



## Идентификация параметров моделей фотоэлектрических преобразователей

С.Г. Обухов<sup>1✉</sup>, И.А. Плотников<sup>2</sup>, Г.Н. Климова<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Томский национальный исследовательский политехнический университет, г. Томск, Россия

**Резюме.** Цель – разработка простого и эффективного способа идентификации параметров моделей фотоэлектрических преобразователей, доступного для широкого практического применения. В качестве базовой модели фотоэлектрического преобразователя принята экспоненциальная модель с одним диодом и пятью параметрами, которая обеспечивает простую интеграцию в популярный математический пакет схемотехнического моделирования MatLab/Simulink. Для идентификации параметров моделей фотоэлектрических преобразователей использовался оригинальный метод, основанный на поиске минимума среднеквадратичной ошибки между модельными и экспериментальными вольт-амперными характеристиками. Апробация предлагаемого метода проведена путем определения параметров моделей промышленных фотоэлектрических модулей, изготовленных по разным технологиям: тонкопленочного Shell ST40, монокристаллического Shell SP70 и поликристаллического Kyocera KC200GT. Разработана методика построения математических моделей фотоэлектрических преобразователей, позволяющая воспроизводить их электрические характеристики, которая легко реализуется в популярном табличном процессоре Excel с установленной надстройкой «Поиск решения». Установлено, что предлагаемый способ идентификации параметров моделей фотоэлектрических преобразователей является универсальным и может использоваться для построения моделей фотоэлектрических модулей и солнечных элементов широкой номенклатуры. Показано, что модельные вольт-амперные характеристики рассматриваемых фотоэлектрических модулей хорошо согласуются с экспериментальными характеристиками в широком диапазоне изменения температуры и освещенности, соответствующих реальным условиям их эксплуатации. Показано, что математические модели фотоэлектрических преобразователей, параметры которых определены по предлагаемому методу идентификации, обеспечивают более высокую точность в отображении их электрических характеристик в сравнении с моделями, параметры которых идентифицированы с помощью других известных аналитических и численных методов. Таким образом, в результате проведенных исследований разработан простой и эффективный способ построения математических моделей фотоэлектрических преобразователей, не требующий применения программирования и разработки специализированных численных алгоритмов. Это позволяет использовать его для решения множества технических задач, связанных с проектированием и эксплуатацией фотоэлектрических систем.

**Ключевые слова:** фотоэлектрический преобразователь, математическая модель, идентификация параметров, эквивалентная схема замещения, вольт-амперная характеристика

**Для цитирования:** Обухов С.Г., Плотников И.А., Климова Г.Н. Идентификация параметров моделей фотоэлектрических преобразователей // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 539–551. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-539-551>. EDN: LNPHGL.

### POWER ENGINEERING

Original article

## Parameter identification of photovoltaic converter models

Sergey G. Obukhov <sup>1✉</sup>, Igor A. Plotnikov<sup>2</sup>, Galina N. Klimova<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

**Abstract.** The work aims to develop a simple and effective method for identifying the parameters of photovoltaic converter (PV-cell) models for their wide practical application. An exponential model having one diode and five parameters is adopted as the basic model of the photovoltaic converter to facilitate its easy integration into MatLab/Simulink simulation software. To identify the parameters of models of photovoltaic converters, an original method based on finding the minimum of the root-mean-square error between model and experimental volt-ampere characteristics was used. The effectiveness of the method was confirmed by determining the parameters of different models of photovoltaic modules based on various technologies: thin-

film Shell ST40, monocrystalline Shell SP70, and polycrystalline Kyocera KC200GT. A developed technique for constructing mathematical models of photovoltaic converters in order to reproduce their electrical characteristics is presented. The solution is easily implemented in Excel spreadsheet software with the "Search for Solution" add-on installed. The proposed universal method for identifying the parameters of photoconverter models can be used to build models of a wide range of photovoltaic modules and solar cells. The model current-voltage characteristics of the considered photovoltaic modules are shown to be in good agreement with experimental characteristics across a wide range of temperature and insolation conditions corresponding to their actual operation. Higher accuracy is achieved when using the proposed identification method to determine the electrical parameters of mathematical models of photovoltaic converters than when using other well-known analytical and numerical methods. The result is a simple and effective method for constructing mathematical models of photovoltaic converters, which does not require the use of programming or the development of specialized numerical algorithms, allowing it to be used to solve many technical problems related to the design and operation of photovoltaic systems.

**Keywords:** photovoltaic converter, mathematical model, parameter identification, equivalent circuit, volt-ampere characteristic

**For citation:** Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Klimova G.N. Parameter identification of photovoltaic converter models. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):539-551. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-539-551>. EDN: LNPHGL.

## ВВЕДЕНИЕ

В течение последних 10 лет фотоэлектрические станции (ФЭС) являются самым быстрорастущим источником выработки электроэнергии в мире. По данным последнего отчета Всемирной сети по возобновляемой энергетической политике XXI в. (REN21) установленная мощность ФЭС в 2021 г. достигла отметки в 942 ГВт, добавив 175 ГВт новых мощностей<sup>4</sup>. Очевидно, что уже в прошедшем 2022 г. фотоэнергетика успешно преодолела знаковый рубеж в 1 ТВт установленной мощности генерирующего оборудования. Весомыми стимулами к дальнейшему развитию рынка солнечной энергетики являются перспективные технологии электромобильного транспорта и производство «зеленого» водорода, что гарантирует высокую востребованность фотоэнергетики в будущем.

Основным компонентом ФЭС является солнечная батарея, состоящая из определенного набора фотоэлектрических модулей (ФМ), моделирование режимов которых в реальных условиях эксплуатации обеспечивает решение важных технических задач: выбор основных компонентов ФЭС, прогноз и повышение производительности, оптимизацию рабочих режимов и др. Для исследований режимов работы фотоэлектрических систем наибольшее распространение получили математические модели фотопреобразователей (ФП), построенные на основе эквивалентных электрических схем замещения. В зависимости от степени детализации описываемых физических процессов к данному классу моделей относятся модели с одним диодом (Single

Diode Model – SDM) [1, 2], модель с двумя диодами (Double Diode Model – DDM) [3, 4] и модель с тремя диодами (Triple Diode Model – TDM) [5]. Все модели ФП строятся на основе простейших элементов электротехники: источники тока, диоды и резисторы, однако количество элементов, а, соответственно, и число параметров моделей будут различными. Если для построения простейшей SDM-модели ФП необходимо определить 5 параметров, то более сложные DDM и TDM-модели требуют определения 7 и 9 параметров, соответственно.

Следует отметить, что применение более сложных моделей ФП не гарантирует повышения их точности, так как адекватность моделирования зависит не только от типа модели, а обусловлена, главным образом, достоверностью определения ее параметров. Проблема точной оценки параметров моделей ФП вызвана тем, что характеристическое уравнение вольт-амперной характеристики (ВАХ), связывающее параметры модели с током и напряжением ФП, является трансцендентным и нелинейным, при этом несколько параметров модели являются зависимыми от радиации и температуры. Высокая сложность и в то же время чрезвычайная важность научной проблемы точного определения параметров моделей ФП привели к созданию отдельного направления исследований в солнечной энергетике – идентификации параметров моделей ФМ и солнечных элементов (СЭ). Огромное количество статей по данной тематике, ежегодно публикуемых в периодических изданиях, свидетельствуют о том, что научная проблема идентификации пара-

<sup>4</sup>Renewables 2022 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat, 2022. 312 p. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf) (23.03.2022).

метров моделей ФП остается актуальной и не имеет на сегодняшний день законченного решения.

Подробный обзор исследовательских статей по решению проблемы идентификации параметров моделей ФМ и СЭ приведен в работах [5–7]. Проведенный анализ опубликованных результатов исследований показывает, что для идентификации параметров моделей ФП применяются два основных подхода: на основе аналитических и численных методов расчета. Достоинствами аналитических методов является простота практической реализации, но необходимость применения упрощающих допущений неизбежно приводит к снижению точности моделей. Для реализации численных методов расчета используют как классические математические алгоритмы решения систем нелинейных уравнений: Ньютона–Рафсона, Левенберга–Марквардта и др., так и разнообразные метаэвристические алгоритмы. Достоинствами современных эволюционных алгоритмов является возможность многомерной оптимизации, не критичность к начальным условиям и высокое быстродействие. Однако идентификация параметров моделей ФП с помощью метаэвристических алгоритмов предопределяет необходимость владения программированием, а во многих случаях и специализированным программным обеспечением, что существенно ограничивает возможность их практического применения для большинства конечных пользователей.

Целью настоящих исследований является разработка простого и эффективного способа идентификации параметров моделей ФП, доступного для широкого практического применения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Модель фотоэлектрического преобразователя.** Для проведения исследований в данной работе использовалась модель ФП, построенная на основе эквивалентной схемы замещения с одним диодом, рис. 1. Выбор SDM-модели обоснован тем, что при корректном выборе ее параметров она обеспечивает высокую точность моделирования электрических характеристик ФП при изменении уровней радиации и температуры [1, 8]. Кроме того, именно на основе SDM-модели реализован встроенный блок PV Array библиотеки Simscape в популярном математическом пакете MatLab/Simulink, который является

одним из самых популярных инструментов в научных исследованиях. Соответственно, полученные с помощью предлагаемого способа параметры моделей ФП могут быть легко интегрированы в данный программный комплекс.

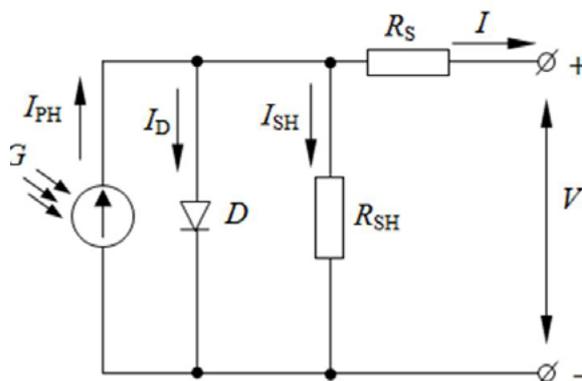


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения фотоэлектрического преобразователя  
Fig. 1. Equivalent photoelectric converter replacement circuit

Вольт-амперная характеристика ФМ, состоящего из  $N_S$  последовательно соединенных СЭ, описывается уравнением:

$$I = I_{PH} - I_D = I_{PH} - I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{N_S \cdot A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{SH}}, \quad (1)$$

где  $I$ ,  $V$  – ток и напряжение на клеммах ФМ, А, В;  $I_{PH}$  – ток, генерируемый под действием солнечного излучения, или фототок, А;  $I_0$  – обратный ток насыщения диода, А;  $q$  – заряд электрона, Кл;  $R_S$ ,  $R_{SH}$  – последовательное и шунтирующее сопротивления ФМ, Ом;  $A$  – коэффициент идеальности диода;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $T$  – текущая рабочая температура ФП, К.

Выражение (1) определяет вольт-амперную характеристику ФМ, содержит пять неизвестных параметров ( $I_{PH}$ ,  $I_0$ ,  $A$ ,  $R_S$ ,  $R_{SH}$ ) и не имеет прямого аналитического решения.

Непосредственное влияние на ВАХ оказывают спектр и интенсивность солнечного излучения, температура, а также параметры самого ФМ, которые определяются его типом и конструктивным исполнением. Часть параметров ФМ можно определить с использованием данных технической спецификации, предоставляемой производителем ФМ, и полученных при стандартных условиях тестирования (Standard Testing Conditions – STC): интенсивность излучения  $G_{STC} = 1000$  Вт/м<sup>2</sup>,

$$I_{PH} = \left[ \frac{R_{SH} + R_S}{R_{SH}} I_{SC\_STC} + k_I \cdot (T - T_{STC}) \right] \cdot \frac{G}{G_{STC}} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{I_{SC\_STC} + k_I \cdot (T - T_{STC})}{\exp\left(\frac{V_{OC\_STC} + k_V \cdot (T - T_{STC})}{A \cdot V_T}\right) - 1}, \quad (3)$$

солнечный спектр AM – 1,5, температура  $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$ . Для определения фототока и обратного тока насыщения диода можно использовать следующие выражения:

где  $I_{SC\_STC}$ ,  $V_{OC\_STC}$  – ток короткого замыкания (КЗ) и напряжение холостого хода (ХХ) ФМ при STC, А, В;  $G$  – интенсивность солнечного излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $k_p$ ,  $k_V$  – температурные коэффициенты тока КЗ и напряжения ХХ, А/К, В/К;

$$V_T = \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q} \quad \text{– тепловое напряжение.}$$

Физическая природа  $R_{SH}$  определяется дефектами производства СЭ, создающими альтернативные каналы протекания светового тока. Особенно заметное влияние на форму ВАХ параллельное сопротивление оказывает при низкой интенсивности солнечного излучения, когда величина светового тока небольшая. Величина  $R_S$  определяется типом и геометрией СЭ и зависит от эмиттерного и контактных сопротивлений. Последовательное сопротивление практически не влияет на характеристики ФМ при разомкнутой цепи, однако определяет форму ВАХ вблизи точки напряжения холостого хода. Величина  $A$  характеризует качество  $p$ - $n$ -перехода и говорит о виде рекомбинации в СЭ. При наличии обычных механизмов рекомбинации  $A = 1$ , однако в реальных СЭ существуют и другие механизмы рекомбинации, вследствие чего для разных типов СЭ величина  $A$  может изменяться в достаточно широком диапазоне от 1 до 5 [9], для промышленных кремниевых ФП практический диапазон варьирования  $A$  составляет от 1 до 2 [10]. Вследствие того, что прямое измерение  $A$ ,  $R_S$  и  $R_{SH}$  невозможно, задача точного определения их значений и является основной целью идентификации параметров модели ФМ.

**Краткий обзор методов идентификации параметров моделей фотоэлектрических преобразователей.** В качестве исходных данных при идентификации параметров моделей ФМ и СЭ используют данные технической

спецификации и/или их ВАХ и вольт-ваттные (ВВХ) характеристики, полученные экспериментальным путем. Точность полученных параметров модели оценивается путем сравнения модельных ВАХ или ВВХ, построенных по основному характеристическому уравнению модели (для SDM это уравнение (1)) с экспериментальными кривыми. Среди множества используемых критериев оценки наиболее распространенными являются среднеквадратичная (RMSE) и средняя относительная (ARE) ошибки, которые для ВАХ определяются по следующим выражениям:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{i.exp} - I_{i.sim})^2}, \quad (A) \quad (4)$$

$$ARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(I_{i.exp} - I_{i.sim})}{I_{i.exp}} \right| \cdot 100, \quad (\%) \quad (5)$$

где  $I_{i.exp}$ ,  $I_{i.sim}$  – экспериментальные и модельные (расчетные) значения тока в точках кривой ВАХ, соответственно.

Основным подходом определения параметров модели ФП при использовании аналитических методов расчета является составление системы независимых уравнений с входящими в них искомыми переменными. Три уравнения получают путем записи основного уравнения ВАХ для характерных точек: режимов КЗ, ХХ и точки максимальной мощности (ТММ). Полученная система уравнений дополняется четвертым уравнением производной по напряжению в ТММ. Для решения полученной системы уравнений предложено множество приемов и способов, подробно описанных в [6], отличающихся сложностью используемого математического аппарата и точностью.

Применение метаэвристических алгоритмов позволяет решить многофакторную задачу оптимизации с использованием только одного характеристического уравнения. В данном случае в качестве целевой функции используется значение ошибки, а критерием является ее минимизация. Следует отметить, что применение метаэвристических алгоритмов не гарантирует получения глобального экстремума целевой функции, и, соответственно, для получения адекватных конечных результатов необходима тщательная настройка их параметров. Подробный обзор и сравнитель-

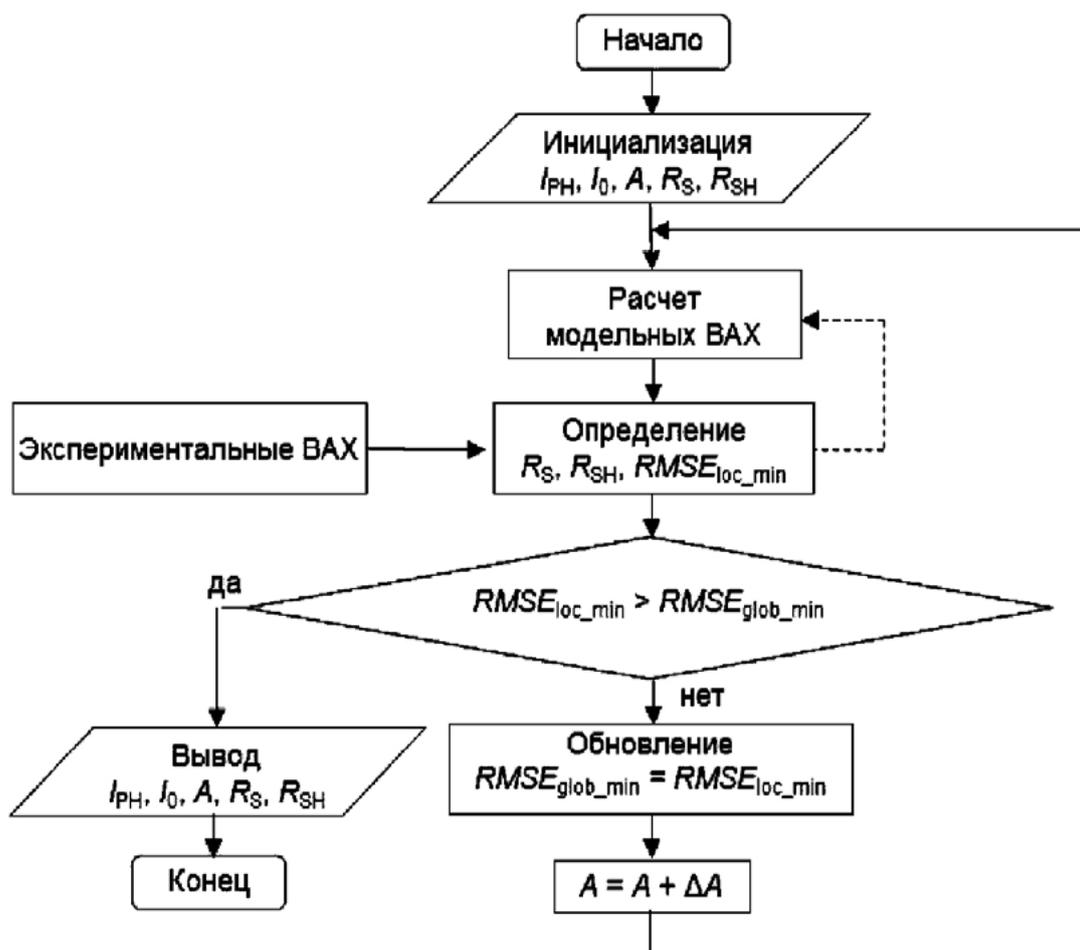


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения параметров модели фотоэлектрических преобразователей  
Fig. 2. Block diagram of the algorithm for determining the parameters of the model of photovoltaic converters

ная оценка метаэвристических алгоритмов, используемых для идентификации параметров моделей ФП, приведены в работах [5, 7, 11].

Анализ работ по теме исследования показал, что в подавляющем большинстве случаев параметры модели  $A$ ,  $R_S$  и  $R_{SH}$  принимают независимыми от солнечной инсоляции и температуры, а для их идентификации используют только данные технической спецификации ФМ и СЭ для режима STC. Такой подход обеспечивает максимально возможную простоту и минимизацию требуемых вычислительных ресурсов, однако использование для идентификации только одной ветви ВАХ приводит к тому, что погрешность модели существенно возрастает при изменении значений инсоляции и температуры.

Для устранения указанного недостатка авторы работ [12–14] предлагают использовать переменные значения параметров  $A$ ,  $R_S$  и  $R_{SH}$ , которые определяются и корректируются с учетом внешних условий эксплуатации ФП. Данный подход позволяет улучшить точность модели, но приводит к значительному усложнению процедуры определения ее параметров

и неудобству последующего применения.

**Предлагаемый способ идентификации параметров моделей фотоэлектрических преобразователей.** В данной работе предлагается альтернативный способ определения параметров модели ФП, позволяющий пользователю решить данную задачу при минимальных временных затратах с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Идея заключается в использовании для определения параметров модели не данных спецификации ФП для режима STC, а непосредственно семейства экспериментальных кривых ВАХ ФМ или СЭ при разных значениях инсоляции, которые многие производители приводят в паспортах технической спецификации. Предлагаемый способ основан на предположении, что в силу того, что форма кривой ВАХ ФП зависит от трех параметров SDM-модели ( $A$ ,  $R_S$  и  $R_{SH}$ ), то фиксированному значению одного из них будет соответствовать определенная пара значений других параметров, при которых величина среднеквадратичной ошибки (4) будет минимальной. Значение данной ошибки будет соответство-

вать локальному экстремуму целевой функции –  $RMSE_{loc\_min}$ . Соответственно, дискретно изменяя в определенном диапазоне значения одного параметра, можно определить для его фиксированных значений два других параметра и  $RMSE_{loc\_min}$ , а из полученной зависимости легко найти величину глобального экстремума  $RMSE_{glob\_min}$ , которая и определяет значения всех искомым переменных. Так как параметр модели  $A$  оказывает меньшее влияние на форму ВАХ в сравнении с параметрами  $R_s$  и  $R_{SH}$ , именно его и целесообразно использовать в качестве фиксированного и дискретно изменяющегося параметра модели. Блок-схема предлагаемого способа идентификации

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
7			Данные технической спецификации								
8		$N_s =$	54	число последовательных СЭ в модуле							
9		$N_p =$	1	число параллельных СЭ в модуле							
10		$G_{STC} =$	1000	радиация при стандартных условиях, Вт/м <sup>2</sup>							
11		$T_{STC} =$	298,15	температура при стандартных условиях, °K							
12		$V_{oc} =$	32,9	напряжение ХХ модуля, В							
13		$I_{sc} =$	8,21	ток КЗ модуля, А							
14		$A =$	0,95	фактор качества ФП (коэффициент идеальности диода)							
15		$V_{MPP} =$	26,3	напряжение в точке максимальной мощности, В							
16		$I_{MPP} =$	7,61	ток в точке максимальной мощности, А							
17		$k_I =$	0,00318	температурный коэффициент тока КЗ (А/°K)							
18		$k_V =$	-0,123	температурный коэффициент напряжения ХХ (В/°K)							
19			Расчет параметров схемы замещения ФМ при STC								
20		$V_{T\_STC} =$	1,3879	тепловое напряжение ФМ при стандартной температуре							
21		$I_{ph\_STC} =$	8,2257	фототок при STC, А							
22		$I_0\_STC =$	1,1958E-10	обратный ток при стандартных условиях, А							
23		$R_s =$	0,2750	последовательное сопротивление, Ом							
24		$R_{SH} =$	143,600	шунтирующее сопротивление, Ом							
25		$I(\Phi) =$	0,24862	целевая функция - минимум RMSE, А							

Рис. 3. Внешний вид листа Excel с расчетными данными фотоэлектрического модуля Kyocera KC200GT

Fig. 3. The appearance of an Excel sheet with calculated data of the Kyocera KC200GT photovoltaic module

параметров моделей ФП показана на рис. 2.

Проведенная апробация предложенного способа определения параметров ФП на разных типах ФМ и СЭ показала, что расчетная зависимость  $RMSE_{loc\_min} = f(A)$  имеет явно выраженный экстремум, что обеспечивает надежное и точное определение глобального минимума целевой функции, а, соответственно, и параметров модели.

Для практической реализации предлагаемого способа требуется общедоступный табличный процессор MS Excel с установленной надстройкой «Поиск решения», в котором необходимо создать бланк с таблицей ввода данных технической спецификации ФП, рис. 3. Также необходимо создать расчетные

таблицы, в которых по заданным значениям напряжения ( $V_j$ ) в точках ВАХ рассчитываются соответствующие им значения тока ( $I_j$ ) идентифицируемого ФП. Расчетные таблицы должны обеспечивать решение уравнения (1) каким-либо из численных методов. В данной работе использовался метод Ньютона-Рафсона, который обеспечивает надежное определение значений тока за 2–3 итерации при нулевых начальных условиях. Общее число расчетных таблиц должно соответствовать количеству используемых для идентификации кривых ВАХ. Чаще всего в данных технической спецификации производитель приводит 5 кривых ВАХ для различных значений солнечной инсоляции ( $G = 1000, 800, 600, 400$  и  $200$  Вт/м<sup>2</sup>) и 3–5 кривых ВАХ для разных значений температур.

Важно отметить, что расчетные бланки MS Excel требуется разработать только один раз, и впоследствии их можно использовать для определения параметров моделей любых ФМ и СЭ, требующих идентификации.

Исходными данными для выполнения расчетов являются кривые ВАХ при различных значениях солнечной инсоляции из технической спецификации ФП, которые нужно предварительно оцифровать. В данной работе для оцифровки графиков использовалась программа GetData Graph Digitizer<sup>5</sup>, которая обеспечивает простой экспорт экспериментальных таблиц данных в MS Excel. В этой работе была выполнена оцифровка всех пяти доступных из технической спецификации кривых ВАХ с различными значениями солнечной радиации для исследуемых моделей ФМ. Для оцифровки каждой кривой использовалось 20 точек.

В представленном на рис. 3 бланке в ячейку C25 введена формула, в которой по уравнению (4) вычисляется значение целевой функции, определяющей локальный экстремум. При фиксированном значении параметра  $A$  (ячейка C14) запускается надстройка MS Excel «Поиск решения», в окне которой необходимо выбрать в качестве целевой функции ячейку C25, а в качестве изменяемых переменных ячейки с определяемыми параметрами –  $R_s$  и  $R_{SH}$  (ячейки C23 и C24).

<sup>5</sup>GetData Graph Digitizer - программа для оцифровки графиков и диаграмм [Электронный ресурс]. URL: <http://getdata-graph-digitizer.com/> (26.03.2023).

**Таблица 1.** Данные технической спецификации фотоэлектрических модулей  
**Table 1.** Data of the technical specification of photovoltaic modules

Электрические характеристики/модель	Kyocera KC200GT	Shell SP70	Shell ST40
Технология	поликристаллический	монокристаллический	тонкопленочный
Количество солнечных элементов, $N_s$	54	36	36
Напряжение холостого хода, $V_{OC}$ (В)	32,9	21,4	23,3
Ток короткого замыкания, $I_{SH}$ (А)	8,21	4,7	2,68
Напряжение в точке максимальной мощности, $V_{MPP}$ (В)	26,3	16,5	16,6
Ток в точке максимальной мощности, $I_{MPP}$ (А)	7,61	4,25	2,41
Температурный коэффициент тока КЗ, $k_i$ ( $A/^\circ C$ )	0,0032	0,002	0,00035
Температурный коэффициент напряжения ХХ, $k_v$ ( $B/^\circ C$ )	-0,123	-0,076	-0,1
Максимальная мощность в режиме STC, $P_{max}$ (Вт)	200	70	40

Высокое быстродействие обеспечивает метод «Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ», который и рекомендуется выбрать. После запуска на выполнение надстройки будут рассчитаны значения параметров  $R_s$  и  $R_{SH}$ , соответствующие данному локальному экстремуму. Дискретно изменяя значения параметра  $A$ , и несколько раз повторив описанную выше процедуру, легко найти конечное решение оптимизационной задачи.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что используемый метод решения не критичен к начальным условиям, и для выполнения расчетов достаточно задать следующие диапазоны изменения варьируемых переменных:

$$0 < R_s \leq 0.05 \cdot N_s; \quad (6)$$

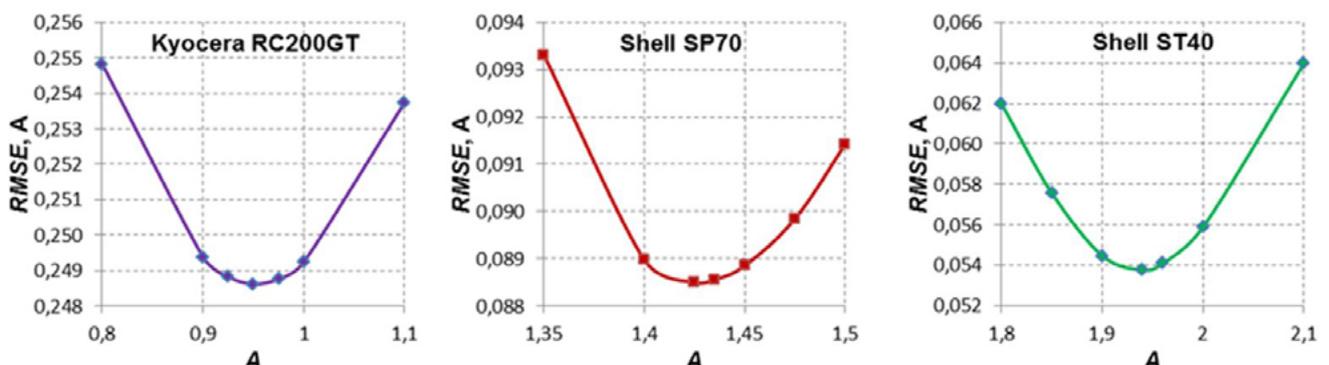
$$N_s \leq R_{SH} \leq 30 \cdot N_s.$$

Данный практический диапазон с запасом охватывает значения параметров всех типов используемых на сегодняшний день ФП.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для апробации предлагаемого способа идентификации параметров ФП было выбрано три модели ФМ, изготовленных по разной технологии, для которых опубликованы результаты аналогичных исследований [15–20]. Данные технической спецификации ФМ, отобранных для проведения исследований, приведены в табл. 1.

С помощью предложенного способа и по описанной выше методике были определены параметры моделей трех ФМ, которые представлены в табл. 2. Для проверки адекватности предлагаемого подхода в этой же таблице приводятся параметры моделей ФМ, полученные



**Рис. 4.** Расчетные зависимости среднеквадратичной ошибки модели фотоэлектрических модулей от коэффициента идеальности диода  
**Fig. 4.** Calculated dependences of the photovoltaic modules error of the photovoltaic modules model on the ideality coefficient of the diode

**Таблица 2.** Идентифицированные параметры моделей фотоэлектрических модулей  
**Table 2.** Identified parameters of photovoltaic module models

Тип ФМ	Метод	A	$I_{PH}$ , A	$I_0$ , A	$R_s$ , Ом	$R_{SH}$ , Ом
Kyocera KC200GT	Хмаму [17]	0,984	8,230	$1,96 \cdot 10^{-10}$	0,351	500
	Вильяльва [15]	1,3	8,214	$9,83 \cdot 10^{-8}$	0,226	508,99
	Ван [16]	1,3	8,213	$9,83 \cdot 10^{-8}$	0,229	593,24
	Предлагаемый метод	0,95	8,226	$1,096 \cdot 10^{-10}$	0,275	143,60
Shell SP70	Хмаму [17]	0,981	4,722	$3,42 \cdot 10^{-10}$	0,386	163,10
	Вильяльва [15]	1,3	4,713	$8,76 \cdot 10^{-8}$	0,401	135,42
	Ван [16]	1,3	4,713	$8,76 \cdot 10^{-8}$	0,408	145,44
	Предлагаемый метод	1,425	4,704	$4,20 \cdot 10^{-7}$	0,429	568,58
Shell ST40	Хмаму [17]	1,1	2,685	$3,42 \cdot 10^{-10}$	1,400	7520
	Вильяльва [15]	1,6	2,683	$3,89 \cdot 10^{-7}$	1,345	1465,8
	Ван [16]	1,6	2,681	$3,89 \cdot 10^{-7}$	1,366	7301,6
	Предлагаемый метод	1,94	2,686	$6,18 \cdot 10^{-6}$	0,968	450,03

с помощью других известных методов: популярного численного метода, предложенного Вильяльвой [15], аналитического метода Вана [16] и комбинированного численно-аналитического метода на основе  $W$ -функции Ламберта Бен Хмаму [17].

На рис. 4 показаны расчетные зависимости  $RMSE$  соответствия модельных и экспериментальных ВАХ от коэффициента идеальности диода ( $A$ ) для трех рассматриваемых фотоэлектрических модулей, полученные в результате поиска минимума целевой функции. Данные зависимости подтверждают гипотезу о существовании глобального экстремума целевой функции, а с учетом того, что исследования

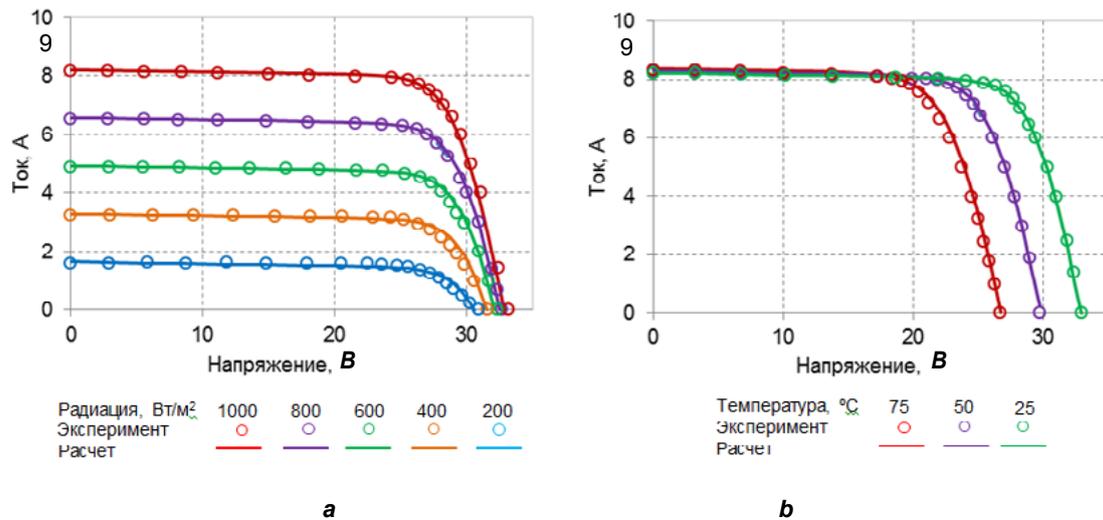
проведены на ФМ, изготовленных по разной технологии, можно сделать вывод, что предлагаемый способ идентификации параметров моделей ФП является универсальным и может использоваться для построения моделей ФП широкой номенклатуры.

Анализ полученных результатов (см. табл. 2) показывает, что предложенный метод обеспечивает достаточно высокую корреляцию с известными методами в части определения параметров  $I_{PH}$  и  $I_0$ , при этом значения других параметров ( $A$ ,  $R_s$ ,  $R_{SH}$ ) могут существенно различаться. Объясняется это тем, что параметры  $I_{PH}$  и  $I_0$  рассчитываются по формулам (2) и (3), и определяющее влияние на их величину оказы-

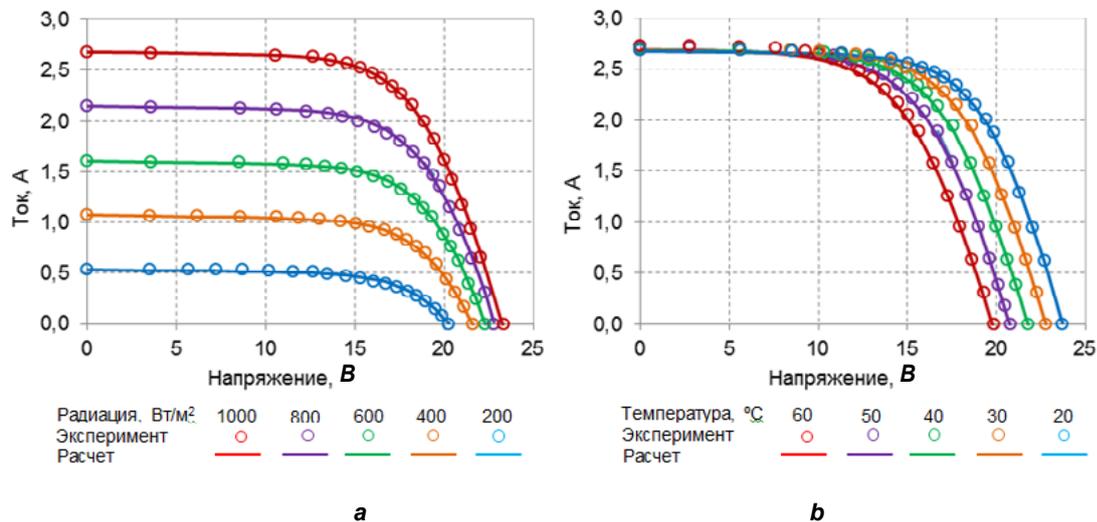
**Таблица 3.** Средняя относительная ошибка моделей фотоэлектрических модулей в реальных условиях окружающей среды

**Table 3.** Average relative error of photovoltaic module models in real environmental conditions

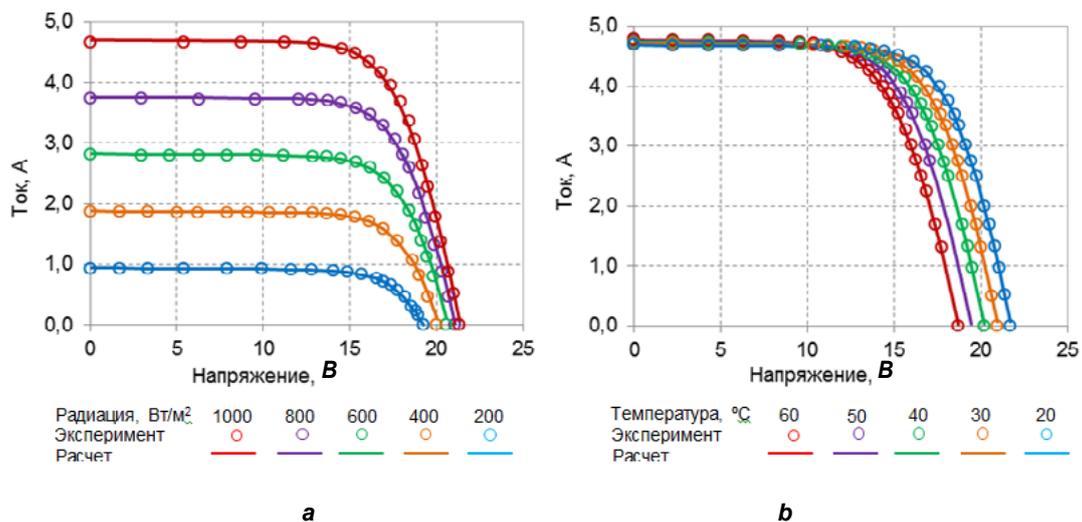
Тип фотоэлектрических модулей	Условия среды	Средняя относительная ошибка, ARE (%)		
		Hmamou[17]	Shin-ong [18]	предлагаемый метод
Kyocera KC200GT при $T = 25^\circ\text{C}$	$G = 1000 \text{ Вт/м}^2$	3,15	5,33	3,27
	$G = 800 \text{ Вт/м}^2$	1,68	6,90	4,16
	$G = 600 \text{ Вт/м}^2$	1,26	8,46	2,66
	$G = 400 \text{ Вт/м}^2$	4,35	5,49	4,69
Shell SP70 при $T = 25^\circ\text{C}$	$G = 1000 \text{ Вт/м}^2$	2,58	4,31	1,92
	$G = 800 \text{ Вт/м}^2$	1,50	3,29	1,65
	$G = 600 \text{ Вт/м}^2$	2,82	7,01	1,43
	$G = 400 \text{ Вт/м}^2$	3,02	5,64	1,21
Shell ST40 при $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$	$T = 20^\circ\text{C}$	2,90	4,05	0,67
	$T = 30^\circ\text{C}$	3,05	3,74	1,08
	$T = 40^\circ\text{C}$	4,20	2,59	1,06
	$T = 50^\circ\text{C}$	5,06	7,67	2,63



**Рис. 5. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрического модуля Kyocera KC200GT при изменении: а – освещенности; б – температуры**  
**Fig. 5. Volt-ampere characteristics of the Kyocera KC200GT photovoltaic module when changing: a – illumination; b – temperature**



**Рис. 6. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрического модуля Shell ST40 при изменении: а – освещенности; б – температуры**  
**Fig. 6. Volt-ampere characteristics of the Shell ST40 photovoltaic module when changing: a – illumination; b – temperature**



**Рис. 7. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрического модуля Shell SP70 при изменении: а – освещенности; б – температуры**

**Таблица 4.** Среднеквадратичная ошибка модели фотоэлектрического модуля Shell ST40 при изменении условий инсоляции, RMSE (A)

**Table 4.** RMS error of the Shell ST40 photovoltaic module model when the insolation conditions change, RMSE (A)

Метод идентификации параметров модели	Солнечная инсоляция, G (Вт/м <sup>2</sup> )				
	1000	800	600	400	200
Hmamou [17]	0,0669	0,0662	0,0256	0,0012	0,0232
Yahya-Khotbehsara [19]	0,0435	0,0359	0,0609	0,0724	0,0701
Babu's [20]	0,1334	0,0411	0,1342	0,1911	0,1707
Wang's [16]	0,0787	0,0344	0,0742	0,0985	0,1038
Предлагаемый метод	0,0199	0,0170	0,0092	0,0085	0,0101

вают данные технической спецификации ФМ при STC, которые во всех сравниваемых методах принимаются одинаковыми. А параметры  $A$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  определяются путем минимизации ошибки между модельными и экспериментальными ВАХ. И если в известных методах для сравнения используются только характерные точки ВАХ при STC, то в предлагаемом методе используется все семейство ВАХ при разных условиях инсоляции. Отметим, что предлагаемый метод позволяет идентифицировать параметры модели ФП и по одной ВАХ, однако результаты вычислительных экспериментов показали, что точность модели при этом ухудшается.

В табл. 3 представлены средние относительные ошибки между модельными и экспериментальными характеристиками ФМ, рассчитанные по предлагаемому методу и методами, предложенными в работах Hmamou [17] и Shinong [18], в реальных условиях окружающей среды.

На рис. 5–7 представлены ВАХ рассматриваемых модулей при изменении освещенности и температуры. Маркерами на графиках обозначены экспериментальные данные, а линии соответствуют расчетным характеристикам.

Из рис. 5–7 видно, что модельные характеристики хорошо согласуются с экспериментальными в широком диапазоне изменения температуры и освещенности для всех рассматриваемых ФМ.

В табл. 4 приведены значения среднеквадратичной ошибки между модельными и экспериментальными значениями тока модуля Shell ST40 при изменении условий инсоляции, полученные различными методами идентификации параметров [16, 17, 19, 20].

Результаты сравнительной оценки моделей ФП с параметрами, определенными с помощью различных методов идентификации, показывают, что полученные в данной работе модели ФМ в целом обеспечивают более высокую точность моделирования ВАХ в широком диапазоне изменения внешних условий в сравнении с аналогами.

Важным достоинством предлагаемого метода является возможность идентификации параметров моделей ФП только по данным измерений ВАХ, что позволяет его использовать для определения параметров моделей ФП, по которым отсутствуют данные технической спецификации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты исследований, посвященные разработке оригинального метода идентификации параметров моделей фотоэлектрических преобразователей. На основании сравнительного анализа известных видов математических моделей выбрана базовая структура экспоненциальной модели с одним диодом и пятью параметрами, обеспечивающая достаточно высокую точность моделирования электрических характеристик ФП в широком диапазоне изменения уровней радиации и температуры, а также простую интеграцию в популярный математический пакет схемотехнического моделирования MatLab/Simulink. Отличительной особенностью предлагаемого метода идентификации от известных является использование в качестве исходных данных семейства экспериментальных кривых ВАХ при разных значениях солнечной радиации, а в качестве критерия оптимизации минимум среднеквадратичной ошибки между модельными и экспериментальными ВАХ. Достоинством

такого подхода является возможность определения значений последовательного RS и параллельного RSH сопротивлений при фиксированном коэффициенте идеальности диода A с помощью табличного процессора MS Excel с установленной надстройкой «Поиск решения». Применение данной надстройки позволяет легко определить все неизвестные параметры модели без необходимости разработки программного кода и вычислительных алгоритмов, что обеспечивает доступность предлагаемого метода широкому кругу пользователей.

Результаты апробации предлагаемого метода идентификации на примере трех типов фотоэлектрических модулей Shell ST40, Shell SP70 и Kyocera KC200GT показали, что модельные ВАХ в широком диапазоне изменения

радиации и температуры хорошо согласуются с экспериментальными характеристиками, предоставленными производителями. Результаты сравнительной оценки погрешностей построенных моделей ФМ с другими известными моделями показали, что предлагаемый метод в целом обеспечивает более высокую точность моделирования, что позволяет его использовать для прогнозирования выработки электроэнергии фотоэлектрическими системами, анализа и оптимизации их рабочих режимов и т.п.

Направлением дальнейших исследований является изучение возможностей по повышению точности моделей ФП путем коррекции параметров  $A$ ,  $R_s$ ,  $R_{SH}$  в зависимости от значений солнечной радиации и температуры.

#### Список источников

1. Al-Subhi A. Efficient mathematical models for parameters estimation of single-diode photovoltaic cells // Energy Systems. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12667-022-00542-3>.
2. Hmamou D.B., Elyaqouti M., Arjdal E.H., Saadaoui D., Lidaighbi S., Chaoufi J., et al. A novel hybrid numerical with analytical approach for parameter extraction of photovoltaic modules // Energy Conversion and Management: X. 2022. Vol. 14. P. 100219. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100219>.
3. Montalvo-Galicia F., Sanz-Pascual M.T., Rosales-Quintero P., Moreno-Moreno M. Solar cell parameter extraction method from illumination and dark I-V characteristics // Nanomaterials. 2022. Vol. 12. P. 1955. <https://doi.org/10.3390/nano12121955>.
4. Kumar M., Kumar A. An efficient parameters extraction technique of photovoltaic models for performance assessment // Solar Energy. 2017. Vol. 158. P. 192–206. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.046>.
5. El-Dabah M.A., El-Sehiemy R.A., Hasanien H.M., Saad B. Photovoltaic model parameters identification using Northern Goshawk Optimization algorithm // Energy. 2023. Vol. 262. Part B. P. 125522. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125522>.
6. Fahim S.R., Hasanien H.M., Turky R.A., Aleem S.H.E.A., Calasan M. A Comprehensive review of photovoltaic modules models and algorithms used in parameter extraction // Energies. 2022. Vol. 15. P. 8941. <https://doi.org/10.3390/en15238941>.
7. Abbassi R., Abbassi A., Jemli M., Chebbi S. Identification of unknown parameters of solar cell models: a comprehensive overview of available approaches // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 90. P. 453–474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.011>.
8. Gude S., Jana R.C., Laudani A., Thanikanti S.B. Parameter extraction of photovoltaic cell based on a multi-objective approach using nondominated sorting cuckoo search optimization // Solar Energy. 2022. Vol. 239. P. 359–374. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.007>.
9. Said S., Massoud A.M., Benammar M., Ahmed S. A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox // Journal of Energy and Power Engineering. 2012. Vol. 6. P. 1965–1975.
10. Humada A.M., Hojabri M., Mekhilef S., Hamada H.M. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 56. P. 494–509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.051>.
11. Bo Qiuyu, Cheng Wuqun, Khishe M., Mohammadi M., Mohammed A.H. Solar photovoltaic model parameter identification using robust niching chimp optimization // Solar Energy. 2022. Vol. 239. P. 179–197. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.056>.
12. Naeijian M., Rahimnejad A., Ebrahimi S.M., Pourmousa N., Gadsden S. A. Parameter estimation of PV solar cells and modules using Whippy Harris Hawks optimization algorithm // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 4047–4063. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.085>.
13. Farah A., Belazi A., Benabdallah F., Almalaq A., Chtourou M., Abido M.A. Parameter extraction of photovoltaic models using a comprehensive learning Rao-1 algorithm // Energy Conversion and Management. 2022. Vol. 252. P. 115057. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115057>.
14. Humada A.M., Darweesh S.Y., Mohammed K.G., Kamil M., Mohammed S.F., Kasim N.K., et al. Modeling of PV system and parameter extraction based on experimental data: review and investigation // Solar Energy. 2020. Vol. 199. P. 742–760. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.068>.
15. Villalva M.G., Gazoli J.R., Filho E.R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays // IEEE Transactions on Power Electronics. 2009. Vol. 24. Iss. 5. P. 1198–1208. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>.
16. Wang Gang, Zhao Ke, Shi Jiangtao, Chen Wei, Zhang Haiyang, Yang Xinsheng. An iterative approach for modeling photovoltaic modules without implicit equations // Applied Energy. 2017. Vol. 202. P. 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.088>.

apenergy.2017.05.149.

17. Hmamou D.B., Elyaqouti M., Arjdal E., Ibrahim A., Abdul-Ghaffar H.I., Aboelsaud R., et al. Parameters identification and optimization of photovoltaic panels under real conditions using Lambert W-function // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. P. 9035–9045. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.219>.
18. Shinong Wang, Qianlong Mao, Jie Xu, Yuan Ge, Shilin Liu. An improved mathematical model of photovoltaic cells based on datasheet information // *Solar Energy*. 2020. Vol. 199. P. 437–446. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.046>.
19. Yahya-Khotbehara A., Shahhoseini A. A fast modeling of the double-diode model for PV modules using combined analytical and numerical approach // *Solar Energy*. 2018. Vol. 162. P. 403–409. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.047>.
20. Babu B.C., Gurjar S. A novel simplified two-diode model of photovoltaic (PV) module // *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2014. Vol. 4. Iss. 4. P. 1156–1161. <http://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2316371>.

### References

1. Al-Subhi A. Efficient mathematical models for parameters estimation of single-diode photovoltaic cells. *Energy Systems*. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12667-022-00542-3>.
2. Hmamou D.B., Elyaqouti M., Arjdal E.H., Saadaoui D., Lidaighbi S., Chaoufi J., et al. A novel hybrid numerical with analytical approach for parameter extraction of photovoltaic modules. *Energy Conversion and Management: X*. 2022;14:100219. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100219>.
3. Montalvo-Galicia F., Sanz-Pascual M.T., Rosales-Quintero P., Moreno-Moreno M. Solar cell parameter extraction method from illumination and dark I-V characteristics. *Nanomaterials*. 2022;12:1955. <https://doi.org/10.3390/nano12121955>.
4. Kumar M., Kumar A. An efficient parameters extraction technique of photovoltaic models for performance assessment. *Solar Energy*. 2017;158:192-206. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.046>.
5. El-Dabah M.A., El-Sehiemy R.A., Hasanien H.M., Saad B. Photovoltaic model parameters identification using Northern Goshawk Optimization algorithm. *Energy*. 2023;262(B):125522. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125522>.
6. Fahim S.R., Hasanien H.M., Turkey R.A., Aleem S.H.E.A., Calasan M. A Comprehensive review of photovoltaic modules models and algorithms used in parameter extraction. *Energies*. 2022;15:8941. <https://doi.org/10.3390/en15238941>.
7. Abbassi R., Abbassi A., Jemli M., Chebbi S. Identification of unknown parameters of solar cell models: a comprehensive overview of available approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;90:453-474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.011>.
8. Gude S., Jana R.C., Laudani A., Thanikanti S.B. Parameter extraction of photovoltaic cell based on a multi-objective approach using nondominated sorting cuckoo search optimization. *Solar Energy*. 2022;239:359-374. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.007>.
9. Said S., Massoud A.M., Benammar M., Ahmed S. A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox. *Journal of Energy and Power Engineering*. 2012;6:1965-1975.
10. Humada A.M., Hojabri M., Mekhilef S., Hamada H.M. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56:494-509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.051>.
11. Bo Qiuyu, Cheng Wuqun, Khishe M., Mohammadi M., Mohammed A.H. Solar photovoltaic model parameter identification using robust niching chimp optimization. *Solar Energy*. 2022;239:179-197. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.056>.
12. Naeijian M., Rahimnejad A., Ebrahimi S.M., Pourmousa N., Gadsden S. A. Parameter estimation of PV solar cells and modules using Whippy Harris Hawks optimization algorithm. *Energy Reports*. 2021;7:4047-4063. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.085>.
13. Farah A., Belazi A., Benabdallah F., Almalaq A., Chtourou M., Abido M.A. Parameter extraction of photovoltaic models using a comprehensive learning Rao-1 algorithm. *Energy Conversion and Management*. 2022;252:115057. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115057>.
14. Humada A.M., Darweesh S.Y., Mohammed K.G., Kamil M., Mohammed S.F., Kasim N.K., et al. Modeling of PV system and parameter extraction based on experimental data: review and investigation. *Solar Energy*. 2020;199:742-760. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.068>.
15. Villalva M.G., Gazoli J.R., Filho E.R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009;24(5):1198-1208. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>.
16. Wang Gang, Zhao Ke, Shi Jiangtao, Chen Wei, Zhang Haiyang, Yang Xinsheng. An iterative approach for modeling photovoltaic modules without implicit equations. *Applied Energy*. 2017;202:189-198. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.149>.
17. Hmamou D.B., Elyaqouti M., Arjdal E., Ibrahim A., Abdul-Ghaffar H.I., Aboelsaud R., et al. Parameters identification and optimization of photovoltaic panels under real conditions using Lambert W-function. *Energy Reports*. 2021;7:9035-9045. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.219>.
18. Shinong Wang, Qianlong Mao, Jie Xu, Yuan Ge, Shilin Liu. An improved mathematical model of photovoltaic cells based on datasheet information. *Solar Energy*. 2020;199:437-446. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.046>.

19. Yahya-Khotbehsara A., Shahhoseini A. A fast modeling of the double-diode model for PV modules using combined analytical and numerical approach. *Solar Energy*. 2018;162:403-409. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.047>.
20. Babu B.C., Gurjar S. A novel simplified two-diode model of photovoltaic (PV) module. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2014;4(4):1156-1161. <http://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2316371>.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ****Обухов Сергей Геннадьевич,**

д.т.н., доцент,  
профессор отделения электроэнергетики и  
электротехники,  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия  
✉ serob99@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7177-4036>

**Плотников Игорь Александрович,**

к.т.н., доцент,  
доцент отделения электроэнергетики  
и электротехники,  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия  
igorplt@tpu.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4777-1577>

**Климова Галина Николаевна,**

к.т.н., доцент,  
доцент отделения электроэнергетики  
и электротехники,  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия  
gariki@tpu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-6930-3603>

**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 10.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 12.05.2023 г.; принята к публикации 27.06.2023 г.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS****Sergey G. Obukhov,**

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Professor of the Department of Electrical Power Engineering  
and Electrical Engineering,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30 Lenin Pr., Tomsk 634050, Russia  
✉ serob99@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7177-4036>

**Igor A. Plotnikov,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Electrical Power  
Engineering and Electrical Engineering,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30 Lenin Pr., Tomsk 634050, Russia  
igorplt@tpu.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4777-1577>

**Galina N. Klimova,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Electrical Power  
Engineering and Electrical Engineering,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30 Lenin Pr., Tomsk 634050, Russia  
gariki@tpu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-6930-3603>

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflicts of interests.

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

**Information about the article**

The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 12.05.2023; accepted for publication 27.06.2023.