

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

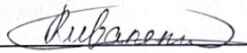
Бакалаврська дипломна робота на тему:

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

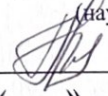
Виконав: студент 4 курсу групи 2ЕЕ-206
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електроенергетика та електротех-
ніка»

Ярош Р.Р.

Керівник: д.т.н., проф., професор каф.
ЕСС Рубаненко О.О.


«___» _____ 2024 р.

Рецензент: к.т.н., доц. каф. ЕСС Е.М.
(наук. ступінь, вч. звання, назва кафедри)

 Рубаненко О.О.
«___» _____ 2024 р.

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


«17» 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ 2024 рік

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

« 11 » 03 2024р.

З А В Д А Н Н Я **НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Ярошу Роману Руслановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Дослідження зміни технічного стану обладнання фотоелектричних станцій під час експлуатації»

Керівник роботи д.т.н., проф., професор каф. ЕСС Рубаненко О.О.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 11.03.2024 року № 80

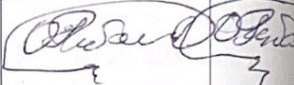
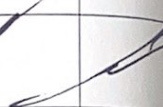
2. Термін подання студентом роботи червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи: P. Lezhniuk, V. Komar, M. Belik, O. Rubanenko and I. Smaglo, "Analysis of technical conditions influencing the operation of PV power stations cooperating with controlled power grids," 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005686. Посилання на періодичні видання. Вихідні дані для проведення обчислювальних експериментів: Статистика пошкоджень елементів фотомодулів (cell – 3.9%; busbar – 1.6%; junction box – 81.8%; алюмінієвий каркас – 1.9%; захисне скло – 2.6%; кабель, що з'єднує cell з junction box – 1.2%.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Дослідження особливостей фотоелектричних модулів ФЕС; 2. Аналіз технічного стану обладнання фотоелектричних станцій; 3. Математична модель залишкового ресурсу ФЕМ; 4. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 2-4. Актуальність, мета, задачі, об'єкт, предмет. 6. Структурна схема ІЕС. 7. Елементи фотоелектричного модуля. 8. Пошкодження обладнання ФЕС. 9-10. Пошкодження елементів ФЕМ. 11. Аналіз технічного стану фотоелектричних модулів. 12. Пошкодження елементів фотоелектричного модуля. 13. Етапи побудови математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ. 14. Результати дослідження пошкоджуваності ФЕМ. 15. Таблиця даних для моделювання. 16. Етапи розрахунку залишкового ресурсу ФЕМ. 17-18. Структура моделі та нейромережі.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання ви- дав	виконав прийм.
Спеціальна частина	Керівник роботи Рубаненко О.О., д.т.н., проф., професор кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О. В. д.п.н., проф., завідувач каф. БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання 16 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи	
		початок	кінець
1	Вступ. Огляд літературних джерел	21.01.24	15.02.24
2	Дослідження особливостей фотоелектричних модулів ФЕС (розділ 1 БДР)	16.02.24	15.03.24
3	Аналіз технічного стану обладнання фотоелектричних станцій (розділи 2 БДР)	16.03.24	10.04.24
4	Математична модель залишкового ресурсу ФЕМ (розділ 3 БДР)	11.04.24	11.05.24
5	Охорона праці (розділ 4 БДР)	12.04.24	19.05.24
6	Формування висновків по роботі. Оформлення пояснювальної записки	20.05.24	24.05.24
7	Виконання ілюстративної частини та оформлення презентації	25.05.24	04.06.24
	Перевірка БДР на плагіат. Попередній захист БДР	05.06.24	07.06.24
	Рецензування БДР	08.06.24	10.06.24
	Захист БДР	За графіком	

Студент

(підпис)

Р. Р. Яро

Керівник роботи

(підпис)

О. О. Рубанен

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська дипломна робота на тему:

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Виконав: студент 4 курсу групи 2ЕЕ-206
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електроенергетика та електротех-
ніка»

Ярош Р.Р. _____

Керівник: д.т.н., проф., професор каф.
ЕСС Рубаненко О.О.

«____» _____ 2024 р.

Рецензент: _____
(наук.ступінь, вч.звання, назва кафедри)

«____» _____ 2024 р.

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

«____» _____ 2024 р.

Вінниця ВНТУ 2024 рік

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

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

«__» _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Ярошу Роману Руслановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Дослідження зміни технічного стану обладнання фотоелектричних станцій під час експлуатації»
Керівник роботи д.т.н., проф., професор каф. ЕСС Рубаненко О.О.
затверджена наказом вищого навчального закладу від 11.03.2024 року № 80
2. Термін подання студентом роботи _____ червня 2024 року
3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи: P. Lezhniuk, V. Komar, M. Belik, O. Rubanenko and I. Smaglo, "Analysis of technical conditions influencing the operation of PV power stations cooperating with controlled power grids," 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005686.
Посилання на періодичні видання. Вихідні дані для проведення обчислювальних експериментів: Статистика пошкоджень елементів фотомодулів (cell – 3,9%; busbar – 1,6%; junction box – 81,8%; алюмінієвий каркас – 1,9%; захисне скло – 2,6%; кабель, що з'єднує cell з junction box – 1,2%.
4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Дослідження особливостей фотоелектричних модулів ФЕС; 2. Аналіз технічного стану обладнання фотоелектричних станцій; 3. Математична модель залишкового ресурсу ФЕМ; 4. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 2-4. Актуальність, мета, задачі, об'єкт, предмет. 6. Структурна схема ІЕС. 7. Елементи фотоелектричного модуля. 8. Пошкодження обладнання ФЕС. 9-10. Пошкодження елементів ФЕМ. 11. Аналіз технічного стану фотоелектричних модулів. 12. Пошкодження елементів фотоелектричного модуля. 13. Етапи побудови математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ. 14. Результати дослідження пошкоджуваності ФЕМ. 15. Таблиця даних для моделювання. 16. Етапи розрахунку залишкового ресурсу ФЕМ. 17-18. Структура моделі та нейромережі.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання ви- дав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Рубаненко О.О., д.т.н., проф., професор кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О. В. д.п.н., проф., завідувач каф. БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання 16 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		При- мітка
		початок	кінець	
1	Вступ. Огляд літературних джерел	21.01.24	15.02.24	
2	Дослідження особливостей фотоелектричних модулів ФЕС (розділ 1 БДР)	16.02.24	15.03.24	
3	Аналіз технічного стану обладнання фотоелектричних станцій (розділи 2 БДР)	16.03.24	10.04.24	
4	Математична модель залишкового ресурсу ФЕМ (розділ 3 БДР)	11.04.24	11.05.24	
5	Охорона праці (розділ 4 БДР)	12.04.24	19.05.24	
6	Формування висновків по роботі. Оформлення пояснювальної записки	20.05.24	24.05.24	
7	Виконання ілюстративної частини та оформлення презентації	25.05.24	04.06.24	
	Перевірка БДР на плагіат. Попередній захист БДР	05.06.24	07.06.24	
	Рецензування БДР	08.06.24	10.06.24	
	Захист БДР	За графіком		

Студент

(підпис)

Р. Р. Ярош

Керівник роботи

(підпис)

О. О. Рубаненко

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311.1

Ярош Роман Русланович «Дослідження зміни технічного стану обладнання фотоелектричних станцій під час експлуатації». Бакалаврська дипломна робота за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Вінниця : ВНТУ. 2024. 72 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 30 назв; рис.: 30; табл. 16.

В бакалаврській дипломній роботі було досліджено зміни технічного стану обладнання фотоелектричних станцій під час експлуатації.

В першому розділі дипломної роботи було виконано аналіз конструктивних особливостей фотоелектричних станцій. Зокрема, було досліджено класифікації окремого обладнання ФЕС за потужністю, вартістю та ефективністю роботи.

В другому розділі розглядаються причини пошкоджень обладнання ФЕС. Визначено, що в процесі експлуатації відбувається деградація фотомодулів. Виконано аналіз методів та способів визначення технічного стану фотомодулів ФЕС.

В третьому розділі розроблено математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу фотоелектричного модуля методом теорії нечітких множин та теорії нейронних мереж.

Ключові слова: нейроні мережі, коефіцієнт загального залишкового ресурсу, технічний стан, фотоелектрична станція.

ABSTRACT

Yarosh Roman Ruslanovych "Investigation of changes in the technical condition of photovoltaic equipment during operation". Bachelor's thesis in the specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics. Vinnytsia: VNTU. 2024. 72 c.

In Ukrainian. Bibliography: 30 titles; Figures: 30; Table 16.

The bachelor's thesis investigated the changes in the technical condition of photovoltaic power plant equipment during operation.

The first chapter of the thesis analyzed the design features of photovoltaic power plants. In particular, the classification of individual PV equipment by power, cost, and efficiency was investigated.

The second section discusses the causes of damage to PV equipment. It is determined that PV modules degrade during operation. The methods and ways of determining the technical condition of PV modules are analyzed.

In the third section, a mathematical model of the coefficient of residual life of a photovoltaic module is developed using the method of fuzzy set theory and neural network theory.

Keywords: neural networks, coefficient of total residual life, technical condition, photovoltaic power plant.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУ- ЛІВ ФЕС.....	7
1.1 Загальні відомості про ФЕС	7
1.1.1 Огляд фотоелектричних панелей	8
1.1.2 Класифікація за вартістю і потужністю.....	11
1.2 Матеріали та якість ФЕМ.....	13
1.3 Конструктивні особливості фотоелектричних модулів	15
1.4 Дослідження сучасних технологій виготовлення ФЕМ.....	17
1.5 Класифікація інверторів ФЕС	20
Висновки до першого розділу.....	24
2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ.....	25
2.1 Моніторинг технічного стану	25
2.2 Онлайн-моніторинг фотоелектричної системи.....	29
2.3. Методи діагностики фотоелектричних станцій	30
2.4 Інфрачервона термографія фотоелектричних систем	31
Висновки до другого розділу	36
3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ФЕМ.....	37
3.1 Статистика пошкоджуваності фотоелектричних модулів ФЕС	37
3.2 Методика розрахунку коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ	39
Висновки до третього розділу.....	55
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	56
4.1. Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи	56
4.1.1 Технічні рішення щодо безпечної організації робочого місця	56
4.1.2. Електробезпека.....	59
4.2 Технічні рішення з виробничої санітарії	60

4.2.1. Мікроклімат	60
4.2.2 Склад повітря робочої зони	61
4.2.3. Виробниче освітлення	62
4.2.4 Виробничий шум.....	63
4.2.5 Виробнича вібрація.....	64
4.3 Пожежна безпека.....	65
Висновки до четвертого розділу.....	67
ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69
ДОДАТКИ.....	73

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВАХ	—	Вольт-амперна характеристика
ДП	—	Діагностичний параметр
КЗ	—	Коротке замикання
КЗЗР	—	Коефіцієнт загального залишкового ресурсу
ККД	—	Коефіцієнт корисної дії
ПУЕ	—	Правила улаштування електроустановок
ФЕМ	—	Фотоелектричний модуль
ФЕС	—	Фотоелектрична станція

ВСТУП

Війна в Україні показала важливість енергетичної безпеки. Розвиток відновлюваних джерел енергії в електромережах - це шлях до підвищення енергетичної незалежності. Створення систем електропостачання споживачів на основі розподілених відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), наприклад, енергетичного кооперативу, може зменшити навантаження на централізовану енергосистему. Розподілені джерела енергії надають певні переваги з точки зору енергоефективності електропостачання, оскільки розташовані ближче до споживачів.

Розподілені джерела енергії дозволяють формувати локальні електроенергетичні системи на основі ВДЕ як балансуєчі групи в енергосистемі. Однак, оскільки генерація фотоелектричних та вітрових електростанцій залежить від погодних умов, вони не можуть бути гарантованим постачальником електроенергії без додаткових засобів. До складу електростанції з ВДЕ входить система накопичення енергії з достатніми запасами для компенсації нестабільності генерації та балансування, а також для роботи в автономному режимі. Система передачі може використовувати існуючі маневрені потужності, електрохімічні накопичувачі, водневі технології та біогазові установки як резерв.

Встановлена потужність фотоелектричних систем стрімко зростає, з 72,216 ГВт у 2011 році до 1412,093 ГВт у 2023 році, зазначається у звіті IRENA [1-3]. Моніторинг технічного стану та своєчасне виявлення несправностей фотоелектричної системи є важливою складовою ефективної експлуатації. Вплив технічного стану фотоелектричної системи на виробництво електроенергії описано в роботах [4-6]. В [7, 8] зазначено, що ймовірність виходу з ладу фотомодулів є вищою, ніж інших компонентів фотоелектричної системи. Одним з неруйнівних методів діагностики фотоелектричних модулів є термографічні дослідження [9]. Гаряча точка - це несправність, яку можливо виявити за допомогою термографічного контролю [10], але все ще залишається великою проблемою правильна ідентифікація та опис отриманих результатів. Поширеною помилкою, яка впливає

на ідентифікацію несправності, є некоректне введення вхідних значень випромінювальної здатності, температури, відстані від камери до фотомодуля, вологості і т.д. Дослідження процесу деградації фотомодуля є актуальним завданням [11]. Виявлення причин деградації може допомогти продовжити життєвий цикл та скоригувати режим роботи фотоелектричної системи [12-16]. В роботі [17] зазначено, що для моніторингу стану використовується інфрачервона (ІЧ) термографія, яка може бути застосована для визначення технічного стану елементів фотоелектричної системи в режимі реального часу. Завдяки появі ІЧ-камер вона вважається надійним, точним і економічно ефективним методом [18]. Інфрачервона термографія характеризується безпекою та неруйнівними методами контролю, тому вона ефективно використовується для виявлення несправностей фотоелектричних установок для відправки їх на більш глибокий контроль за допомогою флеш-тесту.

Метою роботи є дослідження зміни технічного стану обладнання фотоелектричних станцій під час експлуатації.

Згідно поставленої мети в роботі вирішено наступні задачі:

1. Виконати дослідження особливостей конструкції та експлуатації фотоелектричних модулів ФЕС;
2. Дослідити основні причини пошкоджуваності ФЕМ та методи їх діагностування;
3. Розробити модель узагальненого залишкового ресурсу фотомодуля ФЕС.

Об'єктом дослідження є обладнання фотоелектричних станцій.

Предметом досліджень є методи та засоби діагностування технічного стану обладнання ФЕС.

Практичне значення полягає у моделі визначення залишкового ресурсу ФЕС.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст магістерської роботи, отримані автором самостійно.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ФЕС

1.1 Загальні відомості про ФЕС

Фотоелектричні станції (ФЕС) є одним з найпоширеніших типів відновлюваних джерел енергії, які перетворюють сонячну енергію на електричну. Основним компонентом таких станцій є фотоелектричні панелі, які складаються з фотоелементів, в яких сонячна радіація перетворюється в електроенергію.

Фотоелектричні панелі складаються з напівпровідникових матеріалів, найчастіше кремнію. Коли сонячне світло падає на панель, фотоелементи поглинають фотони, що збуджують електрони і генерують електричний струм.

Основними компонентами системи є фотоелектричні панелі, інвертори, системи зберігання енергії

Переваги використання ФЕС наступні

- Екологічність: виробляють електроенергію без викидів парникових газів.
- Енергетична незалежність: зменшують залежність від викопних видів палива.
- Економічна вигода: після первинних інвестицій, експлуатаційні витрати є відносно низькими.

Недоліки використання ФЕС:

- Залежність від погоди: ефективність знижується в похмурі дні або вночі.
- Високі початкові витрати: вартість встановлення системи може бути значною.

Використовуються ФЕС як в приватних будинках для забезпечення автономного енергопостачання, так і на промислових об'єктах. Також вони мо-

жуть бути інтегровані в загальні енергетичні мережі для підтримки стабільності енергопостачання.

Структурна схема ФЕС показана на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Основні елементи ФЕС

Фотоелектричні станції відіграють важливу роль у розвитку відновлюваної енергетики та забезпеченні сталого розвитку [1, 3].

1.1.1 Огляд фотоелектричних панелей

Фотоелектричні панелі складаються з напівпровідникових елементів, які перетворюють сонячне світло на електричний струм. Існують різні види сонячних панелей, які мають схожий зовнішній вигляд, але відрізняються за своїми властивостями:

- Жорсткі панелі – зроблені з кристалічного або аморфного кремнію, зібрані в міцний металевий каркас.

- Гнучкі панелі – виготовлені з таких матеріалів, як селен, кремній або телурид кадмію. Завдяки полімерним напиленням з алюмінієвими провідниками ці панелі є легкими і тонкими.

- Односторонні панелі – поглинають світло лише з однієї сторони.
- Двосторонні панелі – здатні поглинати світло з обох сторін.

Основними матеріалами для напівпровідників панелей є кремній, арсенід галію, телурид кадмію або комбінація міді, індію, галію і селену. Найбільш поширеними є кремнієві панелі (рис.1.2).

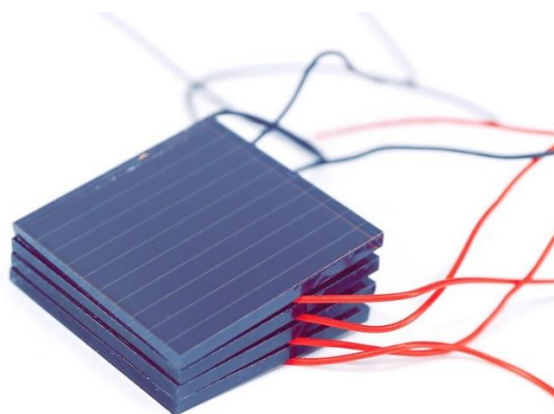


Рисунок 1.2 – Модуль на основі аморфного кремнію

Аморфні кремнієві модулі мають низький коефіцієнт корисної дії (ККД) (6-8%), але їх виробництво є економічно вигідним завдяки низькій вартості матеріалів.

Кремнієві пластини бувають монокристалічними (рис. 1.3) та полікристалічними (1.4).

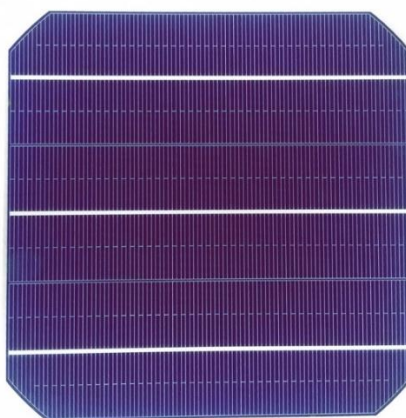


Рисунок 1.3 – Монокристалічний елемент

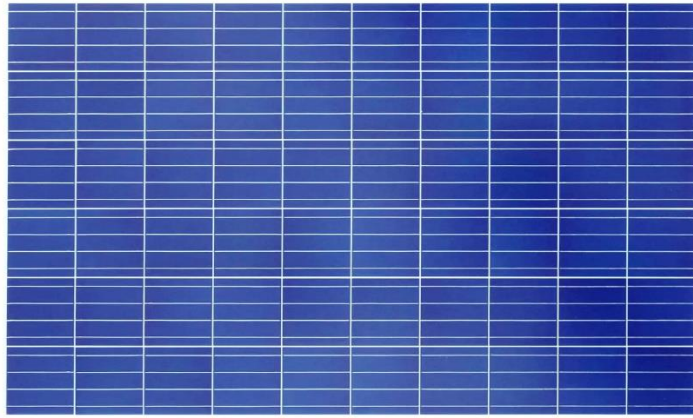


Рисунок 1.4– Полікристалічний елемент

Монокристалічні панелі мають ККД до 19%, що вище, ніж у полікристалічних панелей, але вони дорожчі. Вони виготовляються з високочистих штучно вирощених кремнієвих кристалів, що дозволяє досягти високої продуктивності. Зазвичай такі панелі мають алюмінієву рамку і протиударне скло, їх колір – темно-синій або чорний.

Полікристалічні панелі є дешевшою альтернативою монокристалічним. Вони виготовляються шляхом повільного охолодження розплавленого кремнію, утворюючи кристали різної форми і орієнтації. Їх ККД – до 15%. Верхній шар пластини містить кремній з фосфором, що забезпечує надлишок електронів у ланцюжку рп-переходу. Колір таких панелей – синій, вони також мають захисну рамку і скло.

Сонячна панель складається з наступних основних частин (рис. 1.5):

1. Алюмінієва рамка
2. Загартоване скло з антибликовим покриттям
3. Передня ламінуюча плівка (EVA)
4. Елементи (комірки), з'єднані послідовно плоскими провідниками
5. Задня ламінуюча плівка (EVA)
6. Задня захисна плівка (PET, TPE, TPT)
7. З'єднувальна коробка з захисним діодом і з'єднувальними кабелями

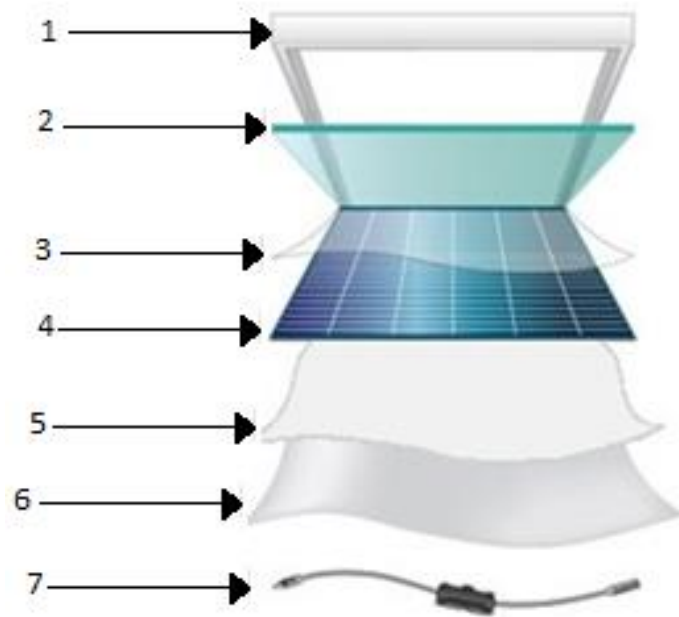


Рисунок 1.5 – Основні частини сонячної панелі

Захисні діоди запобігають перегріванню і виходу з ладу частково затієних елементів панелі. Ламінуючі плівки герметизують елементи, запобігаючи додатковому заломленню світла і втраті потужності, а також захищають елементи від атмосферних впливів і корозії.

Для ефективного функціонування панелі, сонячне світло повинно пройти через скло і ламінуючу плівку EVA. Якість цих компонентів сильно впливає на характеристики панелі. З часом ультрафіолетове випромінювання може знижувати прозорість ламінуючої плівки, що зменшує кількість світла, яке досягає елементів, і, відповідно, знижує потужність панелі.

1.1.2 Класифікація за вартістю і потужністю

Фотоелектричні модулі класифікуються на кілька типів залежно від їх коефіцієнта корисної дії (ККД) та вартості [2].

Основні типи включають аморфні, монокристалічні та полікристалічні модулі.

1. Аморфні кремнієві модулі

Коефіцієнт корисної дії (ККД): 6-8%

Вартість: Низька

Аморфні кремнієві модулі мають найнижчий ККД серед усіх типів, але їх основною перевагою є низька собівартість виробництва. Це робить їх популярними для застосувань, де економічна вигода є важливішою за ефективність.

2. Монокристалічні кремнієві модулі

Коефіцієнт корисної дії (ККД): До 19%

Вартість: Висока

Монокристалічні модулі виготовляються з високочистого кремнію, що забезпечує їх високий ККД.

Вони мають найдорожчу виробничу вартість через складний процес виготовлення та високу якість матеріалів.

Вони підходять для застосувань, де важлива максимальна ефективність і обмежений простір.

3. Полікристалічні кремнієві модулі

Коефіцієнт корисної дії (ККД): До 15%

Вартість: Середня

Полікристалічні модулі є компромісом між вартістю та ефективністю. Вони мають нижчий ККД, ніж монокристалічні, але вищий за аморфні модулі. Процес їх виробництва є простішим і дешевшим, що робить їх доступними для широкого використання. Порівняння характеристик фотомодулів приведена у таблиці 1.1.

Вибір типу фотоелектричного модуля залежить від конкретних потреб та умов використання. Якщо головним критерієм є вартість, аморфні модулі можуть бути найкращим вибором.

Для досягнення високої ефективності на обмеженому просторі краще обрати монокристалічні модулі.

Полікристалічні модулі є оптимальним вибором для тих, хто шукає баланс між вартістю та ефективністю.

Таблиця 1.1 – Характеристика фотомодулів

Тип модуля	ККД	Вартість	Особливості	Тип модуля
Аморфні кремнієві модулі	6-8%	Низька	Низька вартість, простий процес виробництва, підходить для великомасштабних застосувань	Аморфні кремнієві модулі
Монокристалічні модулі	До 19%	Висока	Висока ефективність, складний і дорогий процес виробництва, підходить для обмеженого простору	Монокристалічні модулі
Полікристалічні модулі	До 15%	Середня	Збалансована вартість та ефективність, доступні для широкого використання	Полікристалічні модулі

1.2 Матеріали та якість ФЕМ

Коефіцієнт корисної дії є важливим показником, що характеризує ефективність сонячної панелі. В лабораторних умовах за стандартних параметрів (1000 Вт енергії сонячного світла, температура 25°C, робоча площа модуля 1 м², кут нахилу панелі 30 градусів) ККД показує, який відсоток світлової енергії перетворюється на електричну.

Наприклад, ККД 17% означає, що панель виробляє 170 Вт електроенергії з 1000 Вт сонячної енергії.

Еталоном для кремнієвих елементів є 20% ККД. Хоча деякі виробники досягли цього показника завдяки інноваційним технологіям, середній ККД зазвичай становить 16-18%.

Полікристалічні панелі мають нижчий ККД (14-16%), тоді як монокристалічні можуть досягати 17-20%.

Фактори, що впливають на ефективність. Ефективність сонячних панелей залежить від декількох ключових факторів:

1. Матеріал модуля: Використання монокристала або полікристала впливає на ККД і ступінь очищення матеріалу. Монокристалічні панелі, зазвичай, мають вищий ККД завдяки більшій чистоті матеріалу.
2. Якість збірки: Цілісність матеріалу, ступінь його очищення, технологія з'єднання фотомодулів і прозорість захисної збірки мають значний вплив на загальну ефективність панелей.

Класи якості сонячних панелей

Сонячні панелі класифікуються за якістю на чотири категорії:

- Grid A: Високоякісні монокристалічні панелі від провідних виробників, які мають високу ефективність і тривалий термін експлуатації.
- Grid B: Панелі з незначними косметичними дефектами, які не впливають на продуктивність.
- Grid C: Панелі з порушеннями структури фотоелементів або виготовлені з відходів виробництва, що мають незначні дефекти, але все ж здатні ефективно працювати.
- Grid D: Низькоякісні панелі з дешевих матеріалів, що мають низький ККД і швидко деградують.

Панелі з найвищою ефективністю виготовляються з монокристала кремнію компаніями, що мають багаторічний досвід у сонячній енергетиці.

Вони постійно впроваджують нові технології для покращення з'єднань, конструкцій та передачі енергії, що підвищує якість і продуктивність продукції.

У підсумку, при виборі сонячних панелей важливо враховувати матеріал модуля, якість збірки та заявлений ККД, щоб забезпечити максимальну ефективність і довговічність системи.

Найвищу ефективність і найменшу деградацію забезпечують монокристалічні панелі від провідних виробників, хоча вони й коштують дорожче.

1.3 Конструктивні особливості фотоелектричних модулів

Сонячні панелі складаються з різної кількості кремнієвих елементів (36, 60, 72, 96), що визначає їх номінальну напругу [8]:

- 36 елементів: Стандартний модуль з номінальною напругою 12 В. Потужність таких панелей залежить від розміру кожного з 36 елементів: чим більші розміри, тим більша потужність.
- 72 елементи: Модуль з номінальною напругою 24 В. Однак існують також модулі з 72 елементами, розраховані на 12 В, що досягається за рахунок послідовно-паралельного з'єднання елементів.

Вплив кількості елементів на напругу та потужність

Кожний кремнієвий елемент являє собою фотодіод з напругою в точці максимальної потужності 0,5 В. Отже, кількість елементів визначає номінальну напругу модуля:

- Модуль з 36 елементів (12 В): $36 \times 0.5 \text{ В} = 18 \text{ В}$ (з урахуванням напруги при зарядці акумуляторів).
- Модуль з 72 елементів (24 В): $72 \times 0.5 \text{ В} = 36 \text{ В}$ (також з урахуванням напруги при зарядці акумуляторів).

Модулі з кількістю елементів, що не є кратною 36, вважаються нестандартними. Використання таких модулів вимагає застосування МРРТ (Maximum Power Point Tracking) контролера для досягнення максимальної потужності. Використання PWM (Pulse Width Modulation) контролера може призвести до втрат до 30-40% від номіналу.

При виборі сонячного модуля важливо враховувати:

- Напругу системи: 12 В, 24 В або 48 В.
- Тип контролера: Для систем із нестандартними модулями рекомендується використовувати МРРТ-контролери для мінімізації втрат. Для систем з PWM-контролерами кількість елементів повинна бути кратною 36.

З підвищенням температури ефективність сонячних панелей знижується. Це є суттєвим недоліком кремнієвих фотоелементів, що потребує уваги при їх експлуатації в умовах високих температур.

Часткове затемнення панелей призводить до падіння вхідної напруги через втрати в неосвітлених елементах. Цю проблему можна вирішити встановленням байпасів на кожний фотоелемент панелі. Байпасні діоди дозволяють струму обходити затемнені або пошкоджені елементи, зменшуючи втрати продуктивності.

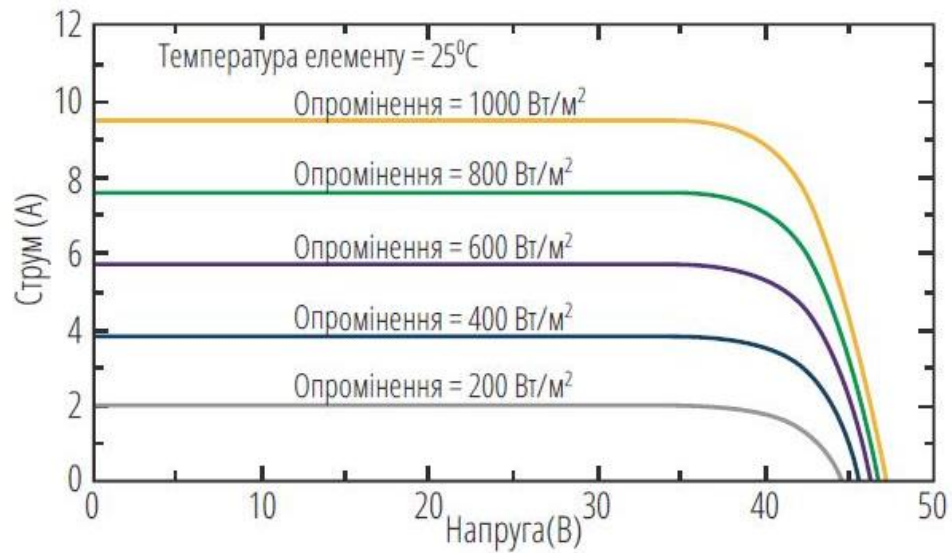
В хмарну погоду панелі з лінзами для концентрації випромінювання стають неефективними, оскільки лінзи втрачають свою функцію. Це означає, що для регіонів з частими хмарними умовами такі панелі не є оптимальним вибором.

З робочої характеристики фотоелектричної панелі видно, що для досягнення максимальної ефективності важливо правильно підбирати опір напруги. Це досягається за допомогою контролера управління фотоелектричними системами, який оптимізує режим роботи панелей, не дозволяючи підключати їх напряму до напруги (рис. 1.6).

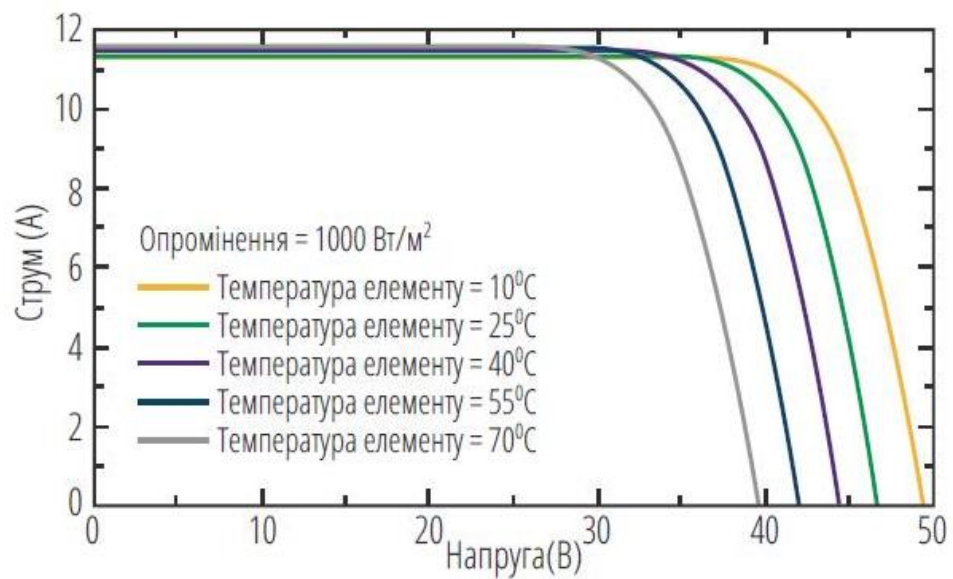
Рекомендації привиборі типу панелей:

1. Вибір панелей: Вибір панелей повинен враховувати кліматичні умови регіону, де вони будуть використовуватися. Для гарячих регіонів слід обирати панелі з меншою температурною залежністю.
2. Встановлення байпасних діодів: Рекомендується встановлювати байпасні діоди для мінімізації втрат через часткове затемнення.
3. Використання контролерів: Для оптимальної роботи системи важливо використовувати контролери управління фотоелектричними системами, які дозволяють підтримувати панелі в оптимальному режимі роботи.
4. Аналіз місцевих погодних умов: Панелі з лінзами для концентрації випромінювання не підходять для регіонів з частими хмарними умовами.

Ці рекомендації допоможуть максимально підвищити ефективність сонячних панелей і забезпечити їх надійну роботу в різних умовах.



а)



б)

Рисунок 1.6 – Робоча характеристика фотоелектричної панелі

1.4 Дослідження сучасних технологій виготовлення ФЕМ

Розглянемо аналіз сучасних технологій виготовлення фотомодулів, включаючи SPLIT технологію, багатошинні панелі (MBB), технологію

DUALGLASS та інші інновації [4].

Метою є вивчення ефективності та надійності різних конструкцій ФЕМ, а також оцінка їхнього впливу на продуктивність сонячних електростанцій.

SPLIT технологія

Однією з інновацій є використання половинчастих комірок у панелях, що складаються з двох паралельно працюючих електрогенеруючих пристроїв з 50% потужністю. Ця структура дозволяє підвищити продуктивність через зниження резистивних втрат, що викликані струмоприймачами. Півкомірка виробляє половину струму при стабільній напрузі, що дозволяє зменшити струмопровідні шини, знижуючи втрати виробітку внаслідок затінення або пошкодження. Переваги включають зменшення ризику появи гарячих точок і підвищення вихідної потужності до 20 Вт (Рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – SPLITтехнологія

MBB (MULTIBUSBAR) технологія

Багатошинні панелі використовують тонкі металеві провода, що проходять через кожен фотоелемент і несуть електрони через панель. Збільшення кількості шин (від 3 до 12) зменшує опір і коротить шлях проходження електронів, знижуючи ризик появи гарячих точок і мікротріщин. Прикладом

є технологія "Віолончель" від LG Energy, яка використовує 12 тонких круглих проводів замість плоских шин (рис. 1.7).

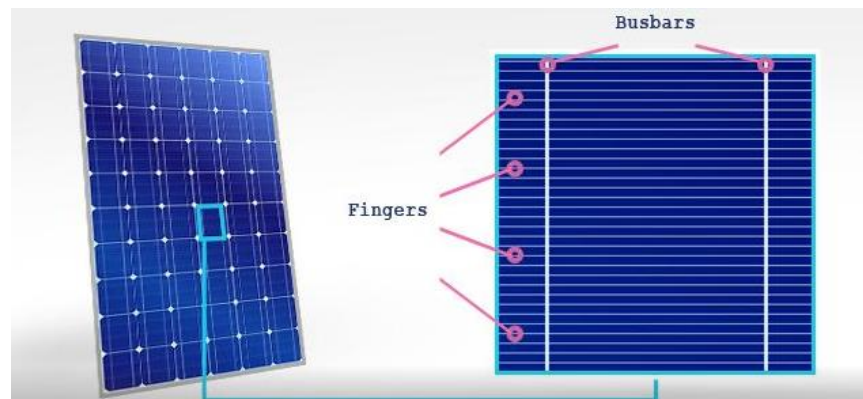


Рисунок 1.8– Технологія MBV

Технологія DUALGLASS

У панелях з подвійним склом замість EVA покриття з зворотного боку використовується гартоване скло. Це забезпечує вищу стабільність, стійкість до деградації та ультрафіолету, а також подовжує термін служби модулів. Прикладом є модулі від Trina Solar, які мають 30-річну гарантію (Рис. 1.9).

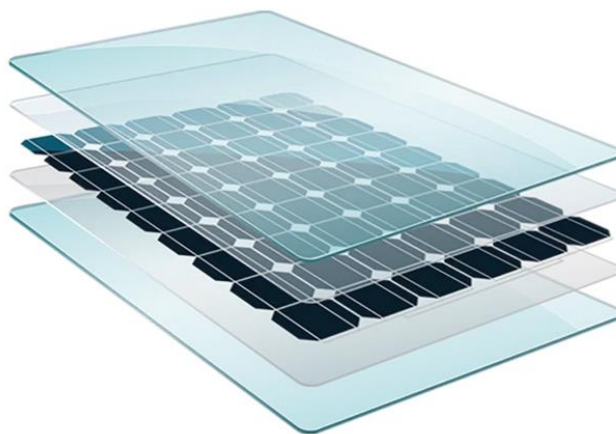


Рисунок 1.9– Технологія DUALGLASS

Важливим показником ефективності є правильне встановлення панелей відносно землі. Якщо дах занадто крутий або пологий, створюється спеціальний каркас або демонтується частина даху для компенсації кута нахилу.

Неправильний кут падіння сонячних променів може призвести до значних втрат ККД (табл. 1.2).

Інсоляція є критичним фактором, що впливає на ефективність системи. Для кожної місцевості рівень інсоляції буде відрізнятися з урахуванням сезонності. Чим вища інсоляція, тим більше енергії отримується на виході.

Таблиця 1.2 – Втрати ККД в залежності від кута падіння сонячних променів

Кут падіння сонячних променів	Відсоток втрат
81°	-120%
72°	-490%
50°	-19%
45°	-29%

1.5 Класифікація інверторів ФЕС

Інвертори, використані на фотоелектричних станціях, грають ключову роль у процесі конвертації постійного струму (ПС) з сонячних панелей у змінний струм (ЗС), який може бути використаний для підключення до електричної мережі або для власного споживання.

Типи інверторів, які часто застосовуються:

1. Мережеві інвертори: Вони використовуються в більших фотоелектричних станціях, де кілька сотень або навіть тисяч сонячних панелей з'єднані у серії і паралельно. Ці інвертори зазвичай мають велику потужність (кілька сотень кВт або більше) і здатність працювати з високими напругами, що дозволяє знижувати втрати енергії і забезпечувати ефективнішу роботу станції.
2. Стрінгові (String) інвертори: Вони використовуються в менших фотоелектричних системах або в ситуаціях, де панелі розташовані у групах

(стрічках). Кожна група сонячних панелей підключена до окремого входу інвертора. Це зменшує втрати потужності в результаті тіні або забруднення панелей.

3. Мікроінвертори: Ці інвертори встановлюються безпосередньо на кожен сонячну панель. Вони конвертують постійний струм у змінний для кожної панелі окремо, що дозволяє оптимізувати виробництво енергії на рівні окремих модулів. Мікроінвертори особливо ефективні в умовах варіабельності освітлення (тінь, хмарність тощо).

4. Гібридні інвертори: Вони комбінують функції інвертора для фотоелектричних панелей і інших джерел енергії, таких як вітрогенератори або батареї. Це дозволяє оптимізувати використання виробленої енергії та забезпечувати роботу системи в умовах недостатку сонячного світла.

5. Бездротові інвертори: Це новітні рішення, які дозволяють підключати сонячні панелі до мережі без потреби в проводах між панелями і інвертором. Це може спростити процес встановлення і зменшити витрати на обслуговування.

Кожен тип інвертора має свої переваги і недоліки в залежності від розміру і характеристик фотоелектричної станції, а також від умов використання. Вибір конкретного типу інвертора залежить від потреби в потужності, ефективності конверсії, вартості та інших факторів, що враховуються при проектуванні сонячної енергетичної системи.

Україна, як і багато інших країн, використовує різні моделі інверторів на фотоелектричних станціях, залежно від потреби і умов конкретного проекту. Ось деякі з популярних моделей інверторів, які часто зустрічаються в Україні:

1. *SMA Sunny Tripower*: Це серія мережевих інверторів від німецького виробника SMA Solar Technology AG. Вони підходять для середніх і великих фотоелектричних станцій і мають добру репутацію за надійність і ефективність (рис.1.9).



Рисунок 1.9– SMA Sunny Tripower

2. *ABB UNO*: Інвертори ABB (раніше відомі як Power-One) також популярні на українському ринку. Вони мають різні моделі від мікроінверторів до центральних інверторів, які відповідають різним потужностям та умовам використання (рис. 1.10).



Рисунок 1.10– ABB UNO-DM-6.0-TL-PLUS-B-QU

3. *Huawei SUN2000*: Ці інвертори виробляються китайською компанією Huawei і є популярними на ринку сонячних систем. Вони мають високий ККД і можуть працювати як на мережі, так і в автономному режимі (рис.1.11).



Рисунок 1.11– Huawei SUN2000-330KTL-H1

4. *Fronius Symo*: Інвертори від австрійської компанії Fronius також є популярними у великих сонячних станціях. Вони відомі своєю надійністю і можливістю інтеграції з різними системами моніторингу (рис.1.12).



Рисунок 1.12– Fronius Symo 3.7-3-S

5. *SolarEdge*: Це компанія, яка відома своїми мікроінверторами та оптимізаторами сонячних панелей. Вони забезпечують оптимальний вихід енергії в умовах часткового затінення або нерівномірного освітлення (рис.1.13).



Рисунок 1.13– Fronius Symo 3.7-3-S

Ці моделі відомі своєю якістю, надійністю і ефективністю, що робить їх популярними в Україні для різних типів сонячних установок. Вибір конкретної моделі інвертора зазвичай залежить від потужності системи, умов монтажу, технічних вимог і бюджету проекту.

Висновки до першого розділу

Сучасні технології виготовлення ФЕМ, такі як SPLIT, MBV та DUALGLASS, значно підвищують ефективність та надійність сонячних панелей. Важливим аспектом є також правильне встановлення панелей та оптимальний вибір кутів нахилу для зменшення втрат. Завдяки інноваціям, ККД сонячних панелей може зрости на 1-5%, що робить їх більш привабливими для широкого застосування в енергетиці.

2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

2.1 Моніторинг технічного стану

Моніторинг технічного стану та своєчасне виявлення несправностей фотоелектричної системи є важливою складовою ефективної експлуатації. Вплив технічного стану фотоелектричної системи на виробництво електроенергії описано в роботах [4-6].

При експлуатації фотоелектричних установок важливо постійно контролювати стан фотомодулів, оскільки вони є основною складовою всієї системи. Для цього необхідно в короткі терміни виявити пошкодження фотоелектричного модуля та якомога швидше усунути ці недоліки.

Пошкодження фотоелектричних панелей може вплинути на їх продуктивність та ефективність. Пошкодження фотоелектричних панелей можна класифікувати на:

- **Механічні ушкодження:** Удари, подряпини або інші механічні пошкодження можуть пошкодити поверхню сонячних панелей. Регулярна перевірка та обслуговування можуть допомогти виявити такі проблеми.
- **Забруднення:** Бруд, пил, листя або інші забруднення можуть знижувати ефективність панелей. Регулярне очищення допоможе зберегти їх продуктивність.
- **Корозія:** Якщо панелі не захищені від вологи або корозії, це може призвести до їх пошкодження.
- **Екстремальні умови:** Висока температура, сильний вітер, град або сніг можуть також пошкодити панелі.
- **Електричні проблеми:** Неправильне підключення, коротке замикання або інші електричні проблеми можуть пошкодити ФЕС.

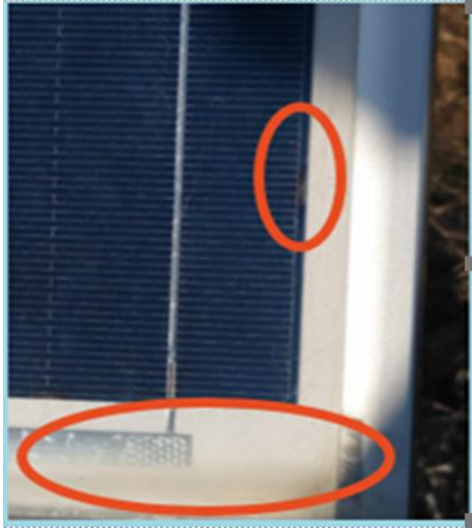
Для збереження ефективності ФЕС рекомендується регулярно перевіряти їх стан та вживати заходів для запобігання пошкоджень. В [7, 8] зазначено, що ймовірність виходу з ладу фотомодулів є вищою, ніж інших компонентів фотоелектричної системи. Одним з неруйнівних методів діагностики фотоелектричних модулів є термографічні дослідження [9]. Hot spot - це несправність, яку можливо виявити за допомогою термографічного контролю [10], але все ще залишається великою проблемою правильна ідентифікація та опис отриманих результатів.

Поширеною помилкою, яка впливає на ідентифікацію несправності, є некоректне введення вхідних значень випромінювальної здатності, температури, відстані від камери до фотомодуля, вологості і т.д. Дослідження процесу деградації фотомодуля є актуальним завданням [11]. Виявлення причин деградації може допомогти продовжити життєвий цикл та скоригувати режим роботи фотоелектричної системи [12-16].

В роботі [17] зазначено, що для моніторингу стану використовується інфрачервона (ІЧ) термографія, яка може бути застосована для визначення технічного стану елементів фотоелектричної системи в режимі реального часу. Завдяки появі ІЧ-камер вона вважається надійним, точним і економічно ефективним методом.

Інфрачервона термографія характеризується неруйнівними методами контролю, тому вона ефективно використовується для виявлення несправностей фотоелектричних установок прийняті рішень щодо їх демонтажу та відправлення на глибокий контроль за допомогою флеш-тестеру PASAN.

Регулярна інспекція панелей, інверторів, кабелів та інших компонентів допомагає виявляти можливі несправності та пошкодження. Це дозволяє вчасно вживати заходів для їх виправлення. Для мінімізації відхилень між реальними та розрахунковими значеннями ККД та енергії необхідно врахувати конкретні умови експлуатації фотоелектричної установки.



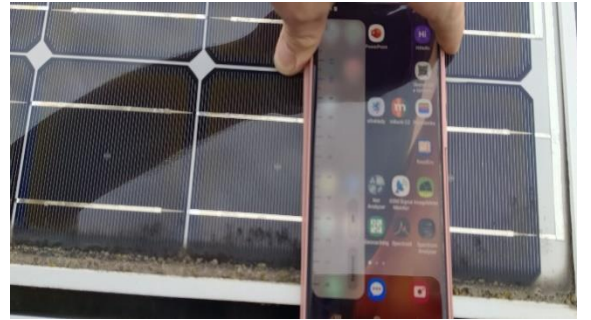
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(k)



(l)

Рисунок 2.1 Фотоелектричний модуль біологічної корозії: а – фотоелектричний модуль, який встановлено в центральній частині України (2 роки експлуатації, фото липень 2021 р.); б, с, d, k, l – фотоелектричні модулі дахової фотоелектричної установки в Чеській Республіці та причини виникнення біологічної корозії (фото 20 років експлуатації, березень 2024 р.); е – фотоелектричні модулі – дахової фотоелектричної станції в Чеській Республіці, лютий 2023 р.; f фотоелектричний модуль, встановлений у центральній частині України з біологічною корозією та hot-spot.

У дослідженні порівнювали фотоелектричні модулі та ідентифікацію процесу деградації фотоелектричної електростанції потужністю 20 кВт, встановленої на даху Західночеського університету (Чеська Республіка) у 2004 році, та фотоелектричної електростанції, встановленої в центральній частині України. На рис. 2.1 наведено приклади біологічної корозії фотоелектричних модулів в Україні та Чехії.

Діагностування фотоелектричних модулів є важливим завданням для забезпечення їх надійної роботи та ефективності. Методи діагностування можна класифікувати за різними ознаками:

- Визначення інтенсивності надходження світлової енергії: Цей метод дозволяє виміряти, наскільки інтенсивно сонячне випромінювання впливає на фотоелектричний модуль 1.
- Вплив зміни рівня освітленості: Дослідження впливу різних рівнів освітленості на характеристики сонячного модуля допомагає визначити оптимальні умови його роботи 1.

- Вплив кута нахилу сонячного модуля: Зміна кута нахилу відносно джерела світла може впливати на ефективність фотоелектричного модуля 1.
- Вплив забруднення робочої поверхні: Діагностування впливу забруднення на характеристики модуля допомагає визначити необхідність очищення 1.
- Вплив температури робочої поверхні: Вимірювання впливу температури на фотоелектричний модуль допомагає зрозуміти, як вона впливає на його продуктивність 1.

Ці методи дозволяють виявити проблеми та оптимізувати роботу фотоелектричних модулів. Більш детальні дослідження можуть включати вимірювання параметрів, таких як напруга, струм та потужність, а також враховувати реальні умови експлуатації

2.2 Онлайн-моніторинг фотоелектричної системи

Найзручнішим і першочерговим методом діагностики є онлайн-моніторинг всієї фотоелектричної системи, але цей метод обмежений у застосуванні та результативності.

Звичайно, неможливо підключити кожен модуль до пристрою, який би постійно зчитував його стан в масштабах великих або середніх промислових СЕС, тому такий моніторинг зводиться до моніторингу стану окремих модульних збірок (стрінгів), з'єднувальних коробок (КБ) або безпосередньо інверторів [11].

При моніторингу стрінгових інверторів відносно невеликої потужності можна відстежувати продуктивність стрінгів, а не конкретно фотомодулів. Тобто цей метод дає можливість зрозуміти, в якій збірці знаходиться імовірно пошкоджений фотомодуль, але отримати більш детальну інформацію таким чином неможливо. Що стосується інверторів великої потужності, то тут онлайн-моніторинг обмежується моніторингом стану СБ, оскільки такі інвертори

потребують більших вхідних значень. У цьому випадку локалізувати можливий дефект ще складніше, а знайти пошкоджений фотомодуль практично неможливо або буде супроводжуватися великими втратами сил і часу. Фотомодулі мають багато дрібних дефектів, таких як мікротріщини, "равликові доріжки", розшарування, сторонні відкладення, гарячі точки тощо, і всі вони впливають на втрати фотоелектричної станції. Запропонований метод дозволяє визначити модулі, які потребують більш глибокого дослідження, наприклад, на Flash-тестері.

2.3 Методи діагностики фотоелектричних станцій

Тим не менш, методи попереднього огляду дозволяють локалізувати ймовірні місця пошкоджень та обсяг майбутніх перевірок.

Наступним етапом, найбільш ефективним, є тепловізійне обстеження фотоелектричних модулів, яке дозволяє отримати максимальну кількість інформації за короткий проміжок часу. Тепловізійне обстеження має ряд переваг перед іншими видами діагностики:

- Діагностика проводиться на працюючому обладнанні, не вимагає його зупинки;
- Не потрібно виконувати оперативні перемикання;
- Забезпечується безпека персоналу при проведенні діагностики, оскільки використовується дистанційний безконтактний метод;
- Забезпечується висока продуктивність праці при проведенні діагностики;
- Забезпечується необхідна точність і достовірність результатів, використання тепловізора дозволяє бачити теплову картину в цілому, що унеможливорює пропуск дефектів.

Тепловізор - це прилад, призначений для перетворення теплового зображення об'єкта (зображення об'єкта, створеного власним тепловим випромінюванням або різницею у випромінювальній здатності поверхні об'єкта контролю) у видиме зображення (рис. 5-6).

Метод тепловізійного обстеження також має свої особливості для ФЕС різного розміру або різного розташування відносно поверхні, оскільки таке обстеження проводиться в кілька етапів.

2.4 Інфрачервона термографія фотоелектричних систем

Предметом представленого в бакалаврській роботі тепловізійного обстеження є оцінка існуючого стану фотоелектричних модулів Isofoton I-150, що експлуатується на доховій ФЕС.

Дата вимірювань:

- 14.5.2024, 13:00 - 15:30;
- Погода: майже ясно (1/8);
- Інтенсивність випромінювання: 810 Вт/м²
- Температура: 24,5 °С;
- Відносна вологість: 25 відс. ;
- Тиск: 1006,9 гПа;
- Вітер: 1,2 м/с північно-західний.

Для вимірювань було використано:

- Тепловізійні вимірювання: Тепловізор Flir T335, sn: 48804070 (калібрувальний лист: 48804070/003);

- Програмне забезпечення Flir Tools 6.4.18039.10003;

Вимірювання величин навколишнього середовища:

- Датчик сонячного випромінювання HT304N + аналізатор HT I-V400, sn: 12102028 (калібрувальний лист: 12102028);

- Двоканальний термометр Commeter D0321, sn: 07910337 (калібрувальний лист: 07910337/000);

- Термогігробарометр Commeter D4141, sn: 07910281 (калібрувальний лист: 07910281/000);

- Анемометр Trotec TA300, sn: 221200507 (калібрувальний лист: RGfv2019-0069/T220119022Q07-01).

За допомогою приладів були визначені параметри навколишнього середовища, які безпосередньо впливають на точність та інтерпретацію тепловізійних вимірювань фотоелектричних модулів (інтенсивність випромінювання, температура атмосфери та відносна вологість).

Температура в центрі аналізованих модулів вимірювалася контактним термометром Commeter D0321 ($t_{\text{hit}} = 30,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Зважаючи на вік модулів та їх помітну деградацію, фактична випромінювальна здатність модулів була визначена на рівні $\epsilon = 0,80$, використовуючи виміряну еталонну температуру хітів.

Тепловізійне вимірювання проводилося з відстані 2,0 - 8,0 м таким чином, щоб виключити можливе теплове відображення працівника, який виконує вимірювання, і в той же час пряме відображення Сонця. Температура навколишніх предметів, яка могла відбиватися на модулях, вимірювалася контактним методом за допомогою термометра Commeter D0321 ($t_{\text{hit}} = 40,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Вимірювання проводилося при достатній інтенсивності сонячного випромінювання ($I = 810 \text{ Вт/м}^2$) для забезпечення належного функціонування фотоелектричних модулів (достатньої продуктивності і, відповідно, можливості підключення навантаження). Якщо ця умова не виконується, результати не є остаточними. Перед самим тепловізійним вимірюванням було проведено огляд окремих модулів.

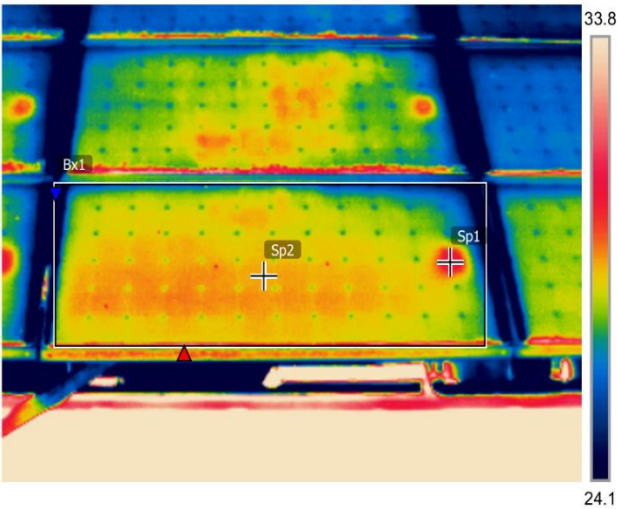
Проаналізовані модулі були промарковані наступним чином: Модуль 01 - Модуль 12 (з нижнього ряду зліва) (рис. 2.2).

У табл. 2.1 узагальнює основні результати тепловізійного обстеження та наступні рекомендації для подальшого аналізу. Враховуючи поточний стан окремих модулів, для 11 модулів немає необхідності в подальших вимірюваннях. Лише модуль 04 показує підвищену температуру для однієї комірки.

Вплив цієї аномалії слід проаналізувати шляхом вимірювання електричних величин (вольтамперних характеристик).

Measurements		
Bx1	Max	34.2 °C
	Min	16.0 °C
	Average	28.3 °C
Sp1	30.8 °C	
Sp2	29.0 °C	

Parameters	
Emissivity	0.8
Refl. temp.	40 °C
Distance	3 m
Atmospheric temp.	23.9 °C
Ext. optics temp.	25 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	25 %



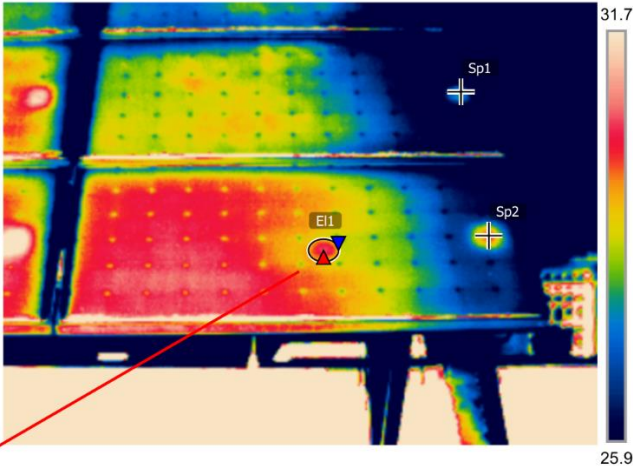
Thermogram - Modul 02

Measurements		
Ei1	Max	30.5 °C
	Min	29.0 °C
	Average	29.7 °C
Sp1	27.5 °C	
Sp2	29.8 °C	

Parameters	
Emissivity	0.8
Refl. temp.	40 °C
Distance	3 m
Atmospheric temp.	23.9 °C
Ext. optics temp.	25 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	25 %

Sp2 is not hot-spot, it is place, where located junction.

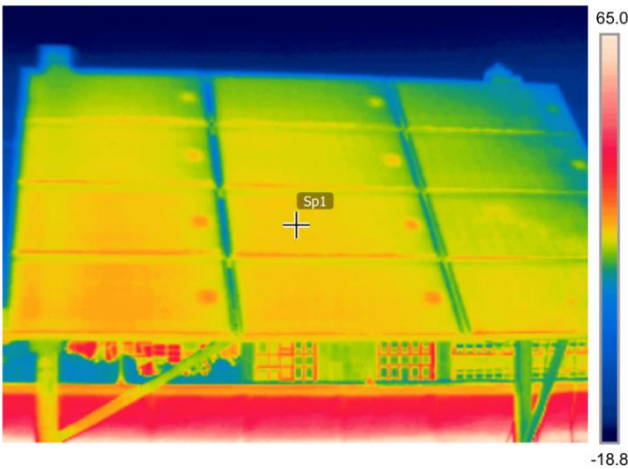
Ei1 is hot spot, and this studied cell should be check



Thermogram - Modul 04

Measurements	
Sp1	32.1 °C

Parameters	
Emissivity	0.98
Refl. temp.	36.7 °C
Distance	3 m
Atmospheric temp.	23.9 °C
Ext. optics temp.	25 °C
Ext. optics trans.	0.86
Relative humidity	25 %



Thermogram –Modul 01 – Modul 12

Рисунок 2.2 – Термограми фототоелектричних модулів

Можливі дефекти будуть ідентифіковані на отриманих термограмах за підвищеною температурою відповідних ділянок (стрінгу або комірки). Однак слід підкреслити, що фактичне підвищення температури може не свідчити про несправність модуля або його частини.

Будь-яка різниця температур окремих компонентів свідчить лише про їхню неоднорідність (модулів або комірок), а сам дефект або підвищену деградацію необхідно довести іншими методами діагностики, бажано шляхом вимірювання вольтамперної характеристики.

Базові вимірювання цих модулів можна виконати на місці установки за допомогою аналізатора фотоелектричних модулів за відповідних умов експлуатації (інтенсивність випромінювання не менше 600 Вт/м^2) і перевести результати в STC (стандартні умови випробувань).

Однак точні результати можна отримати лише в лабораторних умовах при STC за допомогою флеш-тестера.

Видно, що від модуля 01 до модуля 03 і від модуля 05 до модуля 12 не спостерігається однорідності. Приклад термограми показано на рис. 2.1 (модуль 02). Точка Sp2 це референтне вимірювання температури в місці, де було проведено контактне вимірювання. Область навколо точки Sp1 показує теплішу ділянку, спричинену гіршим розсіюванням тепла задньою частиною модуля через встановлену коробку. Ця область явно знаходиться за межами сітки комірок і, отже, не є дефектом модуля.

Для справних модулів це явище є досить поширеним. На нижньому краю модулів нижнього ряду (від модуля 01 до модуля 04) є помітна ділянка з явно підвищеною температурою (див. рис. 2.1). Це мох, інша випромінювальна здатність якого відображається на термограмі таким чином. Однак мох не заважає активній зоні модулів і поки що ніяк не впливає на їхню роботу. Тому це явище не компенсується на термограмах.

Модуль 04 показує чітку аномалію на термограмі однієї комірки, області E11. Це підвищення температури, ймовірно, пов'язане з дефектом або деградацією комірки і може бути дефектом модуля. Ситуація проілюстрована на рис.

2.1. Область навколо точки Sp2 знову вказує на підвищення температури через наявність коробки на задній панелі модуля, а точка Sp1 є лише допоміжною точкою для порівняння з іншою термограмою.

Термограма на рис. 2.2 ілюструє недоцільність використання методу зондування всього поля. У цьому випадку ми стикаємося з проблемою спрямованої випромінювальної здатності, як видно з нижнього і верхнього ряду модулів (очевидно, різні температури).

Основною проблемою є неможливість дотримання відповідної відстані через розташування даху. Іншим обмеженням є фізична роздільна здатність наявної тепловізійної камери, яка становить лише 320 x 240 пікселів.

Таблиця 2.1– Фінансові параметри дахової ФЕС

Номер модуля	Візуальний контроль	Термовізійний контроль	Рекомендації
Модуль 01	Біологічна коррозія	Без пошкоджень	-
Модуль 02	Біологічна коррозія	Без пошкоджень	-
Модуль 03	Біологічна коррозія	Без пошкоджень	-
Модуль 04	Біологічна коррозія	неоднорідний	Виміряти ВАХ
Модуль 05	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 06	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 07	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 08	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 09	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 10	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 11	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 12	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-

Висновки до другого розділу

Термографічний аналіз фотоелектричних модулів Isofoton I-150, що використовуються на фотоелектричній установці потужністю 20 кВт, яка експлуатується на даху навчального корпусу електротехнічного факультету Університету Західної Богемії в Пльзені, проведений 14 травня 2024 року, виявив один модуль, який може бути дефектним або деградованим. Однак результати цього аналізу повинні бути підтверджені подальшими вимірюваннями (вольтамперні характеристики в умовах STC).

Другий результат - визначення відповідного методу для подальшого тепловізійного аналізу експлуатованої системи. Беручи до уваги наявне обладнання та розташування даху, необхідно зробити знімки окремих окремих модулів. Процес не може бути прискорений скануванням цілих полів, оскільки виникають технічні обмеження (фізична роздільна здатність) наявних тепловізійних камер і просторові обмеження даху, які не дозволяють підтримувати відповідну відстань. Аналіз розташування фотомодулів з біологічною корозією показав, що вона частіше трапляється в нижніх рядах сонячних панелей.

В роботі відмічено, що на біологічну корозію впливає стан даху та розташування фотомодулів на даху. Цієї проблеми можна уникнути на проектному стані. Іншою невиключеною проблемою було зазначено перегрів з'єднувальної коробки під час експлуатації ФЕС, який сумарно впливає на одну комірку або один ряд. Це було добре помітно при температурі навколишнього середовища близько $-12-13^{\circ}\text{C}$. Різниця між здоровими і перегрітими елементами становить до 10°C .

3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ФЕМ

3.1 Статистика пошкоджуваності фотоелектричних модулів ФЕС

Головним компонентом фотоелектричної станції (ФЕС) є фотоелектричний модуль (ФЕМ). До складу ФЕМ входять: сонячні фотоелектричні елементи (solar cell), блок терміналів із контактами, герметичний алюмінієвий каркас із захисним склом та кабельні лінії. Шинопровід (busbar) може бути виконаний двома способами: з використанням провідників або шляхом напилення струмопровідних доріжок на скло із застосуванням струмопровідного клею. Аналіз літературних джерел показує, що у різних фотоелектричних модулів (ФЕМ), незалежно від виробника, виникають схожі дефекти. До них належать: пошкодження фотоелектричних елементів (пробій напівпровідникового переходу, перегорання елементів); пошкодження шинопроводу (погіршення контакту в місці з'єднання з селом та корозія провідного матеріалу); пошкодження клемного терміналу (junction box); пошкодження алюмінієвого каркасу (корозія алюмінію, деформація каркасу, пересихання та розтріскування герметика та ущільнень); пошкодження захисного скла (розтріскування, абразивний вплив пилу на прозорість скла). Старіння скла починається майже відразу після його виготовлення. Вплив атмосфери прискорює цей процес. Кислотні дощі, вплив поверхневих газів, що містяться у повітрі, призводять до інтенсивного старіння скла, що неминуче змінює його властивості, такі як прозорість та міцність. Вода, що конденсується та тривало утримується на поверхні скла, посилює процес вилугування. Це означає постійне "вимивання" іонів металу з поверхневого шару, що призводить до перерозподілу іонів у глибинних шарах скла та сприяє подальшому розчиненню іонів металу з поверхні. У результаті руйнуються кремній-кисневі зв'язки, що веде до збільшення пористості поверхні скла та ще більш активної її взаємодії з атмосферою. У підсумку цей процес стає незворотним. Результати досліджень пошкоджуваності елементів ФЕМ та параметри, якими вони визначаються приведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Пошкодження елементів ФЕМ

Елемент ФЕМ	Вид пошкодження	Результат	Параметр		Пошкодженість, од.
cell	пробій напівпровідникового переходу	понад нормоване зменшення опору фотодіода в зворотному напрямку – зменшення опору села	Опір фотодіода, Ом	K ₁ , в.о.	115 од.; 3,9%
	перегорання селу	обрив з'єднувальних провідників (плоскої шини busbar), які з'єднують sell в ФЕМ	Опір провідів, Ом		
busbar	погіршення контакту в місці з'єднання sell та busbar	зростання температури в місці контакту та зменшення струму	Температура, °C Струм, А	K ₂ , в.о.	47 од.; 1,6%
	корозія	зменшення струму, нагрівання busbar	Струм, А		
	пошкодження діода Шотткі (пробій)	нагрів	Температура, °C Струм, А		
клемний термінал – junctionbox	збільшення опору контактів	нагрів	Температура, °C Струм, А	K ₃ , в.о.	2428 од.; 81,8%
алюмінієвий каркас з герметиком	погіршення герметичності каркасу	нагрів, волога в середині ФЕМ	Температура, °C Струм, А	K ₄ , в.о.	57 од.; 1,9%
захисне скло	погіршення герметичності каркасу	нагрів, волога в середині ФЕМ	Температура, °C Струм, А	K ₅ , в.о.	78 од.; 2,6%
кабель, що з'єднує cells з клемним терміналом	пошкодження кабелю	ізоляція та опір коннектора	Опір ізоляції, МОм Тем-ра °C	K ₆ , в.о.	245 од.; 8,2%

Отже, як видно з даних табл. 3.1 найчастіше виходить з ладу клемна коробка, в якій зазвичай перегорає запобіжник. Такий вид пошкоджень є причиною відключення фотомодуля. Також, результати аналізу літературних джерел свідчать про те, що досить часто фотомодулях спостерігаються перегорання селів.

Діаграму пошкоджень елементів ФЕМ показано на рис.3.1.

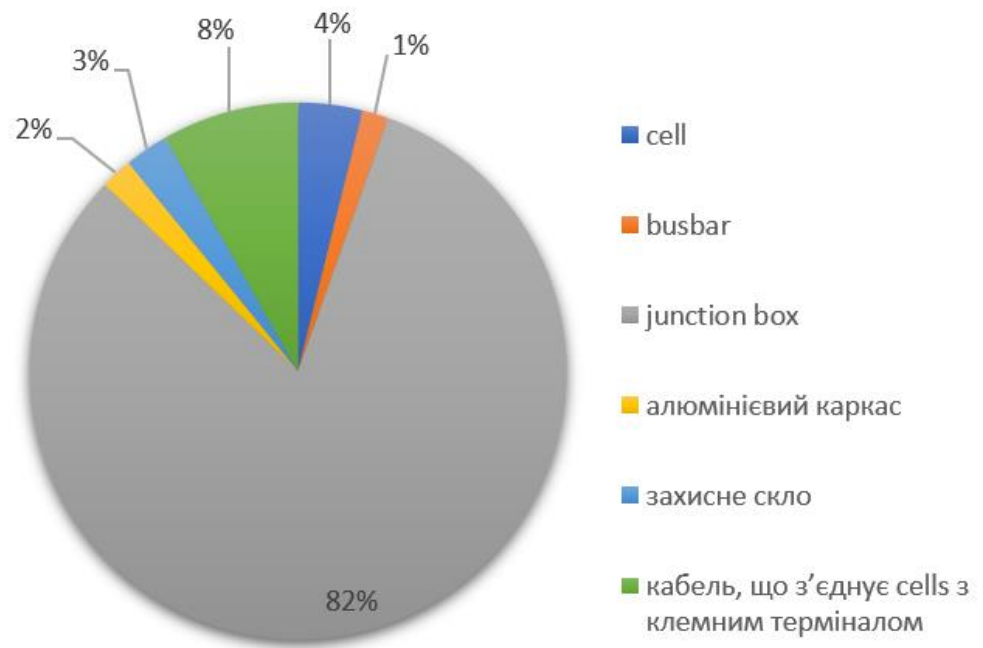


Рисунок 3.1 – Розподіл пошкоджень по елементам ФЕМ

3.2 Методика розрахунку коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ

Для отримання узагальненого показника залишкового ресурсу ФЕМ, який враховує значення всіх діагностичних параметрів та їх вплив, можна застосувати підхід, який базується на переході від значень діагностичних параметрів до відповідних коефіцієнтів залишкових ресурсів (КЗР) для кожного параметру.

Ці коефіцієнти визначаються у відносних одиницях за формулою (3.1) і відображають сумарний робочий час ФЕМ від моменту оцінки його технічного стану до досягнення граничного стану, коли діагностичний параметр досягає свого граничного значення, тобто характеризують залишковий технічний ресурс. Коефіцієнт залишкового ресурсу k_{ik_iki} за i -м діагностичним параметром:

$$k_{i1} = \left| \frac{x_{i1,гран} - x_{i1,ном}}{x_{i1,гран} - x_{i1,поч}} \right|, \quad (3.1)$$

де $x_{il,гран}$ – граничне нормативне значення i_1 -го діагностичного параметра, $x_{il,ном}$ – значення i_1 -го діагностичного параметра на момент контролю, $x_{il,поч}$ – початкове значення i_1 -го діагностичного параметра (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту), i_1 – діагностичний параметр.

Електрична ізоляція ФЕМ має забезпечувати відсутність пробою або втрат по струму більше ніж 60 мкА. Опір ізоляції ФЕМ має бути не менше ніж 60 МОм згідно ДСТУ.

Для визначення КЗР за діагностичним параметром опору ізоляції, потрібно врахувати, що опір активного опору ізоляції був рівний 200 МОм, на момент введення в експлуатацію, при поточному контролі значення цього параметру було рівним 120, відомо, що граничне значення активного опору ізоляції - 50 МОм. Тоді для визначення КЗР k_6 за діагностичним параметром R визначається за виразом (3.1), прийнявши до уваги, що під час вимірювання опір ізоляції був рівний 150МОм.

$$k_{i1} = \left| \frac{50 \text{ МОм} - 120 \text{ МОм}}{50 \text{ МОм} - 200 \text{ МОм}} \right| = 0,46 (\text{в.о.}). \quad (3.2)$$

Враховуючи те, що пошкодження кожного з вузлів ФЕМ (зазначених в табл. 3.1) призводить до пошкодження всього ФЕМ (рис. 3.7), то коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом (3.10) [7]:

$$K_{pec} = \prod_{\tau=1}^v K_{\tau}^{P_{\tau}}, \quad (3.3)$$

де k_{τ} – КЗР ФЕМ по τ -му діагностичному параметру (вважаємо, що кожний контрольований ДП, наприклад, температура, опір ізоляції, струм, напруга та інші впливають на залишковий ресурс елементів ФЕМ за мультиплікативним виразом (3.3), а кожний із діагностичних параметрів k_6 - k_6 впливає на

коефіцієнт ЗЗР всього ФЕМ), τ – τ -тий діагностичний параметр, ν – кількість діагностичних параметрів відповідно до кількості вузлів (табл. 3.1), p_τ – ймовірність відхилень контролюваного параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра (3.4):

$$p_\tau = \frac{y_\tau}{m_2}, \quad (3.4)$$

де y_τ – кількість відхилень контролюваного параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра, які були виявлені шляхом контролю τ -го діагностичного параметра з загальної кількості виявлених відхилень контрольованих параметрів від гранично допустимого нормованого значення, m_2 – загальна кількість виявлених відхилень контрольованих діагностичних параметрів від їх гранично допустимих нормованих значень. Структурна схема з послідовним з'єднанням показана на рис.3.2.

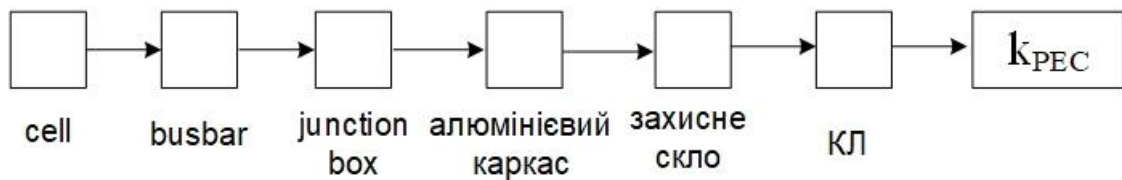


Рисунок 3.2 – Структурна схема моделі УКЗР ФЕМ

Відповідно до виразу (3.3) КЗЗР ФЕМ визначається за виразом (3.5):

$$K_{заг.pec} = K_1^{P_{K1}} \cdot K_2^{P_{K2}} \cdot K_3^{P_{K3}} \cdot K_4^{P_{K4}} \cdot K_5^{P_{K5}} \cdot K_6^{P_{K6}}, \quad (3.5)$$

де $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ – відомі на момент розрахунку значення КЗР по відповід-

них ДП, $p_{\kappa 1}$, $p_{\kappa 2}$, $p_{\kappa 3}$, $p_{\kappa 4}$, $p_{\kappa 5}$, $p_{\kappa 6}$ – ймовірності пошкоджень елементів фотомодулів, виявлених шляхом контролю ДП з урахуванням загальної кількості пошкоджень. Так, відповідно до табл. 3.1: $p_{\kappa 1}=0,039$ в.о., $p_{\kappa 2}=0,016$ в.о., $p_{\kappa 3}=0,818$ в.о., $p_{\kappa 4}=0,019$ в.о., $p_{\kappa 5}=0,026$ в.о., $p_{\kappa 6}=0,082$ в.о.

Для створення математичної моделі КЗР фотомодуля було використано параметри, за кожним з яких можна робити висновок про технічний стан ФЕМ. Але жоден з даних параметрів не в повній мірі характеризує технічний стан, він лише вказує на певні зміни технічного стану ФЕМ.

За допомогою системи комп'ютерної математики – системи MATLAB – є можливість створити математичну модель КЗР ФЕМ, використовуючи яку відредагувати раніше створену вибірку навчальних даних, за якими далі можна отримати аналітичну залежність

КЗР ФЕМ від діагностичних параметрів у вигляді поліному. Для формування початкових навчальних даних, для шести вхідних параметрів моделі, які змінювались випадковим чином від 0 до 1, було визначено КЗР ФЕМ.

Шість вхідних параметрів моделі – КЗР елементів та вузлів ФЕМ, які залежать від поточних значень десяти ДП.

Фрагмент результатів розрахунків наведено в табл. 3.2. Повна таблиця навчальних даних приведена в додатку Б.

Для того, щоб наблизити параметри математичної моделі до реальних умов експлуатації необхідно врахувати експлуатуючий досвід персоналу, що діагностують та ремонтують ФЕС.

Інформація, яка надана цими фахівцями врахована під час створення тестової вибірки даних (табл. 3.3).

Похибка навчання нейро-нечіткої моделі за навчальною вибіркою даних становила $\delta_n=1,9\%$ (0,019 в.о.), а за відкоригованими даними – $\delta_b=3,1\%$.

Що є прийнятним результатом з огляду можливу похибку експертів під час оцінювання поточного стану індукційної машини.

Таблиця 3.2 – Фрагмент результатів розрахунків коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ

K_1 в.о.,	K_2 , в.о.	K_3 , в.о.	K_4 , в.о.	K_5 , в.о.	K_6 , в.о.	$K_{ресФЕМ}$, в.о.
1	2	3	4	5	6	7
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
0,03	0,097	0,03	0,097	0,03	0,097	0,029366
0,04	0,096	0,04	0,096	0,04	0,096	0,035963
0,05	0,095	0,05	0,095	0,05	0,095	0,042042
0,06	0,094	0,06	0,094	0,06	0,094	0,047721
0,07	0,093	0,07	0,093	0,07	0,093	0,053078
0,08	0,092	0,08	0,092	0,08	0,092	0,058164
0,09	0,091	0,09	0,091	0,09	0,091	0,063015
0,1	0,09	0,1	0,09	0,1	0,09	0,067659
...	...	...	...	...	...	...
0,01	0,01	0,01	0,099	0,01	0,099	0,011705
0,02	0,02	0,02	0,098	0,02	0,098	0,020024
0,03	0,03	0,03	0,097	0,03	0,097	0,027369
0,04	0,04	0,04	0,096	0,04	0,096	0,034123
0,05	0,05	0,05	0,095	0,05	0,095	0,040453
...	...	...	...	...	...	...
0,33	0,33	0,067	0,33	0,33	0,067	0,129993
0,34	0,34	0,066	0,34	0,34	0,066	0,131665
0,35	0,35	0,065	0,35	0,35	0,065	0,133267
0,36	0,36	0,064	0,36	0,36	0,064	0,1348
0,37	0,37	0,063	0,37	0,37	0,063	0,136263
...	...	...	...	...	...	...

Таблиця 3.3 – Фрагмент відкоригованих результатів розрахунків коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ

K_1 <i>в.о.</i> ,	K_2 , <i>в.о.</i>	K_3 , <i>в.о.</i>	K_4 , <i>в.о.</i>	K_5 , <i>в.о.</i>	K_6 , <i>в.о.</i>	$K_{ресФЕМ}$, <i>в.о.</i>
0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,000
...	...	...	...	...	...	...
0,43	0,43	0,45	0,48	0,42	0,42	0,37
...	...	...	...	...	...	...
0,62	0,61	0,63	0,61	0,61	0,61	0,37
0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5
...	...	...	...	...	...	...
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,82
...	...	...	...	...	...	...

Повна таблиця містить 325 (табл. 3.2) розглянутих варіантів сполучень діагностичних параметрів та відповідних їм значень ЗЗР ФЕМ.

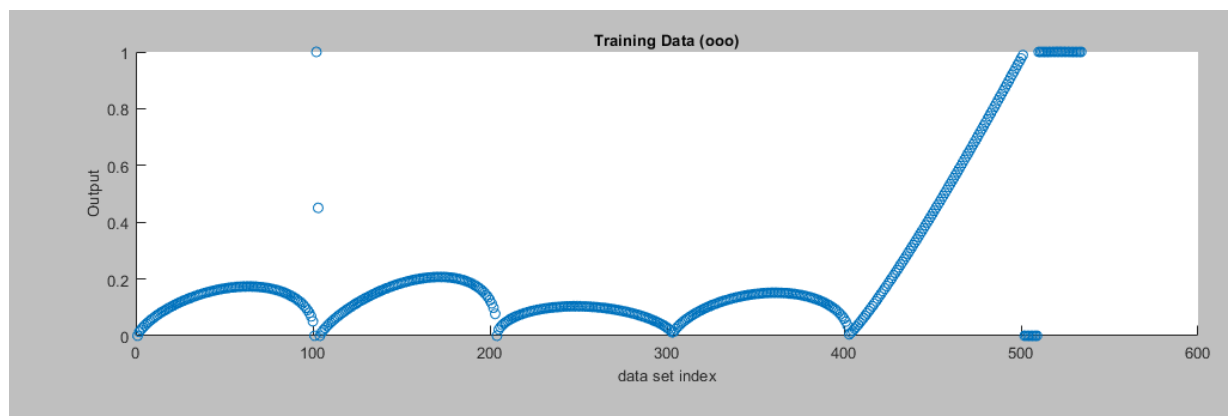


Рисунок 3.3 – Аналіз вхідних в ANFIS редакторі MATLAB

Відкориговані дані використовувалися як навчальні дані для моделювання в системі комп'ютерної математики MATLAB. Для цього застосовували пакет Fuzzy Logic Toolbox. За допомогою редактора ANFIS Editor (Edit – редактор, Adaptive Network of Fuzzy Inference System – адаптивна мережа системи

нечіткого висновку) з використанням гібридного навчального алгоритму та алгоритму нечіткого висновку Сугено було створено нейро-нечітку модель коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ (з використанням методу субкластеризації).

Таблиця 3.4– Фрагмент скорегованих значень КЗР по ДП ФЕМ

K_1	K_{K2}	K_{K3}	K_4	K_5	K_6	$K_{рес\ EД}$
<i>в.о.</i>						
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
...	...	...	...	...	...	...
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.1
0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.1
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1
...	...	...	...	...	...	...
1.00	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.2
1.00	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.2
...	...	...	...	...	...	...
1.00	1.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.2
1.00	1.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.2
...	...	...	...	...	...	...

На рис. 3.4 показано структуру отриманої нейро-мережі.

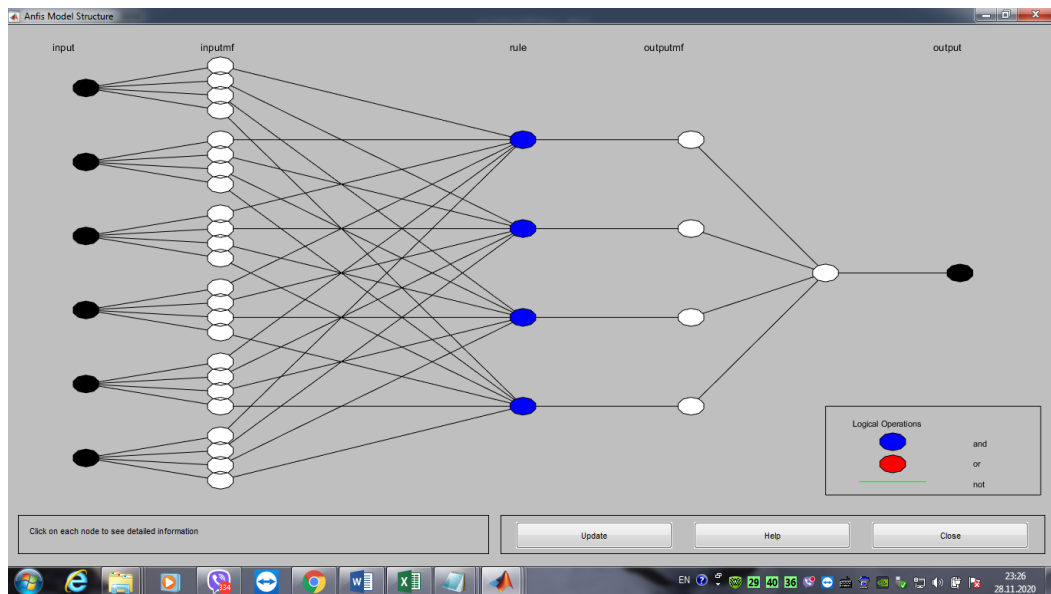


Рисунок 3.4 – Структура отриманої нейро-мережі

Для кожної вхідної змінної нейро-моделі використовувались по чотири лінгвіністичних терми з гаусовими функціями належності вибраними у відповідності до додатку Г (з наступних функцій: трикутної, трапецеподібної, дзвоноподібної та сігмоїдальної функцій) за критерієм мінімальної похибки навчання моделі:

$$\kappa_{\text{pec.}i1} = f(x_{i1}; \sigma_{i1}; c_{i1}) = e^{\frac{-(x_{i1} - c_{i1})^2}{2 \cdot \sigma_{i1}^2}}. \quad (3.6)$$

У формулі (3.6): σ_{i1} та c_{i1} – числові параметри, σ_{i1}^2 в теорії ймовірності називається дисперсією розподілу, а другий параметр c_{i1} – математичним сподіванням, i_1 – вхідний параметр нейро-нечіткої моделі, який відповідає діагностичному параметру, x_{i1} – значення i_1 -го вхідного параметра моделі: $x_1 = K_1, x_2 = K_2, x_3 = K_3, x_4 = K_4, x_5 = K_5, x_6 = K_6$.

Це такі терми, як: «нормальні» (стан ФЕМ – справний) значення ДП КЗР. Значення цих коефіцієнтів змінюються від 1 в.о. (ФЕМ справна) до 0 в.о. (індукційна машина несправна). Значення КЗР згруповані в множини: нормальні значення діагностичних параметрів (КЗР $\in 1..0,78$), стан ФЕМ з незначними

відхиленнями діагностичних параметрів ($KЗР \in 0,78..0,55$), передаварійний ($KЗР \in 0,555..0,25$) – з передаварійними відхиленнями діагностичних параметрів, аварійний ($KЗР \in 0,25..0$) – з аварійними відхиленнями діагностичних параметрів. Для знаходження значення КЗР використовуємо нечітку нелінійну авторегресійну модель КЗЗ ресурсу ФЕМ. Ця модель встановлює нечітке нелінійне перетворення між значеннями КЗР по ДП та УЗЗР ФЕМ (3.14).

$$K_{рес IM} = F(K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6), \quad (3.7)$$

де F – нечітке функціональне перетворення.

Математична модель коефіцієнта загального залишкового ресурсу є системою логічних рівнянь аоказаної на рис. 3.5.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ЯКЩО } K_1 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } K_2 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } K_3 \in \text{"нормальне"} \\ \text{ТА } K_4 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } K_5 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } K_6 \in \text{"нормальне"} \\ \text{ТО } K_{рес IM} = a_{11} \cdot K_1 + a_{12} \cdot K_2 + a_{13} \cdot K_3 + a_{14} \cdot K_4 + a_{15} \cdot K_5 + a_{16} \cdot K_6 \\ \text{ЯКЩО } K_1 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТА } K_2 \in \text{"незначне відхилення"} \\ \text{ТА } K_3 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } K_4 \in \text{"незначне відхилення"} \\ \text{ТА } K_5 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТА } K_6 \in \text{"незначне відхилення"} \\ \text{ТО } K_{рес IM} = a_{21} \cdot K_1 + a_{22} \cdot K_2 + a_{23} \cdot K_3 + a_{24} \cdot K_4 + a_{25} \cdot K_5 + a_{26} \cdot K_6 \\ \text{ЯКЩО } K_1 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } K_2 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } K_3 \in \text{"передаварійне"} \\ \text{ТА } K_4 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } K_5 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } K_6 \in \text{"передаварійне"} \\ \text{ТО } K_{рес IM} = a_{31} \cdot K_1 + a_{32} \cdot K_2 + a_{33} \cdot K_3 + a_{34} \cdot K_4 + a_{35} \cdot K_5 + a_{36} \cdot K_6 \\ \text{ЯКЩО } K_1 \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } K_2 \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } K_3 \in \text{"аварійне"} \\ \text{ТА } K_4 \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } K_5 \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } K_6 \in \text{"аварійне"} \\ \text{ТО } K_{рес IM} = a_{41} \cdot K_1 + a_{42} \cdot K_2 + a_{43} \cdot K_3 + a_{44} \cdot K_4 + a_{45} \cdot K_5 + a_{46} \cdot K_6 \\ \dots \end{array} \right.$$

Рисунок 3.5 – Структура отриманої нейро-мережі

Вихід моделі $K_{заг.зал.рес.}$ знаходиться як зрівноважена сума висновків (3.7) бази

правил, записаних у вигляді системи логічних рівнянь (3.7).

$$K_{\text{рес. ИМ}} = \sum_{j2=1}^{m3} w_{j2} \left(\begin{array}{l} a_{j2\,1} \cdot \kappa_1 + a_{j2\,2} \cdot \kappa_2 + a_{j2\,3} \cdot \kappa_3 + a_{j2\,4} \cdot \kappa_4 \\ + a_{j2\,5} \cdot \kappa_5 + a_{j2\,6} \cdot \kappa_6 + c_{j2} \end{array} \right), \quad (3.7)$$

де $0 \leq w_{j2} \leq 1$ – ступінь виконання (вага) j_2 -го правила, яка визначається відповідністю реальних змін ДП ФЕМ, що відображені у j_2 -му правилі.

Налаштування моделі полягає у визначенні параметрів функцій належності і рівнянь висновку. Терми значень лінгвістичних змінних задаються у вигляді гаусових функції належності. Необхідно визначити середньоквадратичне відхилення $\sigma_{K_1}, \sigma_{K_2}, \sigma_{K_3}, \sigma_{K_4}, \sigma_{K_5}, \sigma_{K_6}$ та математичне очікування $c_{K1}, c_{K2}, c_{K3}, c_{K4}$, гаусових функції належності, параметри рівнянь висновку ($a_{1\,1} - a_{4\,4}, c_1 - c_4$). Для полегшення налаштування та адаптації структури розробленої моделі до реальних параметрів конкретної ФЕМ модель реалізується у вигляді адаптивної нейронечіткої багатошарової мережі прямого розповсюдження ANFIS. ANFIS являє собою найпростішу мережу прямого розповсюдження, яка містить адаптивні вузли, використовуючи правила навчання, параметри цих вузлів налаштовуються так, щоб мінімізувати похибку між реальним виходом моделі $K_{\text{рес.ФЕМ}}$ та реальним коефіцієнтом загального залишкового ресурсу $K_{\text{ресФЕМ. ФЕМ}}$ (3.8):

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

де N_1 – кількість рядків у навчальній вибірці, k_3 – номер рядка в навчальній вибірці, починаючи з рядка з порядковим номером «0».

Відповідно до виразу (3.8) було введено такі параметри рівнянь висновків правил (табл.3.5).

Таблиця 3.5– Параметри висновків правил нейро-нечіткої моделі ФЕМ

Номер пра- вила, j_2	Параметри рівняння висновку						
	$a_{j2,1}$	$a_{j2,2}$	$a_{j2,3}$	$a_{j2,4}$	$a_{j2,5}$	$a_{j2,6}$	c_{j2}
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,051	-0,052	-0,17	-0,89	0	1,05	-0,0067
2	0,55	1,07	0,35	0,15	-0,87	-0,17	0,004
3	0,02	0,17	0,93	0,07	-0,07	-0,05	-0,013
4	0,18	0,045	0,25	0,18	0,15	0,29	-0,009

Для навчання мережі використовували гібридний алгоритм навчання. Після тридцяти епох середньоквадратична похибка навчання склала 0,0128 в.о., а на тестовій вибірці — 0,041 в.о. В результаті навчання були отримані параметри гаусових функцій належності, які потім використовувалися при створенні нейро-нечіткої моделі ФЕМ.

На основі проведених ітераційних обчислювальних експериментів було визначено вектор параметрів функцій належності (табл. 3.6).

Враховуючи дані з таблиць 3.5 і 3.6, можна побудувати математичну модель коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ для розглянутого прикладу. На рис. 3.6 показано фрагмент віконної заставки редактора адаптивної мережі системи нечіткого висновку (ANFIS Editor) пакету Fuzzy Logic Toolbox системи комп'ютерної математики MATLAB. Ця мережа має шість входів, один вихід і використовує алгоритм нечіткого висновку Сугено. На рис. 3.7 показано параметри функції належності.

Таблиця 3.6– Параметри функції належності

Вхідні параметри моделі	Назва терму (нечіткої множини значень вхідних параметрів)	Номер правила	Параметри функцій належності	
			δ	C
K_1	нормальні	1	0,37	0,22
	незначні відхилення	2	0,37	0,79
	передаварійні	3	0,37	0,82
	аварійні	4	0,37	0,92
K_2	нормальні	1	0,37	0,22
	незначні відхилення	2	0,37	0,79
	передаварійні	3	0,37	0,82
	аварійні	4	0,37	0,94
K_3	нормальні	1	0,37	0,03
	незначні відхилення	2	0,37	0,22
	передаварійні	3	0,37	0,82
	аварійні	4	0,37	0,95
K_4	нормальні	1	0,37	0,01
	незначні відхилення	2	0,37	0,081
	передаварійні	3	0,37	0,08
	аварійні	4	0,37	0,94
K_5	нормальні	1	0,37	0,23
	незначні відхилення	2	0,37	0,078
	передаварійні	3	0,37	0,09
	аварійні	4	0,37	0,95
K_6	нормальні	1	0,37	0,02
	незначні відхилення	2	0,37	0,03
	передаварійні	3	0,37	0,08
	аварійні	4	0,37	0,95

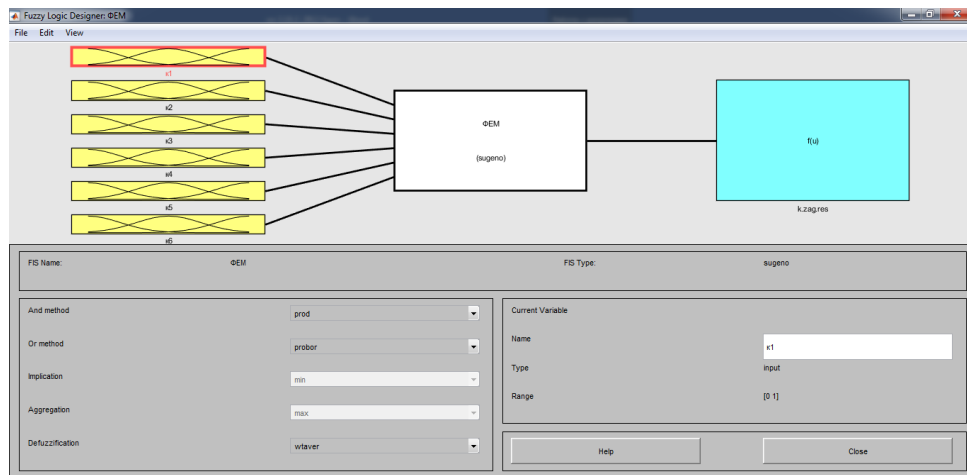


Рисунок 3.6 – Фрагмент віконної заставки редактора ANFIS

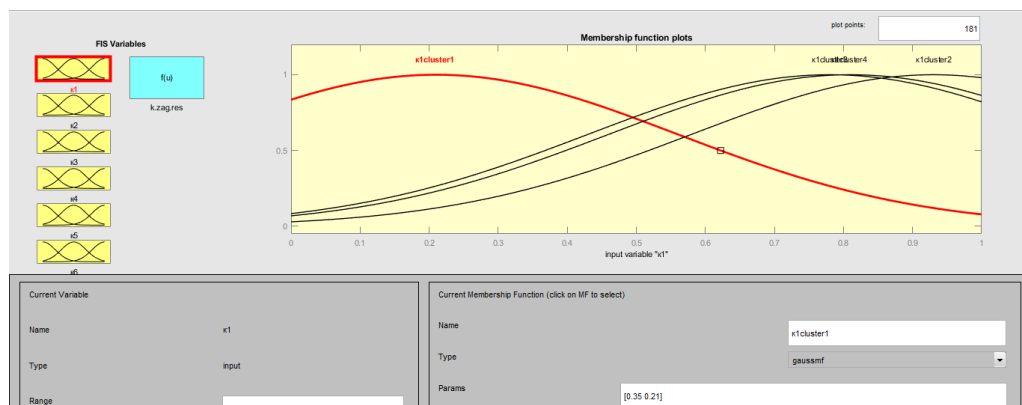


Рисунок 3.7 – Параметри функції належності

Ступінь належності кожного значення вхідного параметра до відповідної множини визначається за допомогою гаусової функції належності. Модель призначена для обчислення числового значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ і має один вихід.

Модель дозволяє визначити значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ФЕМ залежно від значень вхідних параметрів – коефіцієнтів залишкових ресурсів для кожного з контрольованих діагностичних параметрів. Наприклад, якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів дорівнює 0,5 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ становить 0,35 в.о.. Якщо всі коефіцієнти залишкового ресурсу діагно-

стичних параметрів дорівнюють 1 в.о., коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ (з похибкою 2%) дорівнює 0,97 в.о.. У випадку, коли кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів дорівнює 0 в.о., коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ (з похибкою 0,5%) також дорівнює 0 в.о.

Складність залежностей вихідного параметра розробленої моделі від сукупності вхідних параметрів підтверджують графіки поверхонь цих залежностей, які показані на рис. 3.9 – 3.15.



Рисунок 3.8 – Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ при значеннях всіх вхідних параметрів 0.5 в.о

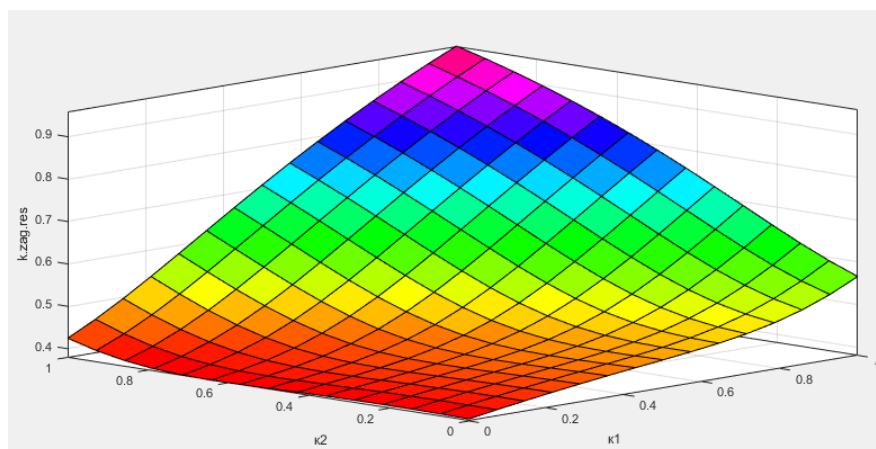


Рисунок 3.9 – Залежність КЗР елементів ФЕМ від КЗР cell та КЗР busbar.

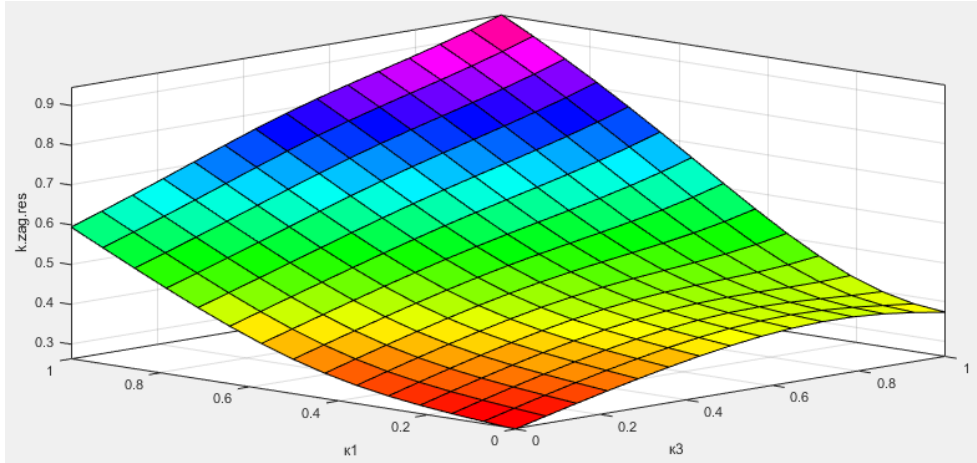


Рисунок 3.10 – Залежність КЗР елементів ФЕМ від КЗР cell та КЗР junctionbox

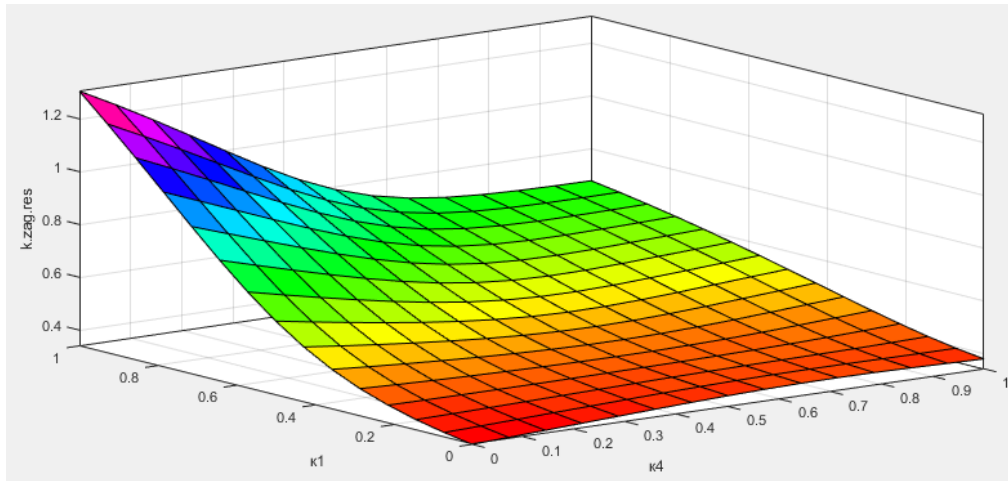


Рисунок 3.11 – Залежність КЗР елементів ФЕМ від КЗР cell та КЗР алюмінієвого каркасу

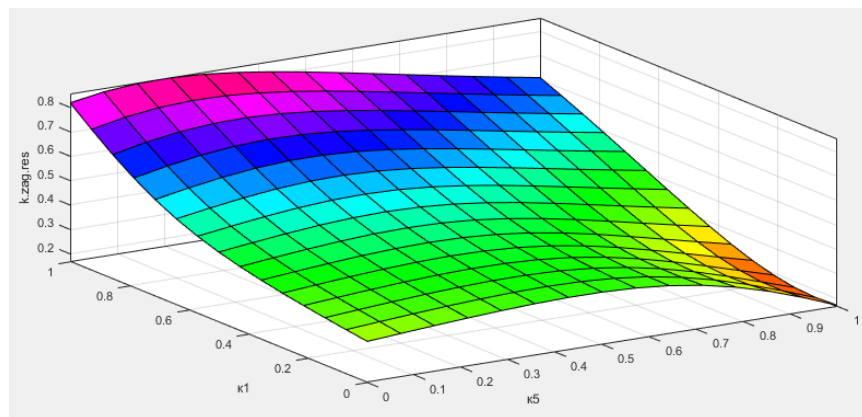


Рисунок 3.12 – Залежність КЗР елементів ФЕМ від КЗР cell та КЗР захисного скла.

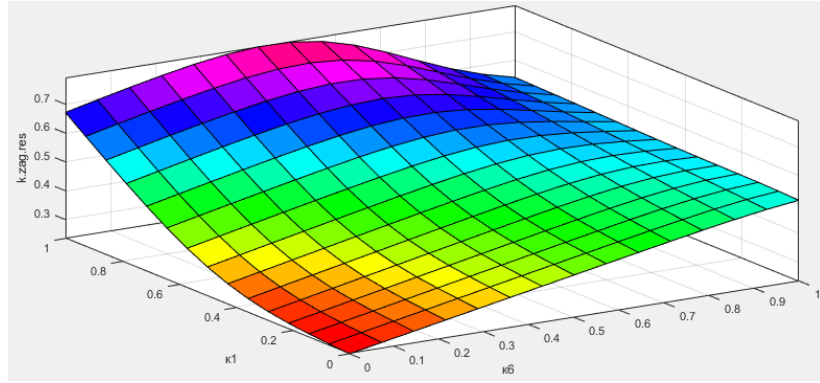


Рисунок 3.13 – Залежність КЗР елементів ФЕМ від КЗР cell та КЗР кабелю

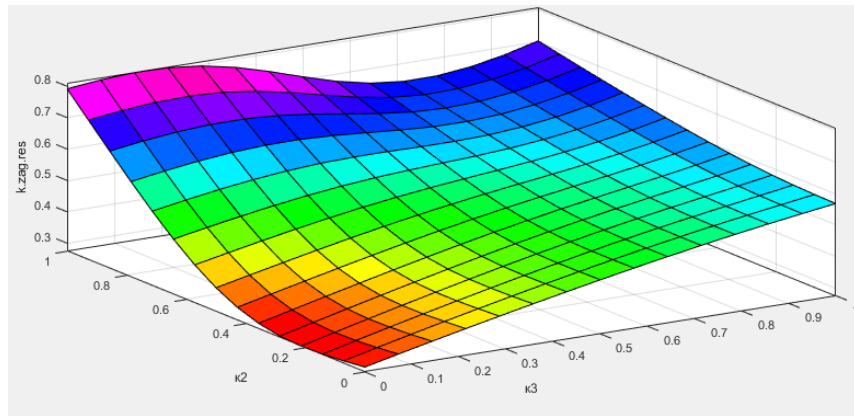


Рисунок 3.14 – Залежність КЗР елементів ФЕМ від КЗР busbar та КЗР distribution box

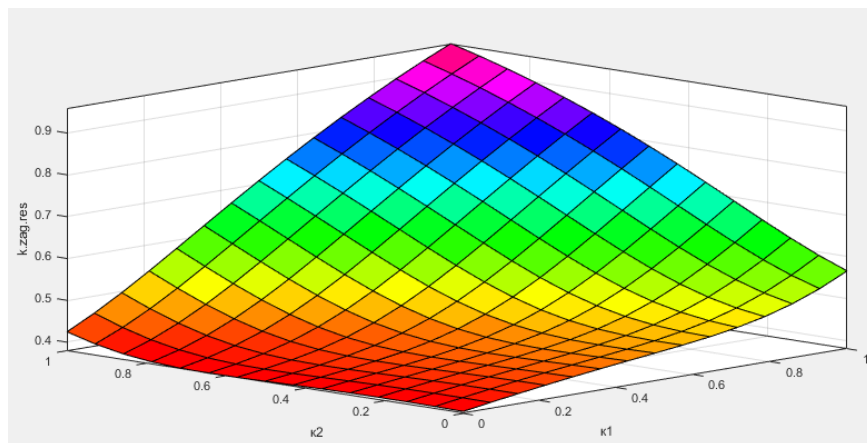


Рисунок 3.15 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від κ_1 та κ_2 .

Висновки до третього розділу

У розділі описано метод діагностики ФЕМ в умовах неповних початкових даних, який за допомогою нейро-нечітких моделей дозволяє визначити поточне значення коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ і зробити висновок про один зі станів ФЕМ: справний, з незначними відхиленнями параметрів, передаварійний або аварійний. Це допомагає зменшити похибку прогнозування стану.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі розроблені заходи з охорони праці під час влаштування СЕС для резервного електропостачання будинку. На електротехнічний оперативно-ремонтний персонал, який здійснює монтаж та обслуговування СЕС, впливають такі шкідливі виробничі фактори [19, 20]: фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил); фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Живлення житлового будинку, переносного інструменту та обладнання, яке використовується в процесі монтажних робіт, та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Під час влаштування СЕС потрібно змонтувати системи РЗАіТ та обліку спожитої/виробленої електроенергії/ Для убезпечення робіт, що їх проводять в колах вимірювальних приладів і пристроїв релейного захисту, всі вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму і напруги слід постійно заземлювати [21]. За необхідності розриву кола струму вимірювальних приладів

і реле кола вторинної обмотки трансформатора струму попередньо закорочується на спеціально призначених для цього затискачах.

Розривати кола, підключені до вторинної обмотки трансформатора струму, забороняється. За необхідності розриву цих кіл вони мають бути попередньо замкнуті перемичкою, встановленою до передбачуваного місця розриву (рахуючи від трансформатора струму). Під час встановлення перемички слід застосовувати інструмент з ізолювальними рукоятками.

Під час роботи на трансформаторах струму або в колах, підключених до їх вторинних обмоток, слід виконувати такі заходи безпеки: зажими вторинних обмоток до закінчення монтажу кіл, що до них підключаються, мають бути замкнені накоротко. Після приєднання змонтованих кіл до трансформатора струму закоротку слід переносити на найближчу збірку затискачів і знімати тільки після повного закінчення монтажу та перевірки правильності приєднання змонтованих кіл; під час перевірки полярності до подавання імпульсів струму в первинну обмотку прилади слід приєднувати до затискачів вторинної обмотки. Забороняється використовувати шини первинних обмоток як струмовідні під час монтажних та зварювальних робіт.

Робота в колах пристроїв релейного захисту, електроавтоматики і телемеханіки (РЗАіТ) проводиться за виконавчими схемами. Під час робіт в пристроях РЗАіТ слід користуватися слюсарно-монтажним інструментом з ізолювальними рукоятками.

Під час перевірки кіл вимірювання, сигналізації, керування і захисту за необхідності в приміщенні електроустановок напругою понад 1000 В дозволяється залишатися одному члену бригади за умовами роботи (наприклад, регулювання вимикачів, перевірка ізоляції); працівник, який перебуває окремо від керівника робіт, повинен мати групу III. Під час робіт в колах трансформаторів напруги з подачею напруги від стороннього джерела знімаються запобіжники з боку вищої і нижчої напруги, а також відключаються автомати від вторинних обмоток.

За необхідності проведення будь-яких робіт в колах чи на апаратурі

РЗАіТ за умови ввімкненого основного обладнання слід вжити додаткових заходів щодо запобігання його випадковому відключенню. Забороняється на панелях або поблизу місця розміщення релейної апаратури провадити роботи, які викликають сильний струс релейної апаратури, що може спричинити до помилкових дій реле.

Перемикання, вмикання і вимикання вимикачів, роз'єднувачів та іншої комутаційної апаратури, пускання і зупинення агрегатів, регулювання режиму їх роботи, необхідні під час налагодження або перевірки пристроїв РЗАіТ, провадять тільки оперативні працівники.

В електроустановках споживачів підготовку робочих місць і допуск до робіт з електролічильниками, за показами яких здійснюються розрахунки за спожиту електроенергію, виконують працівники електропостачальної організації.

Встановлення і зняття електролічильників та інших вимірювальних приладів, підключених до вимірювальних трансформаторів, повинні провадити за нарядом зі зняттям напруги два працівники, один з яких повинен мати групу IV, а другий — групу III. За наявності в колах електролічильників контактів (блоків), що дозволяють працювати без розмикання кіл, підключених до вторинних обмоток трансформатора струму, ці роботи можна виконувати за розпорядженням, не знімаючи напруги зі схеми електролічильника. За відсутності вказаних контактів напругу і струм в колах електролічильника слід відключити.

Приєднання вимірювальних приладів, встановлення і зняття електролічильників, підключених до вимірювальних трансформаторів, за наявності випробувальних блоків або спеціальних затискачів, що дають змогу безпечно закорочувати кола струму, виконуються без зняття навантаження і напруги. Встановлення і зняття електролічильників безпосереднього ввімкнення допускається провадити за розпорядженням одному працівнику з групою III. Встановлення і зняття електролічильників, а також приєднання вимірювальних приладів виконуються зі зняттям напруги.

В разі розміщення однофазних електролічильників безпосереднього ввімкнення в приміщеннях без підвищеної небезпеки відносно ураження людей електричним струмом, роботи з електролічильниками можуть виконуватися одноособово – без зняття напруги, але з відключенням навантаження.

4.1.2 Електробезпека

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [22, 23]:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий

час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні [24] встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення. Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Па.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості Па	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [25]: температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні

допустимих параметрів мікроклімату не повинна перевищувати 2°C; якщо температура поверхонь вище або нижче допустимої температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1 м; для забезпечення нормованих значень швидкості руху повітря проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [25]. Нормовані параметри забруднення повітря в робочій зоні наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимальна разова	Середньодобова	
Оксид вуглецю		20	4
Пил нетоксичний	4	4	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця [26]. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів з очищення забруднених поверхонь. Потрібно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (менша зернистість), тим вище небезпека. Низька вологість збільшує потенційну небезпеку, це повинне прийматися в увагу під час прибирання. Планувати прибирання потрібно на час, коли устаткування вимкнене, зокрема в другу половину дня п'ятниці або на вихідні.

4.2.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт в процесі виконання робіт – середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Допустимі рівні виробничого освітлення наведені в таблиці 4.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп [E27 LED 15W NW A60 "SG"](#). Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Наймен-ший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Роз-ряд зоро-вої ро-боти	Під- розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характе-ристика фону	Штучне при-родне комбінова-ного освіт-лення		Приро-дне Ен пр	Сумі-сне Е сум
						всього	у т. ч. від загаль-ного		
Серед-ньої точ-ності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	малий серед-ній великий	світлий серед-ній темний	400	200	4	2,4

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозво-

ляє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості.

4.2.4 Виробничий шум

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». Нормовані параметри виробничого шуму в робочій зоні наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових	107	95	87	82	78	75	73	71	69

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».

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.

4.2.5 Виробнича вібрація

На нашому підприємстві присутня вібрація типу – За. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання.

Нормовані параметри виробничої вібрації в робочій зоні наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	$\frac{1,3^*}{108}$	$\frac{0,45}{99}$	$\frac{0,22}{93}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	-	-	-	-
Локальна вібрація	-	-	$\frac{2,8}{115}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$

*В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, $\text{м/с} \cdot 10^{-2}$, в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: динамічне погашення вібрації – приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи; зміна конструктивних елементів машин; застосування ЗІЗ, а саме рукавиці, вкладиші

та прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

4.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [27, 28]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [29], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [30].

Приміщення, де здійснюються встановлення обладнання СЕС, за вибухонебезпечною та пожежонебезпечною відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами II-III (місця за межами приміщень, де зберігаються тверді горючі речовини).

Будівля характеризується III ступенем вогнестійкості.

До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону.

Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку.

Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 4.6.

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН

В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, кос-тури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між по-верхові (у т.ч. гори-щні та над пі-два-лами	елементи су-міщених пок-риттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зов-ніш-ні не-несу-чі	внут-рішні не-не-сучі (пере-городки				пли-ти, на-сти-ли, прог-о-ни	балки, фе-рми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не норму-ються	

Таблиця 4.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи проти-пожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип за-повнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	3	REI 45	2	1

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 4.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 4.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських, сільськогосподарських будинків і споруд слід приймати за таблицею 4.8 (знаменник).

Таблиця 4.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

В приміщенні будинку, де встановлене обладнання СЕС, встановлено 5 порошкових вогнегасників ВП-5(8).

Висновки до четвертого розділу

У розділі охорони праці розроблені заходи з охорони праці під час влаштування ФЕС для резервного електропостачання будинку. Зокрема, визначено, що в приміщенні будинку, де встановлене обладнання ФЕС, має встановлено 5 порошкових вогнегасників ВП-5(8).

ВИСНОВКИ

В бакалаврській дипломній роботі досліджено зміни технічного стану обладнання фотоелектричних станцій під час експлуатації.

Фотоелектричний модуль містить алюмінієвий каркас з захисним склом і герметиком, фотоелементи (cell), busbar, клемну коробку (junctionbox) та кабельні лінії.

Аналіз літературних джерел свідчить про те, що різні типи ФЕМ мають подібні дефекти, такі як: пошкодження cell (пробій напівпровідникового переходу, перегорання cell); пошкодження busbar (погіршення контакту між cell та busbar і корозія провідного матеріалу); пошкодження клемного терміналу – junctionbox (83,3%); пошкодження алюмінієвого каркасу (корозія, вигинання, розтріскування герметика); пошкодження захисного скла (розтріскування, вплив пилу на прозорість скла).

Розроблений метод діагностики ФЕМ в умовах неповної інформації використовує нейро-нечітке моделювання для визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ. Цей підхід дозволяє зробити висновок про технічний стан фотомодуля (справний, з незначними відхиленнями, передаварійний, аварійний) і зменшити похибку прогнозування такого стану.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IRENA (2021), World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
2. IEA. (2021). Renewable electricity generation by region and scenario 2018-2040.
3. IRENA. Link: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>
4. M. Cosovic, O. Rubanenko and S. L. Gundebommu, "Analysis of the distributed power generation with focus on power plant technical conditions," 2021 20th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/INFOTEH51037.2021.9400702.
5. P. Lezhniuk, V. Komar, M. Belik, O. Rubanenko and I. Smaglo, "Analysis of technical conditions influencing the operation of PV power stations cooperating with controlled power grids," 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005686.
6. M. Belik, J. Timr and O. Rubanenko, "Prediction of the degradation process of mono-Si photovoltaic panels in Ukrainian and Czech conditions," 2023 23rd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Brno, Czech Republic, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPE58302.2023.10149312.
7. M. Belik, O. Rubanenko, "Degradation of Monocrystalline PV Panels Differences between Ukrainian and Czech Conditions," (2022) Proceedings of the 11th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTRO-ENERGETIKA 2022, pp. 38 – 42.
8. M. Belik, "Detection and prediction of photovoltaic panels malfunctions," Renewable Energy and Power Quality Journal, Article vol. 1, no. 16, pp. 544-548, 2018.
9. Y. Lozanov, S. Tzvetkova and A. Petleshkov, "Faults in photovoltaic

modules and possibilities for their detection by thermographic studies," 2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/BulEF48056.2019.9030795.

10. P. Kumar, S. K. Maurya, S. Chowdhury and I. Yadav, "Assessing Power Degradation and Temperature Due to Hotspots in Solar PV Panels," *2024 3rd International conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*, Mathura, India, 2024, pp. 500-505, doi: 10.1109/PARC59193.2024.10486764.

11. M. M. Nygård, Å. F. Skomedal, M. S. Wiig and E. S. Marstein, "Combined Degradation and Soiling With Validation Against Independent Soiling Station Measurements," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, doi: 10.1109/JPHOTOV.2023.3239752.

12. D. J. Colvin et al., "Degradation of Monocrystalline Silicon Photovoltaic Modules From a 10-Year-Old Rooftop System in Florida," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, doi: 10.1109/JPHOTOV.2023.3238278.

13. Arechkik Ameer, Asmae Berrada, Abdellatif Bouaichi, Khalid Loudiyi, Long-term performance and degradation analysis of different PV modules under temperate climate, *Renewable Energy*, Volume 188, 2022, Pages 37-51, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.025>.

14. W. WEN, S. LI, F. ZHOU, M. LI, Q. XIE and S. Chen, "Stain detection method of solar panel based on spot elimination," 2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (IC-BAIE), Nanchang, China, 2021, pp. 820-824, doi: 10.1109/IC-BAIE52039.2021.9390021.

15. Kim, J.; Rabelo, M.; Padi, S.P.; Yousuf, H.; Cho, E.-C.; Yi, J. A Review of the Degradation of Photovoltaic Modules for Life Expectancy. *Energies* 2021, 14, 4278. <https://doi.org/10.3390/en14144278>

16. Supervision and fault detection system for photovoltaic installations based on classification algorithms. Castellà M., Kampouropoulos K., Urbano E., Romeral L., *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2020. Vol. 18, P. 375 – 379.

17. A.W. Kandeal, M.R. Elkadeem, Amrit Kumar Thakur, Gamal B. Abdelaziz, Ravishankar Sathyamurthy, A.E. Kabeel, Nuo Yang, Swellam W. Sharshir, Infrared thermography-based condition monitoring of solar photovoltaic systems: A mini review of recent advances, Solar Energy, Volume 223, 2021, Pages 33-43, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.032>.

18. Degradation of PV modules, inverters, components and system. [untitled \(europa.eu\)](http://untitled.europa.eu)

19. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

20. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->

21. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.

22. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

23. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

24. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

25. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

26. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

27. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку

та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ul-trazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

28. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

29. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

30. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РО-
БОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗА-
ПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Дослідження зміни технічного стану обладнання фотоелектричних станцій під час експлуатації

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра електричних станцій та систем, факультет електроенерге-
тики та електромеханіки

(кафедра, факультет)

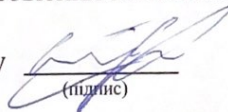
Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 88,3 % Схожість 11,7 %

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.

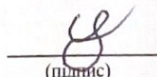
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Вишневський С.Я.
(прізвище, ініціали)

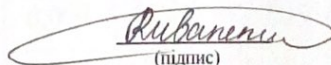
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Ярош Р.Р.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Рубаненко О.О.
(прізвище, ініціали)

ДОДАТОК Б

ТАБЛИЦЯ НАВЧАЛЬНИХ ДАНИХ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ФЕМ

Таблиця Б.1 – Навчальні дані

k1	k2	k3	k4	k5	k6	крес
0	0	0	0	0	0	0
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
0,03	0,097	0,03	0,097	0,03	0,097	0,029366
0,04	0,096	0,04	0,096	0,04	0,096	0,035963
0,05	0,095	0,05	0,095	0,05	0,095	0,042042
0,06	0,094	0,06	0,094	0,06	0,094	0,047721
0,07	0,093	0,07	0,093	0,07	0,093	0,053078
0,08	0,092	0,08	0,092	0,08	0,092	0,058164
0,09	0,091	0,09	0,091	0,09	0,091	0,063015
0,1	0,09	0,1	0,09	0,1	0,09	0,067659
0,11	0,089	0,11	0,089	0,11	0,089	0,072117
0,12	0,088	0,12	0,088	0,12	0,088	0,076408
0,13	0,087	0,13	0,087	0,13	0,087	0,080544
0,14	0,086	0,14	0,086	0,14	0,086	0,084537
0,15	0,085	0,15	0,085	0,15	0,085	0,088397
0,16	0,084	0,16	0,084	0,16	0,084	0,092131
...	...	...	...	...	...	...
0,41	0,059	0,41	0,059	0,41	0,059	0,155837
0,42	0,058	0,42	0,058	0,42	0,058	0,157403
0,43	0,057	0,43	0,057	0,43	0,057	0,1589
0,44	0,056	0,44	0,056	0,44	0,056	0,160327

продовження табл.Б.1

k1	k2	k3	k4	k5	k6	kpec
0,41	0,059	0,41	0,059	0,41	0,059	0,155837
0,42	0,058	0,42	0,058	0,42	0,058	0,157403
0,43	0,057	0,43	0,057	0,43	0,057	0,1589
0,44	0,056	0,44	0,056	0,44	0,056	0,160327
0,45	0,055	0,45	0,055	0,45	0,055	0,161685
0,46	0,054	0,46	0,054	0,46	0,054	0,162973
0,47	0,053	0,47	0,053	0,47	0,053	0,164191
0,48	0,052	0,48	0,052	0,48	0,052	0,165339
0,49	0,051	0,49	0,051	0,49	0,051	0,166416
0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,167423
0,51	0,049	0,51	0,049	0,51	0,049	0,168358
0,52	0,048	0,52	0,048	0,52	0,048	0,169222
0,53	0,047	0,53	0,047	0,53	0,047	0,170012
0,54	0,046	0,54	0,046	0,54	0,046	0,17073
0,55	0,045	0,55	0,045	0,55	0,045	0,171373
0,56	0,044	0,56	0,044	0,56	0,044	0,171941
0,57	0,043	0,57	0,043	0,57	0,043	0,172433
0,58	0,042	0,58	0,042	0,58	0,042	0,172848
0,59	0,041	0,59	0,041	0,59	0,041	0,173185
0,6	0,04	0,6	0,04	0,6	0,04	0,173442
0,61	0,039	0,61	0,039	0,61	0,039	0,173618
0,08	0,08	0,08	0,092	0,08	0,092	0,057678
0,09	0,09	0,09	0,091	0,09	0,091	0,062973
0,1	0,1	0,1	0,09	0,1	0,09	0,068088
0,11	0,11	0,11	0,089	0,11	0,089	0,07304
0,12	0,12	0,12	0,088	0,12	0,088	0,077843
0,13	0,13	0,13	0,087	0,13	0,087	0,082508

продовження табл.Б.1

k1	k2	k3	k4	k5	k6	kpec
0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,104243
0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,112851
0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,121545
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,130322
0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,139176
0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,148104
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,157103
0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,16617
0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,175302
...	...	...	...	...	...	...
0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,897217
0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,908565
0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,919931
0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,931316
0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,942719
0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95414
0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,965578
0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,977035
0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,988509
0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
...	...	...	...	...	...	...

ДОДАТОК В
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Студент _____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис) (ініціали та прізвище)



Вінницький національний технічний університет

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

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ**



Виконав: студент 4 курсу групи 2ЕЕ-206 спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за ОП «Електроенергетика та електротехніка» **Ярош Р.Р.**

Керівник: д.т.н., проф. каф. ЕСС **Рубаненко О.О.**

2024 р.

Актуальність

2

- ☐ Війна в Україні показала важливість енергетичної безпеки.
- ☐ Розвиток відновлюваних джерел енергії в електромережах - це шлях до підвищення енергетичної незалежності.
- ☐ Створення систем електропостачання споживачів на основі розподілених відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), наприклад, енергетичного кооперативу, може зменшити навантаження на централізовану енергосистему.
- ☐ Розподілені джерела енергії надають певні переваги з точки зору енергоефективності електропостачання, оскільки розташовані ближче до споживачів.

Актуальність

3

**Втрачені потужності генерації протягом війни після 24.02.2022
внаслідок окупації і руйнування через ракетні атаки ворога**

44%*



АЕС

59%



ГЕС

93%



ТЕС

16%



ГАЕС

42%



Блочні ТЕЦ

70%



ВЕС

72%



Неблочні ТЕЦ

10%



СЕС

Вінницька область посідає лідируючі позиції по розбудові сонячних електростанцій, а саме фотоелектричних станцій (ФЕС).

Мета та задачі досліджень

4

Метою роботи є дослідження зміни технічного стану обладнання фотоелектричних станцій під час експлуатації. Згідно поставленої мети в роботі вирішено наступні задачі:

1. Виконати дослідження особливостей конструкції та експлуатації фотоелектричних модулів ФЕС;
2. Дослідити основні причини пошкоджуваності ФЕМ та методи їх діагностування;
3. Розробити модель узагальненого залишкового ресурсу фотомодуля ФЕС.

Об'єкт, предмет та методи досліджень

5



Структурна схема ФЕС

6

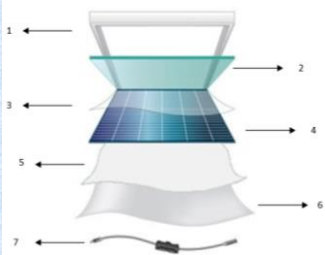


Елементи фотоелектричного модуля

7

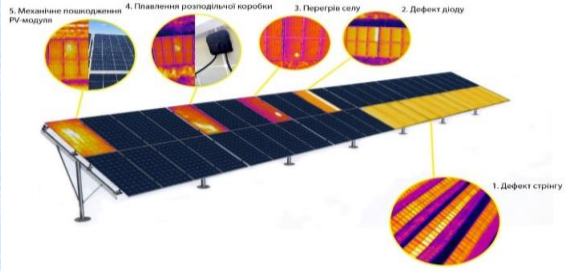
Фотоелектрична панель складається з наступних основних частин:

1. Алюмінієвий каркас з герметиком
2. Загартоване скло з антибликовим покриттям
3. Передня ламінуюча плівка (EVA)
4. Елементи (комірці) cells і busbar
5. Задня ламінуюча плівка (back-sheet)
6. Задня захисна плівка (PET, TPE, TPT)
7. З'єднувальна коробка з захисним діодом і з'єднувальними кабелями – junction box



Пошкодження видів обладнання ФЕС

8



Дефект стрінгу – повністю або частково непрацюючий електричний контур, який складається з послідовно з'єднаних фотоелектричних модулів.

Дефект діоду – шунтуючий діод спрацьовує. Основні причини спрацювання шунтуючого діоду: часткове або повне затінення фотоелектричного модуля; пошкоджені контакти, якими підключаються діоди.

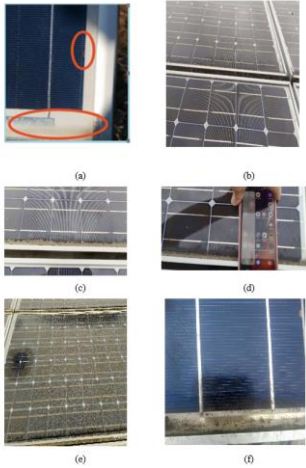
Перегрів селу (Hot spot) – відбувається замикання на шині окремої ділянки модуля. Однією з причин може бути розгерметизація модуля.

Плавлення розподільчої коробки – може виникати через неправильне підключення стрінгів або модулів, як правило, спостерігається підвищена температура розподільчих коробок.

Механічне пошкодження PV-модуля – пошкодження захисного скла, що призводить до розгерметизації модуля.

Пошкодження елементів ФЕМ

9



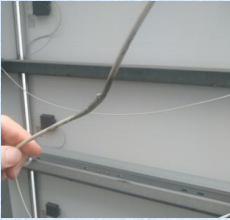
Фотоелектричний модуль з ознаками біологічної корозії:

а – фотоелектричний модуль, який встановлено в центральній частині України (2 роки експлуатації, фото липень 2021 р.);

б, с, d, у, f – фотоелектричні модулі дахової фотоелектричної установки в Чеській Республіці та причини виникнення біологічної корозії (фото панелей 20-річної експлуатації, березень 2024 р.)

Пошкодження елементів ФЕМ

Пошкодження ізоляції ФЕМ



Пошкодження ізоляції та контактних з'єднань ФЕМ

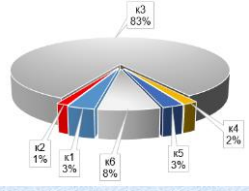


Аналіз технічного стану фотоелектричних модулів

Номер модуля	Візуальний контроль	Термовізіонний контроль	Рекомендації
Модуль 01	Біологічна коррозія	Без пошкоджень	-
Модуль 02	Біологічна коррозія	Без пошкоджень	-
Модуль 03	Біологічна коррозія	Без пошкоджень	-
Модуль 04	Біологічна коррозія	неоднорідний	Виміряти ВАХ
Модуль 05	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 06	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 07	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 08	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 09	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 10	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 11	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-
Модуль 12	Без пошкоджень	Без пошкоджень	-

Пошкодження елементів фотоелектричного модуля

Елемент ФЕМ	Вид пошкодження	Результат
cell	пробій напівпровідникового переходу	понад нормоване зменшення опору фотодіода в зворотному напрямку – зменшення опору села
	перегорання села	обрив з'єднувальних провідників (плоскої шини busbar), які з'єднують sell в ФЕМ
busbar	погіршення контакту в місці з'єднання cell та busbar	зростання температури в місці контакту та зменшення струму
	корозія	зменшення нагрівання busbar
клемний термінал – junction box	пошкодження Шотткі (пробій)	нагрів
алюмінієвий каркас з герметиком	збільшення опору контактів	нагрів
захисне скло	погіршення герметичності каркасу	нагрів, волога в середині ФЕМ
кабель, що з'єднує cells з клемним терміналом	погіршення герметичності каркасу	нагрів, волога в середині ФЕМ
	пошкодження кабелю	ізоляція та опір конектора



$K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ – коефіцієнти залишкових ресурсів елементів ФЕМ
 K_1 – коефіцієнт залишкового ресурсу cell; K_2 – коефіцієнт залишкового ресурсу busbar; K_3 – коефіцієнт залишкового ресурсу junction box; K_4 – коефіцієнт залишкового ресурсу алюмінієвого каркасу; K_5 – коефіцієнт залишкового ресурсу захисного скла; K_6 – коефіцієнт залишкового ресурсу кабельної лінії

13

Етапи побудови математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ



1. Обґрунтування доцільності використання методів нейронечіткого моделювання

2. Формування таблиці початкових даних

3. Розробка структурної схеми діагностичної моделі даних

4. Розробка математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу

5. Визначення параметрів математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу

14

Результати дослідження пошкоджуваності ФЕМ

Елемент ФЕМ	Вид пошкодження	Результат	Параметр	Пошкоджуваність, од.
cell	пробий напівпровідникового переходу	понад нормоване зменшення опору фотодиода в зворотному напрямку – зменшення опору села	Опір фотодиода, Ом	K_{i1} в.о.
	перегорання села	обрив з'єднувальних провідників (плоскої шини busbar), які з'єднують sell в ФЕМ	Опір провідів, Ом	
busbar	погіршення контакту в місці з'єднання sell та busbar	зростання температури в місці контакту та зменшення струму	Температура, °C Струм, А	K_{i2} в.о.
	корозія	зменшення струму, нагрівання busbar	Струм, А	
	пошкодження діода Шотткі (пробій)	нагрів	Температура, °C Струм, А	
клемний термінал – junctionbox	збільшення опору контактів	нагрів	Температура, °C Струм, А	K_{i3} в.о.
алюмінієвий каркас з герметиком	погіршення герметичності каркасу	нагрів, волога в середині ФЕМ	Температура, °C Струм, А	K_{i4} в.о.
закисне скло	погіршення герметичності каркасу	нагрів, волога в середині ФЕМ	Температура, °C Струм, А	K_{i5} в.о.
кабель, що з'єднує cell з клемним терміналом	пошкодження кабелю	ізоляція та опір коннектора	Опір ізоляції, МОм Тем-ра °C	K_{i6} в.о.

$$K_{i1} = \frac{x_{i1,гран} - x_{i1,пот}}{x_{i1,гран} - x_{i1,поч}}$$

Коефіцієнт залишкового ресурсу K_i за i -м діагностичним параметром:
де $x_{i1,гран}$ – граничне нормативне значення i_1 -го діагностичного параметра, $x_{i1,пот}$ – значення i_1 -го діагностичного параметра на момент контролю, $x_{i1,поч}$ – початкове значення i_1 -го діагностичного параметра (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту), i_1 – діагностичний параметр.

15

Таблиця даних для моделювання

Для визначення КЗР за діагностичним параметром опору ізоляції, потрібно врахувати, що опір активного опору ізоляції був рівний 200 МОм, на момент введення в експлуатацію, при поточному контролі значення цього параметру було рівним 120, відомо, що граничне значення активного опору ізоляції - 50 МОм. Тоді для визначення КЗР K_6 за діагностичним параметром R визначається за виразом (3.1), прийнявши до уваги, що під час вимірювання опір ізоляції був рівний 150 МОм.

$$K_{i1} = \frac{50 \text{ МОм} - 120 \text{ МОм}}{50 \text{ МОм} - 200 \text{ МОм}} = 0,46 \text{ (в.о.)}$$

Враховуючи те, що пошкодження кожного з вузлів призводить до пошкодження всього ФЕМ, то коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом:

$$K_{рес} = \prod_{r=1}^v K_r^{P_r}$$

де K_r – коефіцієнт залишкового ресурсу ФЕМ r -му діагностичному параметру

Таблиця 14.1 – Фрагмент результатів розрахунків коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ

K_1 в.о.	K_2 в.о.	K_3 в.о.	K_4 в.о.	K_5 в.о.	K_6 в.о.	$K_{ресФЕМ}$ в.о.
1	2	3	4	5	6	7
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
0,03	0,097	0,03	0,097	0,03	0,097	0,029366
0,04	0,096	0,04	0,096	0,04	0,096	0,035963
0,05	0,095	0,05	0,095	0,05	0,095	0,042042
0,06	0,094	0,06	0,094	0,06	0,094	0,047721
0,07	0,093	0,07	0,093	0,07	0,093	0,053078
0,08	0,092	0,08	0,092	0,08	0,092	0,058164
0,09	0,091	0,09	0,091	0,09	0,091	0,063015
0,1	0,09	0,1	0,09	0,1	0,09	0,067659

Етапи розрахунку залишкового ресурсу ФЕМ

16

v – кількість діагностичних параметрів відповідно до кількості вузлів, p_i – ймовірність відхилення контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра:

$$p_i = \frac{y_i}{m_2}$$

де y_i – кількість відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра, які були виявлені шляхом контролю i -го діагностичного параметра з загальної кількості виявлених відхилень контрольованих параметрів від гранично допустимого нормованого значення, m_2 – загальна кількість виявлених відхилень контрольованих діагностичних параметрів від їх гранично допустимих нормованих значень.

Коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ визначається за виразом:

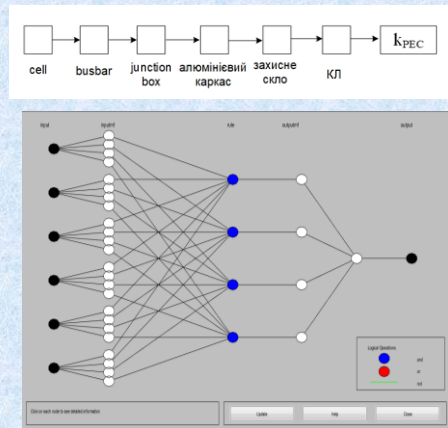
$$K_{\text{заг.рес}} = K_1^{P_{k1}} \cdot K_2^{P_{k2}} \cdot K_3^{P_{k3}} \cdot K_4^{P_{k4}} \cdot K_5^{P_{k5}} \cdot K_6^{P_{k6}}$$

Де $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ – відомі на момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу по відповідних діагностичних параметрах, $P_{k1}, P_{k2}, P_{k3}, P_{k4}, P_{k5}, P_{k6}$ – ймовірності пошкоджень деталей ФЕМ, виявлених шляхом контролю діагностичних параметрів з урахуванням загальної кількості пошкоджень. Так, відповідно:

$$\begin{aligned} p_{k1} &= 0,039 \text{ в.о.}, p_{k2} = 0,016 \text{ в.о.}, \\ p_{k3} &= 0,818 \text{ в.о.}, p_{k4} = 0,019 \text{ в.о.}, \\ p_{k5} &= 0,026 \text{ в.о.}, p_{k6} = 0,082 \text{ в.о.} \end{aligned}$$

Структура моделі та нейромережі

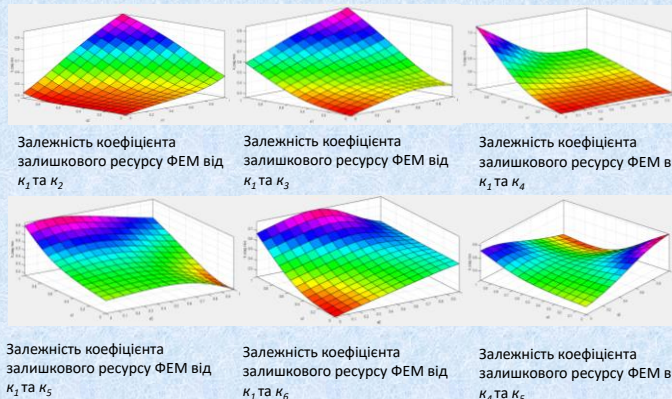
17



Структура нейромережі

Залежності коефіцієнта залишкового ресурсу від ФЕМ діагностичних параметрів

18



ВИСНОВКИ

19

У роботі розглянуто питання дослідження зміни технічного стану обладнання фотоелектричних станцій під час експлуатації.

-Термографічний аналіз фотоелектричних модулів Isofoton I-150, що використовуються на фотоелектричній установці потужністю 20 кВт, яка експлуатується на даху навчального корпусу електротехнічного факультету Університету Західної Богемії в Пльзені, проведений 14 травня 2024 року, виявив один модуль, який може бути дефектним або деградованим. Однак результати цього аналізу повинні бути підтверджені подальшими вимірюваннями (вольтамперні характеристики в умовах STC).

-Другий результат – визначення відповідного методу для подальшого тепловізійного аналізу експлуатованої системи. Беручи до уваги наявне обладнання та розташування даху, необхідно зробити знімки окремих окремих модулів. Процес не може бути прискорений скануванням цілих полів, оскільки виникають технічні обмеження (фізична роздільна здатність наявних тепловізійних камер і просторові обмеження даху, які не дозволяють підтримувати відповідну відстань. Аналіз розташування фотомодулів з біологічною корозією показав, що вона частіше трапляється в нижніх рядах сонячних панелей.

-В роботі відмічено, що на біологічну корозію впливає стан даху та розташування фотомодулів на даху. Цієї проблеми можна уникнути на проектному стані. Іншою невиключеною проблемою було зазначено перегрів з'єднувальної коробки під час експлуатації ФЕС, який сумарно впливає на одну комірку або один ряд. Це було добре помітно при температурі навколишнього середовища близько -12-13 С. Різниця між здоровими і перегрітими елементами становить до 10 С.

-Розроблений метод визначення діагностування ФЕМ в умовах неповноти початкових даних, який шляхом використання нейро-нечіткого моделювання дозволяє отримати поточне значення коефіцієнту залишкового ресурсу ФЕМ і в залежності від результату зробити висновок про один зі станів ФЕМ: справний, з незначними відхиленнями параметрів, передаварійний, аварійний та зменшити похибку прогнозування такого стану.

20

Дякую за увагу!
Доповідь закінчена.