



УДК 004.42
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-96-110>

Оригинальная статья
Original Paper

Методика и программное средство поиска аномалий в данных телеметрии солнечной электростанции на основе анализа нормализованных значений мощности

С. В. Валеви́ч¹, К. С. Дик^{1✉}, И. И. Пилецкий¹, И. Крузе³, Р. М. Асимов², В. С. Осипович⁴

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь
✉E-mail: kanstantind@gmail.com

²ООО «Сенсотроника», ул. Кульман, 9, Минск, 220100, Беларусь

³Sunsniffer, LTD, Людвиг-Фейербах-Штрассе, 69, Нюрнберг, 90489, Германия

⁴Novotech Lab INC, 360 Кинг Стрит, Чарльстон, Южная Каролина, 29401, США

Аннотация

Цели. В связи с увеличением количества солнечных электростанций актуальной задачей становится автоматизация мониторинга их работоспособности. Поиск аномалий в работе солнечных электростанций – одна из основных составляющих мониторинга. Цель исследования заключается в разработке новых методик и программных алгоритмов поиска аномалий в работе солнечных панелей на основе результатов работы цифрового двойника, созданного и обученного по данным телеметрии солнечной электростанции.

Методы. Методика основана на статистических исследованиях отклонений значений мощности в точке максимально эффективной работы солнечной панели, рассчитанной цифровым двойником. Кроме того, введено нормализованное значение мощности максимально эффективной работы солнечной панели для более точной кластеризации и поиска аномалий.

Результаты. С помощью разработанной методики поиска аномалий в данных телеметрии за полгода наблюдений обнаружены 18 аномалий в работе солнечных панелей электростанции. Все случаи проанализированы на предмет причин возникновения аномалий в работе солнечных панелей.

Заключение. Установлено, что при использовании в анализе отклонений нормализованных значений мощностей в точке максимальной мощности P_N возможно обнаружение аномальной работы отдельных панелей. Рассчитан уровень отклонения нормализованных значений в точке максимальной мощности, свидетельствующий о наличии аномалии в работе солнечной панели.

Ключевые слова: солнечная панель, нормализованное значение мощности, поиск аномалий, точка максимальной мощности, солнечная электростанция, телеметрия

Для цитирования. Методика и программное средство поиска аномалий в данных телеметрии солнечной электростанции на основе анализа нормализованных значений мощности / С. В. Валеви́ч [и др.] // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 96–110. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-96-110>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 13.03.2023

Подписана в печать | Accepted 21.04.2023

Опубликована | Published 29.06.2023

Methods and software for anomalies searching in the telemetry data of a solar power plant based on the normalized power analysis

Sergey V. Valevich¹, Konstantine S. Dzick^{1✉}, Ivan I. Pilecki¹, Ingmar Kruse³, Roustam M. Asimov², Vitali S. Asipovich⁴

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
st. P. Brovki, 6, Minsk, 220013, Belarus

✉E-mail: kanstantind@gmail.com

²Sensotronica LTD,
st. Kulman, 9, Minsk, 220100, Belarus

³Sunsniffer, LTD,
Ludwig-Feuerbach-Straße, 69, Nürnberg, 90489, German

⁴Novotech Lab INC,
360 King Street, Charleston, SC, 29401, USA

Abstract

Objectives. In connection with the increase in the number of solar power plants, the automation of monitoring their performance becomes an urgent task. The search for anomalies in the operation of solar power plants is one of the main components of monitoring. The purpose of the study is to develop new methods and software algorithms for finding anomalies in the operation of solar panels based on the results of a digital twin created and trained according to the telemetry data of a solar power plant.

Methods. The developed technique is based on statistical studies of deviations of power values at the point of maximum efficient operation of the solar panel calculated by the digital twin. In addition, a normalized value of the power in the maximum efficient operation of the solar panel was introduced for more accurate clustering and anomaly search.

Results. Using the developed method of static search for half a year of observations, 18 anomalies were detected in the operation of the solar panels of the power plant. All cases are analyzed for the causes of anomalies in the operation of solar panels.

Conclusion. It has been established that when using normalized power values in the analysis of deviations at the point of maximum power PN, it is possible to detect abnormal operation of individual panels. The level of deviation of the normalized values at the point of maximum power was calculated, indicating the presence of an anomaly in the operation of solar panel.

Keywords: solar panel, normalized power value, anomaly search, maximum power point, solar power plant, telemetry

For citation. Valevich S. V., Dzick K. S., Pilecki I. I., Kruse I., Asimov R. M., Asipovich V. S. *Methods and software for anomalies searching in the telemetry data of a solar power plant based on the normalized power analysis*. Informatika [Informatics], 2023, vol. 20, no. 2, pp. 96–110 (In Russ.).
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-96-110>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Рост объемов выработки электроэнергии посредством солнечных электростанций стимулирует развитие систем мониторинга их технического состояния, а также способов автоматизации поиска неисправных солнечных панелей и фактов их аномального функционирования.

Для мониторинга технического состояния используют облачные ресурсы (URL: <https://www.solarfeeds.com/mag/solar-monitoring-systems-in-the-world/>, <http://www.sunsniffer.de/solution/what-is-sunsniffer.html>, <https://www.solareye.eu/platform/?r=site/page&view=features>, <http://www.pvsyst.com/en/>), которые позволяют собирать данные телеметрии при оснащении солнечных электростанций соответствующим оборудованием, осуществлять через веб-интерфейс анализ основных параметров работы электростанции в целом и конкретных панелей в частности. Как правило, в облачных сервисах сохраняются значения напряжения, температу-

ры, силы тока каждой панели и освещенности для всех панелей электростанции. Обнаружение аномалий в работе конкретных солнечных панелей и их классификация зависят от внимания и квалификации пользователя облачного ресурса, а также от наличия у ресурса функций по обнаружению аномалий в работе и неисправных солнечных панелей.

Для решения задачи поиска аномалий в работе солнечных панелей с использованием данных телеметрии ряд исследователей предлагают осуществлять моделирование солнечных панелей [1–3]. Другие авторы [4–10] используют методики и алгоритмы оценки так называемой точки максимальной мощности (Maximum Power Point, MPP) – комбинации силы тока и напряжения панели, при которых съём энергии является оптимальным, – для солнечных панелей электростанции при определенных условиях. Однако эти методики либо требуют установки дополнительного оборудования с извлечением дополнительных данных для применения методик и алгоритмов, либо не учитывают того факта, что солнечные панели подключены в цепочки последовательно и могут работать не в своем оптимальном режиме.

Отмеченные недостатки методик моделирования работоспособности солнечных панелей устранены авторами [11–14]. Результаты работы цифрового двойника позволяют использовать расчетные значения мощности MPP и вольт-амперные характеристики для каждой панели при поиске аномалий в работе солнечных панелей.

Цель настоящего исследования – разработка методики и программного средства обнаружения аномалий в работе солнечных панелей по результатам телеметрии, представленной облачным ресурсом (URL: <http://www.sunsniffer.de/solution/what-is-sunsniffer.html>), на основании мощности MPP, полученной с использованием цифрового двойника солнечной электростанции.

Методика эксперимента. В ходе исследования использовались результаты телеметрии с электростанции Südstadt-Forum, расположенной в Нюрнберге, Германия. В состав установки входят три инвертора (модели SUN2000-20KTL, Sinvert PVM17 и Sinvert PVM20) с 16 последовательностями (цепочки солнечных панелей) и 287 солнечных панелей. Все цепочки состоят из 18 фотоэлектрических монокристаллических модулей M190 (STORM Energy GmbH, Германия).

Платформа цифрового двойника предоставляет программный интерфейс API (Application Programming Interface) [14, 15], который принимает данные мониторинга за определенный период и возвращает параметры физико-математической модели для всех солнечных панелей. Входные данные для API включают в себя следующие параметры: напряжение, силу тока, температуру в корпусе солнечной панели, уровень освещенности, временную метку. Интервал фиксации перечисленных параметров 2 мин. Набор данных собирался с помощью телеметрии с июня по ноябрь 2019 г. включительно.

Результатом работы цифрового двойника (API) являются 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 реализации и проверки предложенной методики использовался язык программирования Node.JS вместе с распараллеливанием `async/await` для ускорения вычислений с большим количеством солнечных панелей.

Общий анализ с помощью критериальной методики применяется для представления и изучения данных, удобных для обнаружения аномалий. Такая методика может помочь выявить некоторые проблемы на уровне цепочек или конкретных солнечных панелей на основе локальных критериев.

Исходные точки данных, полученные в результате расчета цифровым двойником, имеют следующие особенности: мощность MPP в STC, идентификатор модуля, календарный месяц. Для анализа данных использовались нормализованные значения мощностей в MPP P_N для всех солнечных панелей, которые рассчитывались по формуле

$$P_N = \frac{P_{mpp} - P_m}{P_m} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где P_m – глобальное медианное значение мощности, Вт. Вычисляется как среднее значение по всем медианам строк:

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_S}{n}, \quad (2)$$

где P_S – медианное значение мощности P_{mpp} для отдельной цепочки последовательно подключенных солнечных панелей, n – количество цепочек в электростанции, i – номер цепочки солнечных панелей.

Чтобы структурировать результаты расчетов и однозначно выделить аномалии, значения P_N были разделены на следующие категории:

- минимальное значение;
- 25-й перцентиль;
- 50-й перцентиль;
- 75-й перцентиль;
- максимальное значение.

Для представления 50-го перцентилья распределения использовались два метода оценки: медианы и центра масс. Оба метода были проанализированы визуально по графикам, чтобы оценить, какой из них наиболее информативен. Такое статистическое структурирование данных позволяет визуализировать выбросы при выполнении анализа на уровне цепочки или отдельно взятой солнечной панели.

Для анализа данные были объединены в два представления: одноточечные и линейные. Одноточечные данные содержат только одно агрегированное значение за весь полугодовой период. Линейные данные имеют шесть точек: по одной точке на каждый месяц (июнь – ноябрь 2019 г.). Одноточечные данные позволяют грубо оценить общую производительность конкретной солнечной панели, линейные данные – аномалии в динамике. Помимо расчета глобального P_N по формуле (1) был осуществлен еще расчет локального P_{N1} по этой же формуле. Однако для расчета P_{N1} использовались медианы, рассчитанные по цепочкам панелей, относящимся к конкретному инвертору.

Для дальнейшего анализа данные структурируются по нескольким этапам группировки: начиная со всех модулей вместе, затем по группам, прикрепленным к конкретному типу инвертора, и, наконец, по панелям, соединенным в одну цепочку.

Этапы группировки:

- 1) все модули;
- 2) модули по типу инвертора (группа 1 – Huawei SUN2000-20KTL, группа 2 – Siemens Sinvert PVM17, группа 3 – Siemens Sinvert PVM20);
- 3) модули, подключенные в цепочки.

На первом этапе все точки разделяются на три категории в зависимости от типа инвертора. Следующий этап включает 16 категорий (одна категория на одну цепочку солнечных панелей).

При анализе данных внутри групп используются два типа критериев: глобальные и локальные. Глобальные критерии учитывают все нормализованные значения мощностей в MPP P_N для панелей солнечной электростанции при создании эталонного значения. Напротив, локальные критерии рассматривают только текущую группу (например, конкретную цепочку или инвертор). Кроме того, нормализация данных применяется для устранения смещения номинальных мощностей между солнечными панелями. Это позволяет лучше визуализировать аномалии и определять их количественно в процентах. Медиана распределения P_{mpp} использовалась в качестве эталонного значения для нормализации.

Последовательность группировки, представленная выше, позволяет начать поиск выбросов на уровне всей электростанции, а затем на каждом этапе группирования постепенно сужать область анализа для выявления локальных проблем с отдельными солнечными панелями.

Результаты исследования. Анализ основан на нескольких этапах группировки и представляет локализованные результаты на каждом этапе. На первом этапе осуществляется анализ среднего значения мощности солнечных панелей в МРР и в состоянии STC (P_{mpp}). На рис. 1 красным цветом показана кривая со средними значениями P_{mpp} за полгода.

Среднее значение P_{mpp} для всех точек составляет 176,89 Вт. Порог отклонения 10 Вт от среднего будем считать признаком проявления аномальной работы солнечной панели. (Этот порог установлен экспериментально, разработанное программное средство обеспечивает возможность его изменения.) В результате применения методики обнаружены четыре солнечные панели, выходящие за установленный порог: Module 1.4_1 (200,01 Вт), Module 1.4_8 (188,18 Вт), Module 1.11_15 (158,7 Вт) и Module 2.3_10 (130,5 Вт). Эти две отрицательные и две положительные аномалии видны на графике.

Для того чтобы определить, были обнаруженные аномалии в работе солнечных панелей постоянными или проявились единожды, осуществлен расчет среднего значения P_{mpp} для каждого месяца и проанализированы минимальные и максимальные значения в сопоставлении с общим средним значением (рис. 1).

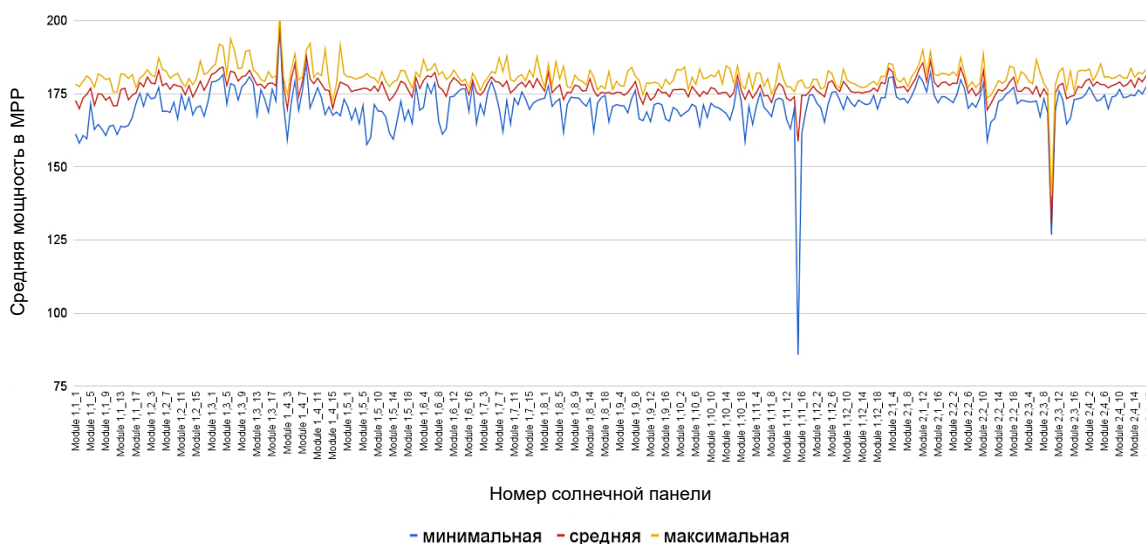


Рис. 1. Средняя мощность в МРР для солнечных панелей с июня по ноябрь 2019 г.
Синим цветом отмечено минимальное среднеемесячное значение, оранжевым – максимальное среднеемесячное значение, красным – среднее за полгода значение

Fig. 1. Average power per point at the MPP for solar panels from June to November 2019. Blue marks the minimum average monthly value, orange – the maximum average monthly value, red – the average value for half a year

Рис. 1 позволяет визуально классифицировать паттерны аномалий за шесть месяцев наблюдения и выработать критерии для алгоритма автоматического поиска аномалий в работе солнечных панелей. Видно, что отклонение в работе солнечных панелей Module 2,3_10, Module 1.4_1 и Module 1.4_8 имеет постоянный характер. Например, среднее значение P_{mpp} для солнечной панели Module 2,3_10 составляет 130,51 Вт, а минимальное значение – 126,78 Вт. Напротив, солнечная панель с Module 1,11_15 демонстрирует аномальное поведение единожды с минимальным значением P_{mpp} в 85,72 Вт, что скорее всего и приводит к среднему значению 158,72 Вт.

Далее был осуществлен анализ линейных данных, где нормированные значения P_N для всех модулей были рассчитаны с помощью формул (1) и (2). Первый подход к кластеризации заключается в отнесении солнечных панелей, отклонение P_N которых от глобальной медианы превышает определенный предел, к отдельному кластеру. Выбор одного порога дает два кластера: нормальные и аномальные солнечные панели. При использовании в кластеризации порогового значения $\pm 10\%$ были получены восемь солнечных панелей, которые относятся к кластеру аномальных (разработанное программное средство обеспечивает изменение этого порогового

значения). Для более детального и наглядного анализа солнечные панели были сгруппированы по типу инвертора, к которому их подключили. Результаты для группы 1 (цепочки панелей, подключенных к инвертору SUN2000-20KTL) представлены на рис. 2. В группе 1 в кластер аномальных попадают пять солнечных панелей: Module 1,1_2 (10,8 % в августе), Module 1,1_4 (- 10 % в августе), Module 1,4_1 (все шесть месяцев, от +17 до +20 %), Module 1,4_1 1.4_3 (- 10,1 % в ноябре) и Module 1,4_1 1.5_6 (- 11,1 % в ноябре). Интересно, что Module 1,4_1 постоянно показывает положительные значения отклонения в течение всех шести месяцев. Это можно объяснить значительно лучшими условиями установки или просто аппаратным артефактом мониторинга.



Рис. 2. Нормализованные значения мощностей в MPP P_N для солнечных панелей группы 1 по месяцам в 2019 г.

Fig. 2. Normalized power values in MPP P_N for group 1 solar panels by month in 2019

В группу 2 входят цепочки солнечных панелей, подключенных к инвертору Sinvert PVM17 (рис. 3). Солнечные панели группы 2 не имеют аномалий согласно установленному критерию (отклонение $P_N \pm 10\%$). Некоторые наблюдаемые отклонения могут быть вызваны естественным загрязнением или очисткой модулей.

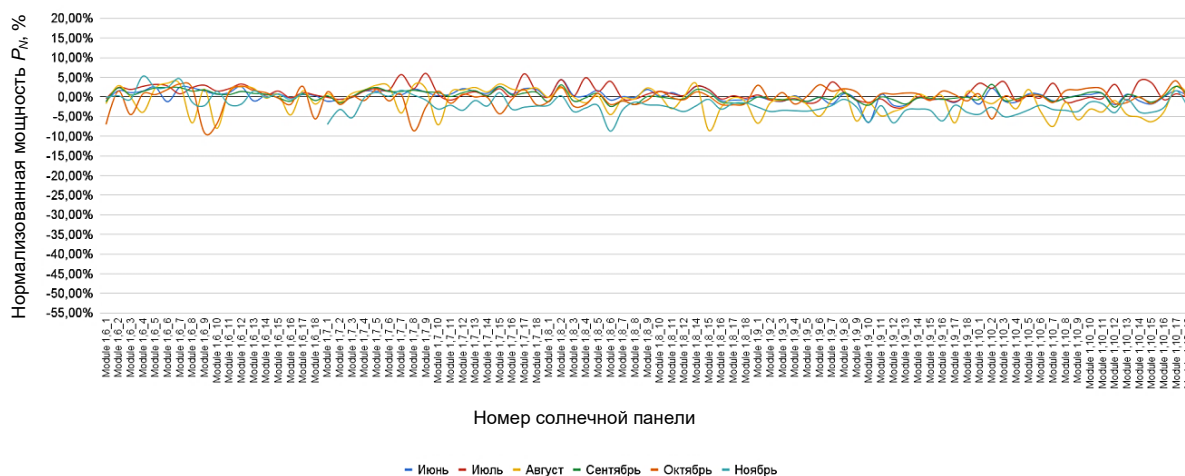


Рис. 3. Нормализованные значения мощностей в MPP P_N для солнечных панелей группы 2 по месяцам в 2019 г.

Fig. 3. Normalized capacities in MPP P_N for group 2 panels by month in 2019

В группу 3 входят цепочки солнечных панелей, подключенных к инвертору Sinvert PVM20 (рис. 4).



Рис. 4. Нормализованные значения мощностей в MPP P_N для солнечных панелей группы 3 по месяцам в 2019 г.

Fig. 4. Normalized power values in MPP P_N for group 3 solar panels by month in 2019

В группе 3 три солнечные панели можно отнести к аномальным: Module 1.11_1 (– 10,4 % в ноябре), Module 1.11_15 (– 51,6 % в ноябре) и Module 2.3_10 (более – 20 % для всех шести месяцев). Следует отметить, что аномалия Module 1,11_15 носит временный характер. Отклонение в – 51,6 % зарегистрировано только в ноябре. Анализ кривых освещенности и силы тока показывает, что причина заключается в попадании солнечной панели в тень практически на весь день во второй половине ноября.

Аномальная работа солнечной панели Module 2,3_10 сохраняется все шесть месяцев (– 28,2 % в июне, – 25,5 % в июле, – 28,5 % в августе, – 28,1 % в сентябре, – 26,9 % в октябре и – 21 % в ноябре).

В целом анализ показывает, что только модули, подключенные к первому и третьему инверторам, имеют аномалии. Производительность модулей двух инверторов все время находится в пределах допустимого диапазона отклонений. Это означает, что группировка по типу инвертора может дать информацию о том, как распределение аномалий соотносится с инверторами.

Результаты анализа отклонений расчетных P_N для конкретных панелей от глобального медианного значения P_N рассмотрим на примере двух цепочек солнечных панелей с номерами 2.3 и 2.4 (рис. 5 и 6) для инвертора группы 3 в 2019 г. Маркеры в виде цветных кругов и квадратов указывают границы выбранных статистических категорий, а цветными линиями отражены нормализованные значения мощности в MPP P_N цепочки солнечных панелей (см. легенду на рис. 5–8).

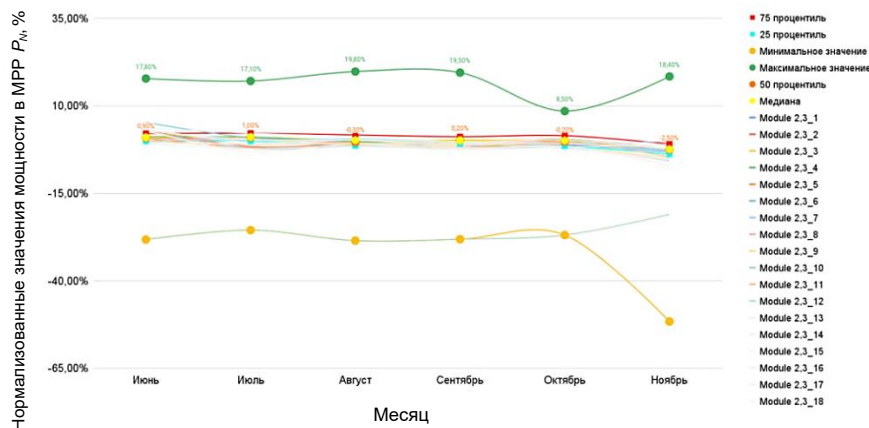


Рис. 5. Нормализованные значения мощности в MPP P_N солнечных панелей цепочки String 2.3

Fig. 5. Normalized power values in MPP P_N photovoltaic modules of String 2.3

Видно, что большинство кривых для солнечных панелей тяготеют к центру распределения, показанному с критериями медианы и центра масс. Кривые солнечных панелей, которые демонстрируют аномальную работу, либо значительно выше, либо ниже медианы и центра масс (например, Module 2,3_10).

Для солнечной панели Module 2,3_10 в цепочке солнечных панелей с номером String 2.3 почти всегда (кроме ноября) расчетная мощность в MPP P_N имеет минимальное значение. Она показывает отклонение относительно центра около 25 % в течение всех шести месяцев.

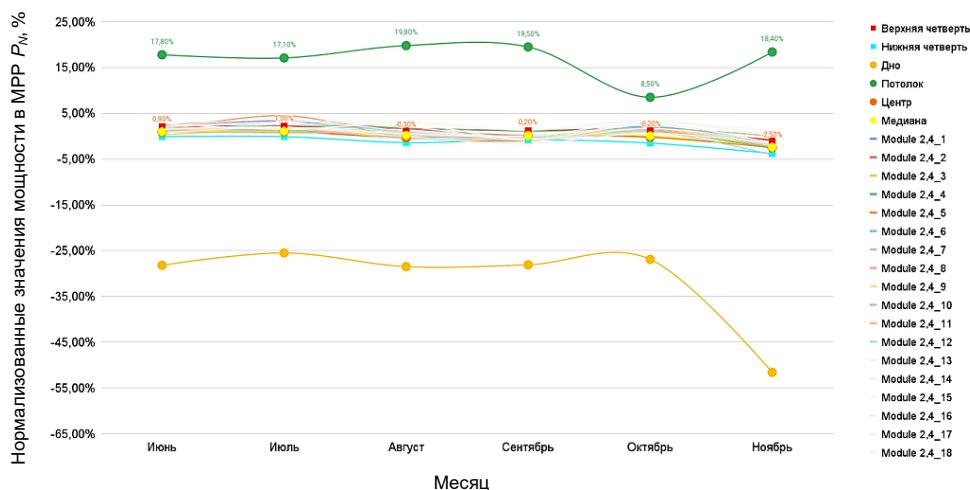


Рис. 6. Нормализованные значения мощности в MPP P_N солнечных панелей цепочки String 2.4

Fig. 6. Normalized power values in MPP P_N photovoltaic modules of String 2.4

Тот же анализ, что и для строки 2.4, показывает типичные результаты для исправной строки. Отклонение всех модулей от центра распределения остается в пределах $\pm 4,5 \%$.

Можно сделать интересное заключение, что почти нет видимой разницы между центрами распределения, определенными критериями медианы и центра масс. Это можно объяснить наличием значительного количества модулей, используемых для расчета глобальных критериев, что дает статистически надежный результат.

Две цепочки были проанализированы путем расчета нормализованных значений мощности в MPP P_{N1} с использованием локальных медиан – значений, полученных от солнечных панелей группы 3. Результаты представлены на рис. 7 и 8. Маркеры указывают границы выбранных статистических категорий для инвертора группы 3 в 2019 г.

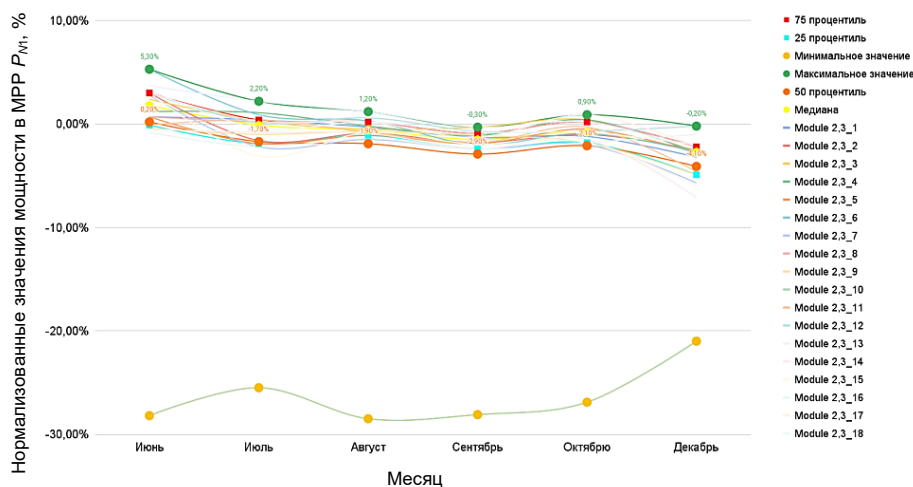


Рис. 7. Нормализованные значения мощности в MPP P_{N1} солнечных панелей цепочки String 2.3

Fig. 7. Normalized power values in MPP P_{N1} photovoltaic modules String 2.3

На рис. 7 видно, что при отмеченном способе анализа неисправная солнечная панель Module 2,3_10 находится прямо у критериев минимального значения и показывает отклонения порядка – 25 % за весь период наблюдения.

Следует заметить, что центр распределения, определяемый средним значением, остается в пределах большинства кривых, хотя расположение центра масс значительно смещено в сторону кривой солнечной панели, которая демонстрирует аномальное поведение (Module 2,3_10). Поэтому использование медианы предпочтительнее для анализа локальных критериев из-за меньшей статистической выборки.

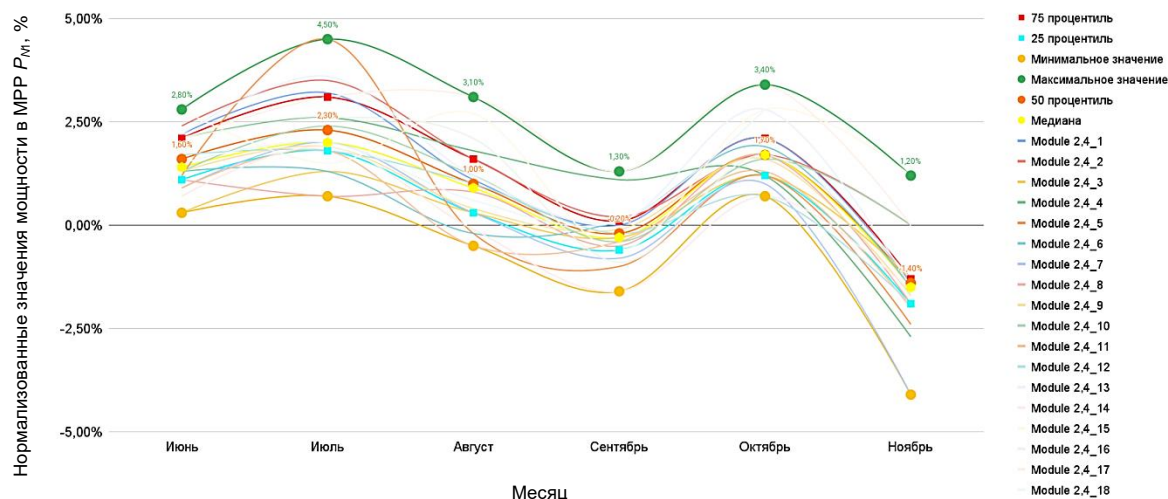


Рис. 8. Нормализованные значения мощности в MPP P_{M1} солнечных панелей цепочки String 2.4

Fig. 8. Normalized power values in MPP P_{M1} photovoltaic modules String 2.4

Анализ локальных критериев для цепочки 2.4, в которой солнечные панели работают одинаково, дает результаты с малым отклонением от результатов расчета глобальных критериев. Отклонение всех солнечных панелей от центра распределения остается в пределах $\pm 4,5\%$.

Подчеркнем, что все исправные цепочки в электростанции демонстрируют поведение, подобное описанному выше. Таким образом, исправная цепочка характеризуется относительным разбросом производительности в пределах $\pm 4,5\%$ независимо от глобальных или локальных критериев, использованных при расчетах. Характер кривых на рис. 8 позволяет судить о количестве ясных дней в том или ином месяце. Отклонение кривой в отрицательную сторону свидетельствует о снижении количества ясных дней относительно других месяцев.

Результаты анализа, проведенного для всех цепочек солнечных панелей электростанции, представлены в таблице и на рис. 9. В рассматриваемом тестовом примере восемь солнечных панелей демонстрируют аномальное поведение, всего было обнаружено 18 случаев аномальной работы. Группирование модулей в соответствии с их инверторными и цепными соединениями подчеркивает корреляцию аномалий с конкретным электрическим соединением или физической областью.

Проанализируем кривые напряжения, силы тока и температуры, измеренные для солнечных панелей (таблица), с целью проверки наличия неисправностей в их работе и предварительного анализа возможных причин этих неисправностей. На рис. 10 изображены кривые напряжения в зависимости от времени измерения, снятые датчиками в солнечных панелях Module 2,3_9 и Module 2,3_10. Кривые показывают, что солнечная панель Module 2,3_10 имеет напряжение на 10 В ниже, чем у других солнечных панелей цепочки. Это может свидетельствовать об открытии одного из защитных диодов в солнечной панели, которые предназначены для отключения от цепи частей солнечной панели.

Результаты поиска аномалий в течение шести месяцев (июнь – ноябрь) 2019 г.

Anomaly results for six months (June – November) 2019

Вид анализа <i>Type of analysis</i>	Количество аномалий <i>Number of anomalies</i>	Номер солнечной панели <i>PV module number</i>	Месяц <i>Month</i>	Максимальное отклонение <i>Maximum deviation</i>
Средняя мощность в МРР	4 солнечные панели / 19 аномалий	Module 1,4_1	Весь период. Среднее значение	+23,03 W
		Module 1,4_8	Весь период. Среднее значение	+11,28 W
		Module 1,11_15	Ноябрь	-18,17 W
		Module 2,3_10	Весь период. Среднее значение	-46,38 W
Общий статический анализ по критериям на основе нормализованных значений мощности в МРР: глобальный и локальный	В общем: 8 солнечных панелей / 18 аномалий По группам: в группе 1 5 солнечных панелей / 10 аномалий; в группе 2 0 солнечных панелей / 0 аномалий; в группе 3 3 солнечных панели / 8 аномалий	Module 1,1_2	Август	-10,8 %
		Module 1,1_4	Август	-10 %
		Module 1,4_1	Июнь	+17,8 %
			Июль	+17,1 %
			Август	+19,8 %
			Сентябрь	+19,5 %
			Октябрь	+19,1 %
		Module 1,4_3	Ноябрь	-10,1 %
		Module 1,5_6	Ноябрь	-11,1 %
		Module 1,11_1	Ноябрь	-10,4 %
		Module 1,11_15	Ноябрь	-51,6 %
		Module 2,3_10	Июнь	-28,2 %
			Июль	-25,5 %
			Август	-28,5 %
			Сентябрь	-28,1 %
Октябрь	-26,9 %			
Ноябрь	-21 %			

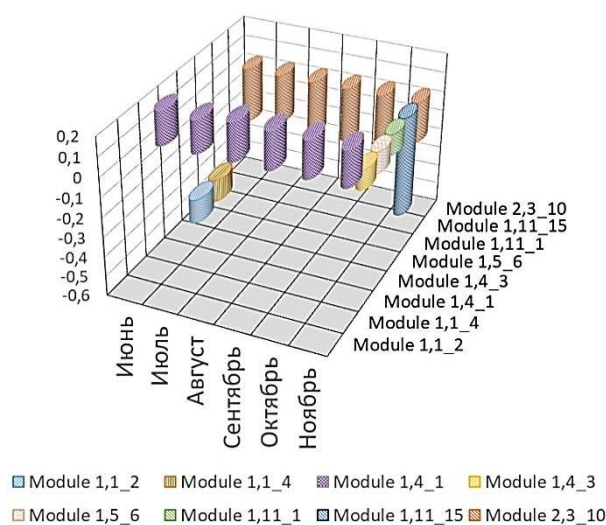


Рис. 9. Группирование аномалий в работе солнечных панелей в течение шести месяцев (июнь – ноябрь) 2019 г.

Fig. 9. Grouping anomalies in the operation of solar panels for six months (June – November) 2019

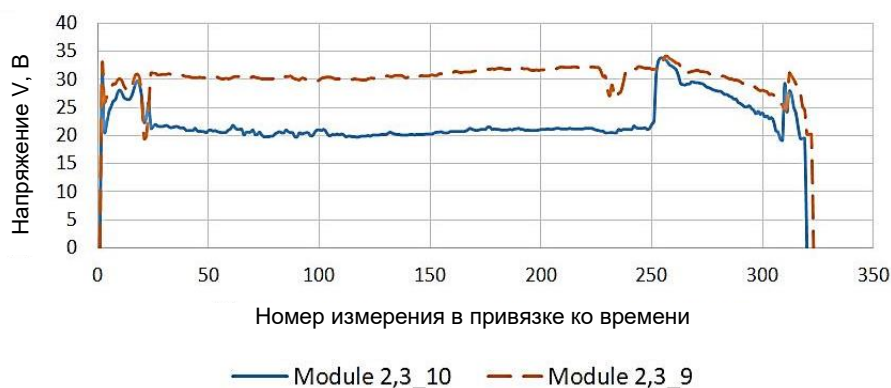


Рис. 10. Изменение напряжения в солнечных панелях Module 2,3_9 и Module 2,3_10 в зависимости от времени

Fig. 10. Change of voltage in solar panels Module 2,3_9 and Module 2,3_10 depending on time

На рис. 11 изображены кривые температуры в зависимости от времени измерения, снятые датчиками в солнечных панелях Module 1,1_2 и Module 1,1_3 в течение ясного солнечного дня. Кривые показывают, что солнечная панель Module 1,1_2 нагревается больше, чем панель Module 1,1_3, на 7–9 °С. Избыточный нагрев может свидетельствовать о неполном или поврежденном контакте при подключении солнечной панели в цепь. Солнечная панель Module 1,1_4 демонстрирует аналогичное поведение температурной кривой в течение дня.

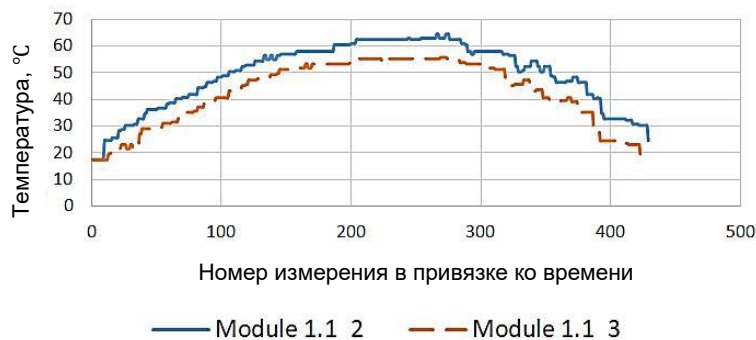


Рис. 11. Изменение температуры в солнечных панелях Module 1,1_2 и Module 1,1_4 в зависимости от времени

Fig. 11. Temperature change in solar panels Module 1,1_2 and Module 1,1_4 depending on time

Анализ кривых температуры для солнечных панелей Module 1,4_3 и Module 1,5_6 в ясные дни в ноябре показал, что они тоже работали с повышением температуры, измеряемой датчиком, на 8–11 °С.

На рис. 12 отражены кривые напряжения, силы тока и температуры в зависимости от времени измерения, снятые датчиками в солнечных панелях Module 1,11_1, Module 1,11_9 и Module 1,11_15 в течение ясного солнечного дня. Кривые напряжения показывают, что данные с датчика солнечной панели Module 1,11_15 отсутствуют при выходе панели на интенсивный рабочий режим. Такое может происходить при срабатывании всех трех защитных диодов и фактическом отключении солнечной панели вместе с датчиком от цепи.

Кривые температуры показывают, что солнечная панель Module 1,11_1 нагревается больше, чем панель Module 1,11_9, на 9–12 °С, т. е. имеет место случай, аналогичный панели Module 1,1_3.

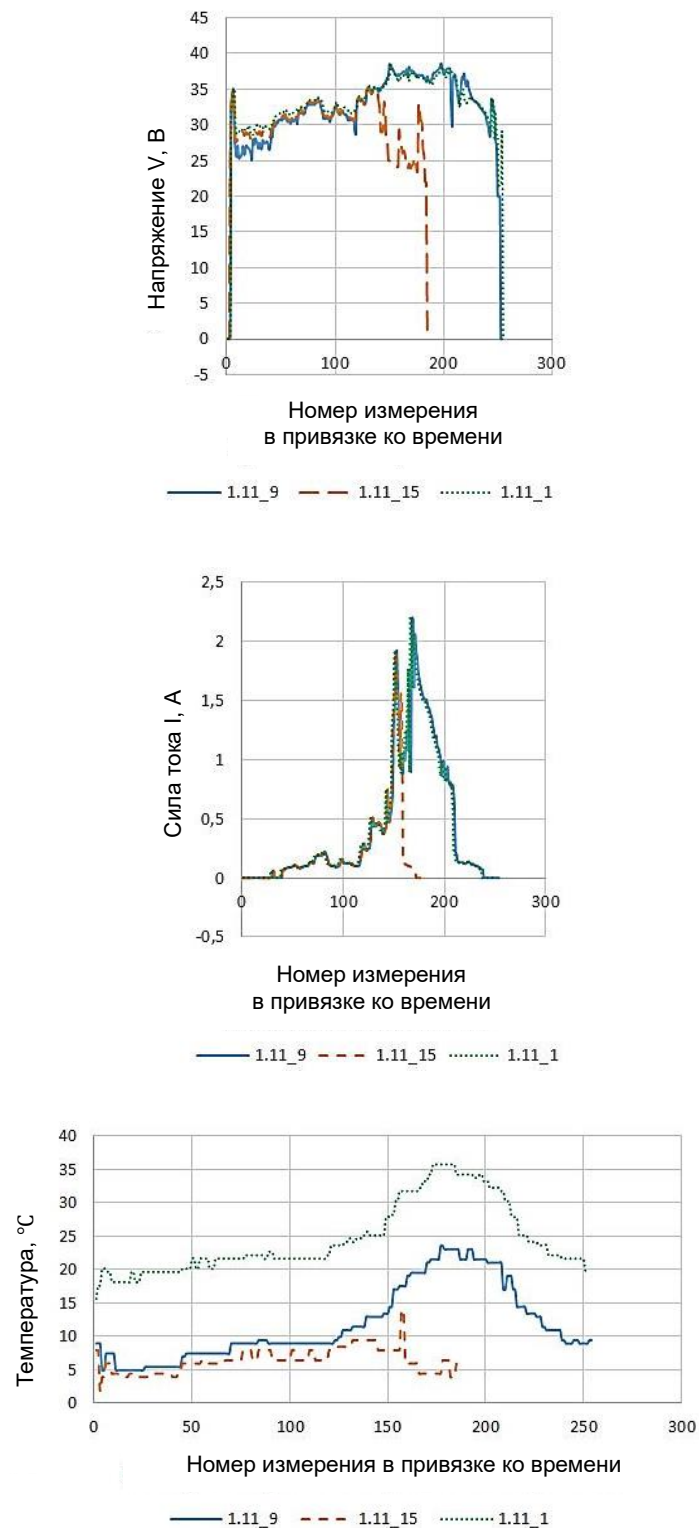


Рис. 12. Изменение напряжения, силы тока и температуры в солнечных панелях Module 1,11_1, Module 1,11_9 и Module 1,11_15 в зависимости от времени
 Fig. 12. Change of voltage, current and temperature in solar panels Module 1,11_1, Module 1,11_9 and Module 1,11_15 depending on time

На основании проведенных исследований было разработано программное средство, алгоритм работы которого представлен на рис. 13. Входными данными для программного средства являются объекты json от API цифрового двойника, а выходными данными – результаты расче-

та нормализованных значений мощностей в МРР для каждой солнечной панели, квартили, медианное и среднее значения P_N , список номеров солнечных панелей, в работе которых обнаружены аномалии, и критерии найденных аномалий.

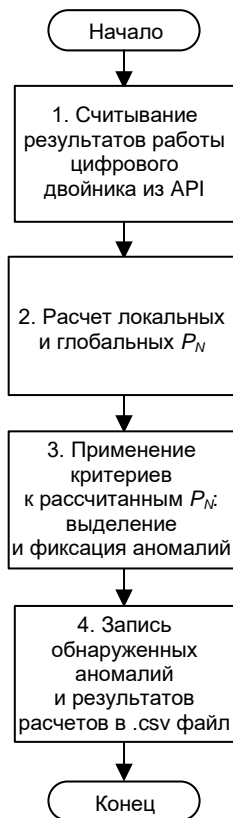


Рис. 13. Блок-схема алгоритма программного обеспечения для поиска аномалий в работе солнечных панелей, разработанного на основе предложенной методики

Fig. 13. Block diagram of the software algorithm for detecting anomalies in the operation of solar panels, developed on the basis of the proposed methodology

Заключение. В исследовании установлено, что, основываясь на нормализованных значениях мощностей в МРР P_N для всех панелей солнечной электростанции, полученных с использованием цифрового двойника, можно обнаруживать аномальную работу отдельных панелей. При использовании в анализе отклонений нормализованных значений мощностей в МРР P_N локальных критериев уровня инвертора об аномальной работе солнечной панели свидетельствует отклонение 9 % и выше. Это подтверждает непосредственный анализ результатов телеметрии, полученных в ходе работы солнечной электростанции.

Таким образом, предлагаемые методика и алгоритм поиска аномалий в работе электростанции смогут оперативно помочь обнаружению солнечных панелей, которые имеют отклонения в режиме работы, что повысит скорость реагирования на появление дефектов в солнечных панелях, а значит и эффективность работы солнечной электростанции.

Вклад авторов. С. В. Валевич разработал алгоритмы и программное обеспечение для выборки и фильтрации данных в соответствии с методикой исследования. К. С. Дик провел сравнительный анализ кривых напряжения силы тока и температуры солнечных панелей, в которых обнаружены аномалии, работал с графическим материалом, редактировал текст рукописи. И. И. Пилецкий сформулировал выводы по результатам исследования. И. Крузе интерпретировал полученные результаты и провел экспертизу результатов исследования. Р. М. Асимов разработал методику поиска аномалий на основе результатов работы цифрового двойника солнечных па-

нелей. В. С. Осипович разработал методику поиска аномалий на основе результатов работы цифрового двойника солнечных панелей. Все авторы принимали участие в формулировании гипотез, целей и задач исследования.

Список использованных источников

1. Dorin, P. Modelling and simulation of photovoltaic cells / P. Dorin, C. Farcas, I. Ciocan // *ACTA Technica Napocensis*. – 2008. – Vol. 49, no. 1. – P. 42–47.
2. Modeling and simulation of energy recovery from a photovoltaic solar cell / Adeniyi O. D. [et al.] // *Nigerian J. of Technological Research*. – 2016. – Vol. 11. – P. 26–31.
3. MATLAB/Simulink based modelling of solar photovoltaic cell / T. Salmi [et al.] // *Intern. J. of Renewable Energy Research*. – 2012. – Vol. 2, no. 2. – P. 213–218.
4. Tina, G. Monitoring and diagnostics of photovoltaic power plants / G. Tina, F. Cosentino, C. Ventura // *Renewable Energy in the Service of Mankind* / ed. A. Sayigh. – Springer, Cham, 2016. – Vol. 2. – P. 505–516.
5. Ibbini, M. Analysis and design of a maximum power point tracker for a stand-alone photo voltaic system using Simscape / M. Ibbini, A. Adawi // *Intern. J. of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 8, no. 1. – P. 54–57.
6. Rashid, Md. M. Design and construction of the solar photovoltaic simulation system with the implementation of MPPT and boost converter using Matlab/Simulink / Md. M. Rashid, A. Habib, M. Mahdi Hasan // *Asian J. of Current Research*. – 2018. – Vol. 3, no. 1. – P. 27–36.
7. Flatness-based control for the maximum power point tracking in a photovoltaic system / G.-A. Leopoldo [et al.] // *Energies*. – 2019. – Vol. 12. – P. 1843–1862. <https://doi.org/10.3390/en12101843>
8. Modeling of PV module with consideration of environmental factors / N. Kishor [et al.] // *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conf. Europe (ISGT Europe)*, Gothenburg, Sweden, 11–13 Oct. 2010. – Gothenburg, 2010. – P. 121–126.
9. Simulation of PV array output power for modified PV cell model / N. Kishor [et al.] // *2010 IEEE Intern. Conf. on Power and Energy*, Kuala Lumpur, Malaysia, 29 Nov. – 01 Dec. 2010. – Kuala Lumpur, 2010. – P. 533–538.
10. Steady-state model and power flow analysis of grid-connected photovoltaic power system / Y. Wang [et al.] // *2008 IEEE Intern. Conf. on Industrial Technology*, Chengdu, China, 21–24 Apr. 2008. – Chengdu, 2008. – P. 1–6.
11. Virtual laboratory for testing of solar power plants in big data analysis / R. M. Asimov [et al.] // *Collection of Materials of the V Intern. Scientific and Practical Conf. "Big Data and Advanced Analytics"*, Minsk, 13–14 Mar. 2019. – Minsk, 2019. – P. 61–65.
12. Asipovich, V. S. Digital twin in the analysis of a big data / V. S. Asipovich, R. M. Asimov, S. V. Chernoshey // *Collection of Materials of the IV Intern. Scientific and Practical Conf. "Big Data and Advanced Analytics"*, Minsk, 3–4 May 2018. – Minsk, 2018. – P. 69–78.
13. Digital twin for PV module fault detection / S. Valevich [et al.] // *J. of Engineering Science*. – 2020. – Vol. XXVII, no. 4. – P. 80–87.
14. Digital twin for PV plant's power generation analysis / R. M. Asimov [et al.] // *Collection of Materials of the VI Intern. Scientific and Practical Conf. "Big Data and Advanced Analytics"*, Minsk, 20–21 May 2020. – Minsk, 2020. – P. 78–88.
15. Информационное обеспечение мониторинга технического состояния солнечных электростанций / С. В. Валеvич [и др.] // *Информационные технологии*. – 2020. – Т. 26, № 10. – С. 594–601.

References

1. Dorin P., Farcas C., Ciocan I. Modelling and simulation of photovoltaic cells. *ACTA Technica Napocensis*, 2008, vol. 49, no. 1, pp. 42–47.
2. Adeniyi O. D., Ali D. A., Olutoye M. A., Adeniyi M. I., Azeez O. S., ..., Eniafe B. O. Modeling and simulation of energy recovery from a photovoltaic solar cell. *Nigerian Journal of Technological Research*, 2016, vol. 11, pp. 26–31.
3. Salmi T., Bouzguenda M., Gastli A., Masmoudi A. MATLAB/Simulink based modelling of solar photovoltaic cell. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 213–218.
4. Tina G., Cosentino F., Ventura C. Monitoring and diagnostics of photovoltaic power plants. *Renewable Energy in the Service of Mankind*. In A. Sayigh (ed.), Springer, Cham, 2016, vol. 2, pp. 505–516.

5. Ibbini M., Adawi A. Analysis and design of a maximum power point tracker for a stand-alone photo voltaic system using simscape. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 2019, vol. 8, no. 1, pp. 54–57.
6. Rashid Md. M., Habib A., Mahdi Hasan M. Design and construction of the solar photovoltaic simulation system with the implementation of MPPT and boost converter using Matlab/Simulink. *Asian Journal of Current Research*, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 27–36.
7. Leopoldo G.-A., Belem S., Otniel P.-R., Juan C. Á.-V., Pánfilo R. M.-R., Rigoberto M.-M. Flatness-based control for the maximum power point tracking in a photovoltaic system. *Energies*, 2019, vol. 12, pp. 1843–1862. <https://doi.org/10.3390/en12101843>
8. Kishor N., Villalva M., Mohanty S. R., Filho E. Modeling of PV module with consideration of environmental factors. *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), Gothenburg, Sweden, 11–13 October 2010*. Gothenburg, 2010, pp. 121–126.
9. Kishor N., Mohanty S. R., Villalva M., Filho E. Simulation of PV array output power for modified PV cell model. *2010 IEEE International Conference on Power and Energy, Kuala Lumpur, Malaysia 29 November – 01 December 2010*. Kuala Lumpur, 2010, pp. 533–538.
10. Wang Y., Chun-Sheng W., Hua L., Hong-Hua X. Steady-state model and power flow analysis of grid-connected photovoltaic power system. *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology, Chengdu, China, 21–24 April 2008*. Chengdu, 2008, pp. 1–6.
11. Asimov R. M., Valevich S. V., Kruse I., Asipovich V. S. Virtual laboratory for testing of solar power plants in big data analysis. *Collection of Materials of the V International Scientific and Practical Conference "Big Data and Advanced Analytics", Minsk, 13–14 March 2019*. Minsk, 2019, pp. 61–65.
12. Asipovich V. S., Asimov R. M., Chernoshey S. V. Digital twin in the analysis of a big data. *Collection of Materials of the IV International Scientific and Practical Conference "Big Data and Advanced Analytics", Minsk, 3–4 May 2018*. Minsk, 2018, pp. 69–78.
13. Valevich S., Asimov R., Kruse I., Asipovich V. Digital twin for PV module fault detection. *Journal of Engineering Science*, 2020, vol. XXVII, no. 4, pp. 80–87.
14. Asimov R. M., Valevich S. V., Kruse I., Asipovich V. S. Digital twin for PV plant's power generation analysis. *Collection of Materials of the VI International Scientific and Practical Conference "Big Data and Advanced Analytics", Minsk, 20–21 May 2020*. Minsk, 2020, pp. 78–88.
15. Valevich S. V., Asipovich V. S., Kruse I., Asimov R. M. *Information support for monitoring the technical condition of solar power plants*. *Informacionnie tehnologii [Information Technology]*, 2020, vol. 26, no. 10, pp. 594–601 (In Russ.).

Информация об авторах

Валевич Сергей Владимирович, магистр технических наук, аспирант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
<https://orcid.org/0000-0001-9324-8790>

Дик Константин Сергеевич, аспирант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
<https://orcid.org/0009-0006-8750-0738>

Пилецкий Иван Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информатики, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
<https://orcid.org/0009-0002-2252-0835>

Крузе Ингмар, директор, Sunsniffer LTD.
<https://orcid.org/0000-0001-7074-6172>

Асимов Рустам Мустафьевич, кандидат технических наук, директор, ООО Сенсотроника.
<https://orcid.org/0000-0002-4033-4238>

Осипович Виталий Семенович, кандидат технических наук, доцент, технический директор, Novotech Lab LTD.
<https://orcid.org/0000-0001-9658-2866>

Information about the authors

Sergey V. Valevich, M. Sc. (Eng.), Postgraduate Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
<https://orcid.org/0000-0001-9324-8790>

Konstantine S. Dzick, Postgraduate Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
<https://orcid.org/0009-0006-8750-0738>

Ivan I. Pilecki, Ph. D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Associate Professor Department of Informatics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
<https://orcid.org/0009-0002-2252-0835>

Kruse Ingmar, CEO, Sunsniffer LTD.
<https://orcid.org/0000-0001-7074-6172>

Roustam M. Asimov, Ph. D. (Eng.), CEO, Sensotronica LTD.
<https://orcid.org/0000-0002-4033-4238>

Vitali S. Asipovich, Ph. D. (Eng.), Associate Professor, CTO, Novotech Lab LTD.
<https://orcid.org/0000-0001-9658-2866>