів і причин їх виникнення.

Діагностування ФЕМ виконується за комплексною методикою, що включає в себе пошук температурних відхилень за допомогою квадрокоптера з вбудованою тепловізійною камерою, обстеження ФЕМ тепловізором зі зворотної сторони для уникнення відблисків, зняття ВАХ для модуля з виявленим дефектом та ведення статистики пошкоджень ФЕМ.

Дефекти ФЕМ можуть виникати через пошкодження конекторів, які з'єднують модулі (дефект стрінгу), розгерметезацію модулів (перегрів селу),

неправильне підключення стрінгів (плавлення розподільчої коробки), корозію алюмінію (пошкодження каркасу), тріщини скла, вплив пилу та інших забруднень (пошкодження захисного скла).

Досліджено дерево пошкоджень ФЕМ і виконано порівняння вольт-амперних характеристик справного модуля із ФЕМ з різними дефектами.

Проаналізовано структурну схему моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ і його нейро-нечітку модель, яка була створена у системі MATLAB.

Для розуміння технічного стану ФЕМ і забезпечення очікуваного рівня генерування електроенергії запропоновано користуватися програмно-апаратним комплексом діагностування ФЕС, який описаний у блок-схемі і ґрунтується на зборі інформації про величину потужності генерації станції та струмів стрінгів за певних метеорологічних умов. Проводиться аналіз поточних значень у порівнянні з ретроспективними і розрахунковими, отриманими за допомогою нейро-нечіткої мережі. У випадку невідповідності поточного значення ретроспективному чи розрахунковому проводяться обчислення коефіцієнтів-індикаторів для визначення коефіцієнта залишкового ресурсу. Це дозволяє ідентифікувати стан модуля та передбачити розвиток дефекту.

Ефективність даного методу підтверджено експериментальним дослідженням, яке було проведено на даховій ФЕС і у навчально-дослідній лабораторії кафедри електричних станцій і систем ВНТУ.

Запропоновано заходи з охорони праці щодо безпечного виконання роботи під час діагностування технічного стану ФЕС, розроблено технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії. Виконано розрахунок захисного заземлення для ФЕС. Наведено заходи з підвищення безпеки роботи ФЕС в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.

Здійснено кошторисний розрахунок виїзду бригади для проведення планової діагностики ФЕС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Share of energy consumption from sources in Europe (8th EAP). [Електронний ресурс] URL: <https://www.eea.europa.eu/ims/share-of-energy-consumption-from>
2. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. [Електронний ресурс] URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>
3. Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями : монографія / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, та ін. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 136 с.
4. Греськов Д. О., Тептя В. В. Вплив ВДЕ на режими роботи розподільних електромереж. Матеріали ЛІІ Науково-технічної конференції факультету електроенергетики та електромеханіки, тези доповіді, Вінниця. 2023. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2023/paper/view/18742/15538>
5. Електричні мережі з відновлювальними джерелами енергії: навчальний посібник / Л. Н. Добровольська, В. І. Волинець, Д. С. Собчук, В. В. Черкашина. // Під редакцією Добровольської Л.Н.– Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2016. – 352 с.
6. Лежнюк, П. Д. Оцінювання деградації фотоелектричних станцій в задачі прогнозування генерування електроенергії : монографія / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, О. О. Рубаненко. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 190 с.
7. Колонтаєвський Ю. П. Фотоенергетика : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай, С. В. Котелевець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 160 с.
8. Сонячна панель: з чого вона складається та як працює. [Електронний ресурс] URL: <https://soncedim.com.ua/blog/soniachna-panel-z-chogo-vona-skladaetsia-ta-iak-pratsiue>

9. Колонтаєвський Ю. П. Перетворювальна техніка в нетрадиційній та відновлювальній електроенергетиці : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 67 с.

10. Принцип роботи фотоелектричної станції. [Електронний ресурс] URL: <https://delaenergy.systems/articles/princzip-roboti-sonyachno%D1%97-elektrostanzi%D1%97/>

11. Сонячні модулі: різновиди та характеристики: [Електронний ресурс] URL: <https://newlineenergy.com.ua/sonyachni-moduli-riznovydy-ta-harakterystyky/>

12. Гаєвський О. Ю. Фотоенергетика. Частина I. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі: підручник / О. Ю. Гаєвський; Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2023. – 150 с.

13. Перспективні технології фотоелектричної сонячної енергетики. [Електронний ресурс] URL: <https://razumkov.org.ua/statti/perspektyvni-tekhnologii-fotoelektrychnoi-soniachnoi-energetyky>

14. Фотоелектричні панелі та їх типи. [Електронний ресурс] URL: <https://teplocel.com.ua/ru/ne-vyvodyty/fotoelektrychni-paneli-ta-yih-typy/>

15. Метод, спосіб і засоби оцінювання фактичного генерування фотоелектричних станцій з врахуванням їх деградації: науково-технічний звіт (остаточний) ВНТУ; кер. П. Д. Лежнюк. Вінниця, 2021. 199 с. № ДР 0121U113451.

16. Belik M. Evaluation of long term degradation process of monocrystalline si photovoltaic panels. Renewable Energy and Power Quality Journal, 2020. Vol. 18.

17. Рубаненко О. О. Аналіз нестабільності генерування відновлюваними джерелами енергії з урахуванням їх технічного стану. Світлотехніка та Електроенергетика, 2020, № 3(59).

18. Смагло І. І. Діагностика фотоелектричних модулів засобами інфрачервоної техніки. Доповідь на міжнародній науково-практичній

інтернет-конференції молодих вчених та студентів «Сучасні тенденції розвитку агропромислового сектора економіки в умовах конференції» Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, Україна 14-15 травня 2020.

19. Греськов Д. О., Лежнюк П. Д. Врахування деградації фотоелектричних модулів у розрахунках енергоефективності фотоелектричних станцій. Матеріали ЛІІ Науково-технічної конференції факультету електроенергетики та електромеханіки, тези доповіді, Вінниця. 2023. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2023/paper/view/18715/15500>

20. Комар, В. О., Лежнюк П. Д., Лесько В. О., Гунько І. О., Смагло І. І. Програмно-апаратний комплекс діагностування технічного стану обладнання фотоелектричних станцій. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Енергетика: надійність та енергоефективність». – 2022. – Вип. 2. – С. 43-50.

21. Rubanenko O., Lezhniuk P., Rubanenko O., Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete Information regarding the values of diagnostic parameters. Chapter of book: Fuzzy Logic). London, UK: IntechOpen Limited, 2019. [Електронний ресурс] URL: <https://www.intechopen.com/chapters/70379>

22. В. О. Комар, П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько, І. І. Смагло. Оцінювання технічного стану обладнання фотоелектричних станцій програмно-апаратними засобами. Відновлювальна енергетика. – №1/2023. – С. 19-26.

23. Бондаренко, Є. А. Навчальний посібник до розділу «Охорона праці» в магістерських кваліфікаційних роботах для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка : навч. посіб. / Бондаренко Є. А., Кутін В. М., Лежнюк П. Д. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 120 с.

24. Методичні вказівки до виконання розділу з охорони праці в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього ступеня магістра галузі

знань 14 «Електрична інженерія» / уклад.: С. В. Дембіцька, І. М. Кобилянська, О. В. Кобилянський. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – 52 с.

25. Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи з «Цивільного захисту» / Уклад. О. В. Поліщук, М. А. Томчук. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 65 с.

26. ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 Правила визначення вартості будівництва.

27. Інвестування [Текст] : конспект лекцій для студентів напряму підготовки 6.030503 «Міжнародна економіка» / Уклад.: Скоробогатова Н.Є. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 120 с.

28. Форми і системи оплати праці. [Електронний ресурс] URL: <https://buklib.net/books/26285/>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ
ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Причини деградації фотоелектричних модулів та виявлення їх під час експлуатації

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра електричних станій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність _____ Схожість _____

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку _____
(підпис)

Вишневський С. Я.
(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи _____
(підпис)

Греськов Д. О.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Лежнюк П. Д.
(прізвище, ініціали)

ДОДАТОК Б

Технічне завдання МКР

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.
(наук. ст., вч. зв., ініц. та прізви.)

_____ (підпис)

" _____ " _____ 2023 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

ПРИЧИНИ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ТА ВИЯВЛЕННЯ ЇХ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

08-21.МКР.003.00.004 ТЗ

Науковий керівник: д.т.н., проф. каф. ЕСС

_____ Лежнюк П. Д.
(підпис)

Студент групи 1ЕС-22м

_____ Греськов Д. О.
(підпис)

Вінниця 2023 р.

1. Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)

а) актуальність досліджень полягає у підвищенні точності прогнозу генерування електроенергії фотоелектричною станцією. На вироблену кількість електроенергії ФЕС впливають не тільки погодні умови, але і технічний стан їх обладнання, зокрема фотоелектричних модулів. Магістерська кваліфікаційна робота спрямована на дослідження та аналіз пошкоджень фотоелектричних модулів з використанням програмно-апаратного комплексу.

б) наказ ректора ВНТУ № 247 від 18 вересня 2023 р. про затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи.

2. Мета і призначення МКР

а) мета – дослідження причин виникнення дефектів фотоелектричних модулів та їхнього впливу на генерування електроенергії фотоелектричними станціями;

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

3. Джерела розробки

Список використаних джерел розробки:

1. Лежнюк, П. Д. Оцінювання деградації фотоелектричних станцій в задачі прогнозування генерування електроенергії : монографія / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, О. О. Рубаненко. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 190 с.

2. Метод, спосіб і засоби оцінювання фактичного генерування фотоелектричних станцій з врахуванням їх деградації: науково-технічний звіт (остаточний) ВНТУ; кер. П. Д. Лежнюк. Вінниця, 2021. 199 с. № ДР 0121U113451.

4. Технічні вимоги до виконання МКР

Передбачається дослідження фотоелектричної станції з використанням програмно-апаратного комплексу.

– технічне завдання: виявлення деградації фотоелектричних модулів та встановлення причин їх появи.

– елементна база: апаратна частина комплексу визначення технічного стану ФЕС (SEAWARD PV150, Актаком АММ6015, OWON Ti332, Benetech GM1250 та ін.)

– показники технологічності: експлуатація електрообладнання має

виконуватися відповідно до вимог ПУЕ та ПТЕ.

5. Економічні показники

Визначити основні техніко-економічні показники виїзду бригади для проведення планової діагностики фотоелектричної станції.

6. Етапи МКР та очікувані результати

№ з/п	Назва етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	кінець	
1	2	3	4	5
1	Розроблення технічного завдання	21.09.23	23.09.23	формування технічного завдання
2	Аналіз роботи фотоелектричних станцій в енергосистемі та функціонування їх елементів	24.09.23	29.09.23	аналітичний огляд літературних джерел, задачі досліджень, розділ 1 ПЗ
3	Виявлення деградації фотоелектричних модулів	30.09.23	10.10.23	розділ 2 ПЗ
4	Використання програмно-апаратних комплексів для визначення технічного стану модуля	11.10.23	28.10.23	розділ 3 ПЗ
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	29.10.23	05.11.23	розділ 4 ПЗ
6	Економічна частина	06.11.23	12.11.23	розділ 5 ПЗ
7	Оформлення пояснювальної записки	13.11.23	21.11.23	пояснювальна записка
8	Оформлення презентації	22.11.23	27.11.23	презентація
9	Перевірка МКР на плагіат. Попередній захист МКР	28.11.23	01.12.23	Результат перевірки на плагіат, відгук керівника
10	Опонування МКР	01.12.23	04.12.23	Відгук опонента
	Захист МКР	Друга декада грудня		Доповідь та відповіді на запитання

7. Очікувані результати

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи очікуються результати дослідження причин деградації фотоелектричних модулів та

отримання шляхів їх виявлення для підвищення точності прогнозування вироблення електроенергії фотоелектричною станцією.

8. Матеріали, що подаються до захисту МКР

Пояснювальна записка МКР (паперовий екземпляр), ілюстративні матеріали, відгук наукового керівника, відгук опонента, анотації до МКР українською та іноземною мовами, протокол перевірки МКР на наявність текстових запозичень.

9. Порядок контролю виконання та захисту МКР

Виконання етапів розрахункової документації МКР контролюється науковим керівником та завідувачем кафедри ЕСС згідно зі встановленими термінами. Захист МКР відбувається на засіданні екзаменаційної комісії, затвердженої наказом ректора.

10. Вимоги до оформлення МКР

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти. СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:2, 2021 р.

11. Вимоги щодо технічного захисту інформації в МКР з обмеженим доступом

Відсутні.

Додаток В
(довідниковий)

Найпоширеніші дефекти ФЕМ, які були виявлені на ФЕС

В даному прикладі показана ФЕС, яка експлуатується з 2005 року [6, 15]. Розглянута станція містить у собі 192 панелей, які функціонують вже понад 16 років. Усі електричні та неелектричні параметри вимірюються з 10-хвилинним інтервалом. Кут нахилу панелей 45° . Тепловізійний контроль кожної панелі виконувався 1 раз в рік планово.

На рисунку В.1 помітні розшарування та деградації cells (темні cells).



Рисунок В.1 - Розшарування та деградація cells ФЕМ

117 панелей досліджуваної ФЕС мають дефект деградації розміру cells. Деградація матеріалу окремих клітин у більшості випадків із 116 дефектних ФЕМ виявляється не на одному дефектному cell, а на певній кількості cells.

Приклад даної деградації показано на рисунку В.2.



Рисунок В.2 – Деградація cells

На 37 ФЕМ виявлено дефект «Hotspot» (рисунок В.3).



Рисунок В.3 – Дефект «Hotspot»

Значно впливає на технічний стан та енергоефективність генерування пошкодження етилен-вінілацетатового покриття (EVA) ФЕМ. Внаслідок цього на ФЕМ відкрито потрапляє волога (рисунок В.4).



Рисунок В.4 – Пошкодження EVA

В результаті місцевого фізичного та термічного впливу на панелях утворюються мікротріщини. Далі цей дефект розповсюджується, тріщина зростає і повільно розділяє cell в одному або декількох напрямках. Приклад мікротріщин на панелі наведено на рисунку В.5.

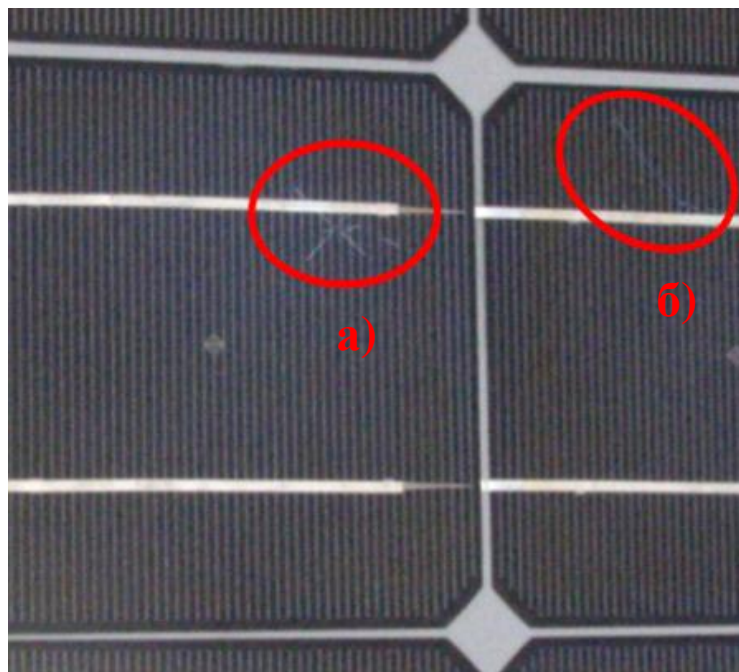


Рисунок В.5 – Мікротріщини: а) у формі зірки; б) лінійна

Ще одним видом дефектів є «слід равлика». Такі сліди можна побачити на нижній частині панелей. До металевого каркасу прикріплені забруднюючі речовини, і їх не можливо повністю вимити з поверхні під час природних дощів. Забруднювачі створюють шар, який повільно стає твердим і міцним.

Приклад дефекту «слід равлика» показано на рисунку В.6.



Рисунок В.6 – Дефект «слід равлика»

Під дією забруднення на алюмінієвому каркасі панелі може утворитися корозія (рисунок В.7).



Рисунок В.7 – Вплив забруднення на фотоелектричну панель

Також чимало дефектів з'являються внаслідок помилок при монтажі ФЕМ (кріплення, виготовлення каркасу тощо).

Дефекти ФЕМ, які виникли при помилках монтажу наведені на рисунках В.8-В.13.



Рисунок В.8 – Тріщини на захисному склі ФЕМ



Рисунок В.9 – Пошкодження каркасу ФЕМ



Рисунок В.10 – Пошкодження кріплення ФЕМ



Рисунок В.11 – Пошкодження склопакету



Рисунок В.12 – Пошкодження герметика ФЕМ



Рисунок В.13 – Значне вигинання каркасу ФЕМ через помилки монтажу

Через вигинання каркасу ФЕМ пошкоджуються контакти в місці з'єднання cell з busbar (рисунок В.14) та відбувається зростання опору та нагрів контактів в місці з'єднання cells між собою або пошкодження діоду Шоттки (рисунок В.15).



Рисунок В.14 – Пошкодження контактів в місці з'єднання cell з busbar



Рисунок В.15 – Пошкодження діоду Шоттки

У клемному терміналі junctionbox теж можуть перегріватись контакти (рисунок В.16).



Рисунок Г.16 – Перегрів у клемному терміналі junctionbox

Через пошкодження ізоляції можуть виникати великі аварії (рисунок В.17)



Рисунок В.17 – Аварії, які виникли внаслідок пошкодження ізоляції

За допомогою програмно-апаратного комплексу були виявлені пошкодження на Писарівській ФЕС (рисунок В.18)

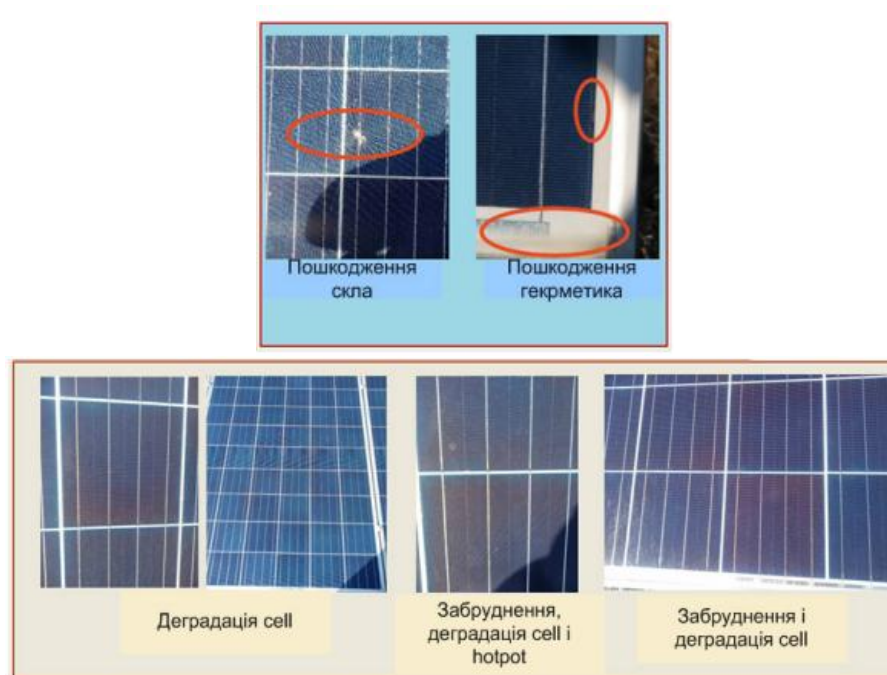


Рисунок В.18 – Пошкодження, виявлені на Писарівській ФЕС

Також програмно-апаратний комплекс дозволяє уникати помилкових припущень щодо пошкоджень ФЕМ. Під час візуального огляду панелей можна помітити коричневі сліди на краях сонячних елементів у фотоелектричному модулі, які можуть нагадувати дефект hotpot. Проте в дійсності такі потемніння спричинені особливостями виробництва [15]. Приклад даних потемнінь наведено на рисунку В.19.



Рисунок В.19 – Потемніння, спричинені особливостями виробництва

Додаток Г
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**ПРИЧИНИ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ТА
ВИЯВЛЕННЯ ЇХ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

(Назва магістерської кваліфікаційної роботи або проєкту)

Студент _____
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис) (прізвище, ініціали)



Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем

Магістерська кваліфікаційна робота на тему:
ПРИЧИНИ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ
ТА ВИЯВЛЕННЯ ЇХ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Виконав: студент 2 курсу, групи 1ЕС-22м
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
освітня програма «Електричні станції»,
Греськов Д. О.

Керівник: д.т.н., проф. каф. ЕСС Лежнюк П. Д.

Вінниця 2023



Актуальність

Метою даної магістерської роботи є дослідження причин виникнення дефектів фотоелектричних модулів та їхнього впливу на генерування електроенергії фотоелектричними станціями.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі **основні завдання:**

- 1 Дослідження роботи фотоелектричних станцій в енергосистемі та конструкції їх елементів;
- 2 Аналіз методів виявлення деградації фотоелектричних модулів;
- 3 Встановлення найпоширеніших дефектів модулів з використанням статистики обстежень і дерева пошкоджень;
- 4 Застосування програмно-апаратного комплексу для визначення технічного стану ФЕС.

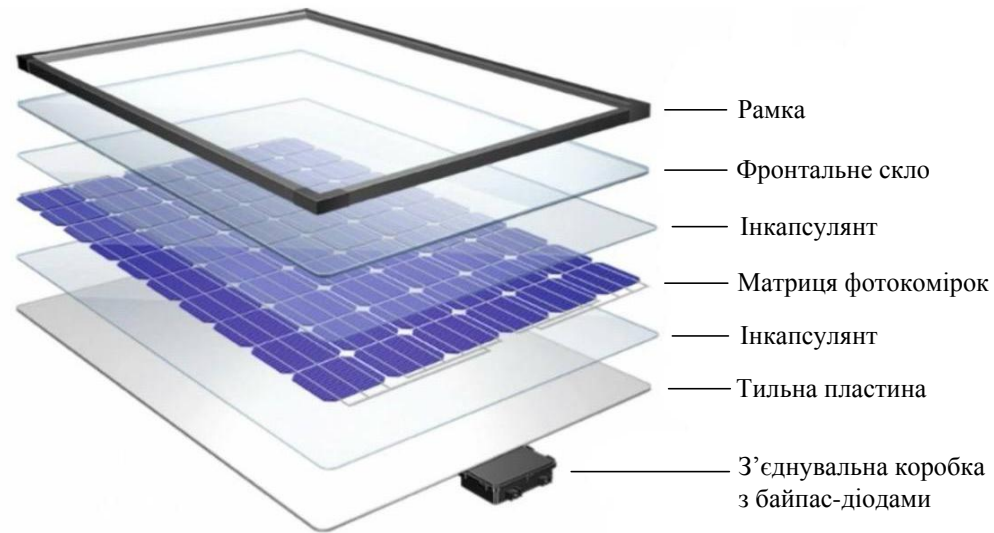


Конструкція та характеристики фотоелектричних модулів

3

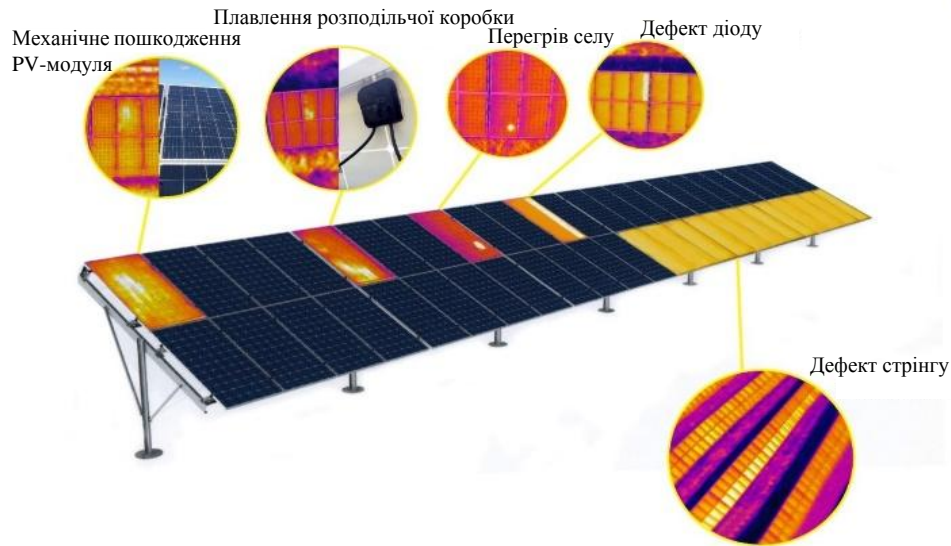
Вимоги до характеристик ФЕМ:

- здатність відбиття та пропускання сонячного світла;
- водонепроникність;
- висока ударостійкість;
- стійкість до впливу ультрафіолетового випромінювання
- низький термічний опір.



Основні компоненти кремнієвого модуля

Методи та засоби знаходження деградації фотоелектричних модулів



Обстеження ФЕМ зі зворотної сторони з використанням тепловізора



Обстеження ФЕС за допомогою квадрокоптера



Найпоширеніші дефекти фотоелектричних модулів

5



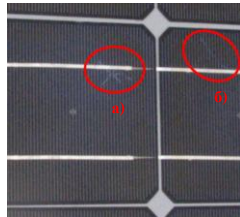
Деградація cells



Дефект «Hotspot»



Пошкодження EVA



Мікротріщини: а) у формі зірки; б) лінійна



Дефект «слід равлика»



Пошкодження герметика ФЕМ



Пошкодження кріплення ФЕМ



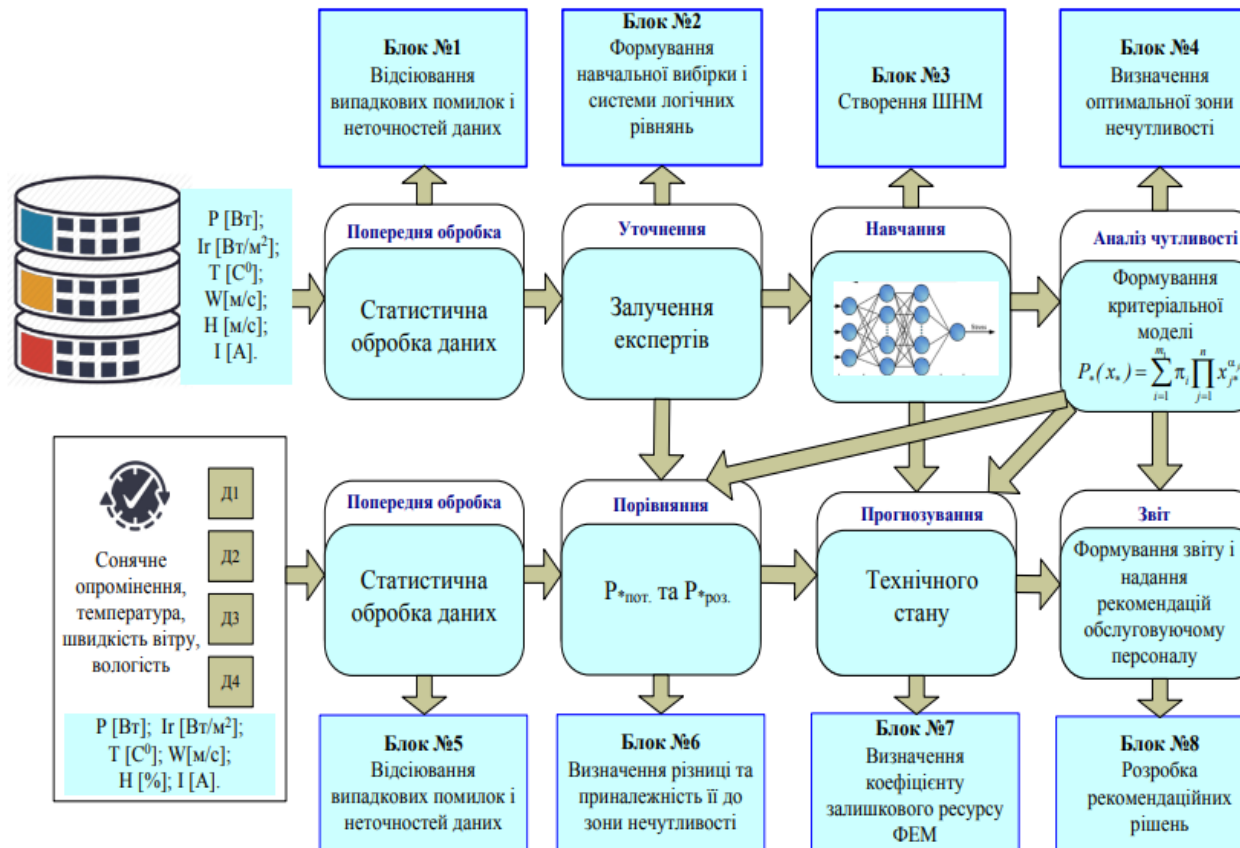
Пошкодження контактів в місці з'єднання cell з busbar



Пошкодження діоду Шоттки



Визначення технічного стану модулів за допомогою програмно-апаратного комплексу





Визначення технічного стану модулів за допомогою програмно-апаратного комплексу

8



Вигляд досліджуваної дахової ФЕС



Збір даних для оцінювання ефективності генерування ФЕС



Висновки

9

У магістерській кваліфікаційній роботі отримані шляхи виявлення деградації фотоелектричних модулів для визначення їхнього технічного стану з метою підвищення точності прогнозу генерування електроенергії фотоелектричною станцією.

У розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» наведено технічні рішення щодо безпечного виконання роботи, гігієни праці та виробничої санітарії, здійснено розрахунок захисного заземлення для ФЕС, а також запропоновано заходи з підвищення безпеки роботи ФЕС в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

В економічній частині виконано кошторисний розрахунок виїзду бригади для проведення планової діагностики ФЕС.



Дякую за увагу!

