

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.383

EDN: IAXHRB

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-82-95



## Обнаружение потенциальных неисправностей фотоэлектрических модулей в реальных условиях эксплуатации по их вольт-амперным характеристикам

И.М. Кирпичникова<sup>1✉</sup>, В.А. Заварухин<sup>2</sup>, В.А. Серов<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Резюме.** Цель – провести экспериментальное исследование по локализации возможных дефектов фотоэлектрического модуля, оперируя данными полученных вольт-амперных характеристик. Исследование реакции фотоэлектрического модуля на изменение внешних и внутренних факторов в условиях городской среды г. Челябинск. Для проведения измерений и контроля состояния модуля использовался программный комплекс IV Swinger 2, считывающий данные с модуля для построения вольт-амперных характеристик и определения точки максимальной мощности в режиме реального времени. Имитация изменения внутренних параметров модуля производилась при помощи подключения добавочных сопротивлений разного номинала к внешним выводам модуля, установленным для проведения экспериментов. В результате проведенных исследований была показана связь между изменением формы вольт-амперной характеристики фотоэлектрического модуля и добавочным сопротивлением, включаемым как последовательно, так и параллельно в различные участки электрической цепи модуля. Сопротивление имитирует основные неисправности согласно приведенной классификации. Установлено, что при наличии добавочного сопротивления в цепи ячеек момент перехода шунтирующего диода в проводящее состояние соответствовал интервалу значений от 0,71 до 1,06 Ом, в то время как при добавочном сопротивлении в цепи между модулями сопротивление может расти в широком диапазоне значений и диод не перейдет в проводящее состояние. Установлено, что наличие добавочного сопротивления способно снизить генерацию фотоэлектрического модуля. Оценено влияние различного уровня затенения ячеек на выработку энергии модулем. Установлено, что при наличии результирующего шунтирующего сопротивления для всех ячеек одного модуля угол наклона характеристики растет по мере уменьшения сопротивления, так как растут токи утечки. Таким образом, оперируя данными вольт-амперных характеристик и угла наклона вблизи точек максимальной мощности, можно проанализировать и выявить возникающие неисправности фотоэлектрического модуля и провести оценку значения его сопротивления.

**Ключевые слова:** фотоэлектрический модуль, вольт-амперная характеристика, добавочное сопротивление, дефекты, деградация

**Для цитирования:** Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Серов В.А. Обнаружение потенциальных неисправностей фотоэлектрических модулей в реальных условиях эксплуатации по их вольт-амперным характеристикам // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 82–95. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-82-95>. EDN: IAXHRB.

## POWER ENGINEERING

Original article

## I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules

Irina M. Kirpichnikova<sup>1✉</sup>, Vladimir A. Zavarukhin<sup>2</sup>, Viktor A. Serov<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The present paper focuses on I-V curves for localizing possible defects in a photovoltaic module. The study considers the response of a photovoltaic module to changes in external and internal factors of the urban environment in Chelyabinsk, Russian Federation. To carry out measurements and control the module condition, we use the IV Swinger 2 software package reading data from the module to plot I-V curves and determine the maximum power point in real time. Changes in the internal parameters of the module are simulated by connecting additional resistances of different values to the external terminals of the experimental module. The conducted research has demonstrated additional resistance changing the shape of the I-V curve of the photovoltaic module regardless the type of connection and electrical circuit section of the module. This resistance simulates the main faults according to the given classification. Additional resistance in the cell circuit makes the shunt diode a conductor in the range

of values from 0.71 to 1.06 Ohm. If additional resistance is installed between modules, the resistance can increase in a wide range of values without the diode transition to the conducting state. Additional resistance can reduce the power generation of a photovoltaic module. Therefore, we have assessed the impact of different cell shading levels on the module power generation. Given the resulting shunt resistance for all cells of one module, the slope of the I-V curve is inversely proportional to resistance due to the increased current leakage. Thus, the data of the I-V curve and the slope angle near the maximum power points is appropriate to identify and analyze the emerging faults of the photovoltaic module by evaluating its resistance.

**Keywords:** photovoltaic module, I-V characteristic, additional resistance, faults, degradation

**For citation:** Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A., Serov V.A. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules. *iPolytech Journal*. 2025;29(1):82-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-82-95>. EDN: IAXHRB.

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации фотоэлектрических модулей (ФЭМ) происходит изменение как их физических, так и энергетических параметров. В первом случае речь идет об изменениях параметров отдельных элементов, узлов или деталей модулей, вызванных, например, их деградацией. Изменение энергетических параметров отражается на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) модулей, которое обусловлено не только колебаниями уровня и равномерности солнечной освещенности, но и температурой окружающей среды [1, 2].

Снижение эффективности ФЭМ является одной из ключевых проблем в сфере возобновляемой солнечной энергетики. Эффективность работы фотоэлектрических модулей колеблется в пределах 14–23% по причине наличия в солнечном свете широкого спектра фотонов различных длин волн. В процессе генерации энергии используется лишь видимая часть спектра электромагнитной волны, в то время как инфракрасная составляющая, которая представляет значительную долю солнечного излучения, поглощается кремниевыми пластинами, но не преобразуется в электричество, а лишь нагревает модуль. Нагрев полупроводниковых элементов внутри модуля приводит к снижению их эффективности. Это связано с тем, что при повышении температуры увеличивается вероятность рекомбинации электронно-дырочных пар, что снижает выходной ток модуля.

Кроме того, существуют дополнительные факторы, влияющие на снижение эффективности ФЭМ [3], такие как:

1) отражение – часть солнечного света отражается от поверхности модуля и не достигает фотоэлементов;

2) потери на соединениях – соединения между различными элементами модуля могут обладать сопротивлением, что приводит к потерям энергии;

3) потери от затенения – даже незначительное затенение способно существенно уменьшить производительность модуля;

4) деградация – с течением времени эффективность ФЭМ может снижаться из-за естественного старения материалов, загрязнения поверхности и других факторов.

На сегодняшний день ученые оценивают максимальный уровень достижения эффективности ФЭМ, равный 68% [4]. Получение такого значения пока возможно только в результате лабораторных испытаний при соблюдении многих параметров, это:

– оптимальный угол наклона поверхности модуля;

– длина волны солнечного света;

– высокий уровень освещенности.

Если принимать во внимание естественные параметры окружающей среды и степень деградации со временем, то эффективность у реального ФЭМ на порядок снизится по сравнению с лабораторным образцом.

Обычный темп деградации большинства моделей составляет 0,3–0,8% в год [4, 5]. Однако исследования [6, 7] показывают, что минимальная скорость деградации исследуемых опытных образцов составила 0,79% в год, а максимальная – 1,67%. Этот показатель в ряде случаев остается зависимым от вида деградации, который влияет на скорость процесса и может значительно сократить срок эффективной работы ФЭМ [3, 8]. Все модули подвержены деградации, но скорость процесса зависит от условий эксплуатации и конкретного случая. При этом важно учитывать тип деградации при оценке срока службы реального ФЭМ.

Целью работы является экспериментальное определение возможных неисправностей/дефектов фотоэлектрического модуля методом сравнительного анализа с использованием текущих показаний его вольт-амперных характеристик.

Повышение эффективности работы ФЭМ является одной из ключевых задач развития солнечной энергетики нашей страны и направлением дальнейших научно-исследовательских работ. Решение этих задач позволит снизить стоимость электроэнергии, полученной из солнечного света, и сделать солнечную энергетику более конкурентоспособной на энергетическом рынке.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились в сентябре 2024 г. в центре г. Челябинск, имеющего географические координаты: северная широта – 55,162°; долгота – 61,369°. Температура воздуха во время эксперимента составляла 21°C, уровень солнечной инсоляции равнялся примерно 750–800 Вт/м<sup>2</sup>.

Было принято допущение, что для ясного солнечного дня возможен уровень затенения от рассеянных облаков и выбросы от промышленных предприятий. В течение эксперимента фотоэлектрический преобразователь был установлен под углом наклона 57,7° (что представляет собой приближенное значение в соответствии с географической широтой г. Челябинск, равной 55°) и ориентирован на юг (рис. 1 b). Измерение температуры модуля производилось с применением рекомендаций, изложенных в ГОСТ Р МЭК 60891-2013<sup>4</sup>. Согласно измерениям, средняя температура ячеек модуля составила 42,5°C (рис. 1 c).

Исследования проводились на фотоэлектрическом модуле BSP 32-100 (рис. 1 a) китайского производства (таблица) [9]. Перед началом эксперимента поверхность модуля очищалась.



**Рис. 1.** Образец и условия проведения эксперимента для снятия вольт-амперных характеристик солнечного модуля: а – солнечный модуль BSP 32-100; б – угол наклона модуля к горизонту; с – пирометр PCE SCANTEMP 490

**Fig. 1.** Sample and setting conditions of the experiment for measuring I-V characteristics of the solar module: a – BSP 32-100 solar module; b – module inclination angle to the horizon; c – PCE SCANTEMP 490 pyrometer

Параметры фотоэлектрического модуля BSP 32-100<sup>5</sup>  
BSP 32-100<sup>5</sup> photovoltaic module parameters

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

<sup>4</sup>ГОСТ Р МЭК 60891-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы фотоэлектрические. Методики коррекции по температуре и энергетической освещенности результатов измерения вольт-амперной характеристики. Введ. 01.07.2015. М.: Стандартинформ, 2015.

<sup>5</sup>Солнечная панель модели BSP 32-100 бренда JINGYANGPV. Режим доступа: [https://aliexpress.ru/store/4433198?spm=a2g2w.detail.100005.1.28a565a1r22zC6&\\_ga=2.190830251.1872709940.1652500190-1697940568.1652500190](https://aliexpress.ru/store/4433198?spm=a2g2w.detail.100005.1.28a565a1r22zC6&_ga=2.190830251.1872709940.1652500190-1697940568.1652500190) (дата обращения: 30.09.2024).

В стандартном ФЭМ солнечные элементы электрически соединены последовательно. Такая конфигурация приводит к формированию высокого напряжения в цепи модуля. Однако следует отметить, что сила тока, протекающая через каждый из подключенных элементов, остается неизменной.

Для проведения экспериментального исследования модуль BSP 32-100, содержащий 32 ячейки, был разделен на две идентичные секции по 16 ячеек. В каждую секцию был интегрирован один шунтирующий диод с рабочим током до 15 А и напряжением до 50 В для обеспечения байпасного соединения (рис. 2). С помощью специально смоделированных выводов, для подключения к электрической

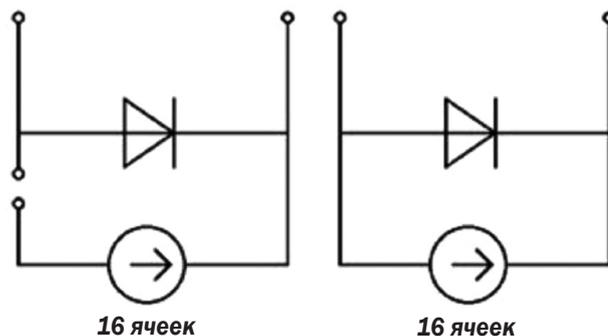


Рис. 2. Принципиальная схема модуля BSP 32-100 для испытаний

Fig. 2. Schematic diagram of the BSP 32-100 module for testing

цепи были созданы условия, имитирующие различные типы неисправностей модуля.



Рис. 3. Контрольная вольт-амперная характеристика модуля BSP 32-100

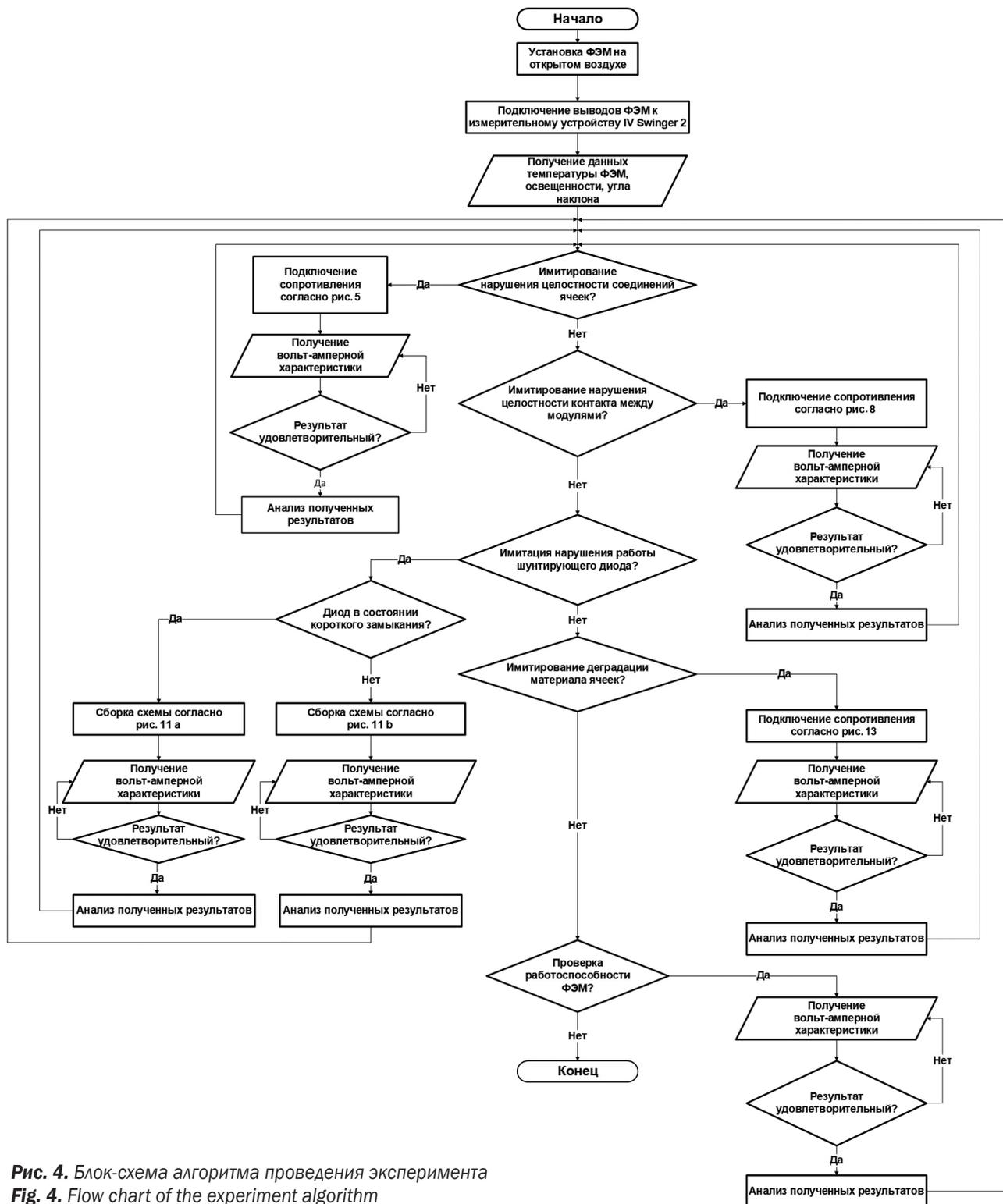
Fig. 3. Control I-V characteristic of the BSP 32-100 module

Во время испытаний для считывания параметров и построения вольт-амперной характеристики модуля использовалась программа «IV Swinger 2»<sup>6</sup>.

Полученная характеристика исследуемо-

го ФЭМ (рис. 3) в дальнейшем использовалась как контрольная [10].

Порядок получения экспериментальных данных различных видов неисправностей ФЭМ изображен на рис. 4.



**Рис. 4.** Блок-схема алгоритма проведения эксперимента  
**Fig. 4.** Flow chart of the experiment algorithm

<sup>6</sup>IV Swinger 2 – PCB (PV Module, SSR). Режим доступа: <https://www.instructables.com/IV-Swinger-2-PCB-PV-Module-SSR/> (дата обращения: 30.09.2024).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования проводились в соответствии с разработанным алгоритмом для различных вариантов подключения добавочных сопротивлений.

**Добавочное сопротивление в цепи ячеек фотоэлектрического модуля.** В ходе эксперимента все 32 ячейки ФЭМ функционировали в нормальном режиме. Для моделирования повреждения межсекционного соединения было применено дополнительное сопротивление на искусственном участке связи двух секций по 16 ячеек (рис. 5). Такой подход позволяет имитировать нарушение контакта между ячейками, которое может возникнуть в реальных условиях эксплуатации вследствие окисления или механических повреждений [11, 12].

Данный эксперимент наглядно иллюстрирует принцип функционирования байпасного (шунтирующего) диода с добавочным сопротивлением в цепи 20 Ом. При достижении критического значения сопротивления ток перенаправляется через диод (рис. 6).

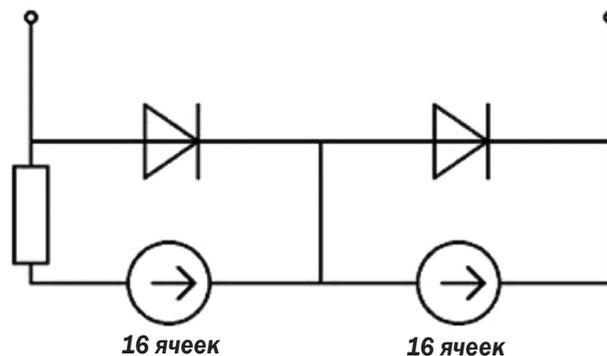


Рис. 5. Принципиальная схема модуля с добавочным сопротивлением в цепи ячеек

Fig. 5. Schematic diagram of the module with an additional resistance in the cell circuit

Экспериментальные результаты подтвердили теоретические предположения. При достижении определенного значения добавочного сопротивления (в данном случае 20 Ом, см. рис. 6) открывается байпасный диод и шунтирует соответствующий участок модуля. В результате функционируют оставшиеся 16 ячеек ФЭМ. При значениях сопротивления в диапазоне 0,15–0,5 Ом байпасный

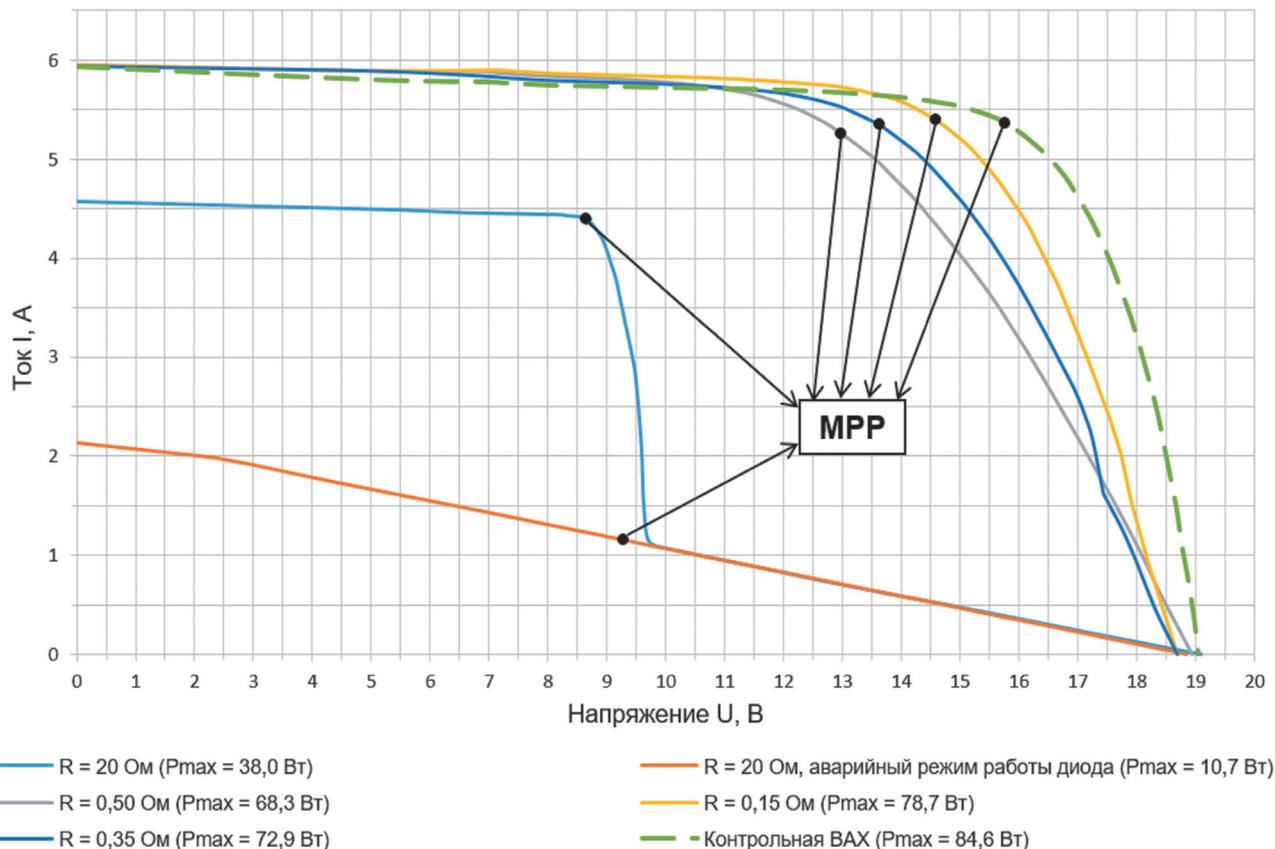


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики модуля при разном значении добавочного сопротивления в цепи ячеек  
 Fig. 6. I-V characteristics of the module at different values of the additional resistance in the cell circuit

диод не открывается, что указывает на недостаточное значение сопротивления для его срабатывания.

Анализ ВАХ, полученной для данного варианта, позволяет сделать вывод о наличии неисправности в модуле, поскольку наблюдается снижение значений точек максимальной мощности (MPP, от англ. Maximum Power Point). Мощность контрольного образца составляет 84,6 Вт и линейно уменьшается с увеличением сопротивления.

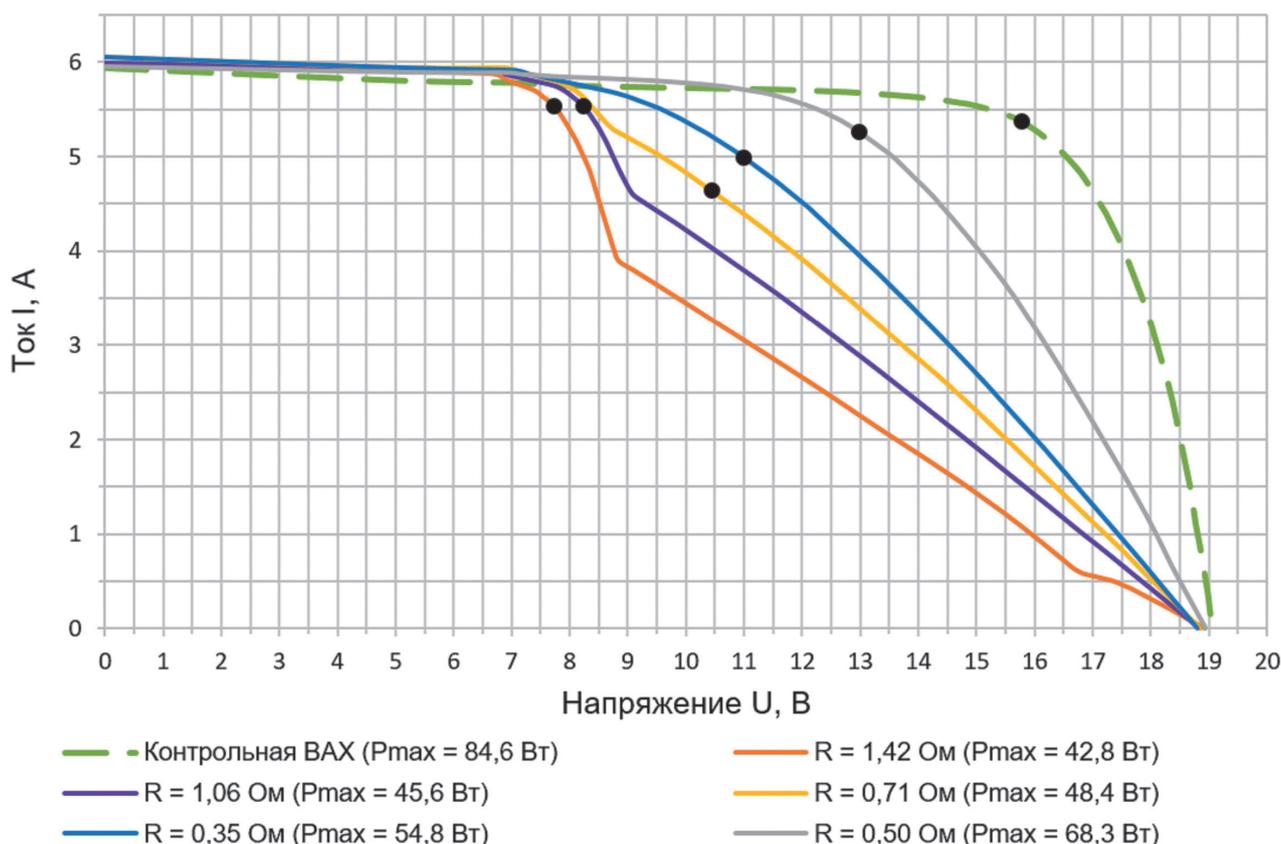
Был смоделирован вариант, когда при значении добавочного сопротивления 20 Ом байпасный диод по естественным причинам перестал открываться. Данный факт визуально выявляется по характеру кривой ВАХ и показателю уменьшения мощности, которая снизилась с 84,6 до 10,7 Вт по сравнению с контрольным образцом.

Экспериментальным методом, подбирая разные значения сопротивлений, был определен интервал значений, при котором наблюдается начало проводимости шунтирующего диода (рис. 7).

Угол наклона характеристик/ступень при значениях сопротивлений 0,71, 1,06 и 1,42 Ом свидетельствует об открытии байпасного диода. Интервал значений сопротивления от 0,71 до 1,06 Ом соответствует области перехода диода в проводящее состояние. Более точное определение значения сопротивления, при котором диод переходит в проводящее состояние, может быть получено посредством расчетного метода с использованием параметров вольт-амперной характеристики шунтирующего диода.

Рост сопротивления между ячейками/элементами ФЭМ является серьезной проблемой, которая приводит к снижению производительности модуля, перегреву, появлению различных дефектов.

К наиболее распространенным проблемам относятся следующие: отслоение герметика, проявляющееся в виде белых пятен на поверхности; окисление контактов, особенно при повышенной влажности; разрушение контактов, вызванное некачественной пайкой, вибрацией и механическими повреждениями.



**Рис. 7.** Экспериментальное определение значений добавочного последовательного сопротивления в цепи ячеек для определения момента открытия шунтирующего диода

**Fig. 7.** Experimental measuring of series additional resistance values in the cell circuit to identify the moment of shunt diode opening

Внедрение своевременных мер по обнаружению и предупреждению подобных неисправностей способствует увеличению срока эксплуатации ФЭМ и поддержанию их рабочих характеристик на заданном уровне.

**Добавочное сопротивление в цепи между модулями.** Для моделирования повреждения на участке электрической цепи (рис. 8) между модулями было использовано добавочное сопротивление. Данный подход позволяет имитировать такие дефекты, как окисление или некачественное соединение контактов. Включение ФЭМ в цепочку (стринг) приводит к тому, что увеличение сопротивления на участке между двумя модулями повлияет на ВАХ всей цепи.

Данный эксперимент основан на том же принципе, что и первый. Однако имеется существенное отличие: в первом эксперименте было установлено, что при возникновении неисправности сопротивление может увели-

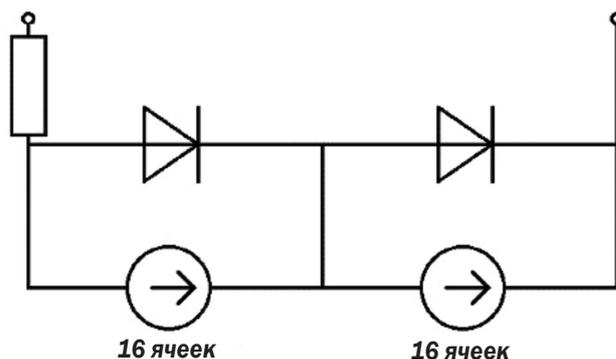


Рис. 8. Принципиальная схема с добавочным сопротивлением в цепи между модулями

Fig. 8. Schematic diagram with additional resistance in the circuit between the modules

чиваться только до значения 0,71 Ом, после чего участок цепи начинает шунтироваться диодом. В настоящем же случае сопротивление может расти в широком диапазоне значений, и шунтирующий диод не переходит в проводящее состояние (рис. 9).

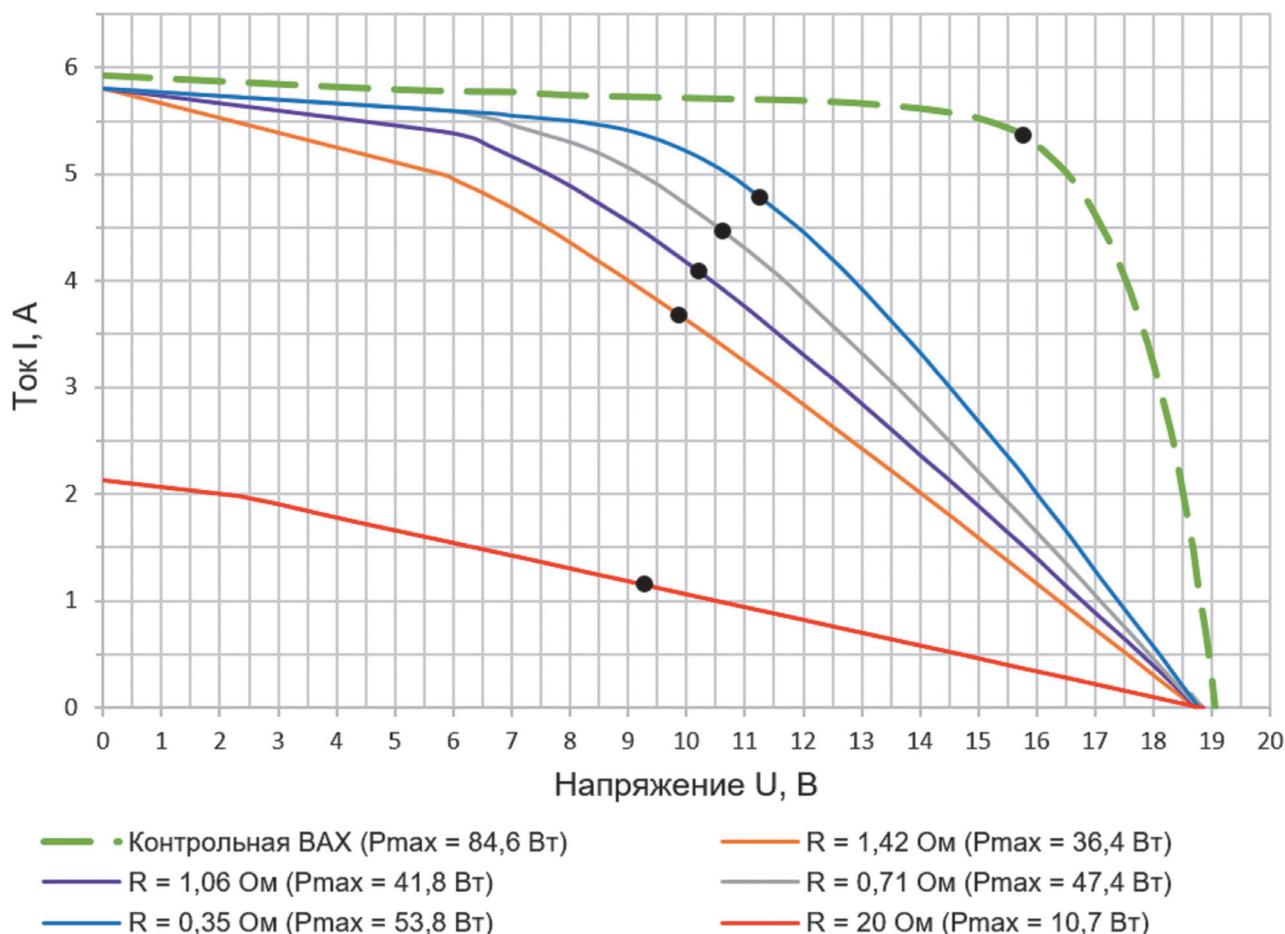


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрического модуля при разном значении добавочного сопротивления в цепи между модулями

Fig. 9. I-V characteristics of the photovoltaic module (PVM) at different values of additional resistance in the circuit between modules

Сравнение точек MPP на ВАХ при добавочном сопротивлении 0,35 Ом в двух экспериментах показало существенную разницу: в первом опыте максимальная мощность составляла 72,9 Вт, а во втором – 53,8 Вт. Данный факт свидетельствует о том, что разница расположения последовательного сопротивления оказывает влияние на реакцию ВАХ модулей.

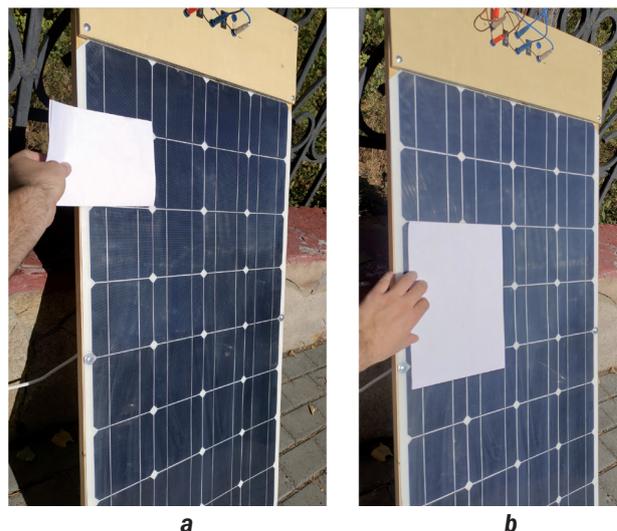
Периодический анализ кривой ВАХ по росту такого сопротивления позволяет выявить причины его появления. Даже незначительные значения сопротивления могут указывать на место локализации дефекта.

#### **Имитация работы байпасного диода.**

В рамках данного эксперимента моделировалась работа шунтирующего диода при различных уровнях затенения без использования добавочного сопротивления. Затенение ячейки происходило перекрытием потока солнечного света листом бумаги для одной ячейки (рис. 10 а) и четырех (рис. 10 б).

В случае, если ячейка затеняется какими-либо внешними факторами, она перестанет вырабатывать электрическую энергию и будет вести себя как полупроводящее сопротивление, сильно уменьшая общее количество энергии, производимой последовательной цепью солнечного модуля. При этом мощность, генерируемая незатененными ячейками, рассеивается затененной ячейкой, вызывая перегрев и появление горячих точек (hot spot/point) модуля [13–15].

Байпасные диоды могут перестать функционировать вследствие перенапряжения, к примеру, в период грозных явлений либо

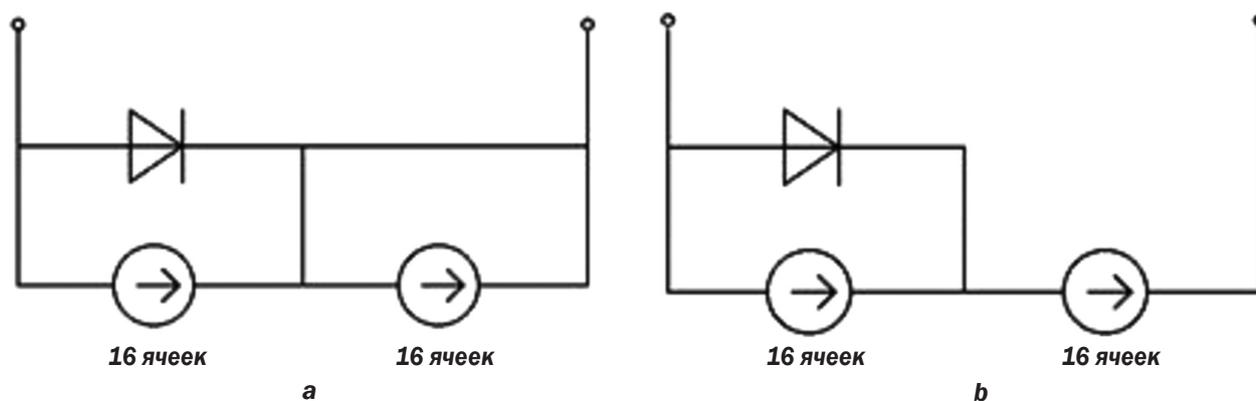


**Рис. 10.** Имитация затенения ячеек фотоэлектрического модуля BSP 32-100: а – затенение одной ячейки; б – затенение четырех ячеек

**Fig. 10.** Simulation of BSP 32-100 photovoltaic module cells shading: a – one cell shading; b – four cells shading

перегрева. Стоит отметить два характерных вида его неисправности: обрыв или короткое замыкание (КЗ). При нормальной работе ФЭМ без затенения обрыв шунтирующего диода (рис. 11 б) себя никак не проявляет и влияния на работу модуля не оказывает. На рис. 11 а показан вариант, когда диод в режиме КЗ приводит к снижению генерируемой энергии определенной части ФЭМ и ускоряет процесс их деградации.

Принципиальные схемы (рис. 11 а, б) являются аварийными режимами работы модулей. В первом случае шунтирующий диод находится в режиме КЗ и выводит из работы часть модуля, а во втором случае диод нахо-



**Рис. 11.** Принципиальная схема аварийной работы фотоэлектрического модуля: а – диод в режиме короткого замыкания; б – диод в режиме обрыва цепи

**Fig. 11.** Schematic diagram of emergency operation of the photovoltaic module: а – diode in short circuit mode; б – diode in open circuit mode

дится в состоянии обрыва цепи и не защищает модуль от частичного затенения.

Используя метод сравнительного анализа, становится понятно, какого рода неисправность присутствует в режиме работы модуля, оперируя данными ВАХ и значениями точек максимальной мощности (рис. 12), и как можно локализовать выявленный эффект.

У исследуемого ФЭМ все ячейки одинаковые, соединены последовательно и разделены на две равные секции. При наличии на каждой секции проводящего шунтирующего диода  $U_{xx\text{ с ШД}}$  напряжение холостого хода модуля с таким диодом будет ниже напряжения холостого хода  $U_{xx\text{ КМ}}$  исправного ФЭМ на величину напряжения  $\Delta U$  шунтированной группы ячеек, которое равно:

$$\Delta U = \frac{U_{xx\text{ КМ}}}{n} \times N \times Z, \quad (1)$$

где  $U_{xx\text{ КМ}}$  – напряжение холостого хода контрольной ВАХ исследуемого модуля, В;  $n$  – количество ячеек в модуле, шт.;  $N$  – количество ячеек в группе на шунтирующий диод, шт.;  $Z$  – число групп, шунтируемых диодом.

На кривой ВАХ (см. рис. 12) заметно смещение по оси напряжения на величину  $\Delta U$ : от  $U_{xx\text{ КМ}}$  до  $U_{xx\text{ с ШД}}$ .

**Влияние наличия шунтирующего сопротивления в цепи фотоэлектрического модуля.** В полностью исправных модулях с качественными ячейками значение шунтирующего сопротивления очень велико. Из-за производственных дефектов (неоднородность материалов ячеек) или некачественного сырья (наличие примесей), используемого для создания солнечных элементов, могут возникать нежелательные пути для протекания токов, что снижает полезную генерацию всей цепи ФЭМ [16].

Подключение добавочного сопротивления (рис. 13) имитирует результирующее шунтирующее сопротивление для всех ячеек одного модуля [17].

Угол наклона при шунтирующем сопротивлении растет по мере уменьшения сопротивления, так как растут токи утечки (рис. 14). По углу наклона характеристики вблизи точки короткого замыкания проводится оценка значения сопротивления [2, 18].

Кроме токов утечек, протекающих в ячейках, могут возникать токи утечки через герметизирующие материалы модулей. Такое явление называется потенциально-ин-

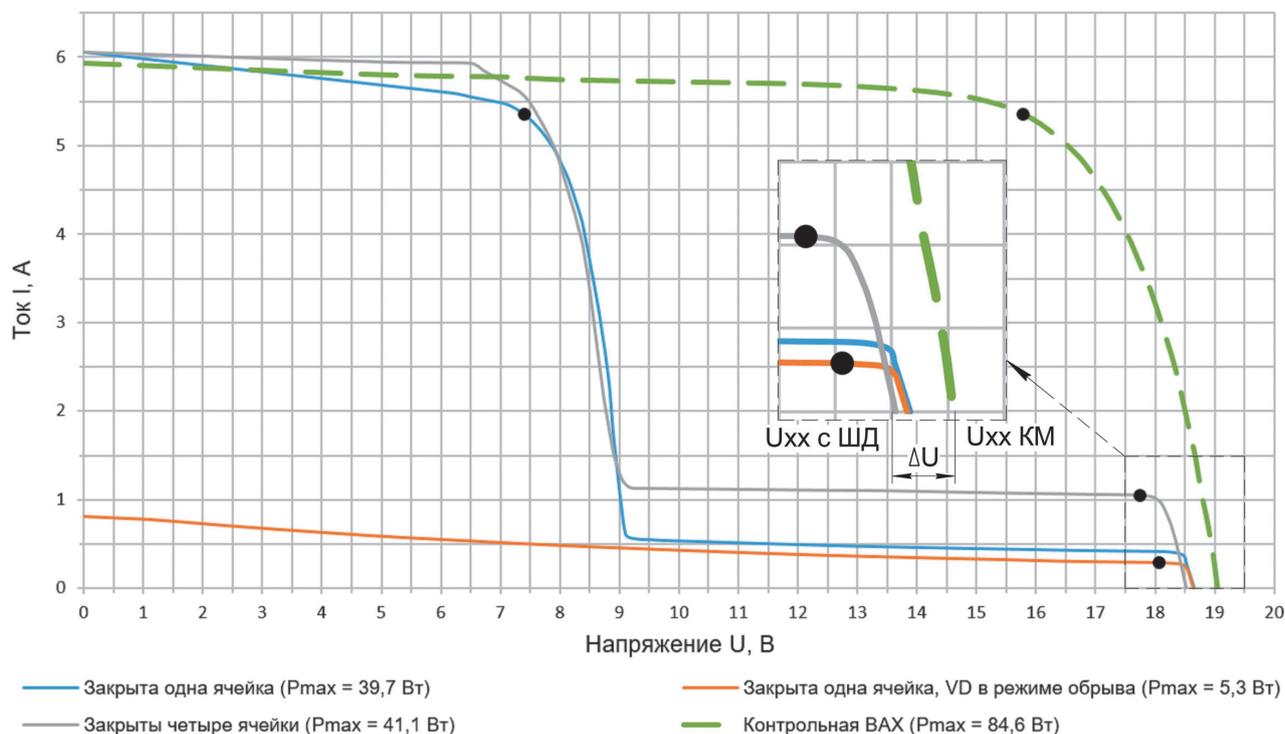
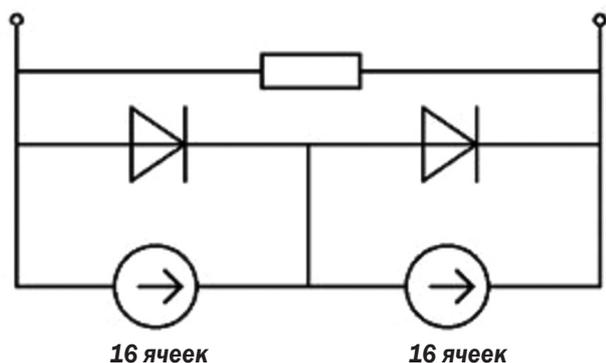


Рис. 12. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрического модуля при разном уровне затенения ячеек  
 Fig. 12. I-V characteristics of a photovoltaic module at different levels of cell shading



**Рис. 13.** Принципиальная схема включения шунтирующего сопротивления в цепь модуля

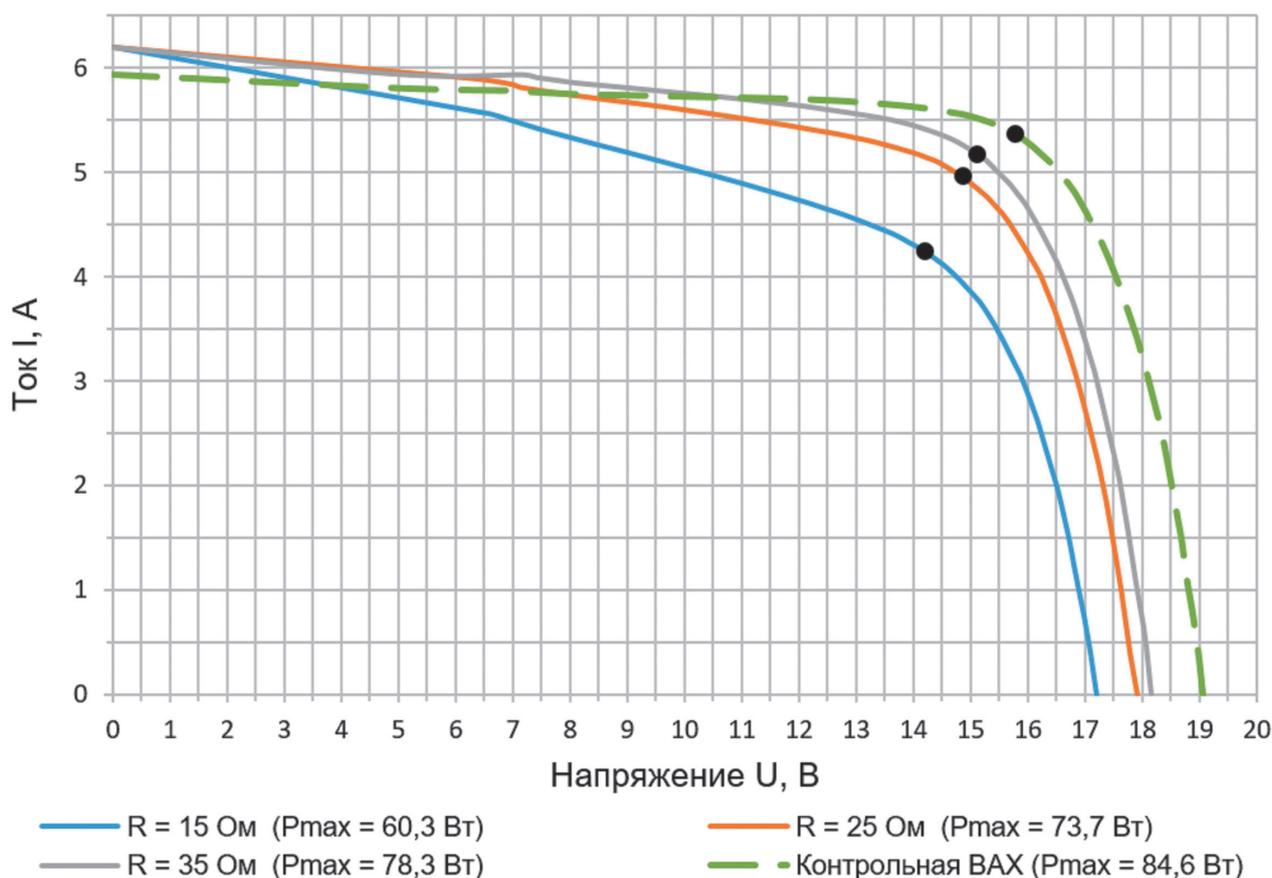
**Fig. 13.** Schematic diagram of including bypass resistance in the module circuit

дуцированной деградацией (PID, от англ. Potential-Induced Degradation) и возникает при сборках модулей в последовательные цепи с напряжением от ~600 В и выше. Это явление связано с некачественными герметизирующими материалами и зачастую является обратимым типом деградации [19, 20].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент диагностика ФЭМ в большей степени проводится вручную. Визуальный осмотр и анализ вольт-амперных характеристик занимают большое количество времени. Сектор диагностики ФЭМ является несформированным, и многие компании предлагают свои варианты оценки состояния модулей. Проблемы ФЭМ, описанные в работе, имеют характерные отличия, которые можно наблюдать на графиках ВАХ. Используя только кривую ВАХ и значение энергетической освещенности в месте расположения ФЭМ, можно определить состояние модулей в цепи, а также причину снижения мощности при возникновении проблем. Таким образом, экономится время на проведение диагностики больших массивов ФЭМ солнечных электростанций.

Рассмотренный в статье способ обнаружения потенциальных неисправностей фотоэлектрических модулей в реальных условиях эксплуатации считается информативным для одиночных ФЭМ и может де-



**Рис. 14.** Вольт-амперные характеристики с наличием шунтирующего сопротивления в цепи фотоэлектрических модулей  
**Fig. 14.** I-V characteristics with the presence of bypass resistance in the photovoltaic module circuit

монстрировать данные о неисправностях, которые визуальным образом проблематично обнаружить.

Направлением дальнейших исследований является рассмотрение вопросов использования разработанного алгоритма анализа состояния фотоэлектрических модулей на солнечных электростанциях. Мы

полагаем, что полученные закономерности будут характерны и для нескольких модулей, объединенных в одну цепь, поскольку такое соединение также представляет собой последовательно соединенные ячейки, т.е. ВАХ такой цепи будет отличаться от рассмотренных в статье ВАХ одиночного ФЭМ только масштабами.

#### Список источников

1. Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Слетова Е.Д. Выбор параметров вольтамперной характеристики для определения возможных причин деградации фотоэлектрических модулей // Энергобезопасность и энергосбережение. 2024. № 3. С. 15–21. EDN: SMFSKD.
2. Da Silva M.K., Gul M.S., Chaudhry H. Review on the sources of power loss in monofacial and bifacial photovoltaic technologies // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 23. P. 7935. <https://doi.org/10.3390/en14237935>.
3. Кирпичникова И.М., Заварухин В.А. Деградация солнечных модулей. Виды, причины, методы диагностики модулей // Энергосбережение и водоподготовка. 2021. № 2. С. 37–42. EDN: PETZHY.
4. Smith J. Solar panel efficiency over time. Режим доступа: <https://www.solarreviews.com/blog/how-has-the-price-and-efficiency-of-solar-panels-changed-over-time> (дата обращения: 30.09.2024).
5. Jordan D.C., Kurtz S.R. Photovoltaic degradation rates – an analytical review // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2013. Vol. 21. Iss. 1. P. 12–29. <https://doi.org/10.1002/pip.1182>.
6. Gyamfi S., Aboagye B., Peprah F., Obeng M. Degradation analysis of polycrystalline silicon modules from different manufacturers under the same climatic conditions // Energy Conversion and Management: X. 2023. Vol. 20. P. 100403. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100403>.
7. Pandey S., Kumar S., Mhatre R., Singh T. Analysis of performance degradation of PV modules. Режим доступа: <https://www.powermag.com/analysis-of-performance-degradation-of-pv-modules/> (дата обращения: 30.09.2024).
8. Libra M., Mrázek D., Tyukhov I., Severová L., Poulek V., Mach J., et al. Reduced real lifetime of PV panels – economic consequences // Solar Energy. 2023. Vol. 259. P. 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.063>.
9. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б., Шестакова В.В. Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности // iPolytech Journal. 2023. Vol. 27. No. 1. P. 83–93. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-83-93>. EDN: URBKSO.
10. Satterlee C. IV Swinger 2. Step-by-step construction: arduino Shield PCB Designs. Режим доступа: <https://cdn.instructables.com/ORIG/F2T/I6P6/JS00S2H3/F2T/I6P6/JS00S2H3.pdf> (дата обращения: 30.09.2024).
11. Ma Mingyao, Zhang Zhixiang, Xie Zhen, Yun Ping, Zhang Xing, Li Fei. Fault diagnosis of cracks in crystalline silicon photovoltaic modules through I-V curve // Microelectronics Reliability. 2020. Vol. 114. Iss. 6 P. 113848. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113848>.
12. Dhimish M., Holmes V., Mehrdadi B., Dales M. The impact of cracks on photovoltaic power performance // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. 2017. Vol. 2. Iss. 2. P. 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2017.05.005>.
13. 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>. EDN: RZXZEQ.
14. Deng Shifeng, Zhang Zhen, Ju Chenhui, Dong Jingbing, Xia Zhengyue, Yan Xinchun, et al. Research on hot spot risk for high-efficiency solar module // Energy Procedia. 2017. Vol. 130. P. 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.399>.
15. Wang Ao, Xuan Yimin. Close examination of localized hot spots within photovoltaic modules // Energy Conversion and Management. 2021. Vol. 234. P. 113959. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113959>.
16. Naumann V., Lausch D., Hähnel A., Breitenstein O., Hagendorf C. Nanoscopic studies of 2D-extended defects in silicon that cause shunting of Si-solar cells // Current topics in solid state physics. 2015. Vol. 20. Iss. 8. P. 1103–1107. <https://doi.org/10.1002/pssc.201400225>.
17. Gaevskaya A. Approximation algorithm for current-voltage characteristics of PV modules under shading conditions // Vidnovljava energetika. 2019. Iss. 3. P. 21–29. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).21-29](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).21-29).
18. Honsberg C., Bowden S. Shunt resistance. Режим доступа: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/shunt-resistance> (дата обращения: 30.09.2024).
19. Swanson R., Cudzinovic M., DeCeuster D., Desai V., Jürgens J., Kaminaret N., et al. The surface polarization effect in high-efficiency silicon solar cells // Proceedings of the 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (Shanghai, 11–13 October 2005). Shanghai, 2005. P. 410–413.
20. Luo Wei, Khoo Yong Sheng, Hacke Peter, Naumann Volker, Lausch Dominik, Harvey S.P., et al. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review // Energy & Environmental Science. 2017. Vol. 10. Iss. 1. P. 43–68. <https://doi.org/10.1039/C6EE02271E>.

## References

1. Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A., Sletova E.D. Selection of V-I characteristics for finding solar module degradation causes. *Energy Safety and Energy Economy*. 2024;3:15-21. (In Russ.). EDN: SMFSKD.
2. Da Silva M.K., Gul M.S., Chaudhry H. Review on the sources of power loss in monofacial and bifacial photovoltaic technologies. *Energies*. 2021;14(23):7935. <https://doi.org/10.3390/en14237935>.
3. Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A. Degradation of photovoltaic modules. Types, causes, diagnostic methods of modules. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2021;2:37-42. (In Russ.). EDN: PETZHY.
4. Smith J. Solar panel efficiency over time. Available from: <https://blueravensolar.com/blog/a-brief-history-and-in-depth-look-into-solar-panel-efficiency/> [Accessed 30th September 2024].
5. Jordan D.C., Kurtz S.R. Photovoltaic degradation rates – an analytical review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2013;21(1):12-29. <https://doi.org/10.1002/pip.1182>.
6. Gyamfi S., Aboagye B., Peprah F., Obeng M. Degradation analysis of polycrystalline silicon modules from different manufacturers under the same climatic conditions. *Energy Conversion and Management: X*. 2023;20:100403. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100403>.
7. Pandey S., Kumar S., Mhatre R., Singh T. Analysis of performance degradation of PV modules. Available from: <https://www.powermag.com/analysis-of-performance-degradation-of-pv-modules/> [Accessed 30th September 2024].
8. Libra M., Mrázek D., Tyukhov I., Severová L., Poulek V., Mach J. et al. Reduced real lifetime of PV panels – economic consequences. *Solar Energy*. 2023;259:229-234. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.063>.
9. Kirpichnikova I.M., Makhsomov I.B., Shestakova V.V. Reduced power generation efficiency of solar panels in dusty locations. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):83-93. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-83-93>. EDN: URBKSQ.
10. Satterlee C. IV Swinger 2. Step-by-step construction: Arduino shield PCB designs. Available from: <https://cdn.instructables.com/ORIG/F2T/16P6/JS00S2H3/F2T16P6JS00S2H3.pdf> [Accessed 30th September 2024].
11. Ma Mingyao, Zhang Zhixiang, Xie Zhen, Yun Ping, Zhang Xing, Li Fei. Fault diagnosis of cracks in crystalline silicon photovoltaic modules through I-V curve. *Microelectronics Reliability*. 2020;114(6):113848. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113848>.
12. Dhimish M., Holmes V., Mehrdadi B., Dales M. The impact of cracks on photovoltaic power performance. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2017;2(2):199-209. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2017.05.005>.
13. Shvets S.V., Baishev A.V. Bypass diode function in solar panels and their diagnostic methods. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(6):1187-1202. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1187-1202>. EDN: RZXZEQ.
14. Deng Shifeng, Zhang Zhen, Ju Chenhui, Dong Jingbing, Xia Zhengyue, Yan Xinchun, et al. Research on hot spot risk for high-efficiency solar module. *Energy Procedia*. 2017;130:77-86. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.399>.
15. Wang Ao, Xuan Yimin. Close examination of localized hot spots within photovoltaic modules. *Energy Conversion and Management*. 2021;234:113959. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113959>.
16. Naumann V., Lausch D., Hähnel A., Breitenstein O., Hagendorf C. Nanoscopic studies of 2D-extended defects in silicon that cause shunting of Si-solar cells. *Current topics in solid state physics*. 2015;20(8):1103-1107. <https://doi.org/10.1002/pssc.201400225>.
17. Gaevskaya A. Approximation algorithm for current-voltage characteristics of PV modules under shading conditions. *Vidnovluvana energetika*. 2019;3:21-29. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).21-29](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).21-29).
18. Honsberg C., Bowden S. Shunt resistance. Available from: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/shunt-resistance> [Accessed 30th September 2024].
19. Swanson R., Cudzinovic M., DeCeuster D., Desai V., Jürgens J., Kaminaret N., et al. The surface polarization effect in high-efficiency silicon solar cells. In: *Proceedings of the 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference*. 11–13 October 2005, Shanghai, Shanghai; 2005, p. 410-413.
20. Luo Wei, Khoo Yong Sheng, Hacke Peter, Naumann Volker, Lausch Dominik, Harvey S.P., et al. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review. *Energy & Environmental Science*. 2017;10(1):43-68. <https://doi.org/10.1039/C6EE02271E>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кирпичникова Ирина Михайловна,**

д.т.н., профессор,  
профессор кафедры электрических станций,  
сетей и систем электроснабжения,  
Южно-Уральский государственный университет,  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия  
✉ kirpichnikovaim@susu.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-4078-8790>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Irina M. Kirpichnikova,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department  
of Power Plants, Networks and Power Supply Systems,  
South Ural State University,  
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia  
✉ kirpichnikovaim@susu.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-4078-8790>

**Заварухин Владимир Александрович,**  
аспирант,  
Южно-Уральский государственный университет,  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия  
zavaruhin-425@yandex.ru

**Vladimir A. Zavarukhin,**  
Postgraduate Student,  
South Ural State University,  
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia  
zavaruhin-425@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0001-0810-1717>

**Серов Виктор Алексеевич,**  
аспирант,  
Южно-Уральский государственный университет,  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия  
va\_serov99@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0003-6415-2935>

**Viktor A. Serov,**  
Postgraduate Student,  
South Ural State University,  
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia  
va\_serov99@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0003-6415-2935>

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 18.11.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.12.2024 г.; принята к публикации 30.01.2025 г.

#### **Authors' contribution**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Information about the article**

The article was submitted 18.11.2024; approved after reviewing 25.12.2024; accepted for publication 30.01.2025.