

ЛИСИЙ Андрій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0001-0065-9740>

e-mail: andriiysyi@khmnu.edu.ua

САВЕНКО Богдан

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5647-9979>

e-mail: savenko_bohdan@ukr.net

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

У статті розглянуто рішення актуальної науково-практичної задачі – підвищення рівня пожежної безпеки сонячних електростанцій шляхом виявлення пожежонебезпечних режимів роботи фотоелектричних модулів. Запропоновано новий метод автоматичного виявлення небезпечних станів на основі аналізу даних, отриманих за допомогою безпілотного літального апарату з встановленими RGB та тепловізійними (IR) камерами. Метод ґрунтується на побудові диз'юнктивної нормальної форми, яка використовує сукупність ключових ознак: тип дефекту (пошкодження, забруднення), результати візуального та теплового аналізу, температура байпасного діода. Розроблено алгоритм, який дозволяє не лише виявляти потенційно небезпечні модулі, але й класифікувати причину дефекту для прийняття оперативного рішення щодо обслуговування чи заміни дефектного обладнання. Для реалізації системи моніторингу запропоновано інтеграцію програмного комплексу SCADA TRACE MODE з БПЛА, що забезпечує: збір та обробку даних у реальному часі, візуалізацію результатів, генерацію тривоги, формування рекомендацій щодо технічного обслуговування. Також, передбачено можливість використання додаткових датчиків температури для контролю стану байпасних діодів. Така комплексна система підвищує ефективність моніторингу, скорочує час реакції на аварійні ситуації та зменшує ризики виникнення пожеж на об'єктах сонячної енергетики.

Ключові слова: фотоелектричні модулі, сонячні електростанції, пожежна безпека, диз'юнктивна нормальна форма, виявлення дефектів.

LYSYI Andriy, SAVENKO Bohdan

Khmelnytskyi National University

METHOD FOR DETECTING FIRE-HAZARDOUS OPERATING MODES OF PHOTOVOLTAIC MODULES IN SOLAR POWER PLANTS

This article addresses a current scientific and practical issue — improving fire safety levels at solar power plants by detecting fire-hazardous operating modes of photovoltaic (PV) modules. A novel method for automatic detection of hazardous conditions is proposed, based on data analysis obtained using an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with RGB and thermal (IR) cameras.

The method is based on the construction of a disjunctive normal form that incorporates a set of key indicators: defect type (damage or contamination), results of visual and thermal analysis, and the temperature of the bypass diode. An algorithm has been developed that not only detects potentially hazardous modules but also classifies the cause of the defect, enabling prompt decisions regarding maintenance or replacement of faulty equipment.

To implement the monitoring system, integration of the SCADA TRACE MODE software suite with UAVs is proposed, which provides real-time data collection and processing, result visualization, alarm generation, and maintenance recommendations. The use of additional temperature sensors to monitor the condition of bypass diodes is also envisaged.

This comprehensive system enhances monitoring efficiency, reduces response time to emergency situations, and mitigates the risk of fires at solar energy facilities.

Keywords: photovoltaic modules, solar power plants, fire safety, disjunctive normal form, defect detection

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сонячна енергетика належить до найбільш перспективних напрямів «чистих» джерел енергії, що динамічно розвиваються у всьому світі. Розміри площ, укритих фотоелектричними модулями, варіюються від десятків метрів до десятків кілометрів. Не зважаючи на таке різноманіття можна відзначити, що ефективність та пожежна безпека експлуатації об'єктів сонячної енергетики переважно залежать від своєчасного виявлення та усунення дефектів. Традиційні методи інспектування, не завжди дають змогу ефективно виявляти пожежонебезпечні дефекти фотоелектричних модулів сонячних електростанцій (ФЕМСЕ). Тому, у світовій практиці дедалі активніше впроваджуються автоматизовані системи моніторингу на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Використання БПЛА, які оснащені відео й тепловізійними камерами, відкриває можливість швидко, безпечно обстежувати великі площі поверхонь ФЕМСЕ та отримувати детальні зображення у видимому та інфрачервоному діапазонах. Проте, ефективність такої системи залежить від швидкості оброблення та аналізу даних, від методів здатних автоматично виявляти та класифікувати дефекти, визначати ступінь їхньої критичності, наприклад, пожежонебезпечності і, за потреби, генерувати рекомендації щодо ремонтних робіт.

Можна відмітити зростаючу потребу в оперативному та достовірному виявленні дефектів ФЕМСЕ за

допомогою БПЛА з одного боку і недостатнім розвитком відповідних інтегрованих рішень, які одночасно охоплювали б адаптивне управління камерами БПЛА та кількісну оцінку критичності пошкоджень щодо пожежної безпеки із забезпеченням обробки даних бортовим комп'ютером.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є підвищення ефективності моніторингу ФЕМСЕ, зменшення ризиків виникнення пожеж, що є актуальною науково-прикладною задачею на основі розробленого методу виявлення пожежонебезпечного режиму роботи фотоелектричних модулів сонячних електростанцій.

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА СТРАТЕГІЙ

Пожежонебезпечні режими роботи сонячних електростанцій є однією з критичних загроз для безпеки як інфраструктури, так і персоналу. До таких режимів зазвичай відносять виникнення гарячих точок (hot spots), пошкодження ізоляції, короткі замикання, що можуть призводити до локального перегрівання та займання. Класичні методи моніторингу, як візуальні огляди та термографія, часто потребують значних ресурсів, особливо на великих станціях. Тому останнім часом зростає інтерес до застосування штучного інтелекту та безпілотних літальних апаратів, які дозволяють проводити автоматизований і високоточний аналіз.

У роботі [1] розглянуто вплив гарячих точок, які є дефектними фотоелектричними елементами, як ключового чинника виникнення пожеж на сонячних електростанціях. Автори наводять аналітичний огляд основних типів пошкоджень, включаючи мікротріщини, локальні перегріви та деламінацію.

Дослідження [2] фокусується на використанні термографії і алгоритмів глибокого навчання для виявлення гарячих точок та інших пожежонебезпечних аномалій на сонячних панелях у реальному часі.

У статті [3] запропоновано інтелектуальну систему раннього виявлення пожеж, яка інтегрує методи комп'ютерного зору та нейромережі для ідентифікації перегрівів, спричинених пошкодженнями панелей.

У роботі [4] здійснено огляд причин пожеж на сонячних електростанціях із практичним аналізом випадків займання та рекомендаціями щодо попередження, включаючи системи моніторингу, що застосовують машинне навчання.

Стаття [5] досліджує можливості застосування цифрового двійника (digital twin) у поєднанні зі штучним інтелектом для виявлення пожежонебезпечних станів, зокрема тривалого локального перегріву, що важко виявити традиційними методами.

У роботі [6] представлено широкий огляд проблеми пожежної безпеки фотоелектричних модулів та рішень для їх мінімізації. Авторами акцентовано, що локальні гарячі точки є ключовими загрозами, здатними викликати пожежу. Розглянуто новітні підходи до зниження цих ризиків: зокрема, структурну реорганізацію модулів, оптимальне розташування панелей для ослаблення ефекту гарячих точок.

Дослідження [7] присвячене кількісному аналізу статистики пожеж на дахових сонячних установках методом «дерева відмов». На основі звітів про пожежі у чотирьох країнах автори ідентифікували сім основних подій-ініціаторів загоряння, серед яких електрична дуга виявилась домінуючою причиною пожеж. Встановлено, що найбільш критичними компонентами, з вини яких виникають загоряння, є комутаційні пристрої, при цьому несправності саме роз'ємних з'єднань спричиняли близько 17 % від усіх проаналізованих PV-пожеж.

У статті [8] запропоновано IoT-платформу моніторингу стану сонячних панелей, що використовує алгоритми штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання гарячих точок. Система аналізує температурні поля модулів і визначає аномальні ділянки перегріву за різних рівнів освітленості. Задля цього автори натренували дві AI-моделі (глибокого навчання CNN та класичного машинного навчання) на даних з реальної PV-установки, де спеціально індукували гарячі точки. Платформа успішно виявляє перегріви модулів, фіксуючи характерні відмінності температур між нормальними і потенційно небезпечними панелями. В результаті система змогла в режимі реального часу ідентифікувати розвиток гарячих точок до того, як ті спричинять пошкодження чи займання, що підтверджує ефективність AI-підходу в підвищенні пожежної безпеки PV-модулів.

У дослідженні [9] розглянуто питання пожежної безпеки будівельних інтегрованих фотоелектричних систем (BIPV). Робота поєднує огляд причин займань у PV-модулях з аналізом ризиків саме в контексті інтеграції панелей у конструкції будівель. Відзначається, що для BIPV актуальні ті ж небезпечні режими, що й для звичайних сонячних станцій: дефекти фотоелементів (тріщини, деградація), зовнішні фактори (пил, затінення) та електричні несправності (перегрів, неузгодженість з'єднань панелей, дугові розряди, замикання тощо) можуть спричинити пожежі. Для комплексної оцінки ризику автори застосували метод аналізу ієрархій, враховуючи сукупність факторів: характеристики PV-системи, електрообладнання, будівельні особливості та наявність протипожежних засобів. На основі багатофакторного аналізу запропоновано рекомендації з пожежонебезпечного проектування BIPV систем.

Проте у зазначених роботах не розглядається нова ознака пожежонебезпечного режиму, що може бути встановлена на основі дослідження комбінацій даних камер спостереження і термоелектричних характеристик байпасних діодів фотоелектричних модулів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Важливою задачею є автоматичне розпізнавання дефектів, які можуть призвести до перегріву фотоелектричних комірок і як наслідок пожежі ФЕМСЕ. Рішення даної задачі реалізується розробленим методом виявлення пожежонебезпечного режиму роботи ФЕМСЕ, етапи якого такі:

узагальнення основних видів моделей термографічних зображень дефектів ФЕМСЕ;

складання таблиці істинності сукупності критично важливих ознак моніторингу ФЕМСЕ;

розробка алгоритму методу виявлення пожежонебезпечного режиму роботи ФЕМСЕ та встановлення причини дефекту за сукупністю ознак.

Фотоелектричні модулі складають основу сонячних електростанцій, де вони об'єднуються у групи, зазвичай, які називають стрингами. Кожен модуль складається з 36, 48, 54, 60, 72 або 96 фотоелектричних комірок (елементів), які з'єднані послідовно в рядки, що забезпечує необхідну вихідну напругу, рис. 1 [10, 11].



Рис. 1. Будова фотоелектричного модуля

Для зменшення впливу пошкоджених або затінених, забруднених комірок зазвичай застосовують байпасні діоди (BPD), підключаються паралельно до всієї панелі або до з'єднань з 15-24 елементів і шунтують цілий рядок фотоелектричних комірок при перевищенні певної кількості несправних, затінених комірок, зазвичай 3-5, рис. 2 [11].

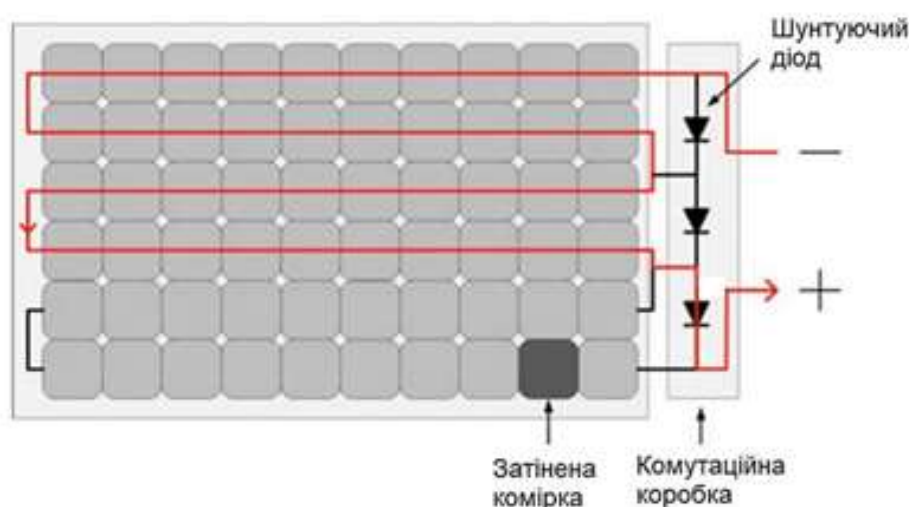


Рис. 2. Підключення байпасних (шунтуючих) діодів до фотоелектричного модуля

У разі втрати працездатності множини комірок одного рядка активується один BPD, третина фотоелементів та їхня потужність буде шунтуватися, а це означає зменшення потужності стрингу панелей. При цьому забезпечується працездатність решти рядків і панелей, запобігання перегріву частини пошкоджених або затінених комірок і як наслідку можливого займання.

Номінальну потужність ФЕМСЕ, виміряну у ватах (Вт), визначають згідно зі стандартними умовами тестування (Standard Test Conditions, STC), тобто за температури елемента 25 °С та інтенсивності радіації сонячного спектра 1000 Вт/м². Однак на практиці температура робочого елемента ФЕМСЕ зазвичай піднімається значно вище 25 °С, що залежить від температури навколишнього повітря, швидкості вітру, часу доби та інтенсивності радіації, а також від конструктивних особливостей модуля. Під час сонячної погоди внутрішня температура фотоелементів у складі ФЕМСЕ може бути на 20–40 °С вища за температуру навколишнього повітря, що призводить до зниження загальної потужності приблизно на 8–17 %.

Номінальну потужність вказують також в умовах NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) – номінальної робочої температури комірки. Використовуючи NOCT, яку надає виробник, а також поточну температуру повітря T_c (°С) та інтенсивність радіації G (Вт/м²), можна оцінити робочу температуру модуля за допомогою наближеної формули [49]:

$$T_{\text{ФМ}} = T_c + (NOCT - T_0) \frac{G}{G_0} = T_c + \frac{NOCT - 20}{800} G.$$

Наприклад, типовий модуль з NOCT = 48 °С за $T = 26$ °С, $G = 900$ Вт/м² буде мати оціночну температуру 57 °С. Температура підвищується вище рівня навколишнього середовища зі збільшенням сонячної радіації для всіх типів модулів. Проте, при затіненні однієї або декількох комірок, наприклад через опале листя, пташиний послід, точковому механічному пошкодженні спрацювання байпасних діодів нестабільне або взагалі не включаються через несуттєве зменшення напруги рядка фотоелектричних комірок, рис. 3.

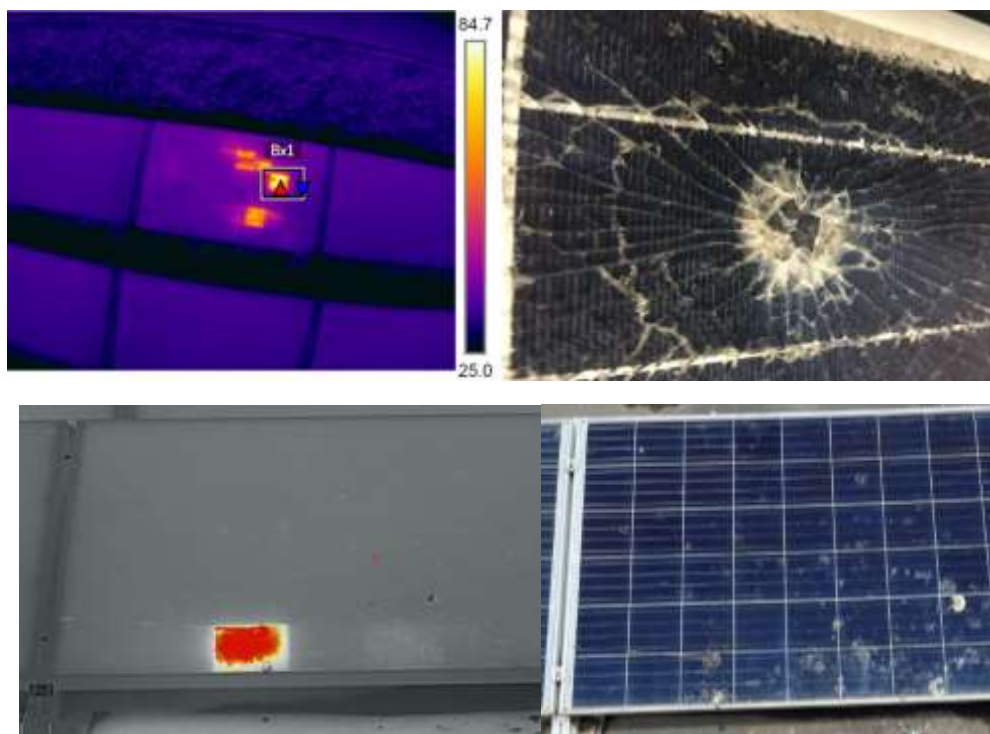


Рис. 3. Термограма і відеозображення пошкодження декількох фотоелектричних елементів, забруднених пташиним послідом

Такий випадок найнебезпечніший у пожежному відношенні, температура лицевої поверхні модуля на ділянці непрацездатної комірки дефекту «гарячої точки» підвищується більше 100 °С, а з тильної сторони є втричі більшою, що безумовно може призвести до пожежі модуля, рис. 4.



Рис. 4. Вигорання декількох ФЕМСЕ

Крім дефекту «гаряча точка» виникають і інші дефекти. Наприклад, може бути відключеним або несправним весь фотоелектричний модуль, рис. 5.

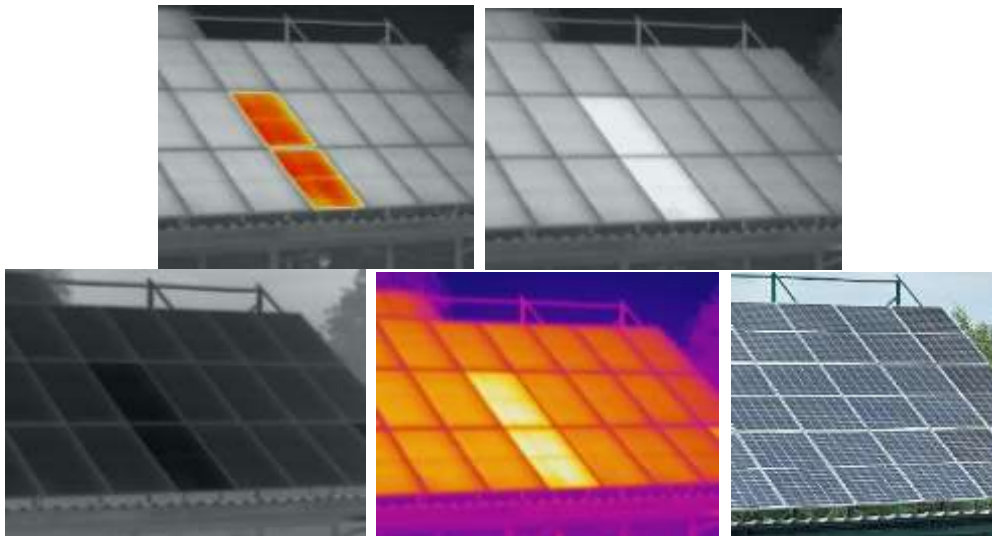


Рис. 5. Термограма різних кольорних палітр і відеозображення пошкодження двох фотоелектричних модулів

Також, наприклад через внутрішні пошкодження здебільшого може бути один рядок тепліший за інші рядки в модулі, рис. 6.

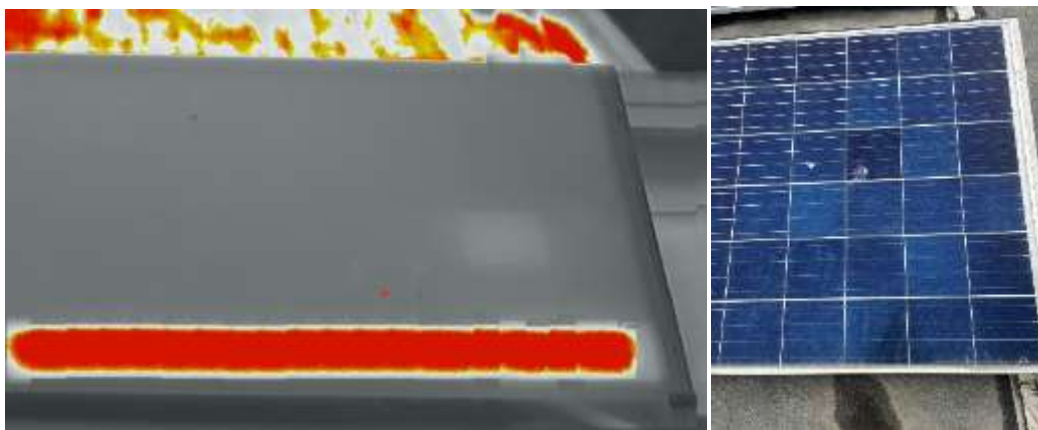
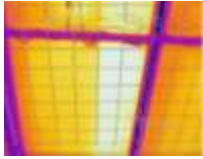
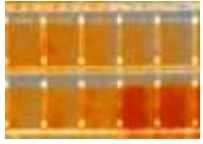
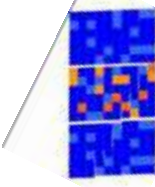


Рис. 6. Термограма і відеозображення пошкодження дефекту одного рядка фотоелектричного модуля

Узагальнений результат аналізу дефектів подамо у вигляді моделей термографічних зображень дефектів ФЕМСЕ, що спостерігаються при дослідженні на відкритому повітрі. Опис, можливі режими відмов та їх вплив на електричну потужність подано у таблиці 1. Зібрані дані були поділені на 3 основних моделі дефектів.

Таблиця 1

Основні види моделей термографічних зображень дефектів ФЕМСЕ

Номер класу моделі	Клас моделі дефекту	Характеристика дефекту	Причина виникнення дефекту	Наслідки впливу дефекту	Фото дефекту
1		Один рядок тепліший за інші рядки в модулі	Коротке замикання обхідного діода	Втрачена потужність рядка фотоелектричного модуля	
2		Один або декілька модулів тепліші за інші	Модулі не підключені до системи	Втрачена потужність електростанції	
3		Поодинокі фотоелектричні елементи тепліші	Обхідні діоди не замкнуті пошкодження декількох елементів у різних рядках модуля	Втрачена потужність модуля	

Слід зазначити, що байпасні діоди у відкритому стані при шунтування дефектних комірок або модулів обов'язково нагріваються до температури більшої за 60 °С, що є прямою ознакою наявності дефектів у ФЕМСЕ.

Здебільшого час для ретельного огляду кожного ФЕМСЕ для виявлення дефектів обмежений погодно-кліматичними умовами, а при застосування БПЛА ще й часом польоту. Це збільшує ризик помилок щодо виявлення дефектів.

Не всі забруднення є критичними, тобто пожежонебезпечними. Визначимо ознаки, за яких можливо розпізнати такі дефекти. Для цього складемо таблицю істинності сукупності критично важливих ознак моніторингу пожежонебезпечного режиму ФЕМСЕ, табл. 2.

Таблиця 2

Таблиця істинності сукупності критично важливих ознак моніторингу пожежонебезпечного режиму ФЕМСЕ

№	Причина дефекту комірок є забруднення, затінення (1) або пошкодження (0), X_1	Виявляються камерою RGB, X_2	Виявляються камерою IR, X_3	Підвищена температура байпасного діода, X_4	Істинне значення функції Y (пожежонебезпечний режим)	Режим роботи модуля
1	0	0	0	0	0	нормальна робота
2	0	0	0	1	0	не існує
3	0	0	1	0	1	пожежонебезпечний
4	0	0	1	1	0	блокування байпасним діодом
5	0	1	0	0	0	пошкодження незначне
6	0	1	0	1	0	не існує
7	0	1	1	0	1	пожежонебезпечний
8	0	1	1	1	0	блокування байпасним діодом
9	1	0	0	0	0	нормальна робота
10	1	0	0	1	0	не існує
11	1	0	1	0	0	не існує
12	1	0	1	1	0	не існує
13	1	1	0	0	0	пошкодження незначне
14	1	1	0	1	0	не існує
15	1	1	1	0	1	пожежонебезпечний
16	1	1	1	1	0	блокування байпасним діодом

На основі таблиці істинності для функції $Y = 1$ (тобто пожежонебезпечний режим), складено диз'юнктивну нормальну форму (ДНФ) виявлення пожежонебезпечного режиму функціонування ФЕМСЕ.

$$Y = (X_1 \cdot \bar{X}_2 \cdot X_3 \cdot \bar{X}_4) \vee (\bar{X}_1 \cdot X_2 \cdot \bar{X}_3 \cdot \bar{X}_4) \vee (\bar{X}_1 \cdot \bar{X}_2 \cdot X_3 \cdot \bar{X}_4)$$

де: X_1 - причина дефекту комірок (1 – забруднення або затінення, 0 - пошкодження), X_2 - виявлення дефектів RGB камерою БПЛА, X_3 - виявлення дефектів IR-камерою БПЛА, X_4 - підвищена температура байпасного діода.

При цьому враховано те, що загалом дефекти можна поділити відповідно до причин виникнення на такі дві групи: пошкодження фотоелектричних комірок; забруднення або затінення комірок.

За результатами аналізу таблиці можна відзначити:

для встановлення пожежонебезпечного режиму роботи ФЕМСЕ необхідно застосовувати відеокамеру RGB, тепловізійну камеру IR і аналізувати їх фотознімки і термограми ФЕМСЕ та температуру байпасних діодів;

алгоритм виявлення пожежонебезпечного режиму роботи ФЕМСЕ та встановлення причини за сукупністю ознак такий, рис. 7:

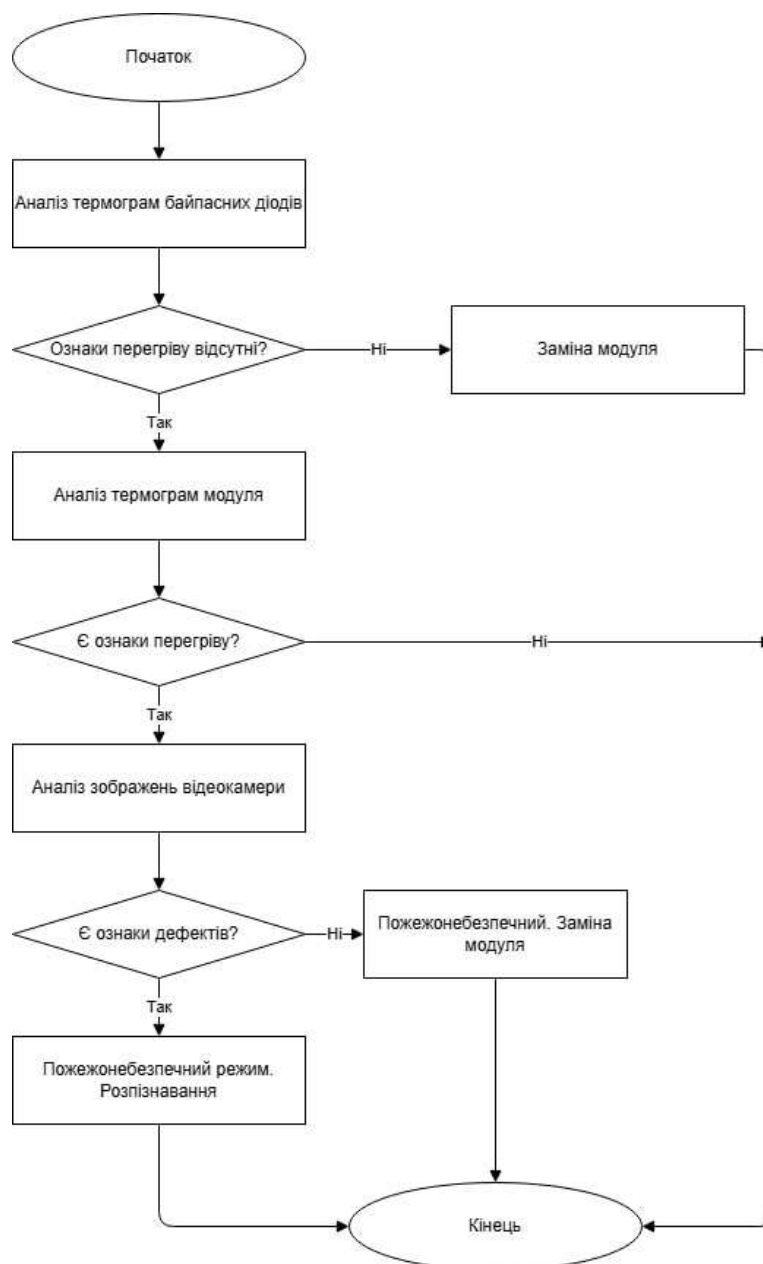


Рис. 7. Алгоритм моделі виявлення пожежонебезпечного режиму роботи ФЕМСЕ та встановлення причини за сукупністю ознак

Відповідно даного алгоритму пожежонебезпечний режим визначається за умови наявності сукупності таких критично важливих ознак моніторингу ФЕМСЕ як наявність дефектів на термограмі модуля, відсутність дефекту на термограмі байпасного діоду або відсутність підвищення його температури. При цьому модуль має пошкодження і потребує заміни. Якщо додатково до зазначених ознак візуально виявлено затінення або забруднення, то потребує відповідного усунення причини затінення або здійснення обслуговування модуля.

Слід відмітити, що алгоритм передбачає термографічну зйомку байпасних діодів, які здебільшого розміщуються в розподільній коробці з тильної сторони сонячної панелі, що ускладнює їх зйомку з БПЛА. Тому, рішення такої задачі може бути здійснено з використанням переносного тепловізора або із отриманням даних від IoT на основі КФС моніторингу генерації електроенергії сонячною електростанцією щодо зміни температури в розподільній коробці з байпасними діодами і передачею їх безпосередньо на комп'ютер БПЛА або ж передачею даних термосенсора по провідному каналу до наземного сервера.

Для підтвердження ефективності запропонованої моделі було змодельовано обробку реальних даних, що надходять від RGB камери, тепловізора (IR) та програмного модуля на базі YOLOv8, який виконує розпізнавання дефектів на фотоелектричних модулях, рис. 8.



Рис. 8. Зображення з IR, RGB камер та з виходу програмного модуля на базі YOLOv8

Вхідні дані представляли собою структури формату JSON, що включали перелік виявлених дефектів (наприклад, "дефект комірки", "дефект рядка", "дефект модуля"), а також логічні параметри: факт не виявлення дефекту в RGB діапазоні, виявлення в IR діапазоні та інформацію про підвищену температуру байпасного діода.

На основі логіки, закладеної у ДНФ, виконувалося автоматичне визначення пожежонебезпечного стану. Зокрема, для запису з наступними ознаками, наприклад:

```
def is_fire_hazardous(defect_type: str, rgb_detected: bool, ir_detected: bool, bypass_temp_high: bool) -> bool:
```

Визначення пожежонебезпечного режиму (Y=1) згідно ДНФ:

$$Y = (\neg X_1 \wedge \neg X_2 \wedge X_3 \wedge \neg X_4) \vee (\neg X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge \neg X_4) \vee (X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge \neg X_4)$$

X1 = 1 if defect_type.lower() in ["забруднення", "затінення"] else 0

X2 = 1 if rgb_detected else 0

X3 = 1 if ir_detected else 0

X4 = 1 if bypass_temp_high else 0

term1 = (not X1) and (not X2) and X3 and (not X4)

term2 = (not X1) and X2 and X3 and (not X4)

term3 = X1 and X2 and X3 and (not X4)

return term1 or term2 or term3

Приклад використання

```
input_data = {"module_id": "panel_001",
```

```
  "yolo_classes": ["дефект комірки"],
```

```
  "rgb_detected": False,
```

```
  "ir_detected": True,
```

```
  "bypass_temp_high": False}
```

Визначення типу дефекту

```
defect_type = "пошкодження"
```

```
for cls in input_data["yolo_classes"]:
```

```
  if "затінення" in cls or "забруднення" in cls:
```

```
    defect_type = "забруднення" break
```

Перевірка на пожежонебезпечність

```
result=is_fire_hazardous(defect_type, input_data["rgb_detected"], input_data["ir_detected"],
```

```
input_data["bypass_temp_high"])
```

```
print(f'Модуль {input_data["module_id"]} – {'ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНИЙ'})
```

Було автоматично встановлено, що модуль є пожежонебезпечним ($Y=1$), а причина пошкодження, оскільки домінуючим класом дефекту було "дефект комірки", що відповідає внутрішньому механічному пошкодженню фотоелектричних комірок $X_1=0$ при $X_2=0$, $X_3=1$ і температурі байпасного діода 14°C , що вказує на виключений режим його роботи $X_4=0$. Тобто алгоритм визначив пожежонебезпечний режим за рядком 3 таблиці 4.6. У подібних випадках система може не лише повідомити про небезпечний стан, а й уточнити, чи слід замінити модуль або здійснити очищення поверхні.

Такий підхід дозволяє інтегрувати результат логічного аналізу у КФС моніторингу ФЕМСЕ для оперативного прийняття рішень про технічне обслуговування.

Найбільш технічно реалізуємим є спосіб отримання даних про стан байпасних діодів за рахунок встановлення у розподільні коробки датчиків температури або струму через діод. Для підвищення ефективності моніторингу ФЕМСЕ та своєчасного виявлення потенційно пожежонебезпечних режимів їх роботи пропонується інтеграція програмного комплексу SCADA TRACE MODE до КФС моніторингу ФЕМСЕ.

SCADA TRACE MODE - це програмний комплекс диспетчерського управління і збору даних з автоматизації технологічних процесів і зокрема IoT. Тоді структура КФС складатиметься з наступних компонентів:

1. БПЛА з мультиспектральними камерами: RGB камера для візуального виявлення забруднень, затіньов та механічних пошкоджень; IR камера (тепловізор) для виявлення температурних аномалій.
2. Бортова обчислювальна система БПЛА: програмне забезпечення на основі нейронної мережі YOLO для обробки зображень у режимі реального часу; модуль бездротової передачі даних для відправлення результатів аналізу до наземного комплексу управління.
3. SCADA TRACE MODE: сервер обробки та зберігання даних на наземній обчислювальній станції; модуль аналізу даних на основі формування ДНФ; система візуалізації даних моніторингу; модуль формування тривоги та повідомлень; модуль створення звітів.
4. Додаткові датчики вимірювання температури байпасних діодів ФЕМСЕ з модулем передачі даних на наземний сервер або радіоканалом на БПЛА.

Алгоритм роботи КФС моніторингу ФЕМСЕ виявлення пожежонебезпечного режиму роботи та встановлення причини за сукупністю ознак з використанням БПЛА та SCADA TRACE MODE представлено на рис. 9.

Програмний комплекс SCADA TRACE MODE отримує результати аналізу зображень з БПЛА (після обробки нейромережею YOLO), а також дані з датчиків температури байпасних діодів ФЕМСЕ. Отримані дані обробляються відповідно до заданої ДНФ. При виконанні умови $Y = 1$ система SCADA TRACE MODE автоматично генерує тривогу про пожежонебезпечний режим роботи ФЕМСЕ. Система SCADA TRACE MODE забезпечує наступні функції в КФС моніторингу ФЕМСЕ:

1. Збір та обробка даних: прийом та обробка термографічних зображень з БПЛА, збір даних з датчиків температури байпасних діодів, моніторинг електричних параметрів ФЕМСЕ.
2. Аналіз даних на основі ДНФ: визначення стану модулів ФЕМСЕ відповідно до заданої логічної функції, класифікація дефектів за типами та ступенем небезпеки.
3. Візуалізація даних моніторингу: відображення термограм модулів ФЕМСЕ, відображення RGB-зображень модулів ФЕМСЕ, графічне представлення температурних профілів, відображення електричних параметрів у вигляді графіків та діаграм.
4. Генерація тривог та повідомлень: автоматичне формування тривог при виявленні пожежонебезпечних режимів, відправлення повідомлень технічному персоналу, ведення журналу подій.
5. Формування звітів: створення звітів про стан ФЕМСЕ, формування рекомендацій щодо обслуговування або заміни модулів, статистична обробка даних моніторингу

Процес обробки даних в КФС моніторингу ФЕМСЕ з використанням БПЛА та SCADA TRACE MODE представлено на рис. 10.

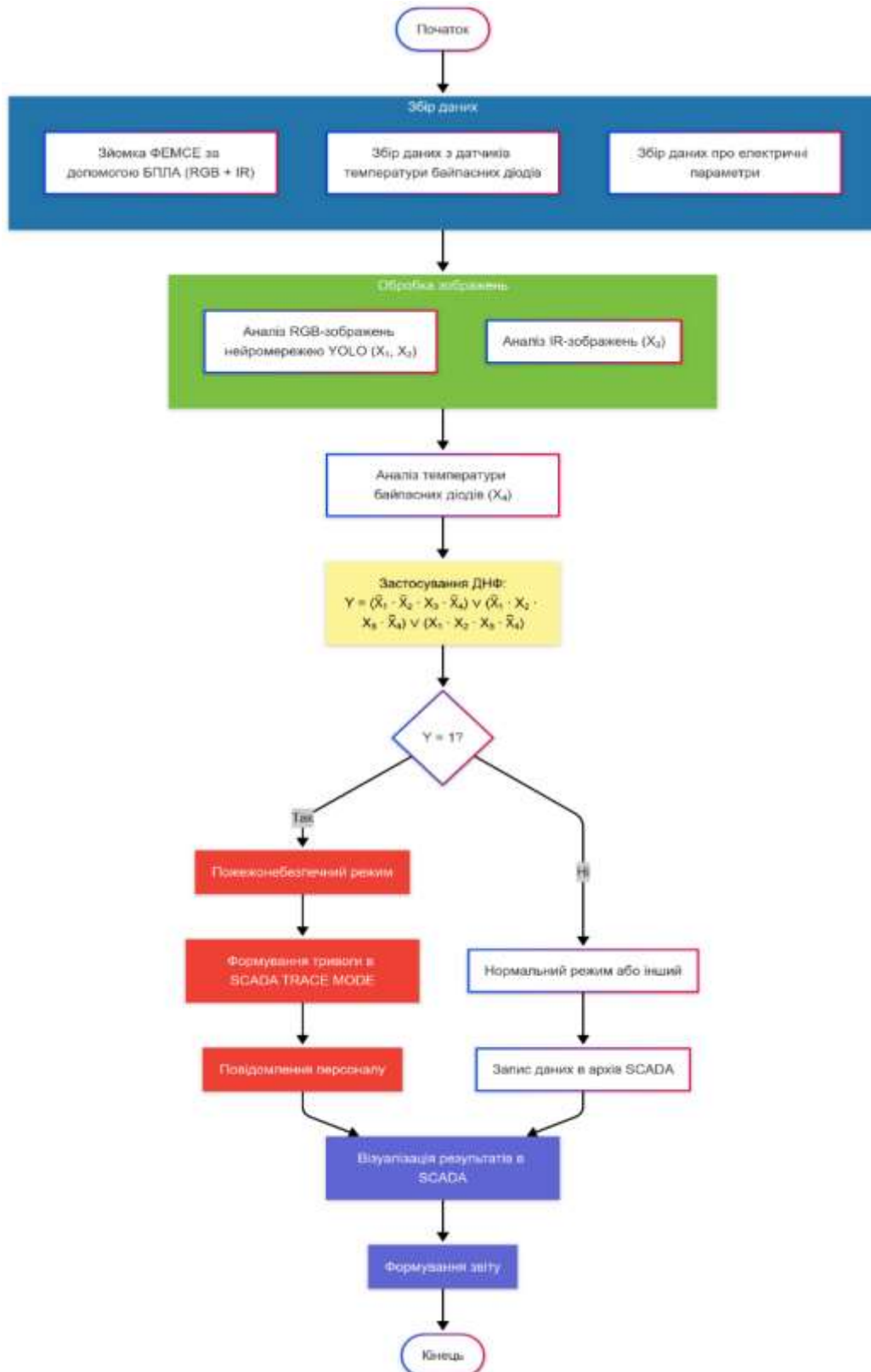


Рис. 9. Алгоритм роботи КФС моніторингу ФЕМСЕ з використанням БПЛА та програми SCADA TRACE MODE

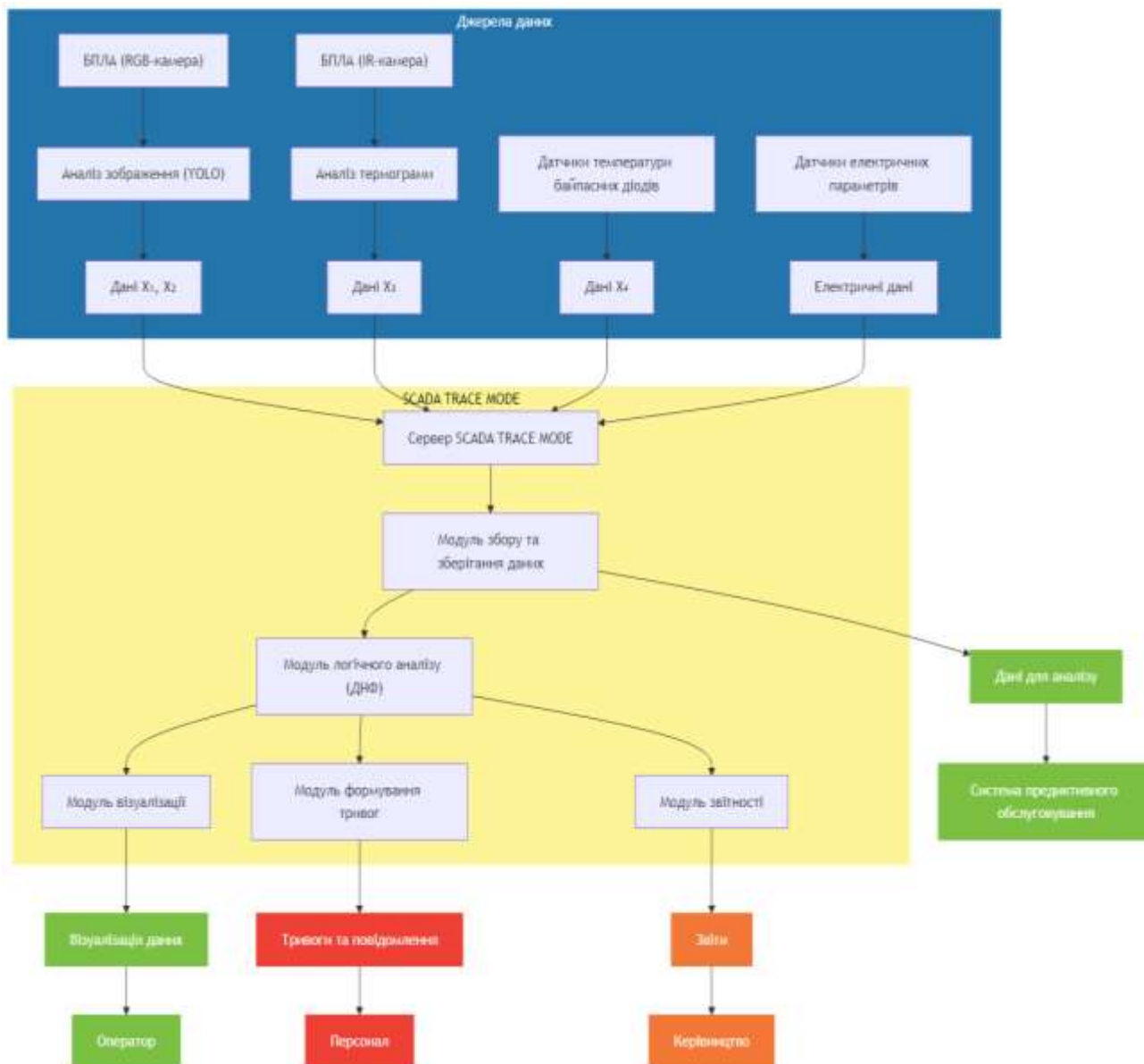


Рис. 10. Схема обробки даних в комплексній системі моніторингу ФЕМСЕ

Інтеграція SCADA TRACE MODE у КФС моніторингу ФЕМСЕ забезпечує наступні переваги:

- зменшення часу на виявлення дефектів;
- зниження витрат на технічне обслуговування ФЕМСЕ;
- підвищення надійності системи моніторингу, зниження ймовірності хибних тривог;
- комплексний аналіз різних типів даних із застосуванням логічних операцій для виявлення пожежонебезпечних режимів;
- можливість інтеграції з іншими автоматизованими системами;
- своєчасне виявлення пожежонебезпечних режимів.

Інтеграція програмного продукту SCADA TRACE MODE у КФС моніторингу ФЕМСЕ з використанням БПЛА з неймережею YOLO дозволяє підвищити ефективність виявлення пожежонебезпечних режимів роботи ФЕМСЕ. Використання ДНФ для формалізації умов видачі тривоги забезпечує високу точність виявлення дефектів та зниження ймовірності хибних спрацювань системи.

Розроблений алгоритм обробки даних дозволяє автоматизувати процес моніторингу ФЕМСЕ та зменшити час реакції на виникнення потенційно небезпечних ситуацій. Впровадження запропонованої системи моніторингу дозволить підвищити безпеку експлуатації ФЕМСЕ та запобігти виникненню пожеж.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Уперше розроблено метод виявлення пожежонебезпечного режиму роботи фотоелектричних модулів сонячних електростанцій, особливістю якого є встановлення сукупності інформативних ознак і на їх основі складання функції тривоги у вигляді диз'юнктивно нормальної форми виявлення пожежонебезпечного режиму функціонування фотоелектричних модулів. Також, запропоновано інтеграцію програмного комплексу з автоматизації технологічних процесів (зокрема IoT) SCADA TRACE MODE до КФС моніторингу фотоелектричних модулів. Це дозволило розробити алгоритм роботи КФС моніторингу фотоелектричних модулів сонячних електростанцій з виявлення пожежонебезпечного режиму роботи та встановлення причини за сукупністю ознак з використанням БПЛА та SCADA TRACE MODE, що покращує автоматизацію процесу моніторингу фотоелектричних модулів сонячних електростанцій та підвищує пожежну безпеку їх експлуатації.

Подальшим напрямком роботи є обґрунтування характеристик апаратно-програмних засобів БПЛА для забезпечення функціонування КФС моніторингу дефектів ФЕМСЕ.

Література

1. A. Triki-Lahiani, M. Bouzguenda, and M. Ksouri, "Review on fault detection and diagnosis of PV systems: Current methods, trends and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 156, Art. no. 111998, Jan. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111998>.
2. M. Siddiquee, M. S. Islam, M. Z. Hossain, et al., "A comprehensive review of hot-spot detection in PV modules using drone-based thermography and AI," *Energies*, vol. 13, no. 22, Art. no. 6022, Nov. 2020, <https://doi.org/10.3390/en13226022>.
3. L. Huang, J. Jiang, L. Liu, et al., "Intelligent fire detection algorithm in photovoltaic panels based on thermal images and deep learning," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12657–12666, Dec. 2022, <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3112257>.
4. A. Buerhop-Lutz, J. Keno, C. Reise, et al., "Fire risks caused by photovoltaic systems: A review and analysis of failure modes," *Solar Energy*, vol. 209, pp. 500–514, Oct. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.042>.
5. S. Taralunga, A. Mihalache, A. Purcaru, et al., "Towards AI-based fire hazard monitoring using digital twins for PV systems," *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 6, Art. no. 105, Dec. 2021, <https://doi.org/10.1007/s41666-021-00105-4>.
6. Z. Wu, Y. Hu, J. X. Wen, F. Zhou, and X. Ye, "A review for solar panel fire accident prevention in large-scale PV applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 132466–132480, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010212>.
7. M. N. Ong, M. A. Sadiq, M. S. Md Said, G. Jomaas, M. Z. Mohd Tohir, and J. S. Kristensen, "Fault tree analysis of fires on rooftops with photovoltaic systems," *Journal of Building Engineering*, vol. 46, Art. no. 103752, Jan. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103752>.
8. L. Cardinale-Villalobos, E. Jiménez-Delgado, Y. García-Ramírez, et al., "IoT system based on artificial intelligence for hot spot detection in photovoltaic modules for a wide range of irradiances," *Sensors*, vol. 23, no. 15, Art. no. 6749, Aug. 2023, <https://doi.org/10.3390/s23156749>.
9. P. Fang, L. Zhao, G. Song, J. Dong, J. Zhao, and Z. Wang, "Fire safety assessment of building-integrated photovoltaics (BIPVs)," *Fire*, vol. 8, no. 2, Art. no. 52, Feb. 2025, <https://doi.org/10.3390/fire8020052>.
10. Андрій ЛИСИЙ, Віталій КІРЕТОВ. Дослідження технології використання термографії для виявлення несправностей сонячних панелей. ВІСТІП, ХНУ, №4, 2024. С. 377-385.
11. Гаєвський О. Ю. Фотоенергетика. Частина І. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі [Електронний ресурс]: підручник / О. Ю. Гаєвський. – Електрон. текстові дані (1 файл: 5,57 Мб). – Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2023. – 150 с. – Назва з екрана.

References

1. A. Triki-Lahiani, M. Bouzguenda, and M. Ksouri, "Review on fault detection and diagnosis of PV systems: Current methods, trends and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 156, Art. no. 111998, Jan. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111998>.
2. M. Siddiquee, M. S. Islam, M. Z. Hossain, et al., "A comprehensive review of hot-spot detection in PV modules using drone-based thermography and AI," *Energies*, vol. 13, no. 22, Art. no. 6022, Nov. 2020, <https://doi.org/10.3390/en13226022>.
3. L. Huang, J. Jiang, L. Liu, et al., "Intelligent fire detection algorithm in photovoltaic panels based on thermal images and deep learning," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12657–12666, Dec. 2022, <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3112257>.
4. A. Buerhop-Lutz, J. Keno, C. Reise, et al., "Fire risks caused by photovoltaic systems: A review and analysis of failure modes," *Solar Energy*, vol. 209, pp. 500–514, Oct. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.042>.
5. S. Taralunga, A. Mihalache, A. Purcaru, et al., "Towards AI-based fire hazard monitoring using digital twins for PV systems," *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 6, Art. no. 105, Dec. 2021, <https://doi.org/10.1007/s41666-021-00105-4>.
6. Z. Wu, Y. Hu, J. X. Wen, F. Zhou, and X. Ye, "A review for solar panel fire accident prevention in large-scale PV applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 132466–132480, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010212>.

-
7. M. N. Ong, M. A. Sadiq, M. S. Md Said, G. Jomaas, M. Z. Mohd Tohir, and J. S. Kristensen, "Fault tree analysis of fires on rooftops with photovoltaic systems," *Journal of Building Engineering*, vol. 46, Art. no. 103752, Jan. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103752>.
 8. L. Cardinale-Villalobos, E. Jiménez-Delgado, Y. García-Ramírez, et al., "IoT system based on artificial intelligence for hot spot detection in photovoltaic modules for a wide range of irradiances," *Sensors*, vol. 23, no. 15, Art. no. 6749, Aug. 2023, <https://doi.org/10.3390/s23156749>.
 9. P. Fang, L. Zhao, G. Song, J. Dong, J. Zhao, and Z. Wang, "Fire safety assessment of building-integrated photovoltaics (BIPVs)," *Fire*, vol. 8, no. 2, Art. no. 52, Feb. 2025, <https://doi.org/10.3390/fire8020052>.
 10. Andrii LYSYI, Vitalii KIRETOV. Doslidzhennia tekhnolohii vykorystannia termohrafii dlia vyivlennia nespravnosti soniachnykh panelei. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh, Khmelnytskyi natsionalnyi universytet, №4, 2024, S. 377–385.
 11. Haiievskiy O. Yu. Fotoenerhetyka. Chastyna I. Soniachna radiatsiia i fotoelektrychni moduli [Elektronnyi resurs]: pidruchnyk / O. Yu. Haiievskiy. – Elektron. tekstovi dany (1 fail: 5,57 Mb). – Kyiv : KPI imeni Ihoria Sikorskoho, 2023. – 150 s. – Nazva z ekrana.