

УДК 620.92:620.179.1

Терентьев Павел Валерьевич,
к.т.н., доцент кафедры «ПМФиВМ»,
Нижегородский государственный агротехнологический
университет им. Флорентьева Л. Я.

Чертилов Денис Анатольевич, магистрант,
Нижегородский государственный агротехнологический
университет им. Флорентьева Л. Я.

Мошков Александр Сергеевич, магистрант,
Нижегородский государственный агротехнологический
университет им. Флорентьева Л. Я.

Кибонги Алекс Партерн, магистрант,
Нижегородский государственный агротехнологический
университет им. Флорентьева Л. Я.

**ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ИНСПЕКТИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ
THERMAL IMAGING INSPECTION OF PHOTOVOLTAIC SOLAR
MODULES IN REAL-WORLD OPERATING CONDITIONS**

Аннотация. В данной работе исследуется применение тепловизионного инспектирования для обнаружения и диагностики дефектов в фотоэлектрических солнечных модулях. Показано, что тепловизионное инспектирование является эффективным и надежным методом для обнаружения и диагностики дефектов в фотоэлектрических солнечных модулях. Установлено, что дефекты влияют на температурное поле и электрическую мощность модулей в разной степени в зависимости от их типа, размера, местоположения и количества.

Abstract. In this paper, the application of thermal imaging inspection for the detection and diagnosis of defects in photovoltaic solar modules is investigated. It has been shown that thermal imaging inspection is an effective and reliable method for detecting and diagnosing defects in photovoltaic solar modules; it has been found that defects affect the temperature field and electrical power of modules to varying degrees depending on their type, size, location and quantity.

Ключевые слова: Тепловизионное инспектирование, фотоэлектрический солнечный модуль, дефекты, диагностика, температурное поле, эффективность, контроль качества, солнечная энергетика, возобновляемые источники энергии.

Keywords: Thermal imaging inspection, photovoltaic solar module, defects, diagnostics, temperature field, efficiency, quality control, solar energy, renewable energy sources.

Существует множество методов контроля и диагностики солнечных модулей. Однако, большинство из них имеют ряд недостатков, таких как высокая стоимость, сложность, низкая скорость, низкое разрешение, необходимость специального оборудования и подготовки образцов. В связи с этим, все большее внимание уделяется тепловизионному инспектированию, которое является простым, быстрым, недорогим и неразрушающим методом, основанным на измерении температурного поля с помощью тепловизора [1].

Тепловизионное инспектирование позволяет обнаружить различные типы дефектов в солнечных модулях, короткие замыкания, горячие точки, перегрев, деградация и др. Эти



дефекты приводят к изменению температуры и электрической мощности модулей, что в свою очередь влияет на их эффективность. Поэтому, важно не только обнаружить дефекты, но и оценить их влияние на работу солнечных модулей.

Целью данной работы является исследование эффективности тепловизионного инспектирования фотоэлектрических солнечных модулей. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- рассмотреть основные принципы и преимущества тепловизионного инспектирования, а также классификацию и характеристику дефектов в фотоэлектрических солнечных модулях;
- провести экспериментальные исследования с использованием тепловизора;
- получить тепловизионные изображения и электрические параметры модулей с различными дефектами;
- провести статистические тесты для проверки гипотез о влиянии дефектов на эффективность модулей.

Гипотезой работы является предположение, что тепловизионное инспектирование является эффективным и надежным методом для обнаружения и диагностики дефектов в фотоэлектрических солнечных модулях, а также для оценки их влияния на эффективность модулей.

Объектом исследования являются фотоэлектрические солнечные модули: поликристаллические Delta SM 100-12P и монокристаллические Delta SM 100-12M, а предметом - тепловизионное инспектирование и диагностика дефектов в них, проводимые тепловизором Fluke Ti32.

Методами исследования являются экспериментальное исследование и статистическая обработка данных.

Тепловизор был установлен на расстоянии 2 м от солнечных панелей и настроен на максимальную чувствительность [2]. Были сделаны снимки двух пар солнечных панелей, у которых наблюдалось снижение мощности относительно других, исследуемых панелей (рис. 1). Снимки были сохранены в формате JPEG с встроенной температурной информацией.

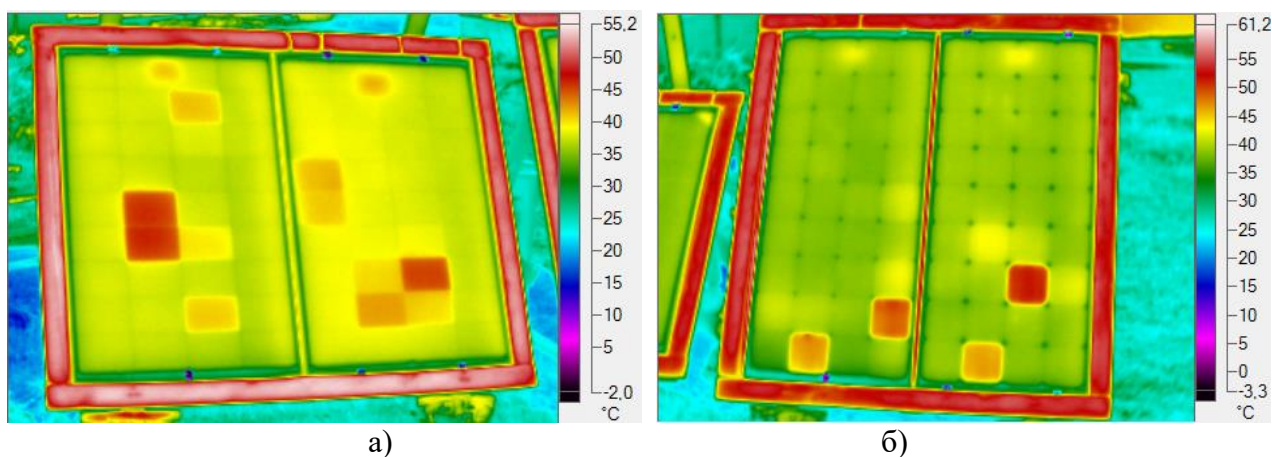


Рис. 1. Тепловизионное изображение исследуемых солнечных модулей
а) Delta SM 100-12P, б) Delta SM 100-12M

На рисунке 1 «а» видно, что солнечные панели имеют преимущественно желтый цвет, что соответствует умеренной температуре около 40 °С. На поверхности панелей видны несколько темных пятен, которые указывают на области с более низкой температурой около 30 °С. Эти пятна могут быть связаны с дефектами, такими как трещины, разрывы или потеря контакта. Также на поверхности панелей видны несколько ярких участков, которые имеют



оранжевый и красный цвет, что соответствует более высокой температуре около 50 °С. Эти участки связаны с дефектами, вызванными эффектом «красных точек», явление, при котором затенённая или дефектная область в последовательно соединённой цепи действует как нагрузка, потребляя энергию, вырабатываемую другими областями, и вызывая локальный перегрев [3, 4]. Края и рамки солнечных панелей имеют более зелёный цвет, что соответствует температуре около 27 °С.

Рисунок 1 «б» показывает, что солнечные панели имеют преимущественно зелёный цвет, что соответствует умеренной температуре около 35 °С. Также на поверхности панелей видны четыре ярких участка, которые имеют оранжевый и красный оттенки, что соответствует более высокой температуре 45 - 50 °С. Эти участки также могут указывать на эффект «красных точек». Края и рамки солнечных панелей имеют более зелёный цвет, что соответствует температуре 30 °С.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

Эффект "красных точек", проявляющийся в виде локальных тепловых аномалий, представляет собой серьезную форму деградации, напрямую влияющую на производительность и долговечность фотоэлектрических солнечных модулей [5].

Тепловизионное инспектирование является высокочувствительным инструментом для оперативного выявления широкого спектра дефектов солнечных модулей. Однако, его диагностическая точность не является постоянной величиной и критически зависит от уровня солнечной инсоляции и скорости ветра. Низкая инсоляция (<400 Вт/м²) маскирует термические аномалии, а сильный ветер (>5 м/с) приводит к их активному охлаждению и снижению контрастности.

Для обеспечения повторяемости и достоверности результатов определены оптимальные условия проведения тепловизионной съемки: инсоляция в диапазоне 600-1000 Вт/м² и скорость ветра не более 3 м/с. Проведение инспекции в этих условиях позволяет минимизировать погрешность диагностики и делает результаты сопоставимыми при мониторинге объекта в разные сезоны [6].

Внедрение регулярного тепловизионного мониторинга позволяет перейти от планово-предупредительного ремонта к ремонту по фактическому состоянию, что снижает эксплуатационные расходы на 15-25% за счет раннего обнаружения критических дефектов и оптимизации графика технического обслуживания.

Таким образом, тепловизионное инспектирование является не просто инструментом визуализации, а мощным средством количественной диагностики состояния фотоэлектрических систем. Однако его максимальная эффективность достигается только при строгом учете реальных эксплуатационных факторов.

Список литературы:

1. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие / А. И. Хальсмаа [и др.]. – Екатеринбург: Издво Урал. ун-та, 2015. – 64 с.
2. РД 153-34.0-20.363-99. Основные положения метода ИК диагностики электрооборудования и ВЛ [Текст]. – Введ. 2000-06-01. — М.: РАО «ЕЭС России», 1999. – 136 с.
3. Понимание эффекта горячей точки в солнечных панелях. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sungoldsolar.com/ru/understanding-the-hot-spot-effect-in-solar-panels/>.
4. Эффект горячей точки в фотоэлектрических модулях: причины, последствия и меры предотвращения. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.egretsolars.com/news-show-4383.html>.



5. Терентьев П. В. Влияние температуры на рабочие характеристики монокристаллических и поликристаллических ФСМ / П. В. Терентьев, С. В. Шильников, С. Е. Шаченков, А. В. Шолин // Инновационные научно-технологические решения для АПК: материалы 74-й Международной научно-практической конференции, Рязань, 20.04.2023 г.: в 2 ч. Ч. II. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева, 2023. – С. 236-241.

6. Terentyev P. V. Research of efficiency of photovoltaic solar modules under favorable conditions of the Nizhny Novgorod region / P. V. Terentyev, D. A. Filatov, S. V. Shilnikov, Begzat Azamatovich Azamatov // Prospects for the development of the electric power industry in the south of the republic: materials of the international scientific and technical conference, Termez, 16-17 Dec. 2022. – Termez, 2022. – P. 452-456.

