

УДК 621.3

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИХ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ

Дик К.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Республика Беларусь, [kanstantind@gmail.com](mailto:kanstantind@gmail.com)

Аннотация: В статье рассматривается результат исследования эффективности использования программных средств для выявления аномалий в работе солнечных панелей, что позволяет повысить эксплуатационные характеристики оборудования. Исследуемые программные средства используют два разных подхода при обнаружении аномалий и неисправностей: с использованием цифрового двойника и искусственной нейронной сети – автокодировщика. В статье приводится описание структурной схемы эксперимента, где данные телеметрии собираются с помощью специального оборудования, а затем анализируются с использованием двух программных средств. Результаты эксперимента показывают, что программное средство на основе автокодировщика эффективнее с точки зрения времени и вычислительных ресурсов на 33,3 – 42,5 % по сравнению с программным средством на основе цифрового двойника, обеспечивая одинаковую точность обнаружения аномалий.

Ключевые слова: моделирование параметров солнечной панели, цифровой двойник, автокодировщик.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие приоритетных направлений научно-технической в значительной степени зависит от своевременного создания и практического применения современных программных средств, которые обеспечивают повышение эксплуатационных характеристик электронного оборудования путём поиска аномалий в их работе, в том числе полупроводниковых ячеек солнечных панелей. Можно отметить актуальность разработки программных средств, на основе новых методик обнаружения аномалий в работе солнечных электростанций на уровне солнечных панелей и полупроводниковых ячеек путём анализа телеметрических данных элементов этих электростанций [1–5].

При этом важное значение имеет оценка эффективности использования разработанных и применяемых программных средств, основанных на разных методиках поиска аномалий в работе солнечных панелей.

Целью работы явилась сравнительная оценка эффективности использования двух подходов для поиска аномалий и неисправностей в работе солнечных панелей при проектировании их отказоустойчивости. Оба подхода опираются на результат телеметрии, но один использует физико-математическое моделирование создавая цифровой двойник [1–3], а другой искусственную нейронную сеть [4, 5].

### II. ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для построения цифрового двойника солнечной панели были использованы результаты телеметрии солнечной электростанции с установленной мощностью 45,2 кВт, оборудованную 272 солнечными панелями M190 (STORM Energy GmbH, Germany). Структурная схема включения солнечных панелей и системы сбора телеметрической информации отражена на рисунке 1.

Напряжение  $V$  и температура  $T$  в каждой солнечной панели измеряется каждые 15 минут с фиксацией даты и времени  $t$  посредством специального датчика Sensor (SunSniffer GmbH & Co, Germany). Данные с группы семнадцати последовательно включенных панелей собираются в устройстве считывания датчиков – String Reader (SunSniffer GmbH & Co, Germany), который дополнительно измеряет силу тока  $I$  в цепи этих панелей. Датчик уровня энергетической экспозиции Irradiance Sensor Si-13TC (Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeyer, Germany) обеспечивает измерение её значения  $G$  (уровня освещённости) и передачу измеренного значения в шлюз – Gateway (SunSniffer GmbH & Co), который в свою очередь записывает все результаты телеметрии в базу данных на сервер. В эксперименте были использованы 20160 векторов  $(t, I, V, T, G)$  собранные в течение 7 месяцев работы солнечной электростанции. Объём информации об векторах  $(t, I, V, T, G)$  составил 269 Mb для всего времени наблюдений. Детально принцип работы использованного в исследовании цифрового двойника отражен в [1].

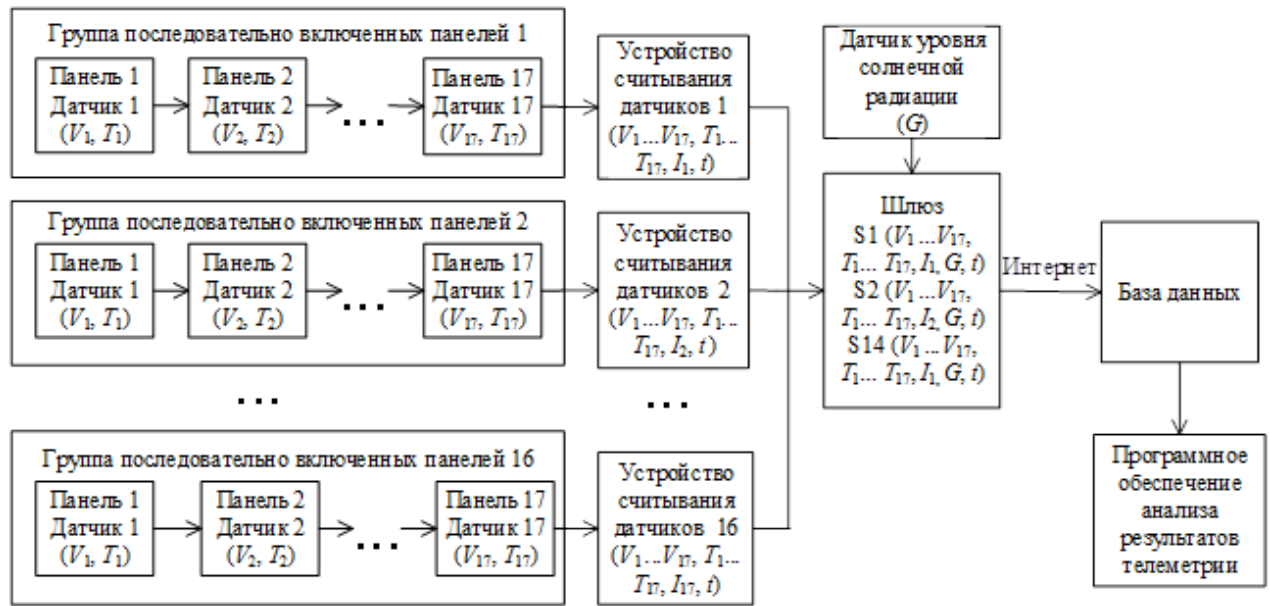


Рисунок 1. Структурная схема солнечной электростанции и системы сбора телеметрической информации

Результатом работы цифрового двойника (API) являются следующие параметры, определенные в смоделированных стандартных условиях испытаний (Standard Test Conditions, STC) для каждой солнечной панели электростанции: выходная мощность в MPP, напряжение и сила тока в MPP, последовательное и параллельное электрическое сопротивление, ток короткого замыкания и напряжение холостого хода.

Для анализа данных использовались нормализованные значения мощностей в MPP  $P_N$  для всех солнечных панелей. Рассчитанные значения сравнивались с медианными значениями и по результатам сравнения относились к дефектным или в пределах нормы. При этом анализ осуществлялся в пределах одного месяца (статический анализ) или в сравнении от месяца к месяцу (динамический анализ). Алгоритм программного обеспечения отражён на рисунке 2.



Рисунок 2. Алгоритм работы программного обеспечения для поиска аномалий в работе солнечных панелей, разработанного на основе цифрового двойника

Второе программное обеспечение имеет в основе разработанную искусственную нейронную сеть, представляющую собой автокодировщик и состоит из пяти слоёв нейронов. Для определения критериев детектирования солнечных панелей в аномальном режиме работы были использованы средне-дневные отклонения измеренных значений силы тока  $\Delta I$  и напряжения  $\Delta U$  от восстановленных автокодировщиком, а также количество строк  $l$  в векторе, средние отклонения в которых по напряжению или по силе тока превысили установленное значение. Алгоритм работы программного обеспечения на основе нейронной сети отражён на рисунке 3.

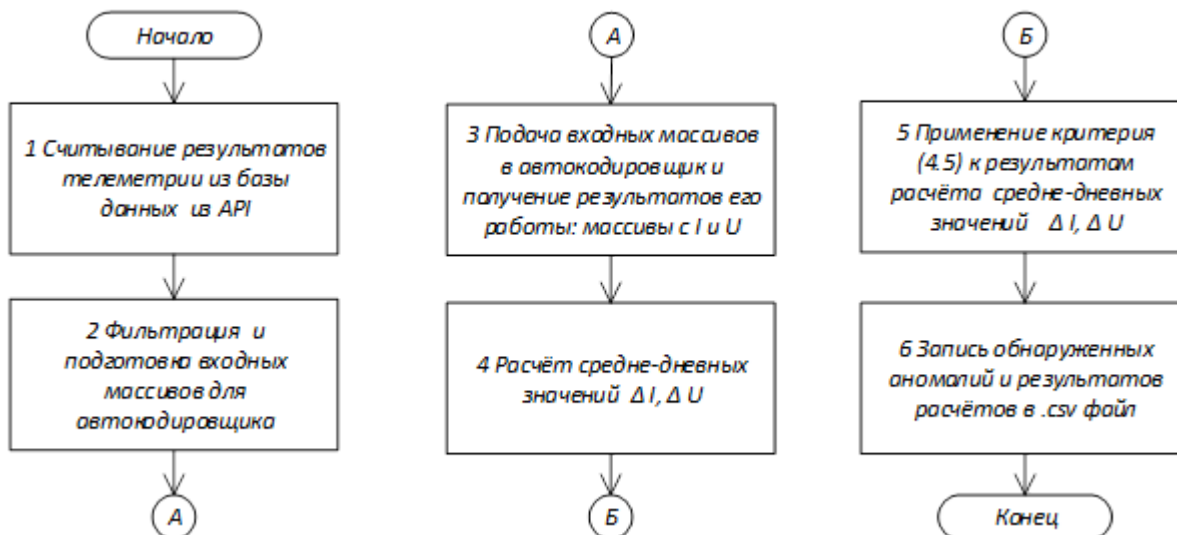


Рисунок 3. Алгоритм работы программного обеспечения для поиска аномалий в работе солнечных панелей, разработанного на основе предложенной методики

Вместе оба программных средства обеспечивают все расчёты, необходимые для применения трёх разработанных методик поиска аномалий в работе солнечных панелей электростанции: статический анализ, динамический анализ и анализ на основе результатов работы автокодировщика.

Далее была проведена оценка затрат времени на выполнение всех математических и алгоритмических вычислений для поиска аномалий в работе 186 солнечных панелей экспериментальной электростанции с использованием данных телеметрии, собранных в течение 6 месяцев. Все операции осуществлялись с использованием персонального компьютера с характеристиками: процессор Intel Core i9 (3,2 ГГц), объём оперативной памяти 8 GB. Все расчёты были повторены 7 раз. Затраты времени составили:

- для расчётов параметров цифрового двойника и выполнения операций 1 – 6 алгоритма поиска аномалий (рисунок 1) необходимо 7 – 8 ч.;
- для обучения искусственной нейронной сети типа автокодировщик и выполнения операций 7 – 10 алгоритма поиска аномалий (рисунок 2) необходимо 4 – 4,6 ч.

При этом, основные затраты аппаратной мощности и времени при использовании алгоритмов основанных на отклонении нормализованных значений мощностей в точке максимальной мощности приходятся на операции, связанные с работой цифрового двойника (80 – 83 %), а при использовании алгоритмов основанных на автокодировщике – обучение искусственной нейронной сети (86 – 89 %).

Таким образом, методика и алгоритм поиска аномалий в работе солнечных панелей основанная на применении автокодировщика эффективнее в использовании в 1,5 – 1,75 раза или на 33,3 – 42,5 %.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка ресурсов, требуемых для выполнения математических и алгоритмических операций реализующих поиск аномалий в работе солнечных панелей электростанции, показала, что основные затраты аппаратной мощности и времени приходятся на операции, связанные с работой цифрового двойника и обучением искусственной нейронной сети типа автокодировщик (83 – 86 %). Обе эти операции выполняются один раз для выбранного для анализа срока.

Установлено, что методика и алгоритм поиска аномалий в работе солнечных панелей основанная на применении автокодировщика эффективнее в использовании в 1,5 – 1,75 раза или на 33,3 – 42,5 %, чем методики, основанные на отклонении нормализованных значений мощностей в точке максимальной мощности. При этом показывают одинаковую точность в поиске аномалий.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность директору ООО «Сенсотроника» Асимову Р.М. за предоставленные данные телеметрии электростанции и доступ к API цифрового двойника.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Валевиц, С.В. Информационное обеспечение мониторинга технического состояния солнечных электростанций / С.В. Валевиц, В.С. Осипович, И. Крузе, Р.М. Асимов // Информационные технологии. – 2020. – Т. 26, № 10. – С. 594–601.
- [2] Методика и программное средство поиска аномалий в данных телеметрии солнечной электростанции / К. С. Дик [и др.] // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 96–110.
- [3] Methods and software tool for automating static and dynamic search for anomalies in telemetry data of a solar power plant / K.S. Dzik [et al.] // International Journal of Advanced Research. – 2023. – Vol. 11, No. 08. – pp. 143–155.
- [4] Methodology and Software for Searching for Anomalies in Telemetry Data of a Solar Power Plant Based on an Artificial Neural Network – Autoencoder // / K.S. Dzik [et al.] // International Journal of Advanced Research. – 2024. – Vol. 12, No. 06. – pp. 1009–1018.
- [5] Метод и программное средство поиска аномалий в данных телеметрии солнечной электростанции на основе искусственной нейронной сети – автокодировщик / К.С. Дик, Н.И. Мухуров, И. Крузе, Р.М. Асимов, В.С. Осипович // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 3 (60). – С. 100.

USING MODELING TOOLS FOR SOLAR PANEL CHARACTERISTICS IN DESIGNING THEIR FAULT TOLERANCE

K. Dzik

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,  
[kanstantind@gmail.com](mailto:kanstantind@gmail.com)

**Abstract:** This article presents the results of a study on the effectiveness of software tools for detecting anomalies in the operation of solar panels, aimed at improving equipment performance. The software tools examined employ two different approaches to anomaly and fault detection: one using a digital twin and the other an artificial neural network, specifically an autoencoder. The article describes the experimental setup, where telemetry data is collected using specialized equipment and subsequently analyzed with the two software tools. The experiment results indicate that the autoencoder-based tool is 33.3–42.5% more efficient in terms of time and computational resources compared to the digital twin-based tool, while providing the same level of accuracy in anomaly detection.

**Keywords:** solar panel parameter modeling, digital twin, autoencoder.