



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-61-69>

УДК 621.311.243

ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТОЙЧИВОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

К. С. ДИК¹, И. В. ГАСЕНКОВА²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

²Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Рассмотрено применение двухдиодной физико-математической модели при анализе телеметрических данных функционирования солнечных панелей с использованием цифровых двойников для контроля эффективности работы солнечных электростанций. Такой подход позволил заменить временные данные функционирования каждой солнечной панели в течение месяца данными из семи выходных электрофизических параметров. Благодаря этому упростилась обработка данных: одна солнечная панель – один набор параметров в месяц. Анализ телеметрических данных с применением цифровых двойников позволяет использовать их для расчета нормализованных значений выходной электрической мощности в точке максимальной выработки электроэнергии для всех солнечных панелей и по результатам находить аномалии в их работе. На примере солнечной электростанции из 272 панелей показана возможность эффективного определения аномально работающих солнечных панелей.

Ключевые слова: солнечная панель, двухдиодная физико-математическая модель, цифровой двойник, нормализованное значение мощности, эффективность работы солнечной электростанции.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дик, С. К. Характеристики устойчивости солнечных батарей в условиях эксплуатации / С. К. Дик, И. В. Гасенкова // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 61–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-61-69>.

CHARACTERISTICS OF SOLAR PANEL STABILITY UNDER OPERATING CONDITIONS

KANSTANTIN S. DZIK¹, IRINA V. GASENKOVA²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²State Scientific and Production Association “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article considers the application of a two-diode physical and mathematical model in the analysis of telemetry data of solar panels using digital twins to monitor the efficiency of solar power plants. This approach made it possible to replace the temporary data of each solar panel's operation during a month with data from seven output electrophysical parameters. This simplified data processing: one solar panel – one set of parameters per month. Analysis of telemetry data using digital twins allows using them to calculate normalized values of the output electric power at the point of maximum electricity generation for all solar panels and, based on the results, to find anomalies in their operation. Using the example of a solar power plant consisting of 272 panels, the possibility of effectively identifying abnormally operating solar panels is shown.

Keywords: solar panel, two-diode physical and mathematical model, digital twin, normalized power value, solar power plant efficiency.

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

For citation. Dzik K. S., Gasenkova I. V. (2025) Characteristics of Solar Panel Stability Under Operating Conditions. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 61–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-61-69> (in Russian).

Введение

Установленная мощность мировой солнечной фотоэнергетики в 2023 г. достигла 1,2 ТВт, что значительно превышает показатели предыдущих лет. Согласно прогнозам Международного энергетического агентства, к 2027-му она может увеличиться до 2,3 ТВт. Доля солнечной энергетики в мировом спросе на электроэнергию составляет 4,5 % и продолжает увеличиваться [1]. Это демонстрирует стремительное развитие отрасли.

Более 90 % современных солнечных фотоэлектрических панелей по-прежнему производятся с использованием кристаллических кремниевых элементов. Эта технология остается доминирующей благодаря своей надежности и относительно низкой стоимости. Производственные мощности по выпуску кремния в 2023 г. оценивались в 1,5–1,7 млн т, причем около 50 000 т использовалось электронной промышленностью. Средние затраты кремния при производстве солнечной энергии снизились до 3,2 г/Вт благодаря улучшению и оптимизации технологических процессов [2].

За период с 2010 по 2023 год средняя стоимость солнечной энергии значительно снизилась: с 0,36 долл. США за 1 кВт·ч в 2010-м до 0,049 долл. США за 1 кВт·ч в 2023-м. Для сравнения: стоимость электроэнергии, вырабатываемой тепловыми и атомными электростанциями, составляет в среднем 0,05–0,07 долл. за 1 кВт·ч. Снижение стоимости солнечной энергии на 90 % за последнее десятилетие стало возможным благодаря технологическим инновациям и масштабированию производства. Стоимость солнечных модулей за этот период уменьшилась на 80 %, что сделало солнечную энергетику одной из самых конкурентоспособных отраслей в энергетическом секторе [1].

Повышение эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую играет ключевую роль как в технологических процессах производства солнечных панелей, так и в их практическом использовании. В связи с этим разработка методов оценки и улучшения эффективности работы солнечных элементов становится важной задачей. Актуальность задачи по поиску аномалий в работе солнечных панелей обусловлена необходимостью обеспечения максимальной эффективности использования солнечной электростанции, которая зависит от своевременного обнаружения неисправностей в ее работе. Множество программных и аппаратных инструментов при мониторинге критически важных параметров функционирования солнечной панели представляет собой комбинации классических способов поиска аномалий в массивах информации. Однако при этом не учитывается ряд отрицательных факторов, влияющих на работу панели, в том числе на долговременную ее стабильность при сохранении условий эксплуатации.

Современная элементная база солнечной энергетики

Современную элементную базу солнечной энергетики можно разделить на четыре технологические группы.

Группа 1. Кремниевые фотоэлементы (рис. 1) делятся на два основных типа: монокристаллические (mono-Si) и поликристаллические (poly-Si). Монокристаллические модули обладают большей эффективностью (до 22–24 %), но их производство дороже. Поликристаллические модули дешевле, однако они менее эффективны (15–18 %) [3, 4].

Группа 2. Каскадные фотоэлементы на основе соединений III и V групп периодической системы. Такие преобразователи солнечной энергии в электрическую могут состоять из каскадов в количестве от одного до пяти и формироваться как путем эпитаксиального выращивания многослойной монокристаллической структуры, так и механической стыковкой отдельных элементов. Эффективность солнечных панелей, созданных на основе каскадных фотоэлементов, варьируется от 27,5 до 46,0 % и зависит от количества каскадов и конечной конструкции [5–9].

Группа 3. Тонкопленочные фотоэлементы. В основе фотоэлектрических элементов этой группы лежат структуры на базе пленок CIGS (медь-индий-галлий-селенид) и теллурида кадмия (CdTe). Эффективность солнечных панелей, созданных по тонкопленочной технологии, — от 14,0 до 23,3 % [10–12].

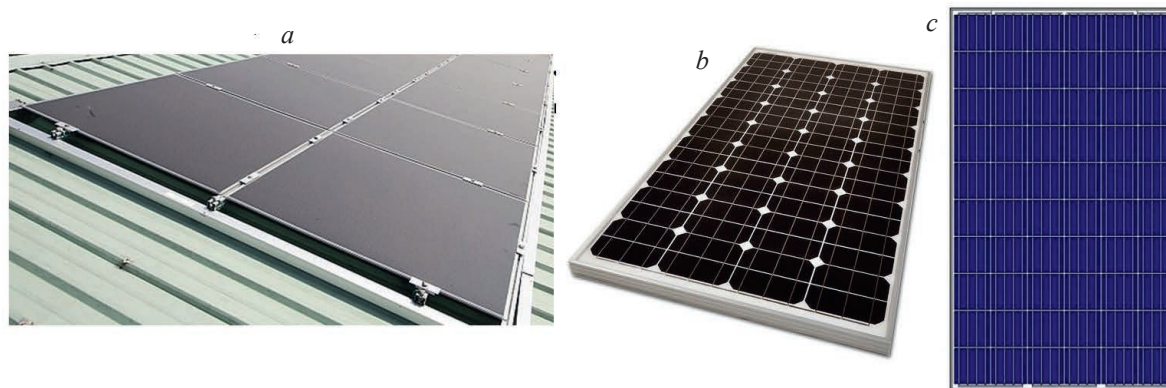


Рис. 1. Виды конструкций солнечных панелей из кремния:

a – аморфного; *b* – монокристаллического; *c* – микроморфного

Fig. 1. Types of solar panel designs made of silicon: *a* – amorphous; *b* – monocrystalline; *c* – micromorphous

Группа 4. В этой группе фотоэлементы созданы на основе пленок из таких материалов, как перовскиты, органические материалы, сенсibilизированные красители, tandemные органические структуры и нанокристаллы (квантовые точки). Эти фотоэлементы относят к числу инновационных, поскольку некоторые из них сегодня являются лабораторными прототипами либо существуют в виде экспериментальных моделей. Достаточно высокие характеристики могут обеспечить солнечные элементы на основе перовскитов [13, 14]. Максимальное значение зафиксированной эффективности для перовскитового фотоэлемента – 22,7 % (2017 г.).

Одним из ключевых направлений развития солнечной энергетики является повышение эффективности фотоэлементов. Поэтому ученые различных стран сосредоточены на исследованиях в области tandemных солнечных элементов: комбинация кремния и перовскита позволяет достичь эффективности более 30 % [15, 16]. Также продолжается совершенствование многослойных и каскадных структур: использование нескольких слоев с разной шириной запрещенной зоны позволяет охватывать более широкий спектр солнечного света. Кроме того, перспективное направление развития отрасли – органические фотоэлементы: легкие и гибкие, они могут использоваться в портативных устройствах и интегрированных системах. Однако их эффективность преобразования пока не превышает 15 % и зависит от формы поверхности солнечных панелей (рис. 2).

Следует отметить, что солнечная энергетика сталкивается с критикой из-за использования токсичных материалов (например, кадмия в CdTe) и высокого энергопотребления при производстве кремния. В ответ на это разрабатываются перерабатываемые модули и программы утилизации солнечных панелей, осуществляется зеленое производство с использованием возобновляемых источников энергии для изготовления солнечных модулей.

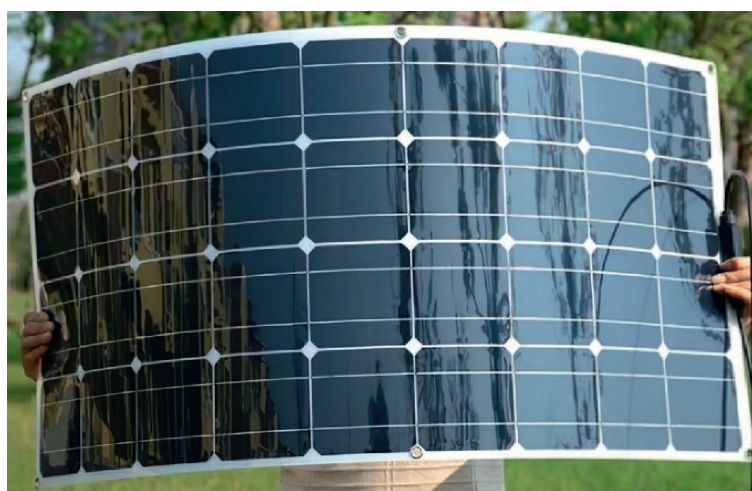


Рис. 2. Гибкая солнечная панель [17]

Fig. 2. Flexible solar panel [17]

Проблемы обеспечения стабильности работы солнечных панелей

Важное значение имеет повышение эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую как на уровне технологических процессов изготовления солнечных панелей, так и при их эксплуатации. Оценка и повышение эффективности эксплуатации солнечных панелей обеспечиваются постоянным сбором данных телеметрии (электрофизических характеристик – силы тока, напряжения, температуры, плотности потока солнечной энергии) о работе солнечных элементов, которая основывается на применении измерительных устройств и приборов сбора и передачи информации. Функциональная схема сбора телеметрии с одной солнечной панели, демонстрирующая ее основные компоненты и процесс работы (начиная от сбора энергии и заканчивая передачей данных и преобразованием энергии), приведена на рис. 3.

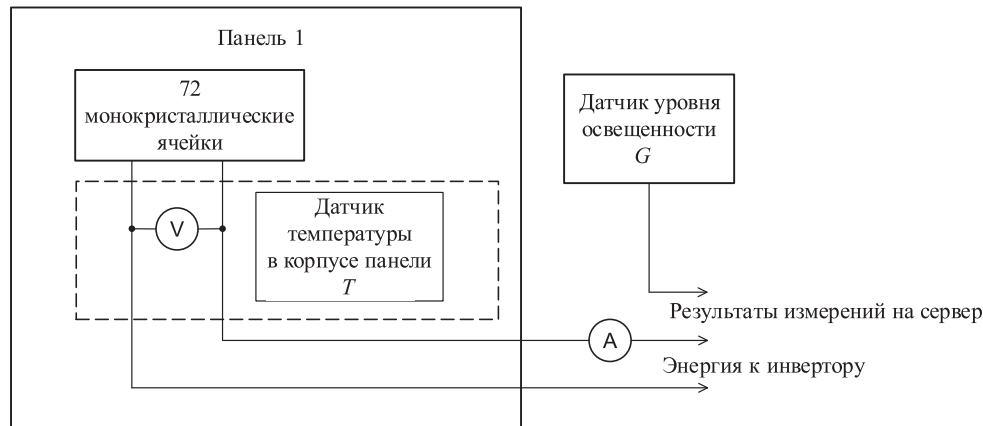


Рис. 3. Функциональная схема для сбора телеметрии с одной солнечной панели

Fig. 3. Functional diagram for collecting telemetry from a single solar panel

В комплект измерительных устройств для сбора результатов телеметрии с солнечной панели, состоящей из 72 монокристаллических ячеек, входят: вольтметр V и датчик температуры T , подключаемые к силовой линии для измерения напряжения и передачи информации о результатах измерения; датчик уровня освещенности G , общий для всей электростанции, который измеряет интенсивность света; амперметр A для измерения силы тока, генерируемой солнечной панелью. Измеренные данные с заданной периодичностью передаются на сервер для их анализа и мониторинга.

Результаты исследований и их обсуждение

Поскольку солнечные панели при подключении к инвертору представляют собой цепочку последовательно включенных панелей, для сбора результатов телеметрии собирается функциональная схема, изображенная на рис. 4.

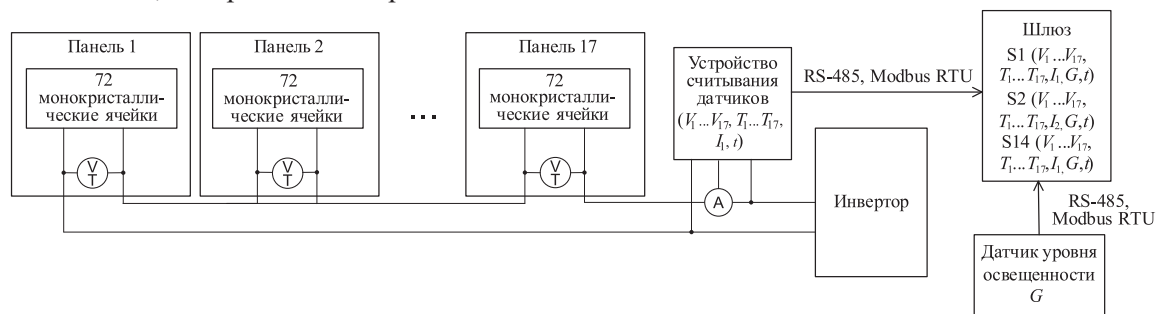


Рис. 4. Функциональная схема для сбора телеметрии с солнечных панелей электростанции

Fig. 4. Functional diagram for collecting telemetry from solar panels of a power plant

Для электростанции, состоящей из 272 солнечных панелей M190 (STORM Energy GmbH, Германия), состав устройств и объем собираемой телеметрии будут выглядеть следующим образом. Собираемые параметры: напряжение V и температура T в каждой солнечной панели, сила тока I в цепочке панелей, уровень энергетической экспозиции G (уровень освещенности). Интервал

сбора результатов измерений – 15 мин с фиксацией даты и времени t . Приборы и измерительные устройства: датчик в солнечной панели производства SunSniffer GmbH & Co (Германия); датчик уровня энергетической экспозиции Irradiance Sensor Si-13TC (Ingenieurbyro Mencke & Tegtmeyer GmbH, Германия); шлюз производства SunSniffer GmbH & Co, записывающий все результаты телеметрии в базу данных на сервер; устройство сбора данных (SunSniffer GmbH & Co) и силы тока с цепочки семнадцати последовательно включенных панелей. В эксперименте использовались результаты телеметрии, собранные в течение семи месяцев работы солнечной электростанции – с мая по ноябрь 2020 г.

Платформа цифрового двойника, применяемого в исследованиях, была основана на двухдиодной модели фотоэлектрической ячейки солнечной панели, приведенной в [18]. Электрическая схема такой модели изображена на рис. 5. Результатом работы цифрового двойника являлись следующие параметры, определенные в смоделированных стандартных условиях испытаний для каждой солнечной панели электростанции: выходная электрическая мощность P_N в точке максимальной выработки электроэнергии (Maximum Power Point, MPP), электрические напряжение и сила тока в MPP, последовательное и параллельное электрические сопротивления, электрический ток короткого замыкания и напряжение холостого хода.

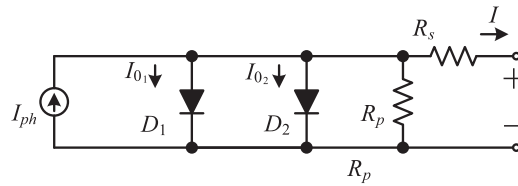


Рис. 5. Электрическая схема двухдиодной модели фотоэлектрической ячейки солнечной панели:

I_{01}, I_{02} – обратный ток насыщения диодов D_1 и D_2 соответственно, А; I_{ph} – фототок, А;
 R_p, R_s – шунтирующее и последовательное сопротивления, Ом; I – сила тока в солнечной панели, А

Fig. 5. Electrical diagram of a two-diode model of a solar panel photovoltaic cell:

I_{01}, I_{02} – reverse saturation current of diodes D_1 and D_2 respectively, А; I_{ph} – photocurrent, А;
 R_p, R_s – shunt and series resistance, Ohm; I – current in the solar panel, А

Для построения цифрового двойника использовались соответствующие уравнения [18] зависимости электрического напряжения V в солнечной панели, I_{ph} и термоЭДС v_T (для каждого диода в отдельности) от уровня солнечной радиации G и от I_{01}, I_{02} :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V + IR_s}{n_1 v_T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V + IR_s}{n_2 v_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p}, \quad (1)$$

$$\text{где } v_T = \frac{v_{T1} v_{T2}}{v_{T1} - v_{T2}}; \quad v_{T1(2)} = n_{s1(2)} k T / q; \quad I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} \left((I_{sc})_{T_1} + K_0 (T - T_1) \right); \quad (I_0)_{T_1} = \left(\frac{(I_{sc})_{T_1}}{e^{\frac{q(V_{OC})_{T_1}}{nkT_1}} - 1} \right);$$

$$I_0 = I_{01} = I_{02} = (I_0)_{T_1} \left(\frac{T}{T_1} \right)^3 e^{\frac{q(E_g)_{T_1}}{nk} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} \right)}.$$

На основе результатов работы цифрового двойника были разработаны две методики для анализа данных телеметрии и поиска аномалий в работе кремниевых солнечных панелей. Нормализованные значения выходной электрической мощности P_N в MPP для всех солнечных панелей рассчитывались по формуле

$$P_N = \frac{P_{MPP} - P_m}{P_m} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где P_{MPP} – выходная мощность в точке MPP, Вт; P_m – глобальная медианная мощность, Вт

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_S}{n};$$

P_S – медианная мощность отдельной цепочки последовательно подключенных солнечных панелей, Вт; n – количество цепочек в электростанции; i – номер цепочки солнечных панелей.

Дисперсия выборки данных S рассчитывалась как для уровня цепочки, так и для панельного уровня

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

где X – значение в баллах; M – среднее значение выборки; N – количество баллов.

Результаты расчета P_N каждой из солнечных панелей группировались различным образом для анализа панели одного инвертора, панели одной электростанции, группировки панелей по медианным значениям и центру масс, одноточечного и линейного значений за исследуемый период. Последовательность группировки позволила начать поиск выбросов на уровне всей электростанции, а затем на каждом этапе группирования постепенно сужать область анализа для выявления локальных проблем с отдельными солнечными элементами и панелями. При этом результаты расчета нормализованных значений P_N в MPP для всех солнечных панелей в предыдущем месяце сравнивали с аналогичными результатами для текущего месяца. Если отклонения в значениях P_N для конкретной солнечной панели (цепочки панелей) составляли величину, больше определенного порогового значения, то в ее работе отмечалось наличие аномалий. Поиск локальных проблем осуществлялся на двух уровнях – в цепочке панелей и в единичных солнечных панелях. В качестве пороговых использовались значения отклонений 5 и 10 %. Такая методика помогает выявить динамические (месяц к месяцу) изменения, которые могут быть пропущены при применении других методик анализа, не учитывающих изменения параметров от месяца к месяцу (табл. 1).

Таблица 1. Результаты применения методики поиска аномалий со значениями отклонений 10 % в единичных солнечных панелях

Table 1. Results of application of the method of searching for anomalies with deviation values of 10 % in single solar panels

Количество аномалий	Номер солнечной панели	От месяца – к месяцу	Отклонение P_N , %
16	Module 1.1.2	Июнь_2020 – июль_2020	–11,60
	Module 1.1.3	Июнь_2020 – июль_2020	–10,80
	Module 1.1.4	Июнь_2020 – июль_2020	–13,20
		Июль_2020 – август_2020	–11,80
	Module 1.1.13	Июнь_2020 – июль_2020	–9,10
	Module 1.1.14	Июнь_2020 – июль_2020	–8,10
	Module 1.4.9	Август_2020 – сентябрь_2020	–11,50
	Module 1.4.13	Август_2020 – сентябрь_2020	–11,40
	Module 1.4.17	Август_2019 – сентябрь_2020	–11,30
	Module 1.5.6	Октябрь_2020 – ноябрь_2020	–11,40
	Module 1.5.14	Сентябрь_2020 – октябрь_2020	–9,10
	Module 1.6.9	Август_2020 – сентябрь_2020	–8,90
	Module 1.7.8	Сентябрь_2020 – октябрь_2020	–11,80
	Module 1.8.15	Июнь_2020 – июль_2020	–9,90
	Module 1.10.7	Июль_2020 – август_2020	–10,10
	Module 1.11.15	Октябрь_2020 – ноябрь_2020	–48,50

На рис. 6 показан уровень генерируемой солнечными панелями в цепочках с номерами Chain 1.4 (рис. 6, а) и Chain 2.3 (рис. 6, б) энергии, рассчитанной с использованием цифрового двойника за период наблюдения (с мая по ноябрь 2020 г.). Полученные уровни энергии отличаются от аналогичных, описанных в [19] для 2019 г.

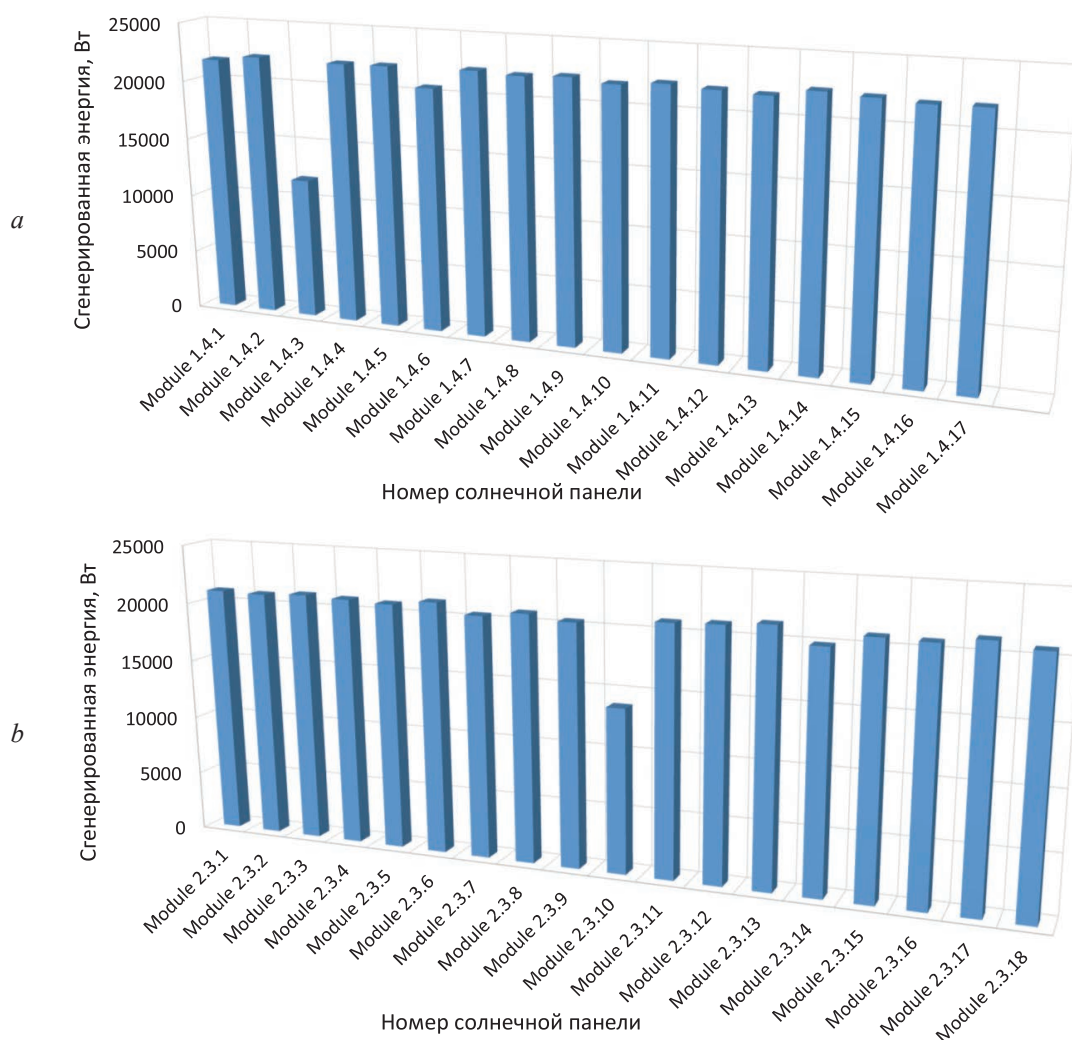


Рис. 6. Уровень генерируемой энергии цепочками солнечных панелей с номерами: *a* – Chain 1.4; *b* – Chain 2.3
Fig. 6. The level of energy generated by solar panels in a chains with a numbers: *a* – Chain 1.4; *b* – Chain 2.3

Заключение

1. Разработана концепция анализа телеметрических данных на солнечных электростанциях с использованием цифровых двойников солнечных панелей. Цифровой двойник строился на двухдиодной физико-математической модели с учетом контролируемых выходных электрофизических параметров отдельных солнечных панелей. Такой подход позволил заменять временные данные функционирования каждой солнечной панели в течение месяца данными из семи выходных электрофизических параметров. То есть обработка данных упростилась: одна солнечная панель – один набор параметров в месяц. По результатам расчета нормализованных значений выходной электрической мощности в точке максимальной выработки электроэнергии для всех солнечных панелей можно определить аномалии в их работе.

2. Установлено, что неэффективно работающая отдельная солнечная панель уменьшает выходную мощность совокупности последовательно включенных панелей примерно на 2,0 %. Это снижает эффективность работы группы других панелей, подключенных к инвертору параллельно с солнечной панелью.

3. Предложенная двухдиодная физико-математическая модель для анализа телеметрических данных солнечных панелей может найти применение в автоматизации систем мониторинга эффективности функционирования солнечных электростанций. Рассмотренные методики мониторинга могут быть применены для контроля качества солнечных панелей при их производстве и для проверки функционирования таких панелей как источников электропитания космических аппаратов и станций.

Список литературы

1. World Energy Outlook 2024 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Date of access: 24.05.2024.
2. New Energy Outlook [Electronic Resource]. Mode of access: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/#exec-summary>. Date of access: 24.05.2024.
3. Wikimedia Commons. File: Best Research-Cell Efficiencies.png [Electronic Resource]. Mode of access: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png. Date of access: 20.02.2018.
4. Outdoor Performance Modeling of Three Different Silicon Photovoltaic Module Technologies / A. Meflah [et al.] // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2017. Vol. 8, No 143.
5. Nguyen, X. H. Mathematical Modeling of Photovoltaic Cell/module/arrays with Tags in Matlab/Simulink / X. H. Nguyen, M. P. Nguyen // Environmental Systems Research. 2015. Vol. 4, No 24. P. 24–32.
6. III–V Multijunction Solar Cells for Concentrating Photovoltaics / H. Cotal [et al.] // Energy & Environmental Science. 2009. Vol. 2, No 2. P. 174–192.
7. High Efficiency III–V Solar Cells / K. W. J. Barnham [et al.] // International School on Crystal Growing of Materials for Energy Production and Energy-Saving Applications: Conf. Proc. 2001.
8. Solar Cell for NASA RAINBOW Concentrator / M. A. Smith [et al.] // Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference: Proceed. of the Conf. 2000. P. 1139–1151.
9. Fan, J. C. C. Thin-Film GaAs Solar Cells / J. C. C. Fan, C. O. Bozler, R. W. McClelland // 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Kissimmee, Florida, May 12–15, 1981: Conf. Record. New York, 1981. P. 375–377.
10. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития / В. А. Меличко [и др.] // Успехи физических наук. 2016. № 186. С. 801–852.
11. Features of KF and NaF Postdeposition Treatments of Cu(In,Ga)Se₂ Absorbers for High Efficiency Thin Film Solar Cells / P. Reinhard [et al.] // Chemistry of Materials. 2015. Vol. 27, Iss. 16. P. 5755–5764.
12. Bonnet, D. Cadmium-Telluride – Material for Thin Film Solar Cells / D. Bonnet, P. Meyers // Journal of Materials Research. 1998. Vol. 13. P. 2740–2753.
13. Integrated Perovskite/Bulk-Heterojunction Toward Efficient Solar Cells / Y. Liu [et al.] // Nano Letters. 2015. Vol. 15, Iss. 1. P. 662–668. <https://doi.org/10.1021/nl504168q>.
14. Snaith, H. J. Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells / H. J. Snaith // The Journal of Physical Chemistry Letters. 2013. Vol. 4, Iss. 21. P. 3623–3630.
15. Synergetic Substrate and Additive Engineering for Over 30%-Efficient Perovskite-Si Tandem Solar Cells / D. Turkyay [et al.] // Joule. 2024. Vol. 8, No 6. P. 1735–1753.
16. Detection of Typical Defects in Silicon Photovoltaic Modules and Application for Plants with Distributed MPPT Configuration / J. Ahmad [et al.] // Energies. 2019. Vol. 12, No 23. P. 4547–4573.
17. Methods for Modelling and Analysis of Bendable Photovoltaic Modules on Irregularly Curved Surfaces / A. Groenewolt [et al.] // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2016. No 7. P. 261–271.
18. Информационное обеспечение мониторинга технического состояния солнечных электростанций / С. В. Валевич [и др.] // Информационные технологии. 2020. Т. 26, № 10. С. 594–601. DOI: 10.17587/it.26.594-601.
19. 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>.

Поступила 21.02.2025

Принята в печать 24.03.2025

References

1. *World Energy Outlook 2024*. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024> (Accessed 24 May 2024).
2. *New Energy Outlook 2024*. Available: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/#exec-summary> (Accessed 24 May 2024).
3. *Wikimedia Commons. File: Best Research-Cell Efficiencies.png*. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png (Accessed 20 February 2018).
4. Meflah, A., Rahmoun K., Mahrane A., Chikh M. (2017) Outdoor Performance Modeling of Three Different Silicon Photovoltaic Module Technologies. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 8, 143–152.
5. Nguyen X. H., Nguyen M. P. (2015) Mathematical Modeling of Photovoltaic Cell/module/arrays with Tags in Matlab/Simulink. *Environmental Systems Research*. 4 (24), 24–32.
6. Cotal H., Fetzer C., Boisvert J., Kinsey G., King R., Hebert P., et al. (2009) III–V Multijunction Solar Cells for Concentrating Photovoltaics. *Energy & Environmental Science*. 2 (2), 174–192.
7. Barnham K. W. J., Bushnell D. B., Connolly J. P., Ekins-Daukes N. J., Kluitinger B. G., Mazzer M., et al. (2001) High Efficiency III–V Solar Cells. *International School on Crystal Growing of Materials for Energy Production and Energy-Saving Applications, Conference Proceedings*.

8. Smith M. A., Sinharoy S., Weizer V. G., Khan O., Pal A.-M., Clark E. B., et al. (2000) Solar Cell for NASA RAINBOW Concentrator. *Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Proceedings of the Conference*. 1139–1151.
9. Fan J. C. C., Bozler C. O., McClelland R. W. (1981) Thin-Film GaAs Solar Cells. *15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Kissimmee, Florida, May 12–15, 1981, Conference Record*. New York. 375–377.
10. Milichko V. A., Shalin A. S., Mukhin I. S., Kovrov A. E., Krasilin A. A., Vinogradov A. V., et al. (2016) Solar Photovoltaics: Current State and Trends. *Physics–Uspekhi*. (186), 801–852 (in Russian).
11. Reinhard P., Bissig B., Pianezzi F., Avancini E., Hagendorfer H., Keller D., et al. (2015) Features of KF and NaF Postdeposition Treatments of Cu(In,Ga)Se₂ Absorbers for High Efficiency Thin Film Solar Cells. *Chemistry of Materials*. 27 (16), 5755–5764.
12. Bonnet D., Meyers P. (1998) Cadmium-Telluride – Material for Thin Film Solar Cells. *Journal of Materials Research*. 13, 2740–2753.
13. Liu Y., Hong Z., Chen Qi, Chang W., Zhou H., Song T.-B., et al. (2015) Integrated Perovskite/Bulk-Heterojunction Toward Efficient Solar Cells. *Nano Letters*. 15 (1), 662–668. <https://doi.org/10.1021/nl504168q>.
14. Snaith H. J. (2013) Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 4 (21), 3623–3630.
15. Turkey D., Artuk K., Chin X.-Yu, Jacobs D., Moon S.-J., Walter A., et al. (2024) Synergetic Substrate and Additive Engineering for Over 30%-Efficient Perovskite-Si Tandem Solar Cells. *Joule*. 8 (6), 1735–1753.
16. Ahmad J., Ciocia A., Fichera S., Murtaza A. F., Spertino F. (2019) Detection of Typical Defects in Silicon Photovoltaic Modules and Application for Plants with Distributed MPPT Configuration. *Energies*. 12 (23), 4547–4573.
17. Groenew A., Bakker J., Hofer J., Nagy Z., Schlüter A. (2016) Methods for Modelling and Analysis of Bendable Photovoltaic Modules on Irregularly Curved Surfaces. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 7, 261–271.
18. Valevich S. V., Osipovich V. S., Kruse I., Asimov R. M. (2020) Information Support for Monitoring of Solar Power Station's Technical State. *Information Technologies*. 26 (10), 594–601. DOI: 10.17587/it.26.594-601 (in Russian).
19. 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).

Received: 21 February 2025

Accepted: 24 March 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Дик К. С., асп. каф. информатики, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Гасенкова И. В., д-р физ.-мат. наук, доц., гл. науч. сотр., Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Адрес для корреспонденции

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

Information about the authors

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

Gasenkova I. V., Dr. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Leading Researcher, State Scientific and Production Association “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”

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