

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-45>
УДК 621.311.243; 621.3.049.771

ЛИСИЙ Андрій

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0009-0001-0065-9740>
e-mail: Andrii.lysyi@gmail.com

КІРЕТОВ Віталій

Національної академії Державної прикордонної служби України
<https://orcid.org/0009-0008-7253-2037>
e-mail: VitaliiKiretov@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОГРАФІЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

У запропонованій статті розглядається використання термографії як високоефективного методу для виявлення несправностей сонячних панелей, що водночас слугує фундаментальною основою моніторингу та діагностики у галузі сонячної енергетики. Локальні дефекти, такі як перегрів, тріщини у фотоелементах та порушення електричних з'єднань, суттєво знижують ефективність роботи панелей, спричиняючи втрати енергії. Термографія дає змогу оперативно та з високою точністю виявляти ці проблеми за рахунок інфрачервоної візуалізації, що відкриває інноваційні можливості для підвищення продуктивності систем. У роботі детально аналізуються різні підходи до впровадження термографічних методів, зокрема застосування ручних тепловізорів, безпілотних літальних апаратів із тепловізійними камерами та стаціонарних моніторингових систем. Особливу увагу приділяється інтеграції термографії із сучасними алгоритмами штучного інтелекту, що сприяє автоматизованому аналізу теплових зображень, прогнозуванню потенційних несправностей та мінімізації людського фактора. Результати проведеного дослідження демонструють, що термографія може розглядатися не лише як засіб діагностики, а й як перспективний інструмент управління технічним станом панелей. Основними перевагами є оперативність, висока точність, можливість масштабування та інтеграції з іншими сучасними технологіями, такими як «розумний будинок», «інтернет речей». Водночас, зазначено, що висока вартість обладнання та залежність від погодних умов є ключовими викликами для впровадження технології.

Одержані висновки підтверджують доцільність застосування термографії для забезпечення надійної експлуатації сонячних електростанцій і зменшення їхнього екологічного впливу. Подальший розвиток технологій, зокрема штучного інтелекту та безпілотних літальних апаратів, сприятиме вдосконаленню методів моніторингу та підвищенню ефективності відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: термографія, сонячні панелі, дефекти, інфрачервона візуалізація, штучний інтелект.

LYSYI Andriy

Khmelnitskyi National University

KIRETOV Vitalii

National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine

RESEARCH ON THE TECHNOLOGY OF USING THERMOGRAPHY FOR DETECTING MALFUNCTIONS IN SOLAR PANELS

In the proposed article, the use of thermography is examined as a highly effective method for detecting solar panel malfunctions, while also serving as a fundamental basis for monitoring and diagnostics in the field of solar energy. Local defects, such as overheating, cracks in photovoltaic cells, and disruptions of electrical connections, significantly reduce panel efficiency, causing energy losses. Thermography enables the swift and highly accurate identification of these issues by means of infrared visualization, thereby opening up innovative possibilities for enhancing overall system performance. The study provides a detailed analysis of various approaches to implementing thermographic methods, including the use of handheld thermal imagers, unmanned aerial vehicles equipped with thermal imaging cameras, and stationary monitoring systems. Special attention is devoted to integrating thermography with contemporary artificial intelligence algorithms, which facilitates the automated analysis of thermal images, the prediction of potential malfunctions, and the minimization of human error. The results of the research demonstrate that thermography may be regarded not only as a diagnostic tool but also as a promising instrument for managing the technical condition of panels. Its main advantages include rapid deployment, high accuracy, scalability, and integration with other modern technologies such as the "smart home" and the "Internet of Things." At the same time, it is noted that high equipment costs and dependence on weather conditions remain key challenges for implementing this technology. The conclusions reached confirm the advisability of employing thermography to ensure the reliable operation of solar power plants and to reduce their environmental impact. Further technological progress, in particular with respect to artificial intelligence and unmanned aerial platforms, will support improvements in monitoring methods and boost the efficiency of renewable energy sources.

Keywords: thermography, solar panels, defects, infrared visualization, artificial intelligence.

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

Сонячна енергетика сьогодні відіграє визначальну роль серед пріоритетних напрямів глобального енергетичного переходу, орієнтованого на масштабне впровадження відновлюваних джерел енергії. Її розвиток сприяє суттєвому зменшенню залежності країн, що не мають власних запасів викопних

вуглеводнів, від імпорту енергоресурсів. З урахуванням зростання світового попиту на екологічно чисту енергію та необхідності скорочення викидів парникових газів, сонячні панелі стали одним із найперспективніших джерел енергії, а також невід'ємною складовою національної енергетичної безпеки.

У даному дослідженні розглядається залежність ефективності функціонування сонячних панелей від їх технічного стану. Відомо, що різноманітні зовнішні та внутрішні фактори, такі як механічні пошкодження, накопичення забруднень, коливання температурного режиму, а також природне старіння фотоелементів, можуть значно знижувати продуктивність сонячних систем. Серед найпоширеніших проблем, що впливають на зниження ефективності панелей, виділяються локальні зони перегріву, мікротріщини у фотоелементах і дефекти монтажу. Згідно з оцінками, ці дефекти здатні призводити до втрат енергії у межах 10–30 % від номінальної продуктивності.

Враховуючи ці виклики, термографія постає як один із найефективніших діагностичних методів, оскільки інфрачервона візуалізація надає змогу вчасно виявляти аномалії, пов'язані з порушеннями температурного режиму на поверхні сонячних панелей. Використання тепловізійного обладнання дозволяє спеціалістам ідентифікувати локальні пошкодження, порушення ізоляції та інші дефекти, що суттєво знижують енергоефективність системи, забезпечуючи таким чином можливість своєчасного усунення виявлених недоліків та підвищення загальної продуктивності.

Окрім того, швидкий розвиток методів машинного навчання та штучного інтелекту створює підґрунтя для прогнозування потенційних несправностей шляхом комплексного аналізу температурних змін. Зокрема, інтеграція термографічних систем із програмними модулями штучного інтелекту дозволяє автоматизувати обробку та класифікацію теплових зображень, підвищуючи точність прогнозів і скорочуючи втрати часу.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Мета статті — провести ґрунтовний аналіз сучасних досліджень, присвячених технологічному використанню термографії для виявлення несправностей сонячних панелей. Для досягнення поставленої мети необхідно розглянути основні принципи функціонування термографії, методи виявлення дефектів, характерні типи несправностей, які можна виявити за допомогою цієї технології, ключові переваги та потенційні виклики, що супроводжують її впровадження, а також перспективи подальшого розвитку.

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА СТРАТЕГІЙ

Термографія вважається одним із найперспективніших методів контролю стану сонячних панелей, оскільки базується на фіксації інфрачервоної випромінювальної здатності, завдяки чому визначаються аномальні зони, що можуть вказувати на дефекти. Ця технологія знайшла широке застосування у сфері сонячної енергетики завдяки своїй здатності швидко та точно виявляти несправності, які впливають на продуктивність сонячних панелей.

На сьогодні у наукових дослідженнях недостатньо висвітлено можливості застосування штучного інтелекту та безпілотних літальних апаратів для онлайн автоматизованого аналізу термограм сонячних панелей і виявлення несправностей. У дослідженні [1] представлено інноваційні методології, спрямовані на підвищення точності та швидкості виявлення аномалій у тепловізійних зображеннях. Можливості перевірки в режимі реального часу, інтегровані в систему на базі безпілотних літальних апаратів, забезпечують миттєвий зворотний зв'язок з обслуговуючим персоналом, що значно полегшує оперативне прийняття рішень. Завдяки застосуванню цього підходу операції з обслуговування сонячних панелей оптимізуються, що призводить до підвищення як загальної ефективності, так і рентабельності.

Термографія працює на основі реєстрації інфрачервоного випромінювання, яке випромінюють усі об'єкти з температурою вище абсолютного нуля. Основний принцип полягає в тому, що інфрачервоні камери перетворюють теплове випромінювання на зображення, яке дозволяє візуалізувати ділянки з аномальними температурними характеристиками. Наприклад, у сонячних панелях гарячі ділянки можуть свідчити про проблеми, такі як механічні пошкодження або дефекти електричних з'єднань.

У термографії сонячних панелей застосовують ручні тепловізори, які забезпечують локальний моніторинг стану панелей. Вони підходять для невеликих сонячних установок і забезпечують високу деталізацію зображень. Серед основних переваг їх використання можна виділити простоту застосування та доступність. Використання 3D-зображень у моніторингу сонячних панелей, представлене у роботі [2], забезпечує високоточне виявлення аномалій панелей, що значно підвищує ефективність обслуговування.

Безпілотні літальні апарати із вбудованими тепловізійними камерами дозволяють обстежувати великі площі за короткий час. Вони ідеально підходять для великих сонячних електростанцій, де ручний моніторинг є надзвичайно трудомістким, а також для обстеження панелей, встановлених на дахах будівель [3].

Стационарні тепловізійні системи використовуються для постійного моніторингу великих сонячних станцій. Такі системи інтегруються із системою «розумний будинок» і забезпечують безперервний збір даних у реальному часі. Водночас, вони є найдорожчими і найскладнішими у впровадженні.

Важливим аспектом термографічного обстеження є можливість виявлення мікротріщин у кремнієвих пластинах, які не завжди помітні візуально, проте істотно позначаються на розподілі тепла та загальній ефективності панелі [4].

Сонячні панелі можуть перегріватися через недостатнє охолодження або несправність системи вентиляції. Термографія допомагає виявити ці проблеми, надаючи теплові карти, які показують детальний розподіл температури по всій панелі. Система активного охолодження фотоелектричних панелей забезпечує ефективне управління теплом, що сприяє підвищенню енергоефективності. У [5] узагальнено основні переваги та недоліки різних методів охолодження для оптимального дизайну моделей та вибору матеріалів.

Інтеграція термографії з алгоритмами штучного інтелекту дозволяє автоматизувати процес аналізу теплових зображень. Наприклад, нейронні мережі можуть класифікувати типи дефектів, такі як гарячі ділянки чи пошкодження ізоляції, з точністю понад 95%. Це значно підвищує швидкість і точність діагностики, мінімізуючи ризик помилок, спричинених людським фактором.

Порівняно з іншими методами діагностики, такими як візуальний огляд або ультразвуковий аналіз, термографія має низку переваг:

- дозволяє обстежити велику кількість панелей за короткий час;
- забезпечує високу роздільну здатність зображень, дозволяє точно локалізувати дефекти;
- не потребує фізичного контакту з панелями, що особливо важливо для великих сонячних електростанцій.

Принципи роботи термографії базуються на використанні інфрачервоної візуалізації для аналізу температурних аномалій. Завдяки різноманіттю тепловізійних камер, включаючи ручні пристрої, безпілотних літальних апаратів та стаціонарні системи, термографія забезпечує швидке і точне виявлення дефектів у сонячних панелях різноманітних типів сонячних електростанцій. Інтеграція цієї технології з «розумним будинком» та алгоритмами штучного інтелекту відкриває нові перспективи автоматизації та підвищення ефективності моніторингу.

Подальший розвиток технологій термографії охоплює використання різноманітних методів, які дають змогу комплексно досліджувати технічний стан сонячних систем. Зокрема, дедалі більшого поширення набуває застосування безпілотних літальних апаратів, автоматизованих систем аналізу та інтеграція цих рішень із принципами «розумного будинку».

Безпілотні літальні апарати з тепловізійними камерами стають дедалі популярнішими завдяки своїй здатності швидко та ефективно обстежувати значні площі сонячних електростанцій. Цей метод обстеження сонячних панелей має кілька ключових переваг. Дрони здатні обстежувати великі сонячні електростанції, які налічують тисячі панелей, за короткий час, що значно скорочує тривалість перевірки. Доступ до важкодоступних місць дозволяє перевіряти панелі, встановлені у віддалених або складних для доступу місцевостях. Також, сучасні тепловізійні камери, інтегровані у безпілотні літальні апарати, забезпечують високу роздільну здатність зображень, що дозволяє ідентифікувати навіть незначні температурні аномалії [4, 6].

Однак використання безпілотних літальних апаратів має і свої обмеження. Зокрема, погодні умови можуть впливати на точність вимірювань і працездатність безпілотних літальних апаратів. У роботі [7] запропоновано метод інтеграції тепловізійних зображень із метеорологічними даними, що дозволяє точно оцінювати стан панелей та передбачати їхній знос при меншій залежності від погодних умов. Крім того, висока вартість обладнання може бути перешкодою для малих підприємств.

Автоматизовані системи моніторингу дозволяють забезпечити безперервний контроль стану сонячних панелей. Такі системи інтегруються з термографічними камерами та аналізують зображення у реальному часі. Основні компоненти автоматизованих систем включають сенсори «розумного будинку», які збирають дані про температуру та інші параметри панелей і передають їх до централізованої системи управління. Зібрані дані зберігаються у хмарі, що забезпечує дистанційний доступ до них із будь-якого пристрою та дозволяє швидко аналізувати поточні зміни технічного стану панелей.

Загалом об'єктами термографії панелей сонячних електростанцій є ділянки фотоелементів сонячних панелей з різкою відмінністю температури, носії тепловізійних камер, засоби передачі і обробки даних (рис. 1).

Важливою перевагою є інтеграція штучного інтелекту у процес обробки даних, що дозволяє автоматизувати аналіз теплових зображень і виявляти дефекти з високою точністю. Автоматизовані системи значно знижують витрати на обслуговування та мінімізують ризик людської помилки. Водночас їх впровадження потребує значних початкових інвестицій.

Обробка теплових зображень є ключовим етапом у процесі виявлення несправностей. Сучасні підходи включають класифікацію типів дефектів за допомогою алгоритмів машинного навчання, що забезпечує ідентифікацію гарячих ділянок панелей, механічних пошкоджень та інших дефектів на основі температурних аномалій. Також використання нейронних мереж забезпечує високу точність локалізації пошкоджень і прогнозування несправностей. Аналіз статистичних даних дозволяє передбачати можливі дефекти та запобігати їх виникненню. Загалом автоматизація аналізу теплових зображень значно підвищує

ефективність діагностики, однак для її впровадження потрібні потужні обчислювальні ресурси та спеціалізоване програмне забезпечення.

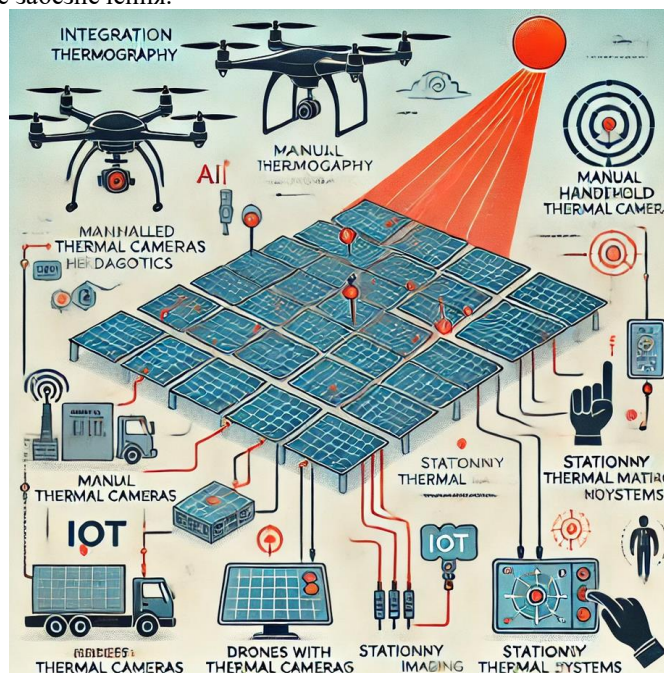


Рис. 1. Об'єкти термографії панелей сонячних електростанцій

Станіонарні тепловізори використовуються для безперервного моніторингу стану сонячних панелей на великих сонячних електростанціях. Вони інтегруються з автоматизованими системами управління та забезпечують швидке виявлення дефектів у реальному часі. Основні переваги цього методу включають безперервний моніторинг, що дозволяє швидко реагувати на несправності, а також інтеграцію з іншими системами. Наприклад, підключення до платформ «розумного будинку» дозволяє не тільки аналізувати дані, а й автономно управляти роботою сонячної електростанції. Проте висока вартість стаціонарних систем може бути перешкодою для їх широкого впровадження.

Інтеграція термографії з «інтернетом речей» (IoT) відкриває нові можливості для масштабування систем моніторингу. Розумні сенсори та хмарні платформи дозволяють:

- оптимізувати витрати, зменшити необхідність у планових періодичних технічних обслуговуваннях;
- забезпечити прогнозування несправностей і планування ремонтів;
- покращити управління енергоспоживанням.

Методи виявлення несправностей за допомогою термографії постійно вдосконалюються завдяки інтеграції з сучасними технологіями, такими як «розумний будинок», IoT та автоматизовані системи моніторингу. Використання безпілотних літальних апаратів, стаціонарних тепловізорів та алгоритмів обробки зображень дозволяє підвищити ефективність діагностики та мінімізувати втрати енергії [8].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Термографія є ключовим інструментом для виявлення різних типів дефектів, які можуть впливати на ефективність роботи сонячних панелей. Ця технологія дозволяє ідентифікувати проблеми без будь якого втручання в електричні ланцюги сонячних електростанцій та своєчасно усунути їх.

Гарячі ділянки сонячних панелей є одним із найпоширеніших дефектів, які виявляються за допомогою термографії. Вони виникають через локальні температурні аномалії, що можуть бути спричинені механічними пошкодженнями, такими як тріщини у фотоелементах, або забрудненням поверхні здебільшого пилом, листям або пташиним послідом. Також характерним є дефектами з'єднань, зокрема слабкими контактами чи зношеними кабелями [9, 10].

Механічні пошкодження панелей можуть виникати через ударні навантаження, наприклад, град або падіння важких предметів, неправильний монтаж панелей та елементів з'єднання, тривалий вплив несприятливих погодних умов [11].

Пошкоджені ділянки панелей спричиняють локальний перегрів панелі, що може призвести до її деградації, втрати енергоефективності та навіть до займання. Термографія дозволяє виявити ці пошкодження, зокрема тріщини в кремнієвих пластинах, які можуть викликати нерівномірний розподіл тепла і знижувати продуктивність панелі.

Дефекти електричних з'єднань є наслідком погано закріплених роз'ємів, пошкодження ізоляції кабелів, окислення металевих частин. Ці дефекти зазвичай проявляються у вигляді локальних гарячих ділянок. Термографічне обстеження допомагає виявити такі проблеми ще до того, як вони призведуть до серйозних наслідків, таких як коротке замикання чи займання [12]. При цьому важливим є розробка і застосування методів прогнозування появи критичних ситуацій, розпізнавання дефектів.

Розриви в елементах схеми сонячних панелей виникають через різкі зміни температури або нерівномірне нагрівання панелі. Вони можуть бути спричинені несправністю охолоджувальної системи, неправильним монтажем панелей, використанням низькоякісних матеріалів як самих панелей, так і монтажних елементів [13, 14]. Розриви знижують здатність панелей ефективно перетворювати сонячне світло на електроенергію і часто призводять до необхідності заміни панелі.

Забруднення поверхні, хоча і не є прямим дефектом, значно знижує ефективність панелі. Такі пошкодження характерні для сонячних електростанцій, що збудовані поруч інфраструктури. Основними забрудненнями є пил і пісок, які накопичуються на поверхні, листя і пташиний послід, лід і сніг у зимовий період.

Термографія дозволяє визначити ділянки, які зазнали найбільшого впливу забруднень, та спланувати вчасне очищення, щоб відновити продуктивність панелі.

Виробничі дефекти або зношення матеріалів можуть спричинити нерівномірний розподіл нагріву кремнієвих пластин, пошкодження захисного скла і руйнування ізоляції. Ці дефекти зазвичай виявляються як аномалії на термографічних зображеннях і можуть бути виправлені або шляхом ремонту, або шляхом заміни панелі.

Кожен із зазначених дефектів має унікальний вплив на продуктивність системи. Наприклад, гарячі ділянки можуть призводити до локального перегріву і деградації панелі. Механічні пошкодження викликають нерівномірний розподіл нагріву панелей. Дефекти електричних з'єднань збільшують опір, що знижує загальну продуктивність. Виявлення та усунення цих проблем на ранніх етапах дозволяє мінімізувати втрати енергії та забезпечити довговічність сонячних панелей і елементів електростанції в цілому.

Термографія є однією з найефективніших технологій для виявлення дефектів у сонячних панелях. Однією з ключових переваг термографії є її здатність оперативно ідентифікувати дефекти сонячних панелей. Використання інфрачервоних камер дозволяє виявляти такі проблеми, як гарячі ділянки, механічні пошкодження, дефекти електричних з'єднань та інші температурні аномалії. Це дає змогу запобігти подальшому пошкодженню системи та мінімізувати втрати енергії.

Використання термографії дозволяє значно скоротити витрати на технічне обслуговування сонячних панелей. Наприклад, завдяки автоматизованим системам моніторингу термографія знижує необхідність у ручних перевірках панелей [4]. Термографія дозволяє швидко ідентифікувати дефекти, що сприяє зниженню витрат на ремонт. А інтеграція з алгоритмами штучного інтелекту допомагає передбачати можливі дефекти, що дозволяє уникнути дорогих аварійних ремонтів.

Раннє виявлення дефектів за допомогою термографії сприяє збереженню високої продуктивності сонячних панелей. Завдяки своєчасному усуненню несправностей система працює з максимальною ефективністю, забезпечуючи стабільне енергопостачання.

Термографія є універсальним методом, який може застосовуватися для моніторингу великих сонячних електростанцій. При цьому використання безпілотних літальних апаратів із тепловізорами дозволяє обстежувати великі площі за короткий час. Також, за допомогою переносних тепловізорів можна здійснити детальний аналіз окремих панелей, що особливо корисно для домашніх сонячних систем.

Однією з головних переваг термографії є швидкість її застосування. Інфрачервоні камери дозволяють отримати теплові зображення у реальному часі, що значно скорочує час діагностики. Наприклад, обстеження великої сонячної електростанції, яке раніше займало кілька днів, за допомогою безпілотних літальних апаратів можна виконати за кілька годин. Проте, слід враховувати погодні умови для реалізації обстеження.

Використання термографії сприяє зменшенню екологічного впливу сонячної енергетики, завдяки своєчасному виявленню дефектів можна уникнути необхідності повної заміни панелей. Також раннє усунення несправностей дозволяє зберегти матеріали та енергію, витрачені на виробництво панелей.

Термографія інтегрується з іншими сучасними технологіями, такими як «Інтернет речей» (IoT) та штучний інтелект. Це дозволяє створювати автоматизовані системи моніторингу, які забезпечують неперервний збір даних сенсорами IoT і передають інформацію про стан панелей у реальному часі [13]. Алгоритми штучного інтелекту аналізують зібрані дані та ідентифікують потенційні несправності ще до їх виникнення, що дозволяє прогнозувати ефективність роботи сонячних електростанцій.

Таким чином, перевагами застосування термографії для моніторингу сонячних панелей є економічна ефективність та зменшення витрат до підвищення продуктивності системи та сприяння сталому розвитку сонячної енергетики. Термографія є незамінним інструментом, який допомагає забезпечити довговічність сонячних панелей та підвищити ефективність використання відновлюваних джерел енергії.

Попри численні переваги, термографія має певні обмеження та проблеми, які впливають на її ефективність і широту застосування. Одним із головних обмежень термографії сонячних панелей є її залежність від погодних умов. Наприклад, сильний вітер, дощ чи сніг можуть знижувати точність вимірювань, ускладнюючи отримання коректних теплових зображень, застосування безпілотних літальних апаратів. Також низькі температури можуть впливати на працездатність тепловізорів і спричинити викривлення даних.

Сучасні інфрачервоні камери та безпілотні літальні апарати з тепловізорами є відносно дорогими. Для багатьох компаній, особливо малих і середніх підприємств, початкові інвестиції в обладнання можуть бути значним бар'єром. Висока вартість також стосується якісного програмного забезпечення для аналізу теплових зображень [11].

Ефективне використання термографії потребує висококваліфікованих фахівців, які володіють навичками роботи з тепловізорами, безпілотними літальними апаратами та програмним забезпеченням. Брак таких спеціалістів може обмежувати впровадження цієї технології, особливо у віддалених регіонах або суттєво збільшує вартість контролю [12].

Важливими факторами, що впливають на результати термографічного обстеження, є щільність установок панелей. Близько розташовані панелі можуть створювати перехресне теплове випромінювання, яке ускладнює аналіз. Надмірна яскравість сонячного світла може викликати засвітку тепловізійних зображень, що впливає на точність діагностики.

Для великих сонячних електростанцій проблемним є обробка величезної кількості теплових зображень. Це вимагає потужного обладнання для аналізу даних, що може бути фінансово затратним. Крім того, у деяких випадках точність виявлення дефектів може бути знижена через великий обсяг даних.

Термографічне обладнання потребує регулярного обслуговування. Це включає калібрування камер, оновлення програмного забезпечення та технічну підтримку безпілотних літальних апаратів, що створює додаткові витрати [12].

Використання безпілотних літальних апаратів у термографії може супроводжуватися ризиками для безпеки, особливо в густонаселених районах або поблизу важливих об'єктів. Такі фактори, як погода чи технічні збої, можуть спричинити аварії під час польотів безпілотних літальних апаратів.

Хоча інтеграція термографії з IoT та «інтернетом речей» відкриває нові можливості, це також створює певні проблеми. Наприклад, необхідність у сумісності між різними платформами та системами може ускладнювати процес впровадження, а також вимагати значних технічних ресурсів [9].

Діяльність з експлуатації та технічного обслуговування фотоелектричних систем є аспектами, якими не можна нехтувати для отримання рентабельності інвестицій і забезпечення їх життєздатності та надійності. В даний час процедури, що застосовуються, в основному стосуються простих методів, таких як візуальний огляд і стратегії планового технічного обслуговування. В [15] пропонується використовувати програмне забезпечення для обробки теплових зображень на основі технології штучного інтелекту для профілактичного обслуговування, щоб виявити фотоелектричні панелі з несправностями, які необхідно відремонтувати або замінити, щоб збільшити ефективність системи.

Важливим організаційним аспектом застосування термографії з безпілотними апаратами є дотримання чинного правового регулювання польотів, що враховує національні вимоги, а також галузеві норми та стандарти [16].

Розвиток термографії у сонячній енергетиці передбачає розширення функціональних можливостей і впровадження інноваційних підходів, у тому числі завдяки удосконаленню тепловізійного обладнання та алгоритмів штучного інтелекту. Інтеграція термографії з IoT відкриває нові можливості для створення "розумних" систем моніторингу. Завдяки IoT можна забезпечити:

неперервний моніторинг стану сонячних панелей шляхом функціонування сенсорів та термографічних камер, що передають дані про стан панелей у реальному часі до хмарних платформ;
прогнозування несправностей, можливих дефектів на ранніх етапах шляхом аналізу даних сенсорів;
оптимізацію обслуговування завдяки постійному моніторингу, що зменшить витрати на технічні перевірки та ремонти.

Штучний інтелект має величезний потенціал для вдосконалення термографії. Основні напрямки використання є:

1. Алгоритми машинного навчання здатні ідентифікувати гарячі ділянки, тріщини та інші дефекти з точністю понад 95% [13].
2. Аналіз великих обсягів даних дозволяє швидко обробляти теплові зображення, навіть у випадках, коли йдеться про великі сонячні електростанції.
3. Оптимізація роботи системи на основі отриманих даних є ефективним рішенням для підвищення продуктивності панелей.

З розвитком технологій очікується, що вартість термографічного обладнання поступово знижуватиметься. Це стосується як інфрачервоних камер, так і безпілотних літальних апаратів із

тепловізорами. Доступніші пристрої дозволять впроваджувати термографію навіть на невеликих сонячних установках.

Нові матеріали для виготовлення тепловізійних камер забезпечать більш точне виявлення теплових аномалій. Зменшення ваги обладнання дозволить створювати мобільніші та зручніші пристрої. Камери, виготовлені з інноваційних матеріалів, будуть стійкішими до екстремальних погодних умов.

Хмарні платформи дозволяють зберігати великі обсяги даних і забезпечувати доступ до них з будь-якої ділянки світу. Основні переваги інтеграції термографії з хмарними платформами:

- централізоване управління даними (усі теплові зображення зберігаються в одному місці, що спрощує аналіз);
- можливість одночасного доступу до даних для кількох користувачів;
- інтеграція з штучним інтелектом (алгоритми штучного інтелекту можуть функціонувати безпосередньо у хмарі, що підвищує ефективність аналізу).

У роботі [17] розглянуто метод композиції мультиспектрального зображення лопатей вітряків. Метод поєднує теплові та RGB-зображення за допомогою просторової трансформації координат, виявлення ключових точок, а також створення бінарного дескриптора та зваженого накладання зображення. При цьому використовувався сталонний набір даних зображень з анотаціями щодо дефектів для оцінки моделей виявлення об'єктів. Даний підхід може бути трансформований і для аналізу несправностей сонячних панелей методом термографії.

Як перспективу можна розглядати поєднання наземного спостереження та спостереження на основі теплового інфрачервоного зображення шляхом одночасного використання RGB-камери та тепловізора, встановлених на дроні [18, 19]. Відзначимо, що теплові інфрачервоні камери є надзвичайно чутливими до швидкості реакції, на відміну від оптичних датчиків, тому подальше вдосконалення методів моніторингу має включати налаштування швидкості зйомки для максимальної достовірності даних.

Із розширенням використання сонячної енергетики виникає необхідність у роботизації контролю. Термографія може стати основою для автономних роботів, оснащених сенсорами та тепловізорами, що здатні самостійно пересуватися територією сонячних електростанцій і виявляти дефекти.

Перспективним є реалізація фотограмметричного термічного аналізу за допомогою маломасштабного безпілотного літального апарату та тепловізійної камери. Метод передбачає вимірювання температури за допомогою термопари на панелях. Результати як окремих зображень, так і ортомозаїк підтверджують можливість отримання якісної інформації для виявлення збоїв в установках сонячних панелей за допомогою недорогих теплових датчиків і безпілотних літальних апаратів, що є доцільним для реалізації на невеликих сонячних електростанціях [20].

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Термографія є ефективним методом для виявлення різних типів дефектів сонячних панелей, таких як гарячі ділянки, механічні пошкодження, дефекти електричних з'єднань та забруднення поверхні. Раннє виявлення та усунення цих проблем дозволяє значно підвищити ефективність системи та зменшити витрати на обслуговування.

Термографія довела свою ефективність як інструмент для моніторингу сонячних панелей, пропонуючи унікальні рішення для виявлення дефектів, підвищення продуктивності та оптимізації витрат. Виклики, такі як висока вартість обладнання та залежність від погодних умов, поступово вирішуються завдяки інноваціям і зростанню доступності технологій. Подальший розвиток термографії у поєднанні з штучного інтелекту, «інтернетом речей» відкриває нові можливості для сталого розвитку енергетики та ефективного використання відновлюваних ресурсів.

Вдосконалення тепловізійних сенсорів та комплексне застосування програмного забезпечення сприятимуть підвищенню точності моніторингу, оптимізації витрат і покращенню масштабованості для великих сонячних електростанцій. Саме завдяки таким інноваціям термографія стає ключовою технологією підтримання та покращення ефективності сонячної енергетики.

Термографія є потужним інструментом для моніторингу стану сонячних панелей, однак її впровадження супроводжується низкою викликів. Висока вартість обладнання, залежність від погодних умов, потреба у кваліфікованих фахівцях і складність інтеграції з іншими системами є основними обмеженнями, які потребують вирішення. Подальший розвиток технологій, зниження вартості обладнання та вдосконалення програмного забезпечення можуть сприяти подоланню цих труднощів.

Використання термографії у сонячній енергетиці забезпечує численні переваги:

- швидке виявлення дефектів;
- економічну ефективність;
- можливість інтеграції з AI та IoT.

Попри всі переваги, термографія має певні обмеження, які стримують її широке впровадження:

- висока вартість обладнання;

- залежність від погодних умов;
- потреба у кваліфікованих спеціалістах.

Розвиток термографії обіцяє розширення її можливостей завдяки інноваціям у таких напрямках, як інтеграція з хмарними платформами та використання сучасних матеріалів для виготовлення тепловізійного обладнання, що загалом сприятиме більш ефективному та сталому розвитку сонячної енергетики.

Література

1. T. Francis et al., "Detection of fault in solar panel using thermal image processing," *Int. J. Sci. Res. Eng. Manage.*, vol. 8, no. 4, pp. 1–10, Apr. 2024, <https://doi.org/10.55041/IJSREM31924>.
2. K.C. Liao et al., "Using Drones for Thermal Imaging Photography and Building 3D Images to Analyze the Defects of Solar Modules," *Inventions*, vol. 7, no. 3, Art. no. 67, Aug. 2022, <https://doi.org/10.3390/inventions7030067>.
3. K. Choi and J. Suh, "Fault Detection and Power Loss Assessment for Rooftop Photovoltaics Installed in a University Campus, by Use of UAV-Based Infrared Thermography," *Energies*, vol. 16, no. 11, Art. no. 4513, June 2023, <https://doi.org/10.3390/en16114513>.
4. A. Michail et al., "A comprehensive review of unmanned aerial vehicle-based approaches to support photovoltaic plant diagnosis," *Heliyon*, vol. 10, Art. no. e23983, Jan. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e23983>.
5. H. Metwally et al., "A critical review of photovoltaic panels thermal management: criteria and methods," *Advances in Structural Mechanics*, vol. 2, no. 1, pp. 1–15, Dec. 2022.
6. M. Libra et al., "Monitoring of Defects of a Photovoltaic Power Plant Using a Drone," *Energies*, vol. 12, no. 5, Art. no. 795, Feb. 2019, <https://doi.org/10.3390/en12050795>.
7. W.H. Chiang et al., "A Method for Estimating On-Field Photovoltaics System Efficiency Using Thermal Imaging and Weather Instrument Data and an Unmanned Aerial Vehicle," *Energies*, vol. 15, no. 16, Art. no. 5835, Aug. 2022, <https://doi.org/10.3390/en15165835>.
8. H. Saadi and P. Hermanucz, "Optimizing thermal management in photovoltaic panels: experimental study," *Hungarian Agricultural Engineering*, vol. 43, pp. 53–64, 2024, <https://doi.org/10.17676/HAЕ.2024.43.53>.
9. G. E. Mustafa Abro, A. Ali, S. A. Memon, T. D. Memon, and F. Khan, "Strategies and challenges for unmanned aerial vehicle-based continuous inspection and predictive maintenance of solar modules," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 176615–176630, Dec. 2024, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3505754>.
10. O. Olayiwola and F. Camara, "Challenges and opportunities for autonomous UAV inspection in solar photovoltaics," *E3S Web of Conferences*, vol. 57, Art. no. 01003, 2024, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457201003>.
11. C. Thai Hung, "Drone-based thermal imaging system for identifying damaged photovoltaic modules," *Open Access Research Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 28–33, 2023, <https://doi.org/10.53022/oarjst.2023.7.2.0023>.
12. P. B. Quater et al., "Light unmanned aerial vehicles (UAVs) for cooperative inspection of PV plants," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 4, pp. 1107–1117, July 2014, <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2323714>.
13. C. Schuss et al., "Thermography of photovoltaic panels and defect detection under outdoor environmental conditions," presented at the Annual Thermography Conference, Oulu, Finland, 2024, <https://doi.org/10.17676/thermo.2024.4135>.
14. S. Dölek and G. Arslan, "Investigation of factors affecting photovoltaic thermal system efficiency," *Int. J. Energy Studies*, vol. 9, no. 1, pp. 93–113, 2024, <https://doi.org/10.58559/ijes.1411663>.
15. A.I. Constantin et al., "Importance of Preventive Maintenance in Solar Energy Systems and Fault Detection for Solar Panels based on Thermal Images," *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, vol. 71, no. 1, pp. 1–12, 2023, <https://doi.org/10.46904/eea.23.71.1.1108001>.
16. S. Vergura, "Criticalities of the Outdoor Infrared Inspection of Photovoltaic Modules by Means of Drones," *Energies*, vol. 15, no. 14, Art. no. 5086, July 2022, <https://doi.org/10.3390/en15145086>.
17. S. Svystun, O. Melnychenko, P. Radiuk, O. Savenko, A. Sachenko, and A. Lysyi, "Thermal and RGB images work better together in wind turbine damage detection," *Int. J. Comput.*, vol. 23, no. 4, pp. 526–535, Dec. 2024, <https://arxiv.org/abs/2412.04114>.
18. D. Lee and J. Park, "Development of Solar-Panel Monitoring Method Using Unmanned Aerial Vehicle and Thermal Infrared Sensor," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 611, Art. no. 012085, 2019, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/611/1/012085>.
19. S. Vergura, "Unmanned Aerial Vehicle for Infrared Inspection of Photovoltaic Modules," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 20, Sept. 2022, <https://doi.org/10.24084/repqj20.383>.
20. L. Cardinale-Villalobos et al., "Solar Panel Failure Detection by Infrared UAS Digital Photogrammetry: A Case Study," *Int. J. Renewable Energy Res.*, vol. 10, no. 3, pp. 1154–1161, Sept. 2020, <https://doi.org/10.20534/ijrer.10.3>

References

1. T. Francis et al., "Detection of fault in solar panel using thermal image processing," *Int. J. Sci. Res. Eng. Manage.*, vol. 8, no. 4, pp. 1–10, Apr. 2024, <https://doi.org/10.55041/IJSREM31924>.
2. K.C. Liao et al., "Using Drones for Thermal Imaging Photography and Building 3D Images to Analyze the Defects of Solar Modules," *Inventions*, vol. 7, no. 3, Art. no. 67, Aug. 2022, <https://doi.org/10.3390/inventions7030067>.
3. K. Choi and J. Suh, "Fault Detection and Power Loss Assessment for Rooftop Photovoltaics Installed in a University Campus, by Use of UAV-Based Infrared Thermography," *Energies*, vol. 16, no. 11, Art. no. 4513, June 2023, <https://doi.org/10.3390/en16114513>.
4. A. Michail et al., "A comprehensive review of unmanned aerial vehicle-based approaches to support photovoltaic plant diagnosis," *Heliyon*, vol. 10, Art. no. e23983, Jan. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e23983>.
5. H. Metwally et al., "A critical review of photovoltaic panels thermal management: criteria and methods," *Advances in Structural Mechanics*, vol. 2, no. 1, pp. 1–15, Dec. 2022.
6. M. Libra et al., "Monitoring of Defects of a Photovoltaic Power Plant Using a Drone," *Energies*, vol. 12, no. 5, Art. no. 795, Feb. 2019, <https://doi.org/10.3390/en12050795>.
7. W.H. Chiang et al., "A Method for Estimating On-Field Photovoltaics System Efficiency Using Thermal Imaging and Weather Instrument Data and an Unmanned Aerial Vehicle," *Energies*, vol. 15, no. 16, Art. no. 5835, Aug. 2022, <https://doi.org/10.3390/en15165835>.
8. H. Saadi and P. Hermanucz, "Optimizing thermal management in photovoltaic panels: experimental study," *Hungarian Agricultural Engineering*, vol. 43, pp. 53–64, 2024, <https://doi.org/10.17676/HAE.2024.43.53>.
9. G. E. Mustafa Abro, A. Ali, S. A. Memon, T. D. Memon, and F. Khan, "Strategies and challenges for unmanned aerial vehicle-based continuous inspection and predictive maintenance of solar modules," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 176615–176630, Dec. 2024, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3505754>.
10. O. Olayiwola and F. Camara, "Challenges and opportunities for autonomous UAV inspection in solar photovoltaics," *E3S Web of Conferences*, vol. 57, Art. no. 01003, 2024, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457201003>.
11. C. Thai Hung, "Drone-based thermal imaging system for identifying damaged photovoltaic modules," *Open Access Research Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 28–33, 2023, <https://doi.org/10.53022/oarjst.2023.7.2.0023>.
12. P. B. Quater et al., "Light unmanned aerial vehicles (UAVs) for cooperative inspection of PV plants," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 4, pp. 1107–1117, July 2014, <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2323714>.
13. C. Schuss et al., "Thermography of photovoltaic panels and defect detection under outdoor environmental conditions," presented at the Annual Thermography Conference, Oulu, Finland, 2024, <https://doi.org/10.17676/thermo.2024.4135>.
14. S. Dölek and G. Arslan, "Investigation of factors affecting photovoltaic thermal system efficiency," *Int. J. Energy Studies*, vol. 9, no. 1, pp. 93–113, 2024, <https://doi.org/10.58559/ijes.1411663>.
15. A.I. Constantin et al., "Importance of Preventive Maintenance in Solar Energy Systems and Fault Detection for Solar Panels based on Thermal Images," *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, vol. 71, no. 1, pp. 1–12, 2023, <https://doi.org/10.46904/eea.23.71.1.1108001>.
16. S. Vergura, "Criticalities of the Outdoor Infrared Inspection of Photovoltaic Modules by Means of Drones," *Energies*, vol. 15, no. 14, Art. no. 5086, July 2022, <https://doi.org/10.3390/en15145086>.
17. S. Svystun, O. Melnychenko, P. Radiuk, O. Savenko, A. Sachenko, and A. Lysyi, "Thermal and RGB images work better together in wind turbine damage detection," *Int. J. Comput.*, vol. 23, no. 4, pp. 526–535, Dec. 2024, <https://arxiv.org/abs/2412.04114>.
18. D. Lee and J. Park, "Development of Solar-Panel Monitoring Method Using Unmanned Aerial Vehicle and Thermal Infrared Sensor," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 611, Art. no. 012085, 2019, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/611/1/012085>.
19. S. Vergura, "Unmanned Aerial Vehicle for Infrared Inspection of Photovoltaic Modules," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 20, Sept. 2022, <https://doi.org/10.24084/repqj20.383>.
20. L. Cardinale-Villalobos et al., "Solar Panel Failure Detection by Infrared UAS Digital Photogrammetry: A Case Study," *Int. J. Renewable Energy Res.*, vol. 10, no. 3, pp. 1154–1161, Sept. 2020, <https://doi.org/10.20534/ijrer.10.3>