



# Определение состояния фотоэлектрических модулей по их вольт-амперным характеристикам

Эксплуатация фотоэлектрических модулей (ФЭМ) имеет существенные отличия от использования генераторов, преобразующих механическую энергию в электрическую, поскольку только ФЭМ используют в своей конструкции полупроводниковые элементы для преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию.

Солнечные фотоэлементы, как и любой полупроводниковый элемент, способны деградировать на протяжении всего периода эксплуатации модулей. Скорость их деградации зависит не только от качества материалов, используемых для их производства, но и от условий эксплуатации на открытом воздухе [1]. Слежение за деградацией ФЭМ в условиях окружающей среды является сложной задачей, требующей корректировки полученных значений их мощностных характеристик для сравнения с паспортными данными, полученными в лабораторных условиях.

Ещё одним главным отличием в эксплуатации ФЭМ от эксплуатации традиционных генераторов является то, что модуль представляет собой цепь ячеек, последовательно соединённых между собой для набора необходимой мощности. Построение солнечных электростанций производится по такому же принципу последовательного соединения ФЭМ в цепи для достижения расчётного напряжения

системы. Такая сборная цепь создаёт проблему при поиске повреждённых ячеек и требует как визуального контроля, так и проведения измерений.

**Солнечные полупроводниковые фотоэлементы способны деградировать на протяжении всего периода эксплуатации модулей. Скорость их деградации зависит не только от качества материалов, но и от условий эксплуатации на открытом воздухе. Слежение за деградацией ФЭМ в условиях окружающей среды является сложной задачей, требующей корректировки полученных значений их мощностных характеристик**

Одним из наиболее эффективных методов диагностики состояния фотоэлектрических модулей является анализ их вольт-амперных характеристик (ВАХ). ВАХ отражает зависимость тока, протекающего через ФЭМ, от напряжения на его выходе при определенных условиях инсоляции и температуры. Изменения в ВАХ могут свидетельствовать о наличии неисправностей или деградации материалов ФЭМ.

Рецензия эксперта на статью получена 12.03.2025 [The expert review of the article was received on Mart 12, 2025]

УДК 621.383. Научная специальность: 2.4.5.

## Определение состояния фотоэлектрических модулей по их вольт-амперным характеристикам

**И. М. Кирпичникова**, д.т.н., профессор; **В. А. Заварухин**, аспирант; **В. А. Серов**, аспирант; **Е. Д. Слетова**, магистрант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет) [ЮУрГУ (НИУ)], г. Челябинск]

В статье рассматривается использование вольт-амперной характеристики фотоэлектрических модулей, полученной в реальных условиях эксплуатации, как основной характеристики для определения их состояния, а также причины изменения параметров модулей, влияющих на генерацию и преждевременную деградацию.

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, фотоэлектрические модули, вольт-амперная характеристика, состояние модулей, стандартные условия испытания.

UDC 621.383. Scientific specialty number: 2.4.5.

## Determination of the state of photovoltaic modules based on their volt-ampere characteristics

**I. M. Kirpichnikova**, Doctor of Technical Sciences, Professor; **V. A. Zavarukhin**, postgraduate student; **V. A. Serov**, postgraduate student; **E. D. Sletova**, Master's student, the Department of Electric Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University (National Research University) [SUSU (NRU), Chelyabinsk]

The article discusses the use of the volt-ampere characteristics of photovoltaic modules obtained under real-world operating conditions as the main characteristics for determining their condition, as well as the causes of changes in module parameters affecting generation and premature degradation.

**Key words:** solar energy, photovoltaic modules, volt-ampere characteristic, module condition, standard test conditions

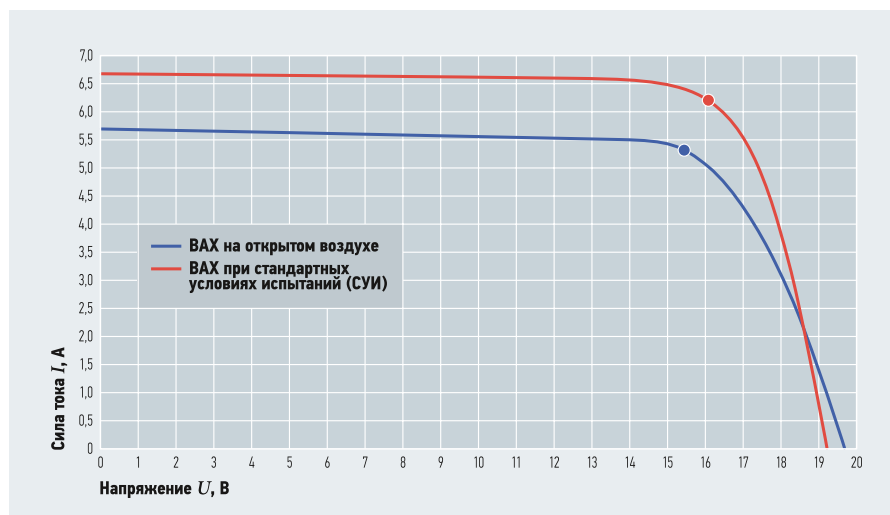


Рис. 1. ВАХ солнечного модуля BSP 32-100 на открытом воздухе и при СУИ

### Различие между стандартными условиями испытаний ФЭМ и условиями окружающей среды

Паспортные данные фотоэлектрического модуля содержат информацию о его основных параметрах, полученных в стандартных условиях испытаний (СУИ). В сертификате (паспорте) на изделие указываются рабочие параметры модуля, соответствующие параметрам, полученным в условиях идентичных стандартным условиям испытаниям фотоэлементов. Освещённость при стандартных условиях испытаний равна 1000 Вт/м<sup>2</sup>, температура — +25 °С, спектр излучения — AM1,5. Все испытания проводятся при скорости ветра, равной нулю.

Сравнение ВАХ при СУИ и на открытом воздухе для солнечного модуля BSP 32-100 производителя Jingyang PV (табл. 1), используемого для данной работы, представлено на рис. 1.

Чаще всего при эксплуатации модулей в реальных условиях окружающей среды невозможно добиться параметров освещённости и температуры, которые используют при СУИ. Различные вари-

### Паспортные данные фотоэлектрического модуля BSP 32-100

табл. 1

| Параметр                                                     | Значение |
|--------------------------------------------------------------|----------|
| Напряжение холостого хода $U_{\text{хх}}$ , В                | 19,2     |
| Ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ , А                  | 6,68     |
| Напряжение в точке максимальной мощности $U_{\text{мм}}$ , В | 16       |
| Ток в точке максимальной мощности $I_{\text{мм}}$ , А        | 6,25     |
| Температурный коэффициент по току $K_I$ , %/°С               | 0,036    |
| Температурный коэффициент по напряжению $K_U$ , %/°С         | -0,31    |

ции температуры и освещённости влияют на выходные параметры мощности ФЭМ. Это создаёт сложность при выполнении качественной оценки состояния модулей, так как при оценке производится сравнение текущей максимальной мощности ФЭМ с паспортным значением:

$$C = \frac{P_{\text{изм(СУИ)}}}{P_{\text{ном(СУИ)}}} 100\%,$$

где  $C$  — текущее состояние ФЭМ, %;  $P_{\text{ном(СУИ)}}$  — номинальная мощность ФЭМ при СУИ, Вт;  $P_{\text{изм(СУИ)}}$  — измеренная максимальная мощность ФЭМ в условиях окружающей среды и приведённая к СУИ, Вт.

Существующий стандарт ИЕС 61853-4:2018 [2] устанавливает границы по температуре и освещённости во время измерений на открытом воздухе, что создаёт определённые трудности в проведении энергетической оценки.

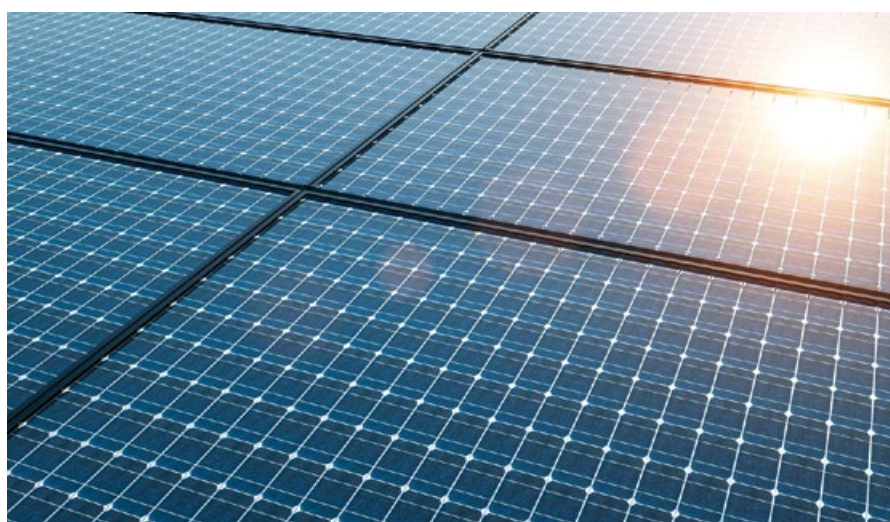
Основными способами приведения ВАХ к СУИ являются экстраполяция и интерполяция. Экстраполяция используется для определения значений ВАХ за пределами измеренного диапазона (например, при очень высокой или очень низкой освещённости). Интерполяция используется для определения значений ВАХ внутри измеренного диапазона [3, 4].

Для приведения ВАХ к СУИ также применяются температурные коэффициенты

и коэффициенты освещённости. Температурный коэффициент тока короткого замыкания, напряжения холостого хода и мощности позволяют определять изменение этих параметров при изменении температуры. Применение данных коэффициентов используется для корректировки параметров ФЭМ с учётом температуры модуля. Коэффициент освещённости позволяет определить изменение параметров ФЭМ при изменении освещённости. Данный коэффициент используется для корректировки параметров ФЭМ с учётом инсоляции.

Для снижения погрешности измерений требуется получение точных данных по температуре и освещённости на территории солнечной электростанции. При измерении температуры обычно применяют ручной способ определения температуры модулей, что приводит к появлению погрешности из-за неодновременного проведения измерений, которое проходит в течение длительного промежутка времени.

Для измерения температуры солнечных модулей можно использовать более современные и эффективные методы, например, использование датчиков температуры. Встроенные датчики в модулях или установленные на них позволяют измерять температуру автоматически и с высокой точностью. Они обычно установлены на задней стороне модуля и измеряют температуру модуля непосредственно.



Плюсами такого метода мониторинга являются высокая точность измерений и возможность создания системы мониторинга температуры в реальном времени. Однако установка датчиков ведёт к дополнительным затратам на установку, а также имеются сложности в прокладке проводки для подключения датчиков к системе мониторинга.

Одним из перспективных методов для измерения температуры солнечных модулей является применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, дронов) с тепловизионными камерами. Дроны могут сканировать большие площади и создавать тепловые карты поверхности. Преимуществами такого метода является быстрое сканирование больших площадей, получение информации о температуре всех модулей на электростанции за короткий промежуток времени. Основным недостатком можно выделить зависимость применения от погодных условий, так как не всегда возможно использовать дроны из-за сильного ветра или дождя.

**На солнечных модулях устанавливают шунтирующие диоды, которые защищают ячейки от локального перегрева, вызванного неравномерным освещением или затенением части последовательно соединённых модулей. Это явление отчётливо заметно на ВАХ, по которой можно определить количество затённых участков**

### Основные факторы, влияющие на форму графика ВАХ ФЭМ

В процессе эксплуатации модули подвергаются внешним и внутренним факторам, которые влияют на их деградацию. Снижение мощности может иметь временный характер и постоянный. Это означает, что, кроме определения состояния модулей, необходимо также определить причину снижения мощности ФЭМ.

На солнечных модулях устанавливают шунтирующие диоды, которые защищают ячейки от локального перегрева (hot-spot), вызванного неравномерным освещением или затенением части последовательно соединённых модулей [5]. Такое явление отчётливо заметно на ВАХ (рис. 2а), и по качественному графику можно определить количество затённых участков, так как каждая образовавшаяся ступень показывает открытие шунтирующего диода. При отсутствии диода на затённом участке, например, из-за его повре-

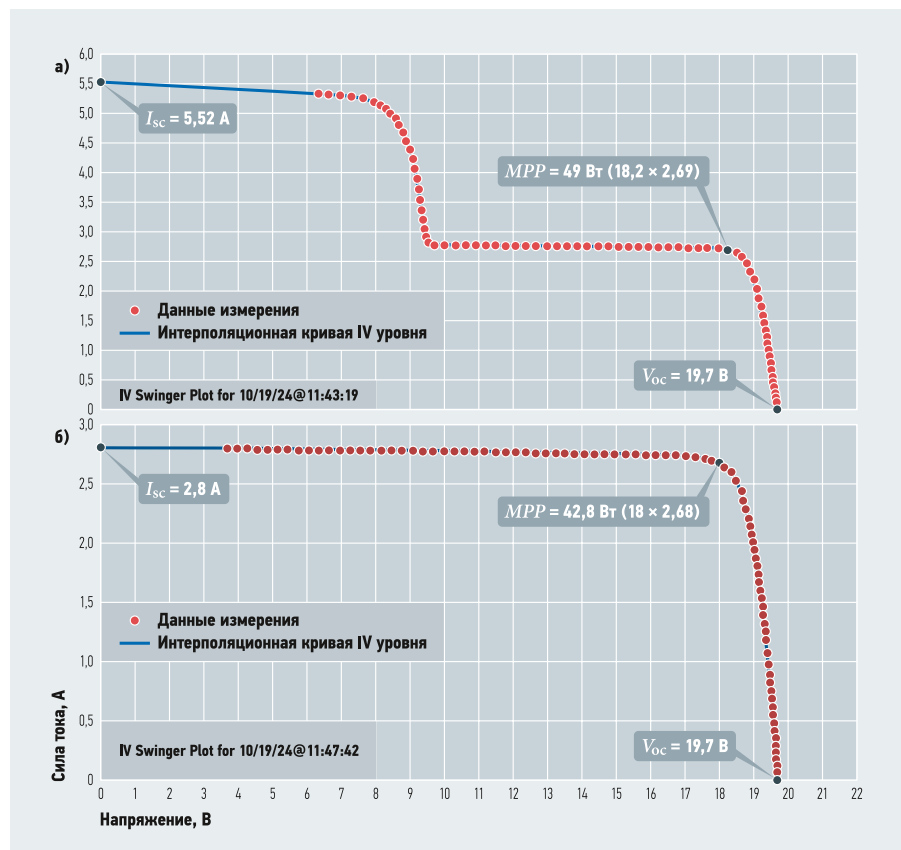


Рис. 2. ВАХ при затенении модуля [шунтирующий диод: а — исправен, б — отсутствует]

ждения, ячейка или группа ячеек с низким освещением будет ограничивать всю последовательную цепь (рис. 2б), что может привести к локальному перегреву и последующему выходу из строя одного или нескольких модулей.

Затенение бывает трёх видов:

- затенение, вызванное облачностью или какими-либо объектами, препятствующими равномерному падению света;
- затенение, вызванное появлением адгезивных загрязнителей на поверхности модулей;
- затенение, вызванное локальным потемнением герметизирующего слоя в местах расположения ячеек.

В первом случае затенение является временным и самоустранивается через короткий промежуток времени, не причиняя вреда ФЭМ. Адгезивные загрязнения требуют вмешательства, поскольку их устранение возможно только путём применения специальных механизмов: щёток, моющих устройств, а также установок по очистке от мелкодисперсной пыли воздействием электростатических полей [6].

Серьёзную проблему представляет затенение, вызванное потемневшим (или помутневшим) герметизирующим материалом модуля. Это происходит из-за некачественных материалов и может вызвать необратимую деградацию модуля (рис. 3).

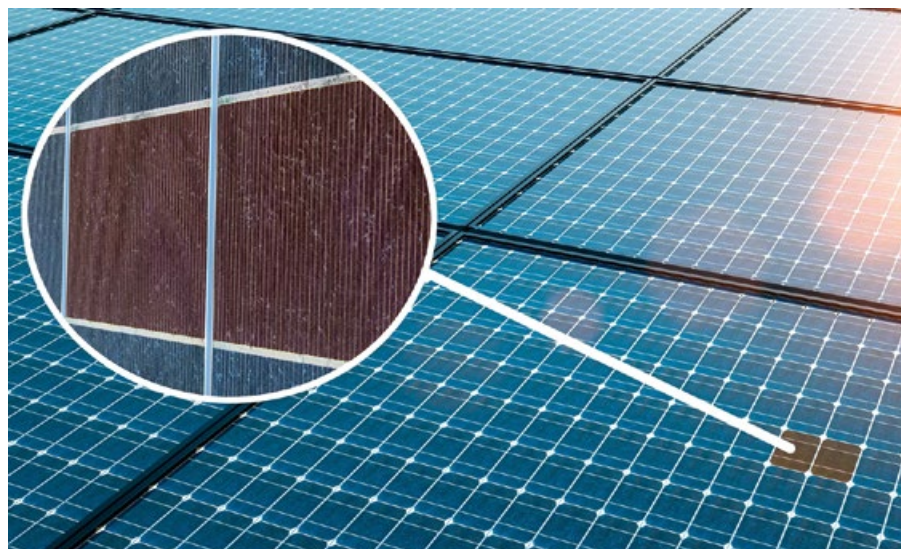


Рис. 3. Потемнение герметизирующего слоя в области ячеек [7]

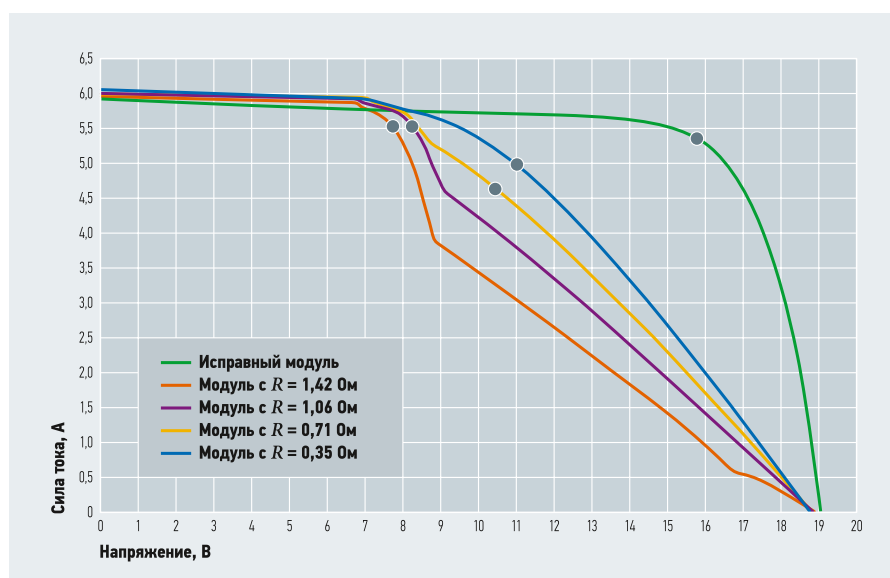


Рис. 4. Влияние последовательного сопротивления на форму графика ВАХ

Работа шунтирующего диода, кроме затенений, позволяет определить проблемы с контактными соединениями или проблемы с ячейками, вызванными увеличением последовательного сопротивления. Появление такого сопротивления также заметно по изменению формы графика вольт-амперной характеристики (рис. 4), изменяя наклон прямолинейного участка графика от точки максимальной мощности до точки холостого хода [8].

При достижении значения сопротивления, при котором открывается шунтирующий диод, вольт-амперная характеристика имеет форму, отличную от формы графика при затенении, что позволяет выявить проблему и своевременно применить необходимые меры по её устранению. Одним из показателей качества ячеек в модулях является их шунтирующее сопротивление, значение которого должно быть неизменно высоким. Сни-

жение такого сопротивления в течение эксплуатации свидетельствует о низком качестве ячеек и выражается на графике ВАХ наклоном прямолинейного участка от точки короткого замыкания до точки максимальной мощности [8]. На рис. 5 изображено влияние шунтирующего сопротивления на форму вольт-амперной характеристики. Изменение шунтирующего сопротивления ячеек является необратимым процессом и требует замены неисправного модуля.

### Заключение

Анализ вольт-амперных характеристик фотоэлектрических модулей является эффективным инструментом для определения их состояния и выявления различных неисправностей. ВАХ ФЭМ может изменяться в зависимости от освещённости и температуры, отличающихся от стандартных условий испытаний.

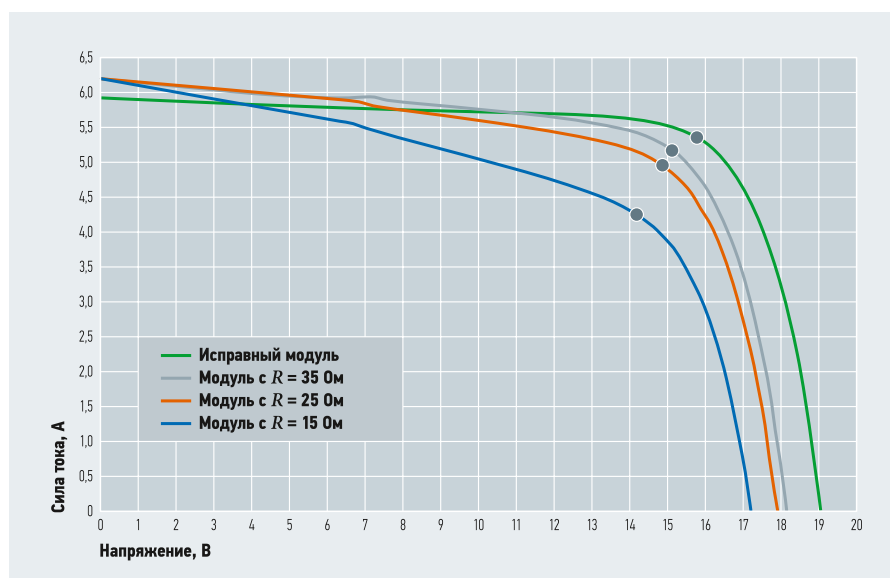


Рис. 5. Влияние шунтирующего сопротивления на форму графика ВАХ

Существующие методы приведения ВАХ к СУИ позволяют сравнивать параметры разных ФЭМ и оценивать их состояние в разных условиях эксплуатации.

Отсутствие линейной зависимости точки максимальной мощности на ВАХ от изменения освещённости создаёт трудность в корректировании графика к СУИ. На текущий момент предлагаются методы приведения графиков к СУИ, но их использование рекомендуется при ВАХ, полученных на значениях освещённости, близким к 1000 Вт/м<sup>2</sup>.

Повышение надёжности генерации солнечных электростанций, достигаемое путём слежения за состоянием ФЭМ, позволяет снизить экономические потери от недовыработки электрической энергии, что является главной задачей для поддержания расчётного срока окупаемости всей системы.

Рассмотренные проблемы на солнечных электростанциях, связанные с неисправностями модулей, показывают необходимость, а также возможность внедрения автоматизации процессов слежения за их состоянием.

1. Кирпичникова И.М. Проблема деградации солнечных модулей и пути её решения // Малая энергетика: проблемы, задачи и перспективы: Мат. Межд. науч.-практ. конф. — Краснодар: Краснодарский ЦНТИ, 2023. С. 92–97.
2. IEC 61853-4:2018. Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating — Part 4: Standard reference climatic profiles [Тестирование производительности фотоэлектрических модулей и оценка энергопотребления. Часть 4: Стандартные эталонные климатические характеристики]. Publ.: August 30, 2018.
3. Hishikawa Y., Ohshima H., Higa M., Yamagoe K., Tanouchi T., Doi T. Extended linear interpolation / Extrapolation procedure for accurate and versatile translation of the I–V curves of PV cells and modules. Col. vol. of the 2017 IEEE 44<sup>th</sup> Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), June 25–30, 2017. Washington, DC, USA. Pp. 441–444.
4. Montes-Romero J., Torres-Ramírez M., de la Casa J., Firman A., Cáceres M. Software tool for the extrapolation to Standard Test Conditions (STC) from experimental I–V curves of photovoltaic modules. Col. vol. of the 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAE). June 22–24, 2016. Seville, Spain. Pp. 1–7.
5. Кирпичникова И.М., Серов В.А. Использование байпасных диодов для защиты солнечных модулей от деградации при затенении // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: Мат. Межд. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов, учёных, 2024. Т. 12. №1. С. 31–34.
6. Патент РФ №218045. МПК F24S 40/20. Устройство для предотвращения загрязнения и деградации солнечных модулей / В.А. Заварухин, И.М. Кирпичникова, В.В. Шестакова. Патентообл.: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». Заявл.: 27.03.2023; опубл.: 04.05.2023.
7. Understanding the degradation phenomenon in solar panels [Понимание явления деградации солнечных панелей] [Электр. текст]. Novergy Energy Solutions от 29.07.2020. Режим доступа: [novergysolar.com](https://novergysolar.com). Дата обращения: 30.10.2024.
8. Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Слетова Е.Д. Выбор параметров вольт-амперной характеристики для определения возможных причин деградации фотоэлектрических модулей // Энергобезопасность и энергосбережение, 2024. №3. С. 15–21.

References — see page 80.

Determination of the state of photovoltaic modules based on their volt-ampere characteristics. Pp. 60–63.

**Irina M. Kirpichnikova**, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Vladimir A. Zavarukhin**, postgraduate student; **Viktor A. Serov**, postgraduate student; **Ekaterina D. Sletova**, the Department of Electric Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University (National Research University) [SUSU (NRU), Chelyabinsk]

1. I.M. Kirpichnikova. *Problema degradatsii solnechnykh modulej i puti ee reshenija* [The problem of degradation of solar modules and ways to solve it]. *Malaja jenergetika: problemy, zadachi i perspektivy: Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Small-scale power engineering: problems, tasks and prospects: Proc. of the International scientific and practical conference]. Krasnodar: *Krasnodarskij TsNTI (filial FGBU "RJeA" Minjenergo Rossii)* [Krasnodar Scientific and Technical Information Center — branch of the "Russian Energy Agency" Federal State Budgetary Institution ("REA") of the Ministry of Energy of Russia]. 2023. Pp. 92–97. [In Russian]
2. IEC 61853-4:2018. Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating — Part 4: Standard reference conditions for PV module performance measurement and data analysis