

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-35>

УДК 004.89:351.88:623.74

ЛИСИЙ Микола

Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького

<https://orcid.org/0000-0002-9858-706X>

e-mail: lisyi3152@ukr.net

ПАРТИКА Сергій

Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького

<https://orcid.org/0000-0003-4071-8503>

e-mail: shelby1969z5@gmail.com

КУШНЕР Ігор

Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького

<https://orcid.org/0009-0004-3038-3871>

e-mail: ztigorkushner@gmail.com

ЛИСИЙ Андрій

Хмельницький національний університет

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

e-mail: Andrii.lysyi1@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ФУНКЦІОНУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ДЕФЕКТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

В роботі наведено результати досліджень методів виявлення дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій із застосуванням технологій штучного інтелекту.

Ключові слова: кіберфізична система, моніторинг дефектів, фотоелектричні модулі.

LYSYI Mykola, PARTYKA Serhii, KUSHNER Igor

National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine named after Bogdan Khmelnytsky

LYSYI Andrii

Khmelnytskyi national university

IMPROVING THE METHOD OF FUNCTIONING OF THE CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR MONITORING DEFECTS IN PHOTOVOLTAIC MODULES OF A SOLAR POWER STATION

The article presents an improved model of the functioning of a cyber-physical system for monitoring defects in photovoltaic modules of a solar power plant. The key feature of the developed system is its integrated architecture, which involves the integration of a surveillance camera model, image processing functions based on a convolutional neural network (CNN), as well as object detection and object tracking algorithms. To ensure the geometric accuracy of image analysis, the surveillance camera is modeled using a pinhole model that allows determining the geometric parameters of images in computer vision tasks, calibrating the camera to determine its internal and external parameters, and correcting lens distortion. Additionally, the developed model provides for automated determination of whether the detected objects belong to predefined classes of defects. The classification is based on the output of a convolutional neural network using the softmax function, which predicts the probability of a defect in each cell of the image grid, providing a quantitative assessment of the confidence in the detected class. An important aspect of the improvement is the integration of Object Detection and Object Tracking technologies, which effectively eliminates the re-detection of already detected defects in the video sequence. This leads to a significant reduction in the number of duplicate and false alarms of the system, increasing its computational efficiency and the reliability of monitoring results. To further improve the tracking accuracy and reliable identification of previously detected defects over time, the model comprehensively uses Deep Simple Online and Realtime Tracking (Deep SORT) algorithms. This approach is based on a combination of two mathematical methods: the Kalman filter to eliminate noise and random outliers in the weighting coefficients of the tracked objects, which ensures more stable and reliable tracking and prediction of the position of objects in subsequent frames, and the Mahalanobis distance to quantify the degree of similarity between the weighting coefficients of already known and newly detected objects, which contributes to more accurate defect identification. In addition, the system integrates the Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) clustering algorithm, which classifies detected defect polygons by their spatial location. This allows detecting groups of closely spaced defects, which can be useful for diagnosing system problems or identifying patterns in the distribution of defects on the surface of a solar power plant. The results of the integrated approach demonstrate a significant improvement in the accuracy of defect detection due to the synergistic effect of the combination of CNN for pattern recognition, Softmax for probabilistic classification, DBSCAN for spatial distribution analysis, and Deep SORT for stable tracking. The detection speed is also increased by integrating Object Detection and Object Tracking, which minimizes the need to re-analyze the same image areas. The system's reliability is enhanced by the use of the Kalman filter to reduce the impact of random noise, the Mahalanobis distance for more objective identification, and the DBSCAN algorithm for detecting spatial anomalies.

Keywords: cyber-physical system, defect monitoring, photovoltaic modules.

Стаття надійшла до редакції / Received 04.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 01.05.2025

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

Ефективне функціонування сонячних електростанцій значною мірою залежить від надійності та довговічності фотоелектричних модулів сонячної електростанції (ФЕМСЕ). Однак, ФЕМСЕ схильні до різноманітних дефектів, які можуть призводити до зниження їхньої продуктивності, скорочення терміну служби та збільшення експлуатаційних витрат. Ці дефекти можуть виникати на різних етапах: під час виробництва, транспортування, встановлення та експлуатації, а також під впливом факторів навколишнього середовища.

Проблема своєчасного виявлення та діагностики дефектів ФЕМСЕ є надзвичайно актуальною з огляду на стрімке зростання встановленої потужності сонячних електростанцій у світі. Наслідки несвоєчасного виявлення дефектів можуть бути значними, включаючи: дефекти призводять до зменшення генерації електроенергії, що негативно впливає на ефективність електростанції; локальне перегрівання може призвести до подальшого пошкодження модуля, пожежі та загрози безпеці; дефекти можуть прискорити процеси старіння та деградації матеріалів ФЕМСЕ, скорочуючи їхній термін служби; для підтримки працездатності електростанції потрібні додаткові витрати на інспектування, ремонт та заміну пошкоджених модулів.

Традиційні методи діагностики дефектів ФЕМСЕ, такі як візуальний огляд та вимірювання електричних параметрів, є трудомісткими, не завжди точними та можуть бути неефективними для великомасштабних сонячних електростанцій. Тому існує нагальна потреба у розробці та впровадженні автоматизованих та високоточних методів діагностики, які забезпечують швидке та ефективне виявлення дефектів на великих площах, об'єктивну оцінку стану ФЕМСЕ та класифікацію дефектів, можливість моніторингу динаміки розвитку дефектів у часі, інтеграцію з системами управління та обслуговування сонячних електростанцій.

Вирішення цих завдань сприятиме підвищенню надійності, продуктивності та економічної ефективності сонячних електростанцій, а також зменшенню експлуатаційних витрат.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Традиційні методи діагностики, такі як візуальний огляд та вимірювання електричних параметрів, мають обмеження у застосуванні до великомасштабних сонячних електростанцій. Тому значна увага приділяється розробці нових методів, зокрема термографія. Інфрачервона термографія дозволяє виявляти "гарячі точки" та інші температурні аномалії, пов'язані з дефектами, такими як тріщини, розшарування та пошкодження між'єднань. Наприклад, у статті [1] описано аналіз дефектів з використанням термографії. У роботі [2] досліджено аналіз дефектів та оцінку продуктивності за допомогою кількісної електролюмінесцентної візуалізації. Успіхи в галузі машинного навчання (МН) та штучного інтелекту (ШІ) відкривають нові можливості для автоматизованого виявлення та класифікації дефектів ФЕМСЕ. Зокрема, активно використовуються згорткові нейронні мережі (CNN). CNN продемонстрували високу ефективність у задачах розпізнавання образів та класифікації зображень, що робить їх ідеальними для аналізу зображень ФЕМСЕ. Наприклад, у статті [3] запропоновано модель YOLO-WAD на основі YOLOv10n для виявлення малих дефектів у ФЕМСЕ. Алгоритми, такі як YOLO, використовуються для автоматичного виявлення та локалізації дефектів на зображеннях з високою точністю та швидкістю. У роботі [4] представлено легку модель YOLOv8-FSD для виявлення дефектів на поверхні фотоелектричних елементів. Для моніторингу динаміки розвитку дефектів у часі застосовуються алгоритми відстеження об'єктів, такі як SORT та Deep SORT. Сучасні дослідження спрямовані на розробку комплексних кіберфізичних систем (КФС) для моніторингу стану ФЕМСЕ. КФС інтегрують різні методи діагностики, алгоритми обробки даних та засоби зв'язку для забезпечення всебічного та своєчасного виявлення дефектів. Окрім методів виявлення, значна увага приділяється вивченню причин виникнення та механізмів розвитку дефектів ФЕМСЕ. Це дозволяє розробляти стратегії запобігання деградації та підвищувати надійність ФЕМСЕ. У статті [5] представлено огляд причин та методів виявлення дефектів ФЕМСЕ. Розробка нових матеріалів та технологій виробництва ФЕМСЕ спрямована на підвищення їхньої стійкості до дефектів.

Останні дослідження у сфері дефектів ФЕМСЕ характеризуються розробкою та вдосконаленням методів діагностики, включаючи термографію [1, 2], активним застосуванням методів машинного навчання та штучного інтелекту для автоматизації процесів виявлення та класифікації дефектів [3, 4], розробкою комплексних КФС моніторингу для забезпечення всебічного аналізу стану ФЕМСЕ, поглибленим вивченням причин виникнення та механізмів розвитку дефектів [5], розробкою нових матеріалів та технологій виробництва для підвищення стійкості ФЕМСЕ до дефектів. Ці досягнення сприяють підвищенню надійності, продуктивності та економічної ефективності сонячних електростанцій, а також зменшенню експлуатаційних витрат.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є: дослідження КФС виявлення дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Візуальний моніторинг дефектів ФЕМСЕ може здійснюватися різними камерами спостереження в діапазонах видимого спектру з отриманням кольорової палітри RGB, мультиспектральними, гіперспектральними, тепловізійними, флуоресцентними камерами, а також лазерами. Оптичні сенсори камер класифікуються за типом виявлення в різних частинах електромагнітного спектру: RGB-сенсори (400-700 нм) видимого спектру, мультиспектральні сенсори (400-1000 нм) працюють у видимому і ближньому інфрачервоному спектрі. Теплові сенсори вимірюють інфрачервоне випромінювання (4000-15000 нм), що знайшло найбільшої популярності в моніторингу фотоелектричних модулів. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) надають достатню роздільну здатність для загального аналізу ФЕМСЕ, ручні сенсори – детальний огляд конкретних ФЕМСЕ. Однак оптичні сенсори створюють великий обсяг даних, які потребують ретельного аналізу за допомогою методів штучного інтелекту для точного моніторингу дефектів.

Однією з головних проблем при діагностиці сонячних панелей є складність виявлення пожежонебезпечних дефектів в залежності від природно-кліматичних умов. Рання діагностика та моніторинг стану фотоелектричних модулів є критично важливими для попередження пожеж на електростанціях. При цьому не менш важливим є також і зменшення продуктивності електростанцій. Рішення зазначеного проблемного аспекту моніторингу ФЕМСЕ може бути покладено в створенні кіберфізичної системи моніторингу ФЕМСЕ на базі БПЛА із забезпеченням автоматизованого виявлення дефектів. Ключові аспекти такого рішення включають аналіз, адаптацію обробки даних, мінімізацію участі персоналу обслуговування та застосування штучного інтелекту для підвищення точності, інтеграцію мультимодальних сенсорів та геоприв'язку для створення карт об'єктів з відповідними дефектами.

Можливості оптимізації збору даних за короткий час та з мінімальними витратами роблять системи дистанційного зондування перспективним інструментом для сонячної енергетики. Сучасний розвиток дистанційного зондування пов'язаний із досягненнями у робототехніці та сенсорних технологіях, особливо з появою БПЛА. БПЛА вертолітного типу популярні у сонячній енергетиці завдяки гнучкості, здатності зависати та літати на низьких висотах, що дозволяє виявляти ознаки дефектів ФЕМСЕ. Здебільшого у практиці моніторингу ФЕМСЕ застосовують квадрокоптери, гексакоптери. Гексакоптери здатні піднімати важкі камери, але мають високе енергоспоживання. Загалом перевагу в сторону квадрокоптерів віддають в залежності від площі, яку займає сонячна електростанція.

Корисне навантаження БПЛА, включаючи камери, відіграє ключову роль у виконанні завдань щодо виявлення дефектів сонячних панелей. БПЛА оснащуються різними типами камер залежно від завдання, але зазвичай RGB, тепловізійної камери. RGB камери є додатковими і в основному виявляють забруднення модулів. Тепловізійні камери, чутливі до інфрачервоного спектру, використовуються для моніторингу дефектів пов'язаних з внутрішніми пошкодженнями ФЕМСЕ. Тепловізійні дані можуть виявляти дефекти, які є критичними до виникнення пожежі, але при їх використанні необхідно враховувати фактори, такі як роздільну здатність, природно-кліматичні умови та висота польоту [6].

В контексті використання БПЛА для моніторингу ФЕМСЕ квадрокоптер DJI Matrice 300 RTK є перспективним зразком, що буде далі обґрунтовано. Він підтримує встановлення обчислювального модуля, такого як NVIDIA Xavier і відповідно програмного забезпечення нейронної мереж YOLO та має інтегровані тепловізійну і RGB камери, лазерний далекомір з можливістю керування кутом огляду, зокрема DJI Zenmuse H20T (RGB камера, тепловізор, лазерний далекомір). DJI Matrice 300 RTK забезпечує високоточне RTK позиціонування та стабільний політ за заданим маршрутом, що загалом дозволяє здійснювати виявлення дефектів ФЕМСЕ на борту БПЛА, а значимість дефектів і прийняття рішення щодо пожежної безпеки ФЕМСЕ здійснювати на наземній апаратурі обробки даних із застосуванням хмарного середовища. Ці підходи можуть бути корисними для розробки КФС моніторингу ФЕМСЕ на базі БПЛА, алгоритмів глибокого навчання. Для подальшого підвищення точності діагностики сонячних панелей доцільно інтегрувати дані камер спостереження з алгоритмами навчання, що базуються на комп'ютерному зорі.

Кіберфізичні системи (англ. Cyber-Physical System, CPS) – це складні, гетерогенні, розподілені системи в яких інтегруються інформаційні, обчислювальні та комунікаційні засоби з фізичними процесами для оперативної взаємодії (спостереження та вплив) з фізичним середовищем. КФС будуються на принципах мережевого, математичного моделювання, при цьому, концептуально механізм їхньої роботи є аналогічним мультиагентним системам, але з більшою мобільністю агентів та включенням у це середовище механізмів розподіленого паралельного обчислення [7].

Суть КФС полягає у тісній інтеграції фізичних компонентів, таких як сенсори, актуатори та об'єкти моніторингу, з їх кібернетичними представленнями у вигляді обчислювальних ресурсів, мереж передачі даних та інтелектуального програмного забезпечення. Такий симбіоз дозволяє здійснювати безперервний збір, обробку та аналіз даних у реальному часі, забезпечуючи глибоке розуміння стану інфраструктури та створюючи підґрунтя для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Одним з ключових елементів запропонованої концепції є застосування передових методів комп'ютерного зору, і зокрема, алгоритму Yolo (You Only Look Once). Ця технологія вирізняється високою швидкістю обробки зображень та здатністю до об'єктного детектування в реальному часі, що є критично

важливим для аналізу великих обсягів візуальних даних, які можуть надходити з різних джерел, включаючи безпілотні літальні апарати.

Застосування Yolo відкриває широкі перспективи для автоматизованого виявлення різноманітних дефектів, таких як тріщини, сколи та руйнування частини модуля. Однак, для отримання більш повної та об'єктивної картини стану, візуальні дані, отримані за допомогою Yolo, доцільно інтегрувати з інформацією, що надходить від інших типів сенсорів.

Безпілотні літальні апарати відіграють важливу роль у запропонованій концепції, виступаючи в якості мобільної платформи для збору даних. Оснащені камерами високої роздільної здатності та інтегрованими обчислювальними модулями для обробки даних Yolo в реальному часі, БПЛА можуть оперативно обстежувати ділянки ФЕМСЕ, включаючи важкодоступні райони.

Зібрані з різних джерел дані (візуальні, сенсорні, геопросторові) потребують інтелектуальної обробки та аналізу. Застосування методів машинного навчання, статистичного аналізу та геоінформаційних систем дозволить виявляти закономірності, прогнозувати стан та визначати пріоритетні дефекти, що потребують втручання. Результати аналізу можуть бути візуалізовані у зручному для користувача форматі, надаючи чітку картину стану ФЕМСЕ та обґрунтовані рекомендації щодо обслуговування та ремонту.

Основною метою формування запропонованої кіберфізичної системи є дослідження стану ФЕМСЕ та визначення потреб у її ремонті. Застосування Yolo в комплексі з датчиками та БПЛА дозволить отримувати детальну інформацію про наявні дефекти, їх динаміку розвитку та вплив на експлуатаційні характеристики.

Продовжуючи обговорення можливостей створення кіберфізичної системи (КФС) моніторингу фотоелектричних модулів сонячних електростанцій (ФЕМСЕ) на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), варто детальніше розглянути ключові компоненти та принципи її функціонування.

КФС включає декілька взаємопов'язаних рівнів. По-перше, це рівень збору даних, на якому основну роль відіграють БПЛА, що оснащені мультимодальними сенсорами (рис. 1). Це можуть бути RGB-камери для виявлення забруднень та видимих пошкоджень, тепловізійні камери для ідентифікації термічних аномалій, мульти- або гіперспектральні камери для аналізу стану матеріалів на молекулярному рівні, а також лазерні далекоміри для точного визначення відстаней та побудови 3D-моделей об'єктів. Інтеграція GPS/RTK приймачів забезпечує точну геоприв'язку отриманих даних.



Рис. 1. Безпілотний літальний апарат DJI Matrice 300 RTK з встановленим мультисенсорним підвісом DJI Zenmuse H20T (RGB камера, тепловізор, лазерний далекомір)

Для забезпечення оперативності, частина обробки даних може здійснюватися безпосередньо на борту БПЛА. Встановлення обчислювальних модулів, таких як NVIDIA Jetson або Xavier, дозволяє в реальному часі запускати алгоритми комп'ютерного зору, зокрема YOLO, для первинного аналізу зображень та виявлення потенційних дефектів. Це зменшує обсяг даних, що передаються на наземну станцію та прискорює процес прийняття рішень.

Зібрані та частково оброблені дані передаються на наземну станцію керування та обробки за допомогою бездротових каналів зв'язку. Вибір каналу залежить від відстані, необхідної пропускної здатності та вимог до надійності передачі. Можуть використовуватися радіоканали, стільникові мережі або супутниковий зв'язок.

На наземній станції здійснюється більш глибокий аналіз отриманих даних із застосуванням потужних обчислювальних ресурсів та алгоритмів штучного інтелекту, що включає: застосування більш складних моделей глибокого навчання для точнішої ідентифікації різних типів дефектів (тріщини, гарячі точки, delamination тощо) на основі мультисенсорних даних, інтеграцію даних про місцезнаходження дефектів для створення геоінформаційних систем (ГІС), що відображають просторовий розподіл проблемних ділянок на сонячній електростанції. Це дозволяє візуалізувати стан ФЕМСЕ на карті, відстежувати динаміку розвитку дефектів та планувати ремонтні роботи.

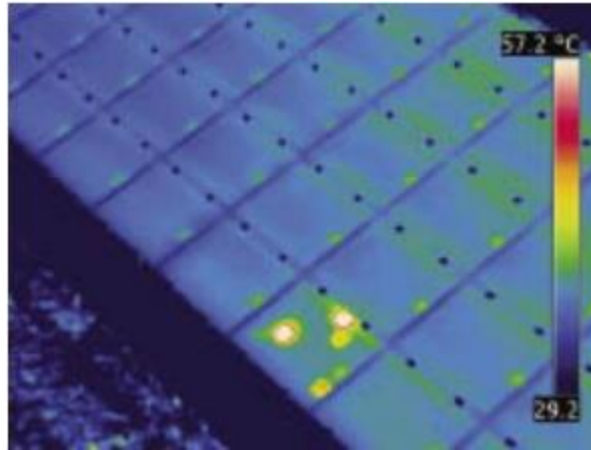


Рис. 2. Приклад теплової карти сонячної електростанції, отриманої за допомогою БПЛА з тепловізійною камерою, з виділеними "гарячими точками", що вказують на потенційні дефекти

Використання методів машинного навчання для прогнозування подальшого розвитку виявлених дефектів та визначення залишкового терміну служби окремих модулів або ділянок електростанції дозволяє переходити від реактивного до проактивного обслуговування, знижуючи ризик виникнення аварійних ситуацій та оптимізуючи витрати на ремонт.

В свою чергу, створення зручних для користувача звітів та інтерактивних візуалізацій, що відображають поточний стан ФЕМСЕ, виявлені дефекти, їхню критичність та рекомендації щодо подальших дій. На основі результатів аналізу даних приймаються рішення щодо необхідності проведення технічного обслуговування або ремонтних робіт. Інформація про виявлені дефекти та їхню пріоритетність може бути інтегрована з системами управління активами підприємства для планування та контролю виконання робіт.

Перевагами запропонованої КФС є: підвищення точності та швидкості діагностики, раннє виявлення пожежонебезпечних дефектів, зниження експлуатаційних витрат, підвищення ефективності роботи сонячної електростанції, оптимізація збору даних, зменшення людського фактору.

Незважаючи на значний потенціал, впровадження КФС моніторингу ФЕМСЕ на базі БПЛА має й певні ризики, а саме: обробка великих обсягів даних, інтеграція різних сенсорних даних, вартість впровадження та експлуатації, необхідність дотримання правил польотів та отримання відповідних дозволів.

Проте, подальший розвиток технологій сенсорів, робототехніки та штучного інтелекту відкриває широкі перспективи для вдосконалення КФС моніторингу ФЕМСЕ на базі БПЛА. Очікується поява більш компактних, енергоефективних та інтелектуальних БПЛА, а також розробка нових, більш точних та швидких алгоритмів обробки та аналізу даних. Інтеграція КФС з хмарними платформами та технологіями Інтернету речей (IoT) дозволить створити масштабовані та гнучкі рішення для моніторингу сонячних електростанцій будь-якого розміру. Метод функціонування КФС моніторингу дефектів ФЕМСЕ подано на рис. 3.

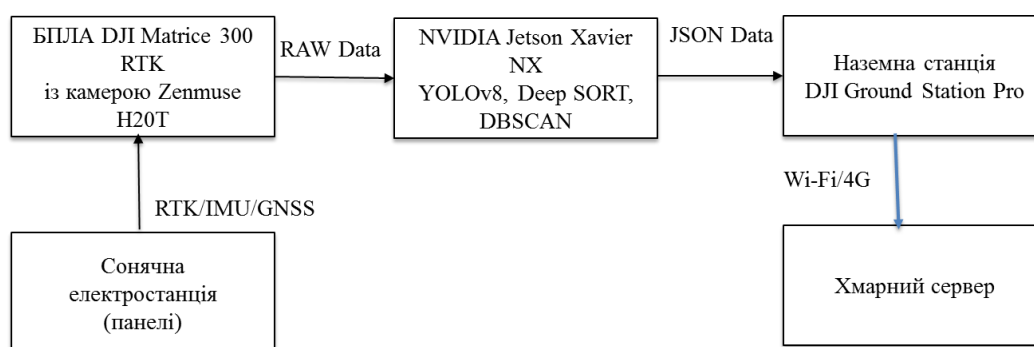


Рис. 3.1 Метод функціонування кіберфізичної системи моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячної електростанції

Опис структурних елементів і їх функціонал:

БПЛА DJI Matrice 300 RTK як носій камери Zenmuse H20T, має відеокамеру RGB, тепловізійну камеру, лазерний далекомір, геолокацію GNSS RTK. Ці засоби реалізують функцію зйомки панелей і передачу зображень (RAW Data), точне позиціонування (RTK/IMU/GNSS).

NVIDIA Jetson Xavier NX як бортовий комп'ютер з вбудованими алгоритмами нейронної мережі YOLOv8, що реалізує функцію виявлення дефектів (JSON Data), Deep SORT алгоритм реалізує функцію відстеження дефектів, DBSCAN реалізує функцію кластеризації дефектів, обробку даних у реальному часі.

Наземна станція DJI Ground Station Pro, реалізує функцію візуалізації результатів, керування польотом.

Хмарний сервер забезпечує зберігання даних (KML/JSON), аналіз трендів.

Реалізація моделі функціонування КФС моніторингу дефектів ФЕМСЕ дозволить автоматизувати від виявлення до кластеризації дефектів без участі оператора, поєднання YOLOv8, Deep SORT і DBSCAN знизить помилки детектування дефектів панелей на 15–20%. Також, обробка на борту (Jetson) зменшує обсяг переданих даних, прискорює процес обробки.

Метод функціонування кіберфізичної системи моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячної електростанції відрізняється комплексуванням моделі, функції, алгоритмів обробки зображень згортковою нейронною мережею.

Створення та впровадження кіберфізичної системи моніторингу ФЕМСЕ на базі БПЛА є перспективним напрямком розвитку в галузі сонячної енергетики. Інтеграція передових сенсорних технологій, робототехніки та штучного інтелекту дозволить значно підвищити ефективність діагностики та моніторингу стану сонячних електростанцій, забезпечуючи їхню безпечну та безперебійну роботу. Подальші дослідження та розробки в цій області сприятимуть оптимізації процесів експлуатації та зниженню вартості виробництва сонячної електроенергії.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Концепція формування кіберфізичної системи моніторингу стану ФЕМСЕ є перспективним напрямком, що поєднує передові досягнення в галузі сенсорних технологій, комп'ютерного зору та інтелектуального аналізу даних. Застосування технології Yolo в комплексі з датчиками, акселерометрами та БПЛА відкриває нові можливості для оперативного, точного та всебічного дослідження стану сонячних електростанцій. Подальші дослідження та розробки в цій галузі сприятимуть реалізації обробки інформації з датчиків на борту БПЛА та інших електронно-обчислювальних носіях інформації, для прикладу – мобільні термінали.

Література

1. Analysis and characterization of PV module defects by thermographic inspection - Redalyc URL: <https://www.redalyc.org/journal/430/43062836009/html/>
2. Defect analysis and performance evaluation of photovoltaic modules using quantitative electroluminescence imaging | Clean Energy | Oxford Academic URL: <https://academic.oup.com/ce/article/9/2/177/7945349>
3. YOLO-WAD for Small-Defect Detection Boost in Photovoltaic Modules - MDPI URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/6/1755>
4. Research on Defect Detection in Lightweight Photovoltaic Cells Using YOLOv8-FSD - MDPI URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/3/843>
5. A Review of Photovoltaic Module Failure and Degradation Mechanisms: Causes and Detection Techniques - MDPI URL: <https://www.mdpi.com/2673-9941/4/1/3>
6. Mahlein A.-K., Kuska M. T., Behmann J., et al. Hyperspectral and Thermal Imaging of Plant Diseases in Horticulture. Sensors. 2018. Vol. 18, No. 9. P. 2936. DOI: 10.3390/s18092936
7. Lee E.A. Cyber Physical Systems: Design Challenges. 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC) : 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing. Orlando, FL, USA : IEEE, 2008. Cyber Physical Systems. C. 363–369. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4519604/>. (дата звернення : 31.10.2024). [in English]

References

1. Analysis and characterization of PV module defects by thermographic inspection - Redalyc URL: <https://www.redalyc.org/journal/430/43062836009/html/>
2. Defect analysis and performance evaluation of photovoltaic modules using quantitative electroluminescence imaging | Clean Energy | Oxford Academic URL: <https://academic.oup.com/ce/article/9/2/177/7945349>
3. YOLO-WAD for Small-Defect Detection Boost in Photovoltaic Modules - MDPI URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/6/1755>
4. Research on Defect Detection in Lightweight Photovoltaic Cells Using YOLOv8-FSD - MDPI URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/3/843>
5. A Review of Photovoltaic Module Failure and Degradation Mechanisms: Causes and Detection Techniques - MDPI URL: <https://www.mdpi.com/2673-9941/4/1/3>
6. Mahlein A.-K., Kuska M. T., Behmann J., et al. Hyperspectral and Thermal Imaging of Plant Diseases in Horticulture. Sensors. 2018. Vol. 18, No. 9. P. 2936. DOI: 10.3390/s18092936
7. Lee E.A. Cyber Physical Systems: Design Challenges. 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC) : 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing. Orlando, FL, USA : IEEE, 2008. Cyber Physical Systems. C. 363–369. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4519604/>. (дата звернення : 31.10.2024).