

УДК 621.31: 621.383.51

DOI 10.22213/2410-9304-2023-4-18-24

## Метод контроля и диагностики для сохранения эксплуатационных параметров солнечного модуля в условиях неоднородного освещения

О. М. Мирсаатов, доктор технических наук, профессор,  
Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

В. В. Зиновьев, Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

*Рассмотрены наиболее известные методы диагностики солнечных модулей, показано, что описанные методы диагностики не позволяют выявить дефекты, развивающиеся в течение длительного времени. Проанализирована работа фотоэлектрических преобразователей в условиях неоднородного освещения. Показано, что работа солнечных модулей при неоднородном освещении может привести к образованию термических повреждений полупроводниковых материалов и к ухудшению энергетических характеристик модуля по причине того, что часть фотоэлектрических преобразователей, находящихся при сниженной энергетической освещенности, становятся паразитной нагрузкой для более освещенных фотоэлектрических преобразователей, входящих в такой модуль. Получено аналитическое уравнение в явном виде для полной вольт-амперной характеристики фотоэлектрического преобразователя с применением  $W$ -функции Ламберта в прямом и обратном смещении, которые позволяют исследовать соединения фотоэлектрических преобразователей в составе солнечного модуля, при неоднородном энергетическом освещении, где важное значение имеет обратная ветвь ВАХ. Аналитическое уравнение позволяет прогнозировать поведение фотоэлектрических преобразователей и составленных из них солнечных модулей при различных режимах работы, в том числе позволяет выявлять процесс деградации. Разработано и изготовлено электронное измерительное устройство, позволяющее снимать световую и темновую вольт-амперную характеристику фотоэлектрического преобразователя включая отрицательную ветвь в автоматическом режиме. Тем самым сокращается время измерения и влияние внешних условий проведения эксперимента при получении ВАХ фотоэлектрического преобразователя. Предложен способ составления солнечных модулей из фотоэлектрических преобразователей в условиях их эксплуатации при неоднородном освещении. В результате такого отбора повышается надежность и достигается повышение КПД солнечного модуля в режиме затенения, составленного из отобранных таким способом последовательно соединенных фотоэлектрических преобразователей.*

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, фотоэлектрический преобразователь, неоднородное освещение, диагностика солнечных модулей.

### Введение

В настоящее время увеличивается доля солнечной генерации в России и мире [1, 2]. Особое внимание уделяется состоянию источника энергии – солнечным модулям, именно их эффективная работа определяет объем производимой электроэнергии солнечными фотоэлектрическими установками. В процессе эксплуатации солнечные модули могут находиться в различных состояниях в зависимости от энергетической освещенности, однородности ее распределения по поверхности модуля и температуры. В летнее время при интенсивном солнечном излучении модули подвергаются значительному нагреву, что приводит не только к снижению выработки электроэнергии, но и к ускорению процессов деградации [3]. При неоднородном освещении светочувствительной поверхности модуля вследствие частичного затенения или иных причин снижается электрическая мощность, а также возрастает риск образования локальных точек перегрева фотоэлектрических преобразователей. Многообразие вариантов состояния солнечных энергоустановок усложняет управление ими, особенно для автономных систем, работающих без участия человека. Целью является предложение новых подходов диагностики состояния солнечных модулей, чтобы сделать процесс более управляемым.

### Используемые подходы

Применяемые на сегодняшний день методы диагностики солнечных модулей предполагают визуально-оптические и электроизмерительные методы. К визуально-оптическим методам относятся визуальный осмотр, тепловизионное и электролюминесцентное тестирование. К электроизмерительным методам относится измерение напряжения холостого хода, тока короткого замыкания, получение вольт-амперной характеристики облученного солнечного модуля.

Визуально-оптические методы проводятся исходя из возможностей человеческого зрения и оптической аппаратуры. Можно обнаружить запыленность, трещины фотоэлектрических преобразователей и защитного стекла, обрывы кабелей, локальные точки перегрева фотоэлектрических преобразователей. Ограничением применения визуально-оптических методов является зависимость результатов осмотра от разрешающей способности оптических приборов, от субъективных факторов, от условий наблюдения, а также малая вероятность обнаружения мелких поверхностных дефектов. Для анализа больших площадей солнечных модулей используются беспилотные летательные аппараты [4].

Тепловизионный метод основан на обнаружении излучения инфракрасного диапазона электромагнитного спектра, невидимого для глаза человека. Инфракрасная тепловизионная камера позволяет

обнаруживать наличие более теплых зон солнечного модуля, что может указывать на наличие дефектов модуля, таких как нагрев мест пайки контактов, повреждение отдельных фотоэлектрических преобразователей в пределах одного солнечного модуля в результате частичного затенения [5]. Данный метод исследования является периодическим и проводится для выяснения причин снижения выработки солнечной энергоустановки. Результаты тепловизионного исследования нуждаются в дальнейшем интерпретировании.

Электролюминесцентный метод основан на том, что фотоэлектрические преобразователи начинают излучать в близком инфракрасном диапазоне, при подключении их к источнику электроэнергии постоянного тока в прямом включении. Данный метод позволяет обнаруживать неоднородности и локальные дефекты фотоэлектрических преобразователей [6], которые могут быть следствием трещин и микротрещин, нарушения соединений фотоэлектрических преобразователей, электрически неактивных частей модуля. Данный метод предполагает извлечение солнечного модуля из энергоустановки для проведения исследования, а также требует наличия специальной светочувствительной фотокамеры для фиксации изображения.

Метод измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) применяется как для отдельных солнечных модулей, так и для их последовательных соединений. Измерение может осуществляться как в лабораторных условиях для отдельных модулей с применением имитатора солнечного излучения и электроизмерительной аппаратуры, так и в полевых условиях при естественном солнечном освещении. В результате анализа полученной вольт-амперной характеристики делаются выводы о наличии или отсутствии дефектов солнечного модуля. При данном подходе необходимо приостанавливать производство электроэнергии, чтобы получить ВАХ при помощи специального прибора.

Описанные методы диагностики не позволяют выявить дефекты, развивающиеся в течение длительного времени, например деградацию солнечных модулей с течением времени.

**Эксплуатация солнечных модулей в условиях неоднородного освещения**

Из фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе кремниевых полупроводниковых материалов собираются солнечные модули. При эксплуатации солнечных модулей могут возникать ситуации, когда их поверхность освещена неравномерно, т. е. часть фотоэлектрических преобразователей находится при сниженной энергетической освещенности. Это может привести к тому, что рабочая точка таких преобразователей смещается в область отрицательных напряжений (ФЭПЗ на рис. 1), таким образом, ФЭП прекращает быть источником энергии и становится потребителем (паразитной нагрузкой). В идеале рабочая точка должна совпадать с точкой максимальной мощности (ТММ) ФЭП, в которой ФЭП выдает максимально возможную мощность при данной освещенности. Основная масса фотоэлектрических преобразователей продолжает генерировать электроэнергию, ток продолжает протекать через менее освещенные ФЭП, приводя к выделению на них энергии в виде тепла, что может в дальнейшем привести к образованию термических повреждений полупроводниковых материалов и к ухудшению энергетических характеристик солнечного модуля.

Локальные точки перегрева являются наиболее часто встречающимся видом дефекта фотоэлектрических преобразователей, работающих в условиях неоднородного освещения. Причинами образования локальных точек перегрева (“hot spot”) являются загрязнение светочувствительной поверхности солнечного модуля, локальные потемнения или трещины светопропускающих элементов конструкции модуля. Снизить риск возникновения локальных точек перегрева помогают байпасные диоды, устанавливаемые параллельно группе последовательно соединенных ФЭП в солнечном модуле [7].

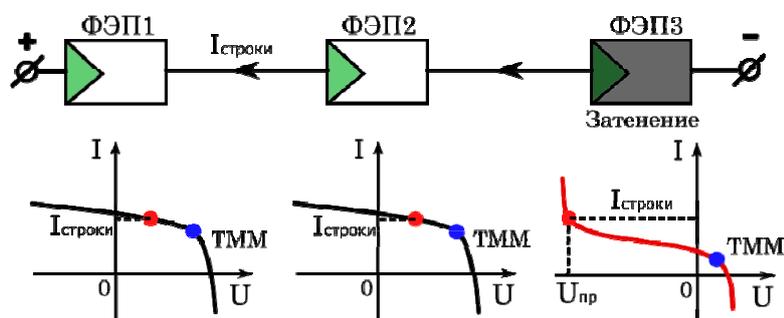


Рис. 1. Неоднородное освещение группы ФЭП

Fig. 1. Non-uniform lighting of a group of PV cells

Длительное воздействие повышенной температуры от нагрева солнечным излучением приводит к снижению эффективности солнечных модулей [8] и в конечном итоге к деградации солнечных модулей

[9], из-за которой мощность модуля постепенно снижается в течение нескольких лет.

Для исследования состояний поведения солнечных модулей в условиях неоднородного освещения

используются уравнения описания вольт-амперных характеристик, которые представляют собой зависимость выходных электрических величин (ток, напряжение, мощность) от внешних условий проведения эксперимента (энергетическая освещенность, температура) [10–12].

$$I_n = \frac{R_{ш} (I_{\phi} + I_{o.n1} + I_{o.n2}) - U_n}{R_n + R_{ш}} - \frac{A_1 U_T W \left( \frac{R_n R_{ш} (I_{o.n1} + I_{o.n2})}{A_1 U_T (R_n + R_{ш})} \exp \left( \frac{R_{ш} (R_n I_{\phi} + R_n I_{o.n1} + R_n I_{o.n2} + U_n)}{A_1 U_T (R_n + R_{ш})} \right) \right)}{2 R_n} - \frac{A_2 U_T W \left( \frac{R_n R_{ш} (I_{o.n1} + I_{o.n2})}{A_2 U_T (R_n + R_{ш})} \exp \left( \frac{R_{ш} (R_n I_{\phi} + R_n I_{o.n1} + R_n I_{o.n2} + U_n)}{A_2 U_T (R_n + R_{ш})} \right) \right)}{2 R_n} + \frac{A_3 \cdot U_T}{R_n (1 - \beta)} W \left( \frac{I_0 R_n (1 - \beta)}{A_3 \cdot U_T} \exp \left( -(1 - \beta) \frac{U_n - I_0 R_n}{A_3 \cdot U_T} \right) \right) - I_0,$$

где  $I_n$  – ток нагрузки, А;  $U_n$  – напряжение нагрузки, В;  $I_{\phi}$  – фототок (ток, произведенный фотогальваническим эффектом), А;  $I_{o.n}$ ,  $I_0$  – обратный ток насыщения, А;  $A$  – фактор идеальности  $p$ - $n$ -перехода ( $A = 1 \dots 5$ );  $R_n$  – последовательное сопротивление, Ом;  $R_{ш}$  – шунтовое (параллельное) сопротивление, Ом;  $U_T$  – термическое напряжение;  $\beta$  – коэффициент формы.

Уравнение использовано при исследовании соединений фотоэлектрических преобразователей в составе солнечного модуля, при неоднородном энергетическом освещении, где важное значение имеет обратная ветвь ВАХ.

Аналитическое уравнение позволяет прогнозировать поведение фотоэлектрических преобразователей и составленных из них солнечных модулей при различных режимах работы, в том числе позволяет выявлять процесс деградации.

Полученное аналитическое уравнение позволяет описать обобщенную кривую ВАХ солнечного модуля, которая будет соответствовать исходной кривой, полученной на начальных стадиях эксплуатации модуля.

Через определенное время производится повторное снятие вольт-амперной характеристики при тех же внешних условиях и сравнение ее с исходной кривой. Выявленные отклонения от исходной эталонной кривой вольт-амперной характеристики указывают на наличие дефектов, в частности на развитие процесса деградации или изменение внешних условий (влияние температуры). Таким образом, обобщенная кривая используется для обнаружения и учета различных факторов, которые влияют на вид ВАХ.

#### Выбор ФЭП для составления солнечного модуля

Напряжение пробоя  $U_{пр}$  следует считать одним из важных параметров фотоэлектрических преобразователей. Величина обратного напряжения пробоя определяется технологией производства, причем не контролируется и изменяется при эксплуатации из-за изменения температуры. В связи с этим требуется контроль используемых ФЭП по данному параметру.

Было получено уравнение [13] полной вольт-амперной характеристики фотоэлектрического преобразователя в явном виде с применением W-функции Ламберта, учитывающее работу ФЭП как в прямом, так и в обратном включении, в зависимости от внешних условий (энергетическая освещенность, температура):

Например, для уменьшения потерь мощности вследствие описанного механизма необходимо выбирать ФЭП с пониженными значениями  $U_{пр}$ . Технология производства фотоэлектрических преобразователей фактически и определяет значение этого параметра.

Одной из актуальных задач является задача составления солнечного модуля из ФЭП со сниженной вероятностью возникновения термических повреждений фотоэлектрических преобразователей, перешедших в режим потребления энергии, например из-за частичного затенения поверхности при последовательном их соединении в составе солнечных модулей.

Решение такой задачи состоит в добавлении еще одного критерия для отбора фотоэлектрических преобразователей при составлении солнечного модуля. После изготовления ФЭП выполняется автоматическая сортировка и разбивка по классам в зависимости от эффективности и качества изготовления. Такая подборка однотипных ФЭП требуется при сборке солнечных модулей, чтобы параметры ФЭП входящих в состав модулей были максимально близки друг к другу. Традиционными эксплуатационными параметрами для отбора ФЭП при классификации являются: КПД, мощность в точке максимальной мощности, температурный коэффициент, коэффициент заполнения, напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, ток и напряжение в точке максимальной мощности, которые определяются по прямой ветви ВАХ ФЭП. Существующие технологии предполагают критерии отбора по классам эффективности с отклонением от среднего не более 1 %, отклонение по мощности в точке максимальной мощности не более 2 %. Суть решения заключается в добавлении нового критерия отбора – порогового напряжения пробоя. Для этого требуется построить обратные ветви световых вольт-амперных характеристик фотоэлектрических преобразователей и затем отобрать ФЭП с пороговым напряжением пробоя (рис. 2) ниже верхнего порога, определяемого максимальной пороговой мощностью [14]. В результате такого отбора повышается надежность и достигается повышение КПД солнечного модуля

в режиме затенения, составленного из отобранных таким способом последовательно соединенных фотоэлектрических преобразователей.

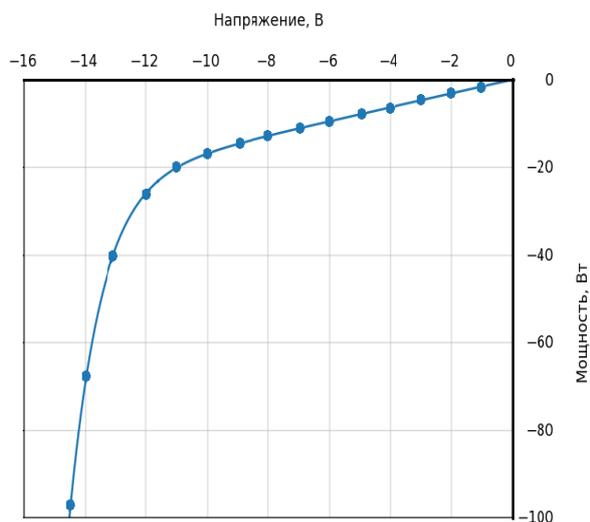


Рис. 2. Зависимость тепловой мощности, выделяемой ФЭП от приложенного обратного напряжения

Fig. 2. Dependence of the thermal power released by the PV cell on the applied reverse voltage

Этот порог определяет величину порогового напряжения пробоя, получаемого по обратной ветви ВАХ. При существенном разбросе приведенных параметров свыше указанных значений (более 1 % и более 2 % соответственно) подбор ФЭП по обратному напряжению пробоя уже не будет иметь смысла, поскольку ФЭП в составе солнечного модуля уже не будут работать согласованно, параметры цепочки последовательно соединенных ФЭП будут определяться параметрами ФЭП с самыми наихудшими значениями. А при больших масштабах массивов последовательно-параллельно соединенных солнечных модулей (с большим разбросом параметров) эффективность будет настолько низкой даже при нормальном однородном освещении, что проблема неоднородного освещения уйдет на второй план.

Выделяемая тепловая мощность не должна приводить к возникновению термических повреждений, что приведет к тепловому разрушению  $p$ - $n$ -перехода. Для этого значение порогового напряжения пробоя ФЭП подбирается на линейном участке до точки перегиба при  $U_{пр}$  (рис. 2). Для кремниевых ФЭП допустимая температура перехода составляет 120–150 °С. При плохих условиях отвода тепла от ФЭП процесс приобретает лавинообразный характер и приводит к образованию локальных точек перегрева, ситуацию усугубляет лучистый нагрев ФЭП от солнечной энергии.

Решения по повышению эффективности солнечных модулей в условиях неоднородного освещения

предлагаются в ряде зарубежных и отечественных патентов: JP 2016192827 A, KR 101692558 B1, CN 103548257 A, JP 2002111030 A, CN 110995149 A, US 20150331972 A1, RU 150172 U1, RU 2565331 C2.

Получен патент РФ на изобретение (Пат. № 2803315, Российская Федерация, МПК H02S 50/10. Способ составления солнечного модуля из фотоэлектрических преобразователей / В. В. Зиновьев, О. М. Мирсаатов, С. Б. Колесова, О. А. Бартенев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» (RU). № 2022128214/07. заявл. 01.11.2022; опубл. 12.09.2023, бюл. № 26).

Существующие экспериментальные методы исследования вида ВАХ состоят из измерения прямой и обратной ветвей, но условия проведения эксперимента влияют на то, будут ли совмещаться эти ветви. Несовпадение объясняется влиянием длительности проведения эксперимента, в ходе которого изменяются внешние условия – освещенность и температура. На рис. 3 показаны графики ВАХ при изменении освещенности и температуры.

Для автоматического получения полных вольт-амперных характеристик фотоэлектрических преобразователей был разработан и изготовлен электронный измерительный блок [15], который позволяет за один проход получать вольт-амперную характеристику ФЭП в расширенной области напряжений, включая прямую и обратную ветви. Тем самым сокращается время измерения и влияние внешних условий проведения эксперимента при получении ВАХ ФЭП. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616597 (Программа для микроконтроллера по регистрации полных вольт-амперных характеристик фотоэлектрических преобразователей / В. В. Зиновьев, О. М. Мирсаатов, С. Б. Колесова. Заявка № 2023613640; заявл. 01.03.23; опубл. 29.03.23, бюл. № 4. 1 с.).

Для удобной работы с электронным измерительным блоком была разработана компьютерная программа с графическим интерфейсом на языке Python. Программа позволяет запускать процесс автоматического снятия ВАХ, получать набор измерений от электронного блока, строить графики, производить сравнение с обобщенной кривой ВАХ, оценивать степень деградации солнечных модулей. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617854 (Программа для обработки результатов измерений полных вольт-амперных характеристик фотоэлектрических преобразователей / В. В. Зиновьев, О. М. Мирсаатов, С. Б. Колесова. Заявка № 2023613619; заявл. 01.03.23; опубл. 14.04.23, бюл. № 4. 1 с.).

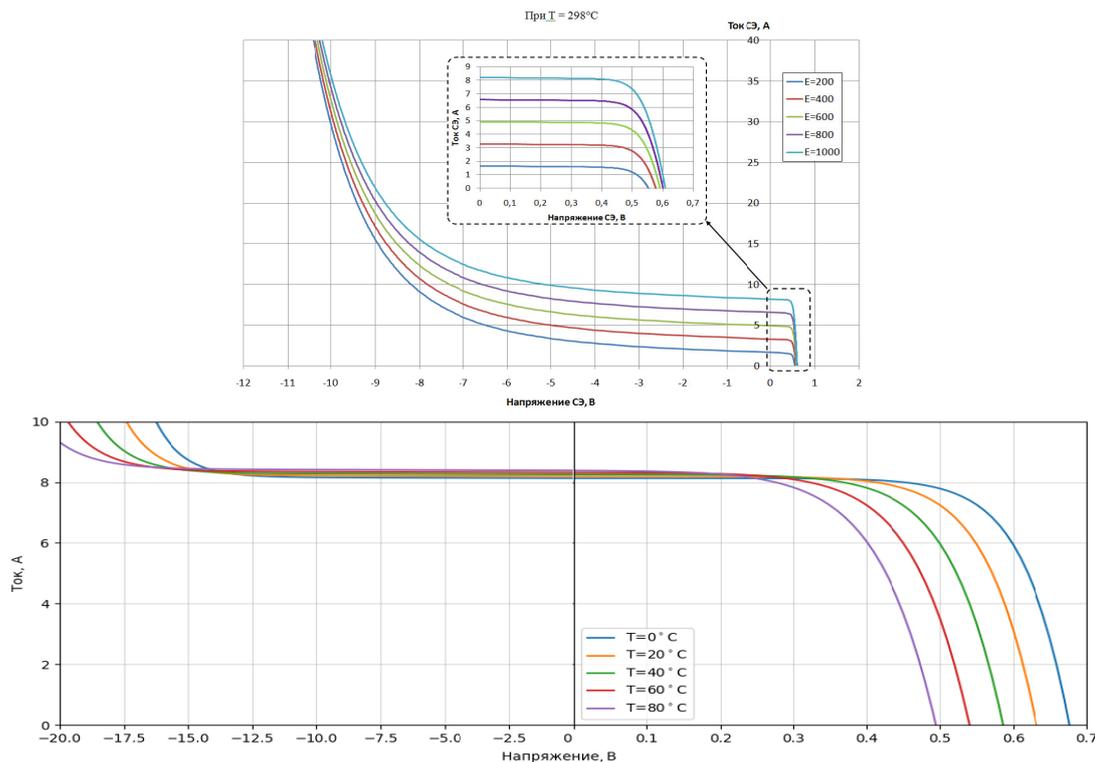


Рис. 3. Вид вольт-амперных характеристик фотоэлектрического преобразователя при изменении освещенности и температуры

Fig. 3. Current-voltage characteristics of a photovoltaic cell with various illumination and temperature

### Анализ результатов

Предложенный подход диагностики позволяет прогнозировать и оценивать степень деградации солнечных модулей. Сопоставление данных эксперимента и расчетных обобщенных характеристик ФЭП показало, что кривые ВАХ достаточно близки друг к другу (рис. 4), что подтверждает точность и достоверность предложенного аналитического уравнения описания вольт-амперной характеристики.

Использованная в этом уравнении W-функция Ламберта позволила получить универсальный и точный метод для исследования фотоэлектрических преобразователей в различных режимах работы по их характеристикам.

Разработанное и изготовленное устройство способствует снижению влияния внешних условий на вид ВАХ, а также сокращению длительности проведения эксперимента в 120 раз по сравнению с ручным методом, что обеспечивает сопряжение прямой и обратной

ветвей световой ВАХ. При помощи программного продукта фиксируется процесс деградации путем сравнения полученной ВАХ с обобщенной кривой, рассчитанной по приведенному выше уравнению.

### Выводы

Проанализирована работа солнечного модуля в условиях неоднородного освещения. Объяснен механизм образования локальных точек перегрева при неоднородном освещении поверхности солнечных модулей.

Выведено уравнение в явном виде, позволяющее описать вид вольт-амперной характеристики ФЭП с прямой и обратной ветвями с применением W-функции Ламберта. Предложенное уравнение позволяет описать поведение ФЭП и их последовательных соединений в условиях неоднородного освещения. Обобщенная кривая используется для обнаружения и учета различных факторов, которые влияют на вид ВАХ.



Рис. 4. Полная вольт-амперная характеристика ФЭП

Fig. 4. Full current-voltage characteristic of PV cell

Разработана и изготовлена экспериментальная установка для получения полных световых и темновых вольт-амперных характеристик ФЭП, учитывающая влияние внешних условий эксперимента. Экспериментальная установка включает в себя имитатор солнечного излучения, электронное измерительное устройство и программное обеспечение.

Предложен способ составления солнечных модулей из фотоэлектрических преобразователей в условиях их эксплуатации при неоднородном освещении. Использование такого способа составления приведет к повышению КПД солнечного модуля, работающего при неоднородном освещении.

#### Библиографические ссылки

1. Стребков Д. С., Бобовников Н. Ю. Роль новых технологий в развитии солнечной энергетики // Энергетик. 2020. № 7. С. 33–36.
2. Дегтярев К. С. Состояние и территориальная организация фотовольтаической солнечной энергетики в России // Окружающая среда и энерговедение. 2019. № 1 (1). С. 23–38. DOI 10.5281/zenodo.2559222.
3. Кирпичникова И. М., Заварухин В. А. Деградация солнечных модулей. Виды, причины, методы диагностики модулей // Энергосбережение и водоподготовка. 2021. № 2 (130). С. 37–42.
4. Котельников Д. Ю., Кузнецов П. Н. Устройство автоматического мониторинга и диагностики солнечной электростанции // Дневник науки. 2021. № 5 (53).
5. Balasubramani G, Thangavelu V, Chinnusamy M, Subramaniam U, Padmanaban S, Mihet-Popa L. Infrared Thermography Based Defects Testing of Solar Photovoltaic Panel with Fuzzy Rule-Based Evaluation. *Energies*. 2020. 13(6):1343. <https://doi.org/10.3390/en13061343>.
6. Owen-Bellini M., Sulas-Kern D. B., Perrin G., North H., Spataru S., & Hacke, P. Methods for in Situ Electroluminescence Imaging of Photovoltaic Modules under Varying Environmental Conditions. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2020. 10(5), 1254-1261. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3001723>.
7. Швец С. В., Байшев А. В. Назначение шунтирующих диодов солнечной панели и методы их диагностики. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23, № 6. С. 1187–1202. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1187-1202>.
8. Vardanyan R. R., Badalyan N. K. The influence of dust and temperature on the efficiency of solar photovoltaic modules // Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. *Electrical Engineering, Energetics*. 2021. No. 1. P. 44-52. DOI 10.53297/18293328-2021.1-44.
9. Кирпичникова И. М., Махсумов И. Б. Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. *Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2020. № 34. С. 56–74. DOI 10.15593/2224-9397/2020.2.04.
10. Garcia-Sanchez, Francisco & Romero, Beatriz & Lugo, Denise & Del Pozo, Gonzalo & Arredondo, Belen & Liou, Jane & Ortiz-Conde, Adolfo. Modelling solar cell S-shaped I-V characteristics with DC lumped-parameter equivalent circuits a review. *FACTA UNIVERSITATIS Series Electronics and Energetics*. 2017. 30. P. 327-350.
11. Xiankun Gao, Yan Cui, Jianjun Hu, Guangyin Xu, Yongchang Yu. Lambert W-function based exact representation for double diode model of solar cells: Comparison on fitness and parameter extraction. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 127. P. 443-460.
12. Shu-xian Lun, Shuo Wang, Gui-hong Yang, Ting-ting Guo. A new explicit double-diode modeling method based on Lambert W-function for photovoltaic arrays. *Solar Energy*. 2015. Vol. 116. P. 69-82.
13. Зиновьев В. В., Бартенев О. А. Двухдиодная модель солнечных преобразователей на основе W-функции Ламберта для прямой и обратной ветви вольт-амперной характеристики // Промышленная энергетика. 2020. № 12. С. 33–39.
14. Совершенствование подходов к составлению, диагностике и эксплуатации солнечных модулей в условиях неоднородного освещения / В. В. Зиновьев, О. М. Мирсаатов, С. Б. Колесова, О. А. Бартенев // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2023. № 2. С. 19–26. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2023.02.019-026>.
15. Зиновьев В. В., Бартенев О. А. Диагностика промышленных солнечных модулей в областях прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики при неоднородном освещении // Промышленная энергетика. 2020. № 1. С. 56–62.

#### References

1. Strebkov D.S., Bobovnikov N.YU. *Rol' novykh tekhnologij v razvitiu solnechnoj energetiki* [The role of new technologies in the development of solar energy]. *Energetik*. 2020. No. 7. Pp. 33-36 (in Russ.).
2. Degtyarev K.S. *Sostoyanie i territorial'naya organizaciya fotovol'taicheskoy solnechnoj energetiki v Rossii* [State and territorial organization of photovoltaic solar energy in Russia]. *Okruzhayushchaya sreda i energovedenie*. 2019. No. 1. Pp. 23-38. DOI 10.5281/zenodo.2559222 (in Russ.).
3. Kirpichnikova I.M., Zavaruhin V.A. *Degradaciya solnechnyh modulej. Vidy, prichiny, metody diagnostiki modulej* [Degradation of solar modules. Types, reasons, methods for diagnosing modules]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2021. No. 2. Pp. 37-42 (in Russ.).
4. Kotel'nikov D.YU., Kuznecov P.N. *Ustrojstvo avtomaticheskogo monitoringa i diagnostiki solnechnoj elektrostancii* [Device for automatic monitoring and diagnostics of a solar power plant]. *Dnevnik nauki*. 2021. No. 5 (in Russ.).
5. Balasubramani G, Thangavelu V, Chinnusamy M, Subramaniam U, Padmanaban S, Mihet-Popa L. Infrared Thermography Based Defects Testing of Solar Photovoltaic Panel with Fuzzy Rule-Based Evaluation. *Energies*. 2020; 13(6):1343. <https://doi.org/10.3390/en13061343>.
6. Owen-Bellini, M., Sulas-Kern, D. B., Perrin, G., North, H., Spataru, S., & Hacke, P. (2020). Methods for in Situ Electroluminescence Imaging of Photovoltaic Modules under Varying Environmental Conditions. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(5), 1254-1261. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3001723>.
7. SHvec S.V., Bajshev A.V. *Naznachenie shuntiruyushchih diodov solnechnoj paneli i metody ih diagnostiki*. [Purpose of solar panel shunt diodes and methods for their diagnosis]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. Vol. 23, no. 6. Pp. 1187–1202 (in Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1187-1202>.
8. Vardanyan R.R., Badalyan N.K. The influence of dust and temperature on the efficiency of solar photovoltaic modules. In Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. *Electrical Engineering, Energetics*. 2021. No. 1. P. 44-52. DOI 10.53297/18293328-2021.1-44.
9. Kirpichnikova I.M., Mahsumov I.B. *Postroenie energeticheskikh harakteristik solnechnyh modulej s uchetom uslovij okruzhayushchej sredy* [Construction of energy characteristics of solar modules taking into account environmental conditions]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*. 2020. No. 34. Pp. 56-74 (in Russ.). DOI 10.15593/2224-9397/2020.2.04.

10. Garcia-Sanchez, Francisco & Romero, Beatriz & Lugo, Denise & Del Pozo, Gonzalo & Arredondo, Belen & Liou, Jane & Ortiz-Conde, Adelmo.. Modelling solar cell S-shaped I-V characteristics with DC lumped-parameter equivalent circuits a review. FACTA UNIVERSITATIS Series Electronics and Energetics. 2017. No.30. Pp. 327-350.

11. Xiankun Gao, Yan Cui, Jianjun Hu, Guangyin Xu, Yongchang Yu. Lambert W-function based exact representation for double diode model of solar cells: Comparison on fitness and parameter extraction. Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 127. Pp. 443-460.

12. Shu-xian Lun, Shuo Wang, Gui-hong Yang, Ting-ting Guo. A new explicit double-diode modeling method based on Lambert W-function for photovoltaic arrays. Solar Energy. 2015. Vol. 116. Pp. 69-82.

13. Zinov'ev V.V., Bartenev O.A. *Dvuhdiodnaya model' solnechnyh preobrazovatelej na osnove W-funkcii Lamberta*

*dlya pryamoj i obratnoj vetvi vol't-ampernoj harakteristiki* [Two-diode model of solar converters based on the Lambert W-function for the forward and reverse branches of the current-voltage characteristic]. *Promyshlennaya energetika*. 2020. No. 12. Pp. 33-39 (in Russ.).

14. Zinovev V.V., Mirsaetov O.M., Kolesova S.B., Bartenev O.A. [Improvement of approaches to the composition, diagnosis and operation of solar modules under ununiform lighting conditions]. *Alternative Energy and Ecology (IS-JAEE)*. 2023. No. 2. Pp.19-26. (In Russ.) <https://doi.org/10.15518/isjaee.2023.02.019-026>.

15. Zinov'ev V.V., Bartenev O.A. *Diagnostika promyshlennyh solnechnyh modulej v oblasti pryamoj i obratnoj vetvej vol't-ampernoj harakteristiki pri neodnorodnom osveshchenii* [Diagnostics of industrial solar modules in the areas of the direct and reverse branches of the current-voltage characteristic under non-uniform lighting]. *Promyshlennaya energetika*. 2020. No. 1. Pp. 56-62 (in Russ.).

\* \* \*

### Monitoring and Diagnostic Method for Maintaining the Operation Parameters of a Solar Module under Non-Uniform Illumination

O. M. Mirsaetov, DSc in Engineering, Professor, Institute of Oil and Gas named after M.S. Gutseriev of Udmurt State University, Izhevsk, Russia

V. V. Zinov'ev, Lecturer, Institute of Oil and Gas named after M.S. Gutseriev of Udmurt State University, Izhevsk, Russia

*The most well-known methods for diagnosing solar modules are considered; it is shown that the described diagnostic methods do not allow identifying defects that develop over a long time. The operation of photovoltaic cells under non-uniform illumination is analyzed. It has been shown that the operation of solar modules under non-uniform illumination can lead to thermal damage to semiconductor materials and deterioration in the module energy characteristics due to the fact that some of the photovoltaic cells located at reduced energy illumination become a parasitic load for more illuminated photovoltaic cells included in such module. An analytical equation has been obtained in explicit form for the full current-voltage characteristic of a photovoltaic cell using the Lambert W-function in forward and reverse bias, which makes it possible to study the connections of photovoltaic cells as a part of a solar module under non-uniform energy illumination, where the reverse branch of the current-voltage characteristic is important. The analytical equation makes it possible to predict the behavior of photovoltaic cells and solar modules composed of them under various operating modes, including identifying the degradation process. An electronic measuring device has been developed and manufactured that makes it possible to measure the light and dark current-voltage characteristics of a photovoltaic cell, including the negative branch, in automatic mode. This reduces measurement time and the influence of external experimental conditions when obtaining the current-voltage characteristics of the photovoltaic cell. A method for constructing solar modules from photovoltaic cells under conditions of their operation under non-uniform lighting has been proposed. As a result of such selection, reliability is increased and an increase in the efficiency of the solar module in shading mode, composed of series-connected photovoltaic cells selected in this way, is achieved.*

**Keywords:** solar energy, photovoltaic cell, non-uniform illumination, solar module diagnosis.

Получено: 18.09.23

#### Образец цитирования

Мирсаетов О. М., Зиновьев В. В. Метод контроля и диагностики для сохранения эксплуатационных параметров солнечного модуля в условиях неоднородного освещения // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 4. С. 18–24. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-18-24.

#### For Citation

Mirsaetov O.M., Zinov'ev V.V. [Monitoring and Diagnostic Method for Maintaining the Operation Parameters of a Solar Module under Non-Uniform Illumination]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 18-24 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-18-24.