

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

К.С. Дик

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники», Минск, Беларусь*

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы и технологии обеспечения безопасности функционирования солнечных панелей. Описаны основные риски и угрозы, связанные с эксплуатацией солнечных электростанций, а также способы их выявления и минимизации. В работе анализируются методы обнаружения аномалий в работе солнечных панелей, включая статистические, метрические, модельные и машинного обучения, что позволяет значительно повысить надежность систем. Приведены примеры практического применения алгоритмов анализа данных для мониторинга и диагностики неисправностей солнечных панелей.

Ключевые слова: солнечная энергетика; безопасность; мониторинг; аномалии; машинное обучение; диагностика; прогнозирование; телеметрия; отказоустойчивость; фотогальванические системы.

ENSURING THE SAFETY OF SOLAR PANEL OPERATION

K.S. Dzik

*Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics",
Minsk, Belarus*

Abstract. The article examines modern methods and technologies for ensuring the safety of solar panels. The main risks and threats associated with the operation of solar power plants, as well as methods for their detection and minimization, are described. The paper analyzes methods for detecting anomalies in the operation of solar panels, including statistical, metric, model-based, and machine learning approaches, which significantly enhance system reliability. Examples of practical applications of data analysis algorithms for monitoring and diagnosing solar panel malfunctions are provided.

Keywords: solar energy; safety; monitoring; anomalies; machine learning; diagnostics; forecasting; telemetry; fault tolerance; photovoltaic systems.

Введение

Развитие солнечной энергетики ставит перед исследователями и инженерами задачу повышения надежности и безопасности функционирования солнечных панелей. Нарушение работы панелей может быть вызвано различными факторами, такими как деградация фотоэлементов, затенение, температурные колебания, механические повреждения и другие неблагоприятные условия. Для эффективного обеспечения безопасности солнечных панелей необходимы современные методы анализа данных, которые позволяют своевременно выявлять отклонения в их работе.

Современные системы мониторинга солнечных электростанций используют автоматизированные алгоритмы для обнаружения аномалий и прогнозирования возможных отказов. Эти методы позволяют не только минимизировать потери энергии, но и продлить срок службы оборудования, обеспечивая бесперебойное функционирование всей системы.

Основная часть

1. Методы обнаружения аномалий в работе солнечных панелей. Обнаружение аномалий играет ключевую роль в обеспечении безопасности солнечных электростанций. В данной статье рассматриваются несколько методов выявления неисправностей:

Статистические тесты – анализируют данные на предмет экстремальных значений, устанавливая предельные значения параметров. Однако такие методы требуют нормального распределения данных и не всегда эффективны в условиях высокой изменчивости. Они применяются для начального анализа данных телеметрии, но не всегда выявляют сложные неисправности, связанные с многомерными зависимостями параметров.

Модельные тесты – используют сингулярное разложение (SVD) и анализ главных компонент (PCA) для сравнения матрицы реальных данных с идеальной моделью. Этот подход активно применяется в кибербезопасности, обработке сетевого трафика и временных рядах. В контексте солнечных панелей этот метод позволяет анализировать параметры работы панелей и выявлять отклонения от ожидаемых значений.

Итерационные методы – включают пошаговое удаление подозрительных объектов из n -мерного признакового пространства, но являются ресурсоемкими. Они применяются при обработке больших массивов данных, но требуют значительных вычислительных ресурсов.

Метрические методы – основаны на измерении расстояний в многомерном

пространстве, например, через алгоритмы LOF (local outlier factor), ABOD (angle-based outlier detection) и k-nearest neighbors. Они позволяют находить отклонения в работе солнечных панелей, анализируя поведение отдельных элементов относительно их ближайших соседей по множеству параметров.

Методы машинного обучения – включают алгоритмы Isolation Forest, OneClass SVM и нейронные сети, которые демонстрируют высокую точность обнаружения аномалий в данных телеметрии солнечных панелей. В частности, алгоритм Isolation Forest выделяется своей способностью эффективно изолировать аномальные значения, быстро анализируя данные без необходимости предварительной нормализации.

Прогнозирование временных рядов – осуществляется с помощью алгоритмов ARIMA, SARIMA, LSTM, что позволяет предсказывать изменения в работе панелей на основе исторических данных. Этот подход полезен для долгосрочного мониторинга и предотвращения неожиданных поломок.

2. Современные технологии мониторинга и диагностики. Для обеспечения безопасной эксплуатации солнечных панелей широко применяются цифровые технологии и автоматизированные системы диагностики. Эти технологии позволяют:

- оперативно выявлять аномалии и прогнозировать неисправности;
- автоматически регулировать параметры работы системы в зависимости от погодных условий;
- оптимизировать энергопотребление и сокращать затраты на обслуживание;
- цифровые двойники солнечных панелей позволяют проводить виртуальные тесты и симуляции, выявляя потенциальные слабые места оборудования до их физического проявления, это значительно снижает риск отказов и увеличивает срок службы солнечных батарей.

3. Применение дронов и IoT в мониторинге солнечных панелей. Использование беспилотных летательных аппаратов (дронов) позволяет осуществлять:

- регулярную инспекцию солнечных панелей с использованием инфракрасных камер;
- оценку состояния панелей в реальном времени и выявление перегретых участков;
- мониторинг повреждений и засорений, влияющих на эффективность работы системы.

Помимо дронов, системы Интернета вещей (IoT) играют важную роль в мониторинге солнечных электростанций. Датчики IoT позволяют удаленно отслеживать ключевые параметры панелей, такие как температура элементов, уровень выработки электроэнергии, напряжение и ток. Эти данные передаются в облачные хранилища и анализируются с помощью алгоритмов машинного обучения, обеспечивая автоматическое выявление неисправностей и оптимизацию работы электростанций.

4. Интеллектуальные системы предсказания отказов. Для минимизации рисков выхода из строя солнечных панелей используются предиктивные аналитические системы, которые анализируют собранные данные и прогнозируют возможные неисправности. Эти системы работают на основе:

- глубокого обучения и нейронных сетей, способных выявлять сложные закономерности в больших массивах данных;
- регрессионного анализа, оценивающего влияние различных факторов (температура, запыленность, интенсивность солнечного излучения) на работоспособность панелей;
- автоматизированных алгоритмов анализа временных рядов, предсказывающих снижение эффективности системы задолго до фактического появления проблем.

Такие системы позволяют операторам электростанций заблаговременно предпринимать меры для устранения возможных неисправностей, что значительно снижает эксплуатационные затраты и повышает надежность работы солнечных электростанций.

5. Развитие методов диагностики и прогнозирования. Современные методы диагностики солнечных панелей развиваются в нескольких направлениях:

- комбинированные подходы: объединение нескольких методов обнаружения аномалий для повышения точности анализа;

- интеграция с облачными вычислениями: анализ данных в реальном времени и их обработка на облачных платформах с доступом к мощным вычислительным ресурсам;

- развитие алгоритмов искусственного интеллекта: обучение моделей предсказания отказов на основе больших данных, полученных от работающих солнечных электростанций;

- применение этих технологий позволяет не только своевременно выявлять неисправности, но и оптимизировать работу солнечных батарей с учетом изменяющихся условий эксплуатации;

- обеспечение безопасности функционирования солнечных панелей является важной задачей, которая требует комплексного подхода.

Применение методов анализа данных, машинного обучения и прогнозирования временных рядов позволяет эффективно выявлять аномалии и прогнозировать возможные неисправности. Современные системы мониторинга и диагностики на основе цифровых двойников и IoT-устройств обеспечивают высокий уровень надежности работы солнечных электростанций.

Будущее развития данной области связано с внедрением адаптивных алгоритмов, которые смогут не только выявлять неисправности, но и автоматически оптимизировать работу панелей в реальном времени. Это позволит увеличить эффективность солнечных электростанций, снизить затраты на их обслуживание и повысить общую надежность энергосистем.

6. Методика поиска аномалий в работе солнечных панелей на основе автокодировщика

Обнаружение аномалий в работе солнечных панелей играет ключевую роль в обеспечении их безопасного и эффективного функционирования. В данной работе рассматривается методика выявления неисправностей и отклонений в работе солнечных электростанций на основе искусственных нейронных сетей, а именно автокодировщика.

Для анализа состояния солнечных панелей использовались данные телеметрии, поступающие в облачное хранилище. Эти данные формировались API-интерфейсами и включали в себя следующие параметры: напряжение (V), сила тока (A), температура корпуса солнечной панели (T , °C), уровень освещенности (G , Вт/м²), временная метка (timestamp). Данные фиксировались с интервалом 2 мин в период с июня 2019 г. по ноябрь 2019 г. Такой объем информации позволил создать детальный временной ряд для выявления закономерностей и поиска отклонений в работе солнечных панелей.

Перед обучением модели телеметрические данные прошли предварительную фильтрацию, направленную на исключение дней с неблагоприятными погодными условиями (например, пасмурных и дождливых дней). Фильтрация производилась на основе следующих критериев:

Сила тока: 0–15 А. Освещенность: 360–1500 Вт/м². Производная по току: –0,2–0,2. Производная по освещенности: –3,8–3,8. Отфильтрованные данные использовались для

формирования векторов входных и тестовых данных. Подготовка данных для обучения автокодировщика. Автокодировщик обучался на векторах данных, содержащих ключевые параметры работы солнечных панелей.

Формирование входных данных: размерность входного вектора: 200×2 ; параметры: временная метка, температура корпуса панели (T), уровень освещенности (G); временной диапазон: 10:00–17:00.

Формирование тестовых данных: размерность тестового вектора: 200×3 ; параметры: временная метка, температура корпуса панели (T), уровень освещенности (G), выходные параметры: напряжение (V) и сила тока (A), которые автокодировщик должен предсказать.

Таким образом, задача модели состояла в восстановлении значений напряжения и силы тока на основании двух параметров: температуры в корпусе панели и уровня освещенности. Дополнительно, для повышения качества обучения модели в обучающий датасет были включены данные исключительно стабильно работающих панелей, не имеющих признаков деградации. Эти данные были отобраны с использованием традиционных методов анализа аномалий, таких как статистические тесты и метрические методы.

Разработанная нейросетевая модель представляет собой автокодировщик, состоящий из пяти слоев нейронов. Архитектура модели включает в себя: входной слой (принимает параметры температуры корпуса панели (T) и уровня освещенности (G)); скрытые слои (несколько уровней с функциями активации ReLU и сигмоидой, отвечающие за кодирование и декодирование данных); выходной слой (восстанавливает исходные параметры, включая напряжение и силу тока).

В качестве среды разработки использовались Python и библиотека TensorFlow, которые обеспечивали обучение и тестирование нейросети.

Алгоритм поиска аномалий включал в себя следующие этапы.

1. Подготовка исходных данных – формирование обучающего и тестового датасетов.

2. Обучение автокодировщика – настройка параметров нейронной сети на основе данных стабильных панелей.

3. Тестирование модели – подача тестовых данных и анализ различий между реальными и восстановленными значениями.

4. Выявление аномалий – анализ ошибки восстановления: если разница между реальными и предсказанными значениями превышала пороговое значение, то данные считались аномальными.

Разработанная искусственная нейронная сеть представляет собой автокодировщик и состоит из пяти слоев нейронов.

Для определения критериев детектирования солнечных панелей в аномальном режиме работы были использованы среднесуточные отклонения измеренных значений силы тока ΔI и напряжения ΔU от восстановленных автокодировщиком, а также количество строк 1 в векторе, средние отклонения в которых по напряжению или по силе тока превысили установленное значение.

$$\Delta I = \frac{\sum_{i=1}^N I'_i - I_i}{N} \quad (1)$$

где I' – восстановленная автокодировщиком сила тока, A ; I – сила тока измеренная при сборе телеметрии, A ; N – количество точек в течение дня использованных для расчетов.

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=1}^N U'_i - U_i}{N} \quad (2)$$

где U' – восстановленное автокодировщиком напряжение, В; U – напряжение измеренное при сборе телеметрии, В; N – количество точек в течение дня использованных для расчетов.

Далее был осуществлен расчет среднеквадратического отклонения для ΔI и ΔU каждой из солнечных панелей для комплекта солнечных дней по формулам.

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M |\Delta I_i - \Delta I_{av}|^2}{M}} \quad (3)$$

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M |\Delta U_i - \Delta U_{av}|^2}{M}} \quad (4)$$

где ΔI_{av} и ΔU_{av} – среднее арифметическое для ΔI и ΔU , соответственно; ΔI_i и ΔU_i – значения ΔI и ΔU , для одной панели соответственно; M – количество значений анализируемой выборки.

В качестве аномалий были рассмотрены солнечные панели, удовлетворяющие условию:

$$\begin{aligned} \Delta I &> K\sigma_I \\ \Delta U &> K\sigma_U \end{aligned} \quad (5)$$

где K – коэффициент, являющийся критерием детектирования аномалии в солнечных панелях. В эксперименте были использованы значения коэффициента K – 2, 3 и 4.

Таким образом были сформированы списки солнечных панелей и аномалий в них. Обученный автокодировщик эффективно выявлял аномалии, связанные с различными дефектами панелей. В ходе тестирования были обнаружены следующие типы отклонений:

- деградация фотоэлементов – снижение напряжения при нормальном уровне освещенности;
- затенение или загрязнение панели – уменьшение выходной мощности при стабильной температуре корпуса;
- перегрев солнечных панелей – повышение температуры при нормальной освещенности и снижении КПД;
- электрические неисправности – нестабильные колебания напряжения и силы тока.

Данный подход позволил снизить вероятность ложных срабатываний и увеличить точность обнаружения неисправностей по сравнению с традиционными методами мониторинга. Использование автокодировщика оказалось особенно полезным в случаях, когда отклонения в работе панели не проявлялись явно, но приводили к снижению эффективности системы.

Заключение

Обеспечение безопасности функционирования солнечных панелей является важной задачей, которая требует комплексного подхода. Применение методов анализа данных, машинного обучения и прогнозирования временных рядов позволяет

эффективно выявлять аномалии и прогнозировать возможные неисправности. Современные системы мониторинга и диагностики на основе цифровых двойников и IoT-устройств обеспечивают высокий уровень надежности работы солнечных электростанций.

Будущее развития данной области связано с внедрением адаптивных алгоритмов, которые смогут не только выявлять неисправности, но и автоматически оптимизировать работу панелей в реальном времени. Это позволит увеличить эффективность солнечных электростанций, снизить затраты на их обслуживание и повысить общую надежность энергосистем.

Сведения об авторе

Дик К. С., выпускник аспирантуры, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Information about the author

Dzik K.S., A Graduate of the Postgraduate Program, Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics".