



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-113-120>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.42

## МЕТОДИКА ПОИСКА ДЕФЕКТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ В ДАННЫХ ТЕЛЕМЕТРИИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

К. С. ДИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 01.06.2023*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Поиск неисправных, а значит, работающих в аномальном режиме солнечных панелей на электростанции является актуальной задачей в условиях развития и роста доли солнечной энергетики в выработке электроэнергии. Исследования нацелены на разработку и оценку результативности новой методики и программного алгоритма поиска аномалий в работе солнечных панелей на основе результатов работы цифрового двойника, созданного и обученного по данным телеметрии солнечной электростанции. Методика основана на исследованиях отклонений значений мощности в точке максимальной эффективной работы солнечной панели, рассчитанной цифровым двойником, от среднестатистических значений по электростанции. С применением предлагаемой методики за полгода прямых наблюдений обнаружены и подтверждены 16 аномалий в работе солнечных панелей электростанции. Установлено, что при анализе отклонений нормализованных значений мощностей в точке максимальной мощности  $P_N$  возможно обнаружение солнечных панелей, которые имеют дефекты или работают с потерей эффективности.

**Ключевые слова:** солнечная панель, нормализованное значение мощности, поиск аномалий, цепочка солнечных панелей, солнечная электростанция, точка максимальной мощности.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Автор благодарит директора ООО «Сенсотроника» Рустама Асимова и директора LTD Sansniffer (Германия) Ингмара Крузе за предоставленный доступ к результатам телеметрии и API цифрового двойника.

**Для цитирования.** Дик, К. С. Методика поиска дефектных солнечных панелей в данных телеметрии электростанции на основе результатов работы цифрового двойника / К. С. Дик // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 113–120. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-113-120>.

## A METHOD FOR SEARCHING FOR DEFECTIVE SOLAR PANELS IN TELEMETRY DATA OF A POWER PLANT BASED ON THE RESULTS OF A DIGITAL TWIN

KANSTANTIN S. DZIK

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 01.06.2023*

**Abstract.** Searching for faulty, and therefore operating in abnormal mode, solar panels at a power plant is an urgent task in the context of the development and growth of the share of solar energy in electricity generation. The research is aimed at developing and evaluating the effectiveness of a new methodology and software algorithm

for searching for anomalies in the operation of solar panels based on the results of a digital twin created and trained using telemetry data from a solar power plant. The methodology is based on studies of deviations in power values at the point of maximum efficient operation of the solar panel, calculated by the digital twin, from the average statistical values for the power plant. Using the proposed methodology, over six months of direct observations, 16 anomalies in the operation of the solar panels of the power plant were discovered and confirmed. It has been established that when analyzing deviations of normalized power values at the maximum power point  $P_N$ , it is possible to detect solar panels that have defects or operate with loss of efficiency.

**Keywords:** solar panel, normalized power value, anomaly search, solar panel chain, solar power plant, maximum power point.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**Gratitude.** The author thanks the director of Sensotronika LLC Rustam Asimov and the director of LTD Sansniffer (Germany) Ingmar Kruse for providing access to the telemetry results and the digital twin API.

**For citation.** Dzik K. S. (2023) A Method for Searching for Defective Solar Panels in Telemetry Data of a Power Plant Based on the Results of a Digital Twin. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 113–120. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-113-120> (in Russian).

## Введение

Ежегодный прирост выработки солнечных электростанций в мире продолжает увеличиваться. Согласно отчету Международного энергетического агентства за 2023 г. ([https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/IEA\\_PVPS\\_Snapshot\\_2023.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/IEA_PVPS_Snapshot_2023.pdf)), в 2022-м мощность солнечных электростанций в мире увеличилась на 240 ГВт, что вдвое больше прироста в 2020 г. Увеличение объемов выработки электроэнергии посредством солнечных электростанций стимулирует развитие систем мониторинга технического состояния солнечных электростанций, а также способов автоматизации поиска неисправных солнечных панелей и фактов аномального их функционирования.

Существуют облачные системы мониторинга, используемые для этой цели (<https://www.solarfeeds.com/mag/solar-monitoring-systems-in-the-world/>; <https://www.sunsniffer.de/en/solution/what-is-sunsniffer>), которые позволяют собирать данные телеметрии при оснащении солнечных электростанций соответствующим оборудованием и средствами связи. С помощью этих систем можно анализировать работу солнечной электростанции в целом и отдельных солнечных панелей в частности посредством статистических отчетов и графиков, предоставляемых через веб-интерфейс. Как правило, системы мониторинга сохраняют результаты измерения напряжения, температуры, силы тока и освещенности каждой панели электростанции. Однако обнаружение аномалий в работе отдельных солнечных панелей и их классификация зависят от квалификации пользователя системы мониторинга, а также от наличия функций по обнаружению аномалий и неисправных панелей в используемой системе.

Для решения задачи поиска аномалий в работе солнечных панелей с помощью данных телеметрии применяют сравнение результатов моделирования солнечных панелей с измеренными данными [1–3]. Альтернативным решением являются методики и алгоритмы оценки так называемой точки максимальной мощности (МРР – комбинации силы тока и напряжения панели, при которых съем энергии является оптимальным) для солнечных панелей электростанции при определенных условиях [4–6]. Однако зачастую такие способы поиска аномалий в работе электростанции требуют установки дополнительного оборудования для получения информации, необходимой для правильного применения методик и алгоритмов, либо не учитывают того факта, что на точку максимальной мощности, выбранную инвертором, оказала влияние одна дефектная панель цепочки, подключенной к нему.

Недостатки методик моделирования работоспособности солнечных панелей попытались нивелировать авторы [7, 8]. Результаты работы цифрового двойника позволяют использовать расчетные значения мощности МРР и вольт-амперные характеристики для каждой солнечной панели в отдельности. Цель исследований автора – разработка методики и программного средства обнаружения аномалий в работе солнечных панелей по результатам телеметрии (полученной с использованием цифрового двойника исследуемой электростанции) на основании мощности МРР для каждой солнечной панели с учетом изменения от месяца к месяцу.

## Методика проведения эксперимента

Информация об исследуемой солнечной электростанции: называется Südstadt-Forum, располагается в Нюрнберге, Германия. В состав установки входят три инвертора (модели SUN2000-20KTL, Sinvert PVM17 и Sinvert PVM20) с 16 цепочками солнечных панелей (287 шт.), подключенных к ним. Каждая цепочка состоит из 18 фотоэлектрических монокристаллических модулей M190 (STORM Energy GmbH, Германия). Все солнечные панели оснащены датчиками, которые осуществляют измерение напряжения на их разъемах и температуры внутри корпуса каждой панели, а также передают результаты измерений по силовым проводам на устройства сбора данных. В свою очередь, устройство сбора данных осуществляет измерение силы тока в цепочке солнечных панелей и отправляет результаты изменений на сервер.

Платформа цифрового двойника предоставляет API [9], 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 характеристики: напряжение  $U$ , силу тока  $I$ , температуру в корпусе солнечной панели  $T$ , уровень освещенности  $G$ , временную метку  $t$ . Интервал фиксации перечисленных параметров – 2 мин. Набор данных для исследования был собран с помощью телеметрии с июня 2019 г. по ноябрь 2019-го включительно. В расчетах использовались только те точки данных, которые удовлетворяли условиям: уровень освещенности  $G > 300 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ; сила тока в цепочке  $I > 2 \text{ А}$ ; напряжение модуля  $U > 10 \text{ В}$ .

Результат работы цифрового двойника API включает следующие параметры, определенные в смоделированных стандартных условиях испытаний (STC) для каждой солнечной панели электростанции: выходную мощность в точке MPP  $P_{\text{MPP}}$ ; напряжение  $U_{\text{MPP}}$  и силу тока  $I_{\text{MPP}}$  в точке MPP; последовательное и параллельное электрическое сопротивление; ток короткого замыкания; напряжение холостого хода. Для реализации и проверки предложенных методов использовалась программная платформа Node.js вместе с распараллеливанием `async/await` для ускорения вычислений с большим количеством солнечных панелей.

Исходные точки данных, полученных в результате расчета цифровым двойником, имели следующие особенности: мощность в MPP для STC (температура окружающей среды  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ , уровень освещенности  $1000 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ), идентификатор модуля, календарный месяц. При анализе данных использовали нормализованные значения мощностей в MPP  $P_N$  для всех солнечных панелей, которые рассчитывались по формуле

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

где  $P_m$  – глобальное медианное значение мощности, вычисляется как среднее значение по всем медианам строк:

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

$P_s$  – медианное значение мощности  $P_{\text{MPP}}$  для отдельной цепочки последовательно подключенных солнечных панелей;  $n$  – количество цепочек в электростанции.

Дисперсию данных рассчитывали как для уровня цепочки, так и для панельного уровня по формуле

$$S^2 = \frac{\sum (X - M)^2}{N - 1}, \quad (3)$$

где  $S^2$  – дисперсия выборки;  $X$  – значение в баллах;  $M$  – среднее значение выборки;  $N$  – количество баллов.

Результаты расчета нормализованных значений мощностей в MPP  $P_N$  для всех солнечных панелей в предыдущем месяце сравнивали с аналогичными результатами расчета для текущего месяца. Если отличия в значениях  $P_N$  для конкретной солнечной панели (цепочки панелей) были больше порогового, то отмечали аномалии в их работе и осуществляли проверку на наличие дефектов. Разработанная методика поиска динамических аномалий включала два уровня: цепочки панелей и единичные солнечные панели. В качестве пороговых использовали значения 5 и 10 %.

Такая методика оценки наличия аномалий в работе солнечной электростанции помогает выявить динамические (месяц к месяцу) изменения, которые могут быть пропущены при других методиках анализа, не учитывающих изменение параметров от месяца к месяцу. Например, могут быть обнаружены некоторые проблемы в случае регулярной чистки модуля. При анализе найденных с использованием разработанной методики аномалий и дефектов для сравнения были использованы следующие методики.

1. Методология анализа наблюдения и оценки напряжения и тока [10] позволяет распознать тип дефекта по специальным расчетным параметрам:  $R_U$ ,  $R_I$  – индикаторы напряжения и силы тока солнечной панели;  $U_M$ ,  $I_M$  – выходное напряжение и ток в точке максимальной мощности солнечной панели в безотказном режиме работы;  $R_{UM}$ ,  $R_{IM}$  – индикаторы напряжения и силы тока солнечной панели в безотказном режиме работы;  $R_{US}$  – индикатор напряжения при наличии короткозамкнутой солнечной панели в одной из цепочек;  $R_{IO}$  – индикатор наличия в цепочке солнечных панелей неисправности обрыва цепи;  $T_{IO}$  – порог обнаружения неисправности разомкнутой цепи;  $T_{US}$  – порог короткого замыкания, свидетельствует о наличии одной или нескольких короткозамкнутых солнечных панелей в цепочке;  $T_{IP}$  – порог ошибок частичного затенения;  $R_{UP}$ ,  $R_{IP}$  – индикаторы напряжения и силы тока частичных замыканий;  $\varepsilon$  – допустимый коэффициент смещения при обнаружении неисправности, влияет на чувствительность алгоритма расчетов. Перечисленные параметры необходимы для классификации дефектов.

Методика позволяет группировать солнечные панели по типам дефектов: обрыв цепи, короткое замыкание, частичное затенение, деградационная неисправность и т. д. В качестве исходных данных для расчета перечисленных параметров были использованы значения  $P_{MPP}$ ,  $U_{MPP}$ ,  $U_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $K_i$  солнечных панелей, полученные из цифрового двойника DT API [9], и данные телеметрии конкретных точек ( $G$  и  $T$ ). Рассчитанные таким образом характеристики необходимы для реализации алгоритма классификации дефектов. Он группирует дефекты по нескольким типам: обрыв цепи, короткое замыкание, частичное затенение и т. д. Описание алгоритма и применение параметров изложены в [10].

2. Мониторинг с помощью методики поиска аномалий в данных телеметрии солнечной электростанции на основе анализа нормализованных значений мощности [11].

3. Анализ кривых напряжения и силы тока в зависимости от времени для солнечных панелей с обнаруженными по новой методике аномалиями, визуальный осмотр панелей, а также оценка их общей выработки энергии.

### Результаты исследований и их обсуждение

Методика поиска динамических аномалий нацелена на поиск аномалий в работе солнечных панелей, зависящих от времени. Это помогает идентифицировать и исследовать некоторые процессы, непостоянные по своей природе, и, в частности, оценить качество очистки солнечной панели. При анализе на уровне цепочек использовали два пороговых значения – 10 и 5 %. Порог 10 % не дает результата обнаружения (цепочки с аномалиями не обнаружены). Порог 5 % позволил обнаружить две аномалии одной и той же цепочки панелей: июль – август, цепочка String 1.1 показывает падение производительности на 8,4 %; август – сентябрь, цепочка String 1.1 показывает прирост производительности на 7,9 %. При анализе на уровне солнечной панели были использованы пороговые значения 5 и 10 %. Результаты применения методики с пороговым значением 10 % представлены в табл. 1.

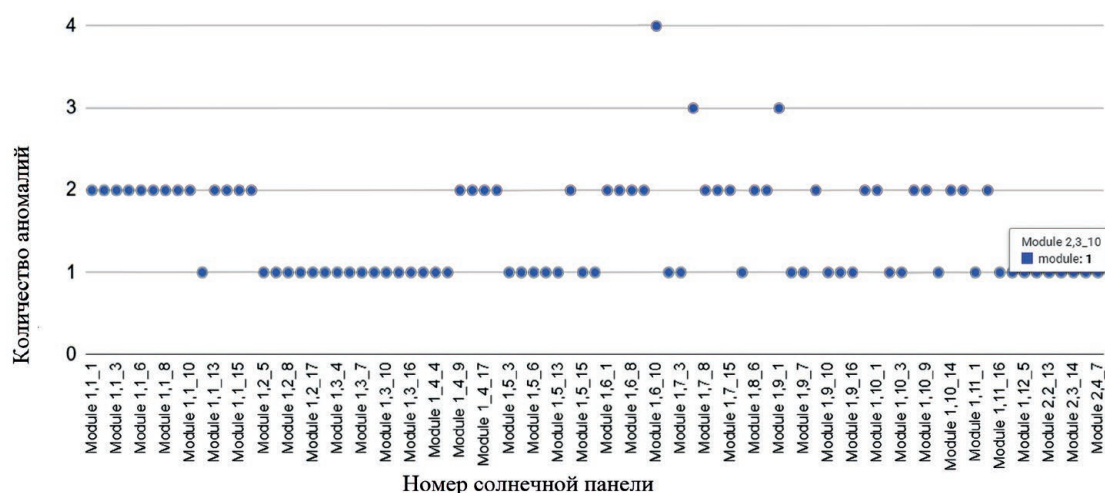
Методика позволила выявить 16 аномалий в работе 15-ти солнечных панелей. Установлено, что большинство зарегистрированных аномалий были в периоды июль – август, сентябрь – октябрь и октябрь – ноябрь. Это указывает на частичное затенение панелей солнечной электростанции, а также может быть вызвано изменением температуры окружающей среды.

При использовании порогового значения 5 % было обнаружено 125 аномалий, что слишком много для прямого анализа. Однако нанесение на график количества обнаруженных на солнечных панелях аномалий (рис. 1) позволило выявить три панели (Module 1,6\_10; Module 1,7\_7; Module 1,9\_1), у которых производительность от месяца к месяцу менялась три и более раз.

В целом для анализа на уровне цепочек панелей дисперсия полученных данных, рассчитанная по формуле (3), составляет 1,43 %, на уровне панели – 2,08 %. На рис. 2 отражены временные ряды напряжения  $U$  солнечной панели с номером Module 1.6\_9 в сравнении с исправной панелью с номером Module 1,6\_5 за 4 октября 2019 г.

**Таблица 1.** Результаты применения методики динамического поиска аномалий с использованием порогового значения 10 % на уровне солнечных панелей  
**Table 1.** Results of applying the dynamic anomaly search technique using a threshold value of 10 % at the level of solar panels

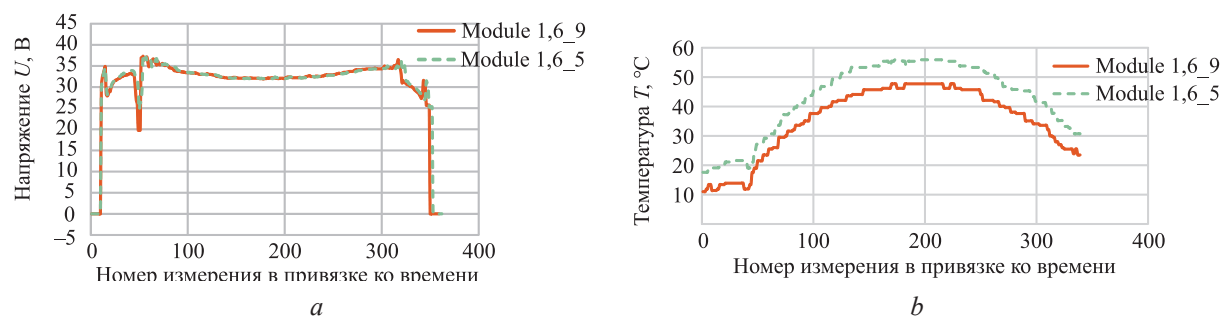
Количество аномалий / Anomalies count	Номер солнечной панели / Solar panel number	От месяца / Month from	К месяцу / Month to	Отклонение $P_N$ , % / Deviation $P_N$ , %
16	Module 1,1_2	Июль 2019	Август 2019	-10,60
	Module 1,1_3	Июль 2019	Август 2019	-10,40
	Module 1,1_4	Июль 2019	Август 2019	-12,20
		Август 2019	Сентябрь 2019	10,80
	Module 1,1_13	Июль 2019	Август 2019	-10,10
	Module 1,1_14	Июль 2019	Август 2019	-10,10
	Module 1_4_9	Октябрь 2019	Ноябрь 2019	-12,50
	Module 1_4_13	Октябрь 2019	Ноябрь 2019	-12,60
	Module 1_4_17	Октябрь 2019	Ноябрь 2019	-13,60
	Module 1,5_6	Октябрь 2019	Ноябрь 2019	-11,40
	Module 1,5_14	Сентябрь 2019	Октябрь 2019	-10,10
	Module 1,6_9	Сентябрь 2019	Октябрь 2019	-10,90
	Module 1,7_8	Сентябрь 2019	Октябрь 2019	-10,30
	Module 1,8_15	Июль 2019	Август 2019	-10,40
	Module 1,10_7	Июль 2019	Август 2019	-11,00
	Module 1,11_15	Октябрь 2019	Ноябрь 2019	-47,70



**Рис. 1.** Распределение динамических аномалий солнечных панелей (порог 5 %)  
**Fig. 1.** Distribution of dynamic anomalies of solar panels (threshold 5 %)

Кривая напряжения  $U$  солнечной панели с номером Module 1,6\_9 (рис. 2, а) показывает типичное поведение исправной солнечной панели и практически не отличается от кривой напряжения солнечной панели Module 1,6\_5. Однако фактическая температура внутри корпуса солнечной панели Module 1,6\_9 на 8–9 °С ниже, чем в корпусе Module 1,6\_5. При прочих равных условиях работы (освещенность, затененность) солнечная панель со сниженной температурой преобразует солнечную энергию в электрическую с большей эффективностью. Поэтому разработанная методика и обнаружила Module 1,6\_9 как работающую с отклонением от нормы в октябре 2019 г.

На рис. 3 отражены временные ряды напряжения  $U$  солнечной панели с номером Module 1,11\_15 в ясные солнечные дни 4 октября и 23 ноября 2019 г. Кривая напряжения  $U$  солнечной панели Module 1,11\_15 показывает, что в течение дня на сервер не приходили результаты измерений. А это говорит об отсутствии питания на датчике в солнечной панели. Такая ситуация, как правило, возникает при срабатывании защитных диодов, которые отключают ячейки солнечной панели от цепочки в случае, когда напряжение на солнечной панели менее 20 В. Это позволяет инвертору и исправным солнечным панелям продолжать работать в оптимальном режиме генерации электроэнергии.



**Рис. 2.** Временные ряды напряжения (а) и температуры (b) в корпусе солнечных панелей с номерами Module 1,6\_9 и Module 1,6\_5 за 4 октября 2019 г.

**Fig. 2.** Time series voltage (a) temperature (b) in the case of solar panels with numbers Module 1,6\_9 and Module 1,6\_5 for October 4, 2019



**Рис. 3.** Временные ряды напряжения солнечной панели с номером Module 1,11\_15 в солнечные дни 4 октября и 23 ноября 2019 г.

**Fig. 3.** Time series voltage solar panels with numbers Module 1,11\_15 on sunny days for October 4 and November 23, 2019

Разработанная методика поиска динамических аномалий подходит для обнаружения проблем в работе солнечных панелей, связанных со временем (например, некоторые из панелей имеют более низкую производительность в течение или после определенного месяца). Обнаружение аномалий с помощью этой методики существенно зависит от выбранного порогового значения. Сравним результаты, полученные с помощью разработанной методики поиска динамических аномалий и с помощью методологии наблюдения и оценки напряжения и силы тока [10]. Использование методологии наблюдения и оценки напряжения и силы тока при стандартном значении  $\varepsilon = 2\%$ , рекомендуемом в [10], не позволяет обнаружить какие-либо аномалии, как и при  $\varepsilon = 5,5\%$ . Методология показывает, что никаких дефектов или аномалий в солнечных панелях электростанции нет. При большем значении коэффициента  $\varepsilon$  увеличивается чувствительность алгоритма и получаются следующие результаты: при  $\varepsilon = 5,8\%$  обнаружено 44 дефекта, при  $\varepsilon = 6\%$  – 312, при  $\varepsilon = 6,5\%$  – 1147, при  $\varepsilon = 7\%$  – 1387, при  $\varepsilon = 10\%$  – 1714 дефектов. Согласно [10], все обнаруженные дефекты относятся к типу «деградационная неисправность» (деградация какого-либо электрического параметра). В результате применения методологии наблюдения и оценки напряжения и силы тока с  $\varepsilon = 5,8\%$  дефекты обнаружены у солнечных панелей с номерами:

- в июле 2019 г.: Module 1,10\_1; Module 1,10\_15; Module 1,11\_12; Module 1,7\_7;
- в августе 2019 г.: Module 1,4\_13; Module 1,11\_12; Module 1,11\_15; Module 1,12\_2; Module 1,2\_14; Module 1,3\_7; Module 1,5\_13; Module 1,5\_14; Module 1,5\_2; Module 1,5\_3; Module 1,6\_1; Module 1,6\_18; Module 1,6\_2; Module 1,6\_3; Module 1,9\_12; Module 1,9\_13; Module 2,1\_1; Module 2,4\_14;
- в сентябре 2019 г.: Module 1,4\_17; Module 1,10\_18; Module 1,10\_6; Module 1,10\_8; Module 1,3\_14; Module 1,3\_15; Module 1,3\_7; Module 1,5\_7; Module 2,1\_1; Module 2,1\_5; Module 2,2\_13;
- в октябре 2019 г.: Module 1,4\_3; Module 1,10\_6; Module 1,10\_8; Module 1,5\_10; Module 1,5\_12; Module 1,5\_15; Module 1,9\_12; Module 1,9\_13; Module 2,2\_13; Module 2,2\_2; Module 2,4\_9.

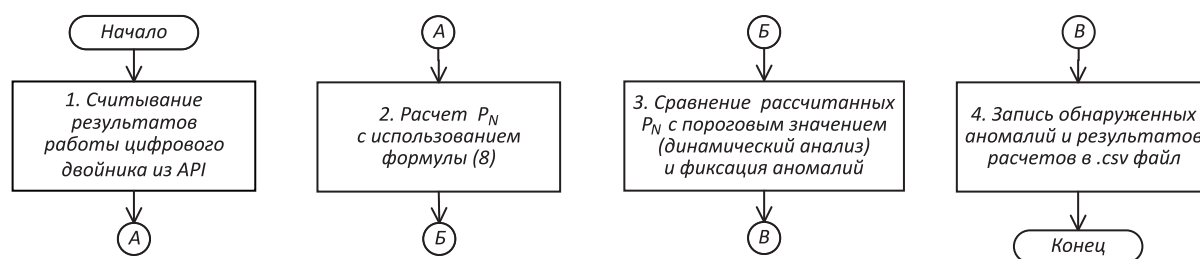
Обнаружено 36 (четыре из них найдены с помощью методики динамического поиска: Module 1,4\_13; Module 1,4\_17; Module 1,5\_14; Module 1,11\_15) дефектных солнечных панелей.

Из них восемь имеют аномалии более чем в одном месяце. Однако месяцы обнаружения аномалий в работе солнечных панелей с номерами Module 1,4\_13; Module 1,4\_17; Module 1,5\_14 и Module 1,11\_15 для методики поиска динамических аномалий и методологии наблюдения и оценки напряжения и силы тока отличаются. Следует отметить, что:

– методика не имеет стабильного результата: в один месяц панель показывает наличие деградиционной неисправности, в другой – не показывает. Это обстоятельство усложняет интерпретацию результатов при применении методики;

– солнечные панели, аномалии в работе которых обнаружены и подтверждены при использовании методики поиска динамических аномалий (табл. 1, рис. 1, 2) и результатов исследования [11], в основном не попали в результаты анализа как дефектные.

На основании проведенных исследований разработали программное средство, алгоритм работы которого представлен на рис. 4. Входными данными являлись JSON-объекты от API цифрового двойника, а выходными – результаты расчета нормализованных значений мощностей в MPP для каждой солнечной панели; уровень отклонения  $P_N$  солнечной панели от порогового значения в процентах; список номеров солнечных панелей, в работе которых обнаружены аномалии; критерии найденных аномалий в виде файла в формате .csv.



**Рис. 4.** Блок-схема алгоритма программного обеспечения для поиска аномалий в работе солнечных панелей

**Fig. 4.** Block diagram of the software algorithm for detecting anomalies in the operation of solar panels

Следует отметить, что разработанные методика и алгоритм применялись к тому же набору данных телеметрии, что и в [11]. Однако аномальная работа солнечных панелей, отмеченных в [11] (это солнечные панели с номерами Module 2,3\_10; Module 1,11\_1; Module 1,4\_3; Module 1,4\_1; Module 1,4\_8; Module 1,4\_1), не была обнаружена в текущем исследовании. И наоборот, текущее исследование позволило выявить солнечные панели (Module 1,1\_3; Module 1,1\_13; Module 1,1\_14; Module 1\_4\_9; Module 1\_4\_13; Module 1\_4\_17; Module 1,5\_14; Module 1,6\_9; Module 1,7\_8; Module 1,8\_15; Module 1,10\_7), которые не обнаружили при использовании методики и алгоритма, приведенных в [11]. Это связано с тем, что солнечные панели, отмеченные в [11], демонстрируют стабильное поведение, т. е. имеют незначительные изменения  $P_N$  от месяца к месяцу.

## Заключение

1. Установлено, что на основании нормализованных значений мощностей в точке максимальной мощности  $P_N$  для всех панелей солнечной электростанции возможно обнаружение аномальной работы отдельных панелей с использованием методики и алгоритма поиска динамических аномалий. В случае применения в разработанной методике порогового значения 10 % в результатах поиска отсутствуют ложные срабатывания: детальный анализ обнаруженных солнечных панелей действительно показал их аномальную работу.

2. Предлагаемая методика поиска динамических аномалий дополняет методику, представленную в [11], и наоборот, методика [11] дополняет разработанную. Это говорит о целесообразности их одновременного использования при мониторинге состояния солнечных электростанций.

## Список литературы

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 / O. D. Adeniyi [et al.] // Nigerian Journal of Technological Research. 2016. Vol. 11. P. 26–31.
3. MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell / T. Salmi [et al.] // International Journal 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*. 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 // *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. 2019. Vol. 8, No 1. P. 54–57.
6. 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.
7. Virtual Laboratory for Testing of Solar Power Plants in Big Data Analysis / R. M. Asimov [et al.] // *Collection of Materials of the V International Scientific and Practical Conference “Big Data And Advanced Analytics”*. 2019. March 13–14. Minsk, BSUIR. P. 61–65.
8. Digital Twin for PV Module Fault Detection / S. Valevich [et al.] // *Journal of Engineering Science*. 2020. Vol. XXVII, No 4. P. 80–87.
9. Информационное обеспечение мониторинга технического состояния солнечных электростанций / С. В. Валеvич [и др.] // *Информационные технологии*. 2020. Т. 26, № 10. С. 594–601.
10. Tingting, Pei. A Fault Detection Method for Photovoltaic Systems Based on Voltage and Current Observation and Evaluation / Pei Tingting, Hao Xiaohong // *Energies*. 2019. Vol. 12, No 9. 1712 p.
11. Методика и программное средство поиска аномалий в данных телеметрии солнечной электростанции / С. В. Валеvич [и др.] // *Информатика*. 2023. Т. 20, № 2. С. 96–110.

## References

1. Dorin P., Farcas C., Ciocan I. (2008) Modelling and Simulation of Photovoltaic Cells. *ACTA Technica Napocensis*. 49 (1), 42–47.
2. Adeniyi O. D., Ali D. A., Olutoye M. A., Adeniyi M. I., Azeez O. S., Otaru A. J., Eniafe B. O. (2016) Modeling and Simulation of Energy Recovery from a Photovoltaic Solar Cell. *Nigerian Journal of Technological Research*. 11, 26–31.
3. Salmi T., Bouzguenda M., Gastli A., Masmoudi A. (2012) MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2 (2), 213–218.
4. Tina G., Cosentino F., Ventura C. (2016) Monitoring and Diagnostics of Photovoltaic Power Plants. *Renewable Energy in the Service of Mankind*. 2, 505–516.
5. Ibbini M., Adawi A. (2019) 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*. 8 (1), 54–57.
6. Leopoldo G.-A., Belem S., Otniel P.-R., Juan C. Á.-V., Pánfilo R. M.-R., Rigoberto M.-M. (2019) Flatness-Based Control for the Maximum Power Point Tracking in a Photovoltaic System. *Energies*. 12, 1843–1862.
7. Asimov R. M., Valevich S. V., Kruse I., Asipovich V. S. (2019) Virtual Laboratory for Testing of Solar Power Plants in Big Data Analysis. In *Collection of Materials of the V International Scientific and Practical Conference “Big Data And Advanced Analytics”*. March 13–14. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 61–65.
8. Valevich S., Asimov R., Kruse I., Asipovich V. (2020) Digital Twin For PV Module Fault Detection. *Journal of Engineering Science*. XXVII (4), 80–87.
9. Valevich S. V., Kruse I., Asimov R. M., Asipovich V. S. (2020) Information Support for Monitoring of Solar Power Station’s Technical State. *Information Technologies*. 26 (10), 594–601 (in Russian).
10. Pei Tingting, Hao Xiaohong (2019) A Fault Detection Method for Photovoltaic Systems Based on Voltage and Current Observation and Evaluation. *Energies*. 12 (9), 1712.
11. Valevich S. V., Dzik C. S., Pilecki I. I., Kruse I., Asimov R. M., Asipovich V. S. (2023) Methods and Programs for Searching for Anomalies in the Telemetry Data of a Solar Power Plant. *Informatics*. 20 (2), 96–110 (in Russian).

## Сведения об авторе

Дик К. С., асп. каф. информатики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

## Адрес для корреспонденции

220018, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Якубовского, 15/1, кв. 358  
Тел.: +375 29 625-10-56  
E-mail: kanstantind@gmail.com  
Дик Константин Сергеевич

## Information about the author

Dzik K. S., Postgraduate at the Department of Informatics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

## Address for correspondence

220018, Republic of Belarus,  
Minsk, Yakubovskogo St., 15-1-358  
Tel.: +375 29 625-10-56  
E-mail: kanstantind@gmail.com  
Dzik Kanstantin Sergeevich