

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-135-145>

УДК 621.311.001.57

Модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink

Д. И. Зализный¹⁾

¹⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Предложена новая Simulink-модель фотоэлемента, ориентированная на использование стандартной библиотеки элементов систем электроснабжения SimPowerSystems из программного пакета MatLab/Simulink. Модель позволяет изменять значения солнечного излучения, температуры фотоэлемента и сопротивления нагрузки. Результатами работы модели являются расчетные значения напряжений и токов на выходе фотоэлемента. Разработанная Simulink-модель реализует известную зависимость вольт-амперной характеристики фотоэлемента путем использования как стандартных блоков MatLab/Simulink, так и специальных электротехнических блоков библиотеки SimPowerSystems. Модель отличается тем, что последовательное и параллельное сопротивления фотоэлемента в ней выполнены в виде резисторов из библиотеки SimPowerSystems. Основной алгоритм расчета реализован программным путем с использованием языка программирования «С». Для повышения устойчивости алгоритма к алгебраическим циклам введены параметры ограничений. Предложена новая методика расчета параметров модели фотоэлемента на основе экспериментальных данных. Методика предполагает составление системы уравнений с экспериментальными значениями напряжений и токов фотоэлемента. Для фотоэлектрического модуля OSP XTP 250 выполнены экспериментальные исследования в условиях различных значений солнечного излучения, показавшие, что относительная погрешность разработанной Simulink-модели не превышает 12 %. Simulink-модель позволяет формировать фотоэлектрические модули и затем схемы фотоэлектростанций в составе систем электроснабжения. Благодаря этому можно имитировать работу потребителей электроэнергии, погодные условия, наличие теней или загрязнения на поверхности фотоэлектрических модулей, выполнять имитацию развивающихся неисправностей в фотоэлектрических модулях электростанции (например, имитацию снижения КПД модулей из-за их деградации или увеличение их последовательного сопротивления из-за ухудшения внутренних контактов). Разработанная Simulink-модель может быть использована на этапе как проектирования, так и эксплуатации фотоэлектростанций.

Ключевые слова: Simulink, модель фотоэлемента, вольт-амперная характеристика, SimPowerSystems, последовательное сопротивление, алгебраический цикл, ограничения

Для цитирования: Зализный, Д. И. Модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink / Д. И. Зализный // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 135–145. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-135-145>

Адрес для переписки

Зализный Дмитрий Иванович
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
просп. Октября, 48а, корп. 2,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 40-57-64
kaf_power@gstu.by

Address for correspondence

Zalizny Dmitry I.
Sukhoi State Technical University
of Gomel
48a, housing 2 October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 40-57-64
kaf_power@gstu.by

Model of a Photovoltaic Cell for the MatLab/Simulink SimPowerSystems Library

D. I. Zalizny¹⁾

¹⁾Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. A new Simulink model of a photovoltaic cell has been proposed. The model is focused on the use of a standard SimPowerSystems library with power engineering elements from the MatLab/Simulink software package. The model allows altering the values of solar irradiance, photovoltaic cell temperature and load resistance. The results of the model application are the calculated values of voltages and currents at the photovoltaic cell output. The Simulink model that has been developed implements the known dependence of the photovoltaic cell volt-ampere characteristic by using both standard MatLab/Simulink blocks and special electric SimPowerSystems library blocks. The model is characterized by the fact that the series and parallel resistance of the photovoltaic cell are made in the form of resistors from the SimPowerSystems library. The main calculation algorithm is implemented programmatically by using the “C” programming language. To increase the algorithm stability to algebraic cycles the restrictions parameters are introduced. A new technique of calculating the photovoltaic cell model parameters based on experimental data has been proposed. The technique includes the preparation of a system of equations with experimental values of the photovoltaic cell voltages and currents. Experimental tests have been carried out for the photovoltaic module OSP XTP 250 under different solar irradiance values. The tests showed that the relative error of the Simulink model that has been developed does not exceed 12 %. The Simulink model makes it possible to build photovoltaic modules and then to build schemes of photovoltaic power plants as a part of power supply systems. Due to the latter it is possible to simulate the electricity consumers’ work, weather conditions, and the presence of shadows or pollution on the surface of photovoltaic modules. Also, one can carry out a simulation of increasing failures in power plant photovoltaic modules, e.g. simulating of modules efficiency reducing because of their degradation, or simulating of modules series resistance increasing because of the photovoltaic cell internal contacts deterioration. The Simulink model that has been developed can be used both at the design stage and at the stage of photoelectric power plants operation.

Keywords: Simulink, photovoltaic cell model, volt-ampere characteristic, SimPowerSystems, series resistance, algebraic cycle, restrictions

For citation: Zalizny D. I. (2019) Model of a Photovoltaic Cell for the MatLab/Simulink SimPowerSystems Library. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (2) 135–145. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-135-145> (in Russian)

Введение

Программный пакет MatLab/Simulink широко используется в технике для математического моделирования процессов и проведения вычислительных экспериментов. Он содержит как базовые элементы моделирования, так и множество дополнительных библиотек. Для задач энергетики наиболее актуальной является библиотека SimPowerSystems, имеющая электротехнические элементы и позволяющая формировать схемы систем электроснабжения с целью анализа их работы. К сожалению, стандартная модель фотоэлемента, содержащаяся в этой библиотеке, ограничена в выполнении всех необходимых настроек.

В литературе присутствует ряд разработок моделей фотоэлектрических модулей и фотоэлементов для MatLab/Simulink. Так, в [1–11] предложены модели, реализуемые на основе базовых блоков Simulink, что серьезно затрудняет их использование в библиотеке SimPowerSystems и последующее

моделирование элементов фотоэлектростанции, поскольку блоки библиотеки SimPowerSystems нельзя рассматривать как чисто математические. Эти блоки выполняют расчеты напряжений и токов и не совместимы напрямую с базовыми блоками Simulink. Чтобы выполнить такое совмещение, требуются специальные методики, не описываемые в [1–11].

В [12, 13] рассматриваются модели, использующие, помимо стандартных блоков Simulink, непосредственно блоки библиотеки SimPowerSystems по известной методике с применением управляемого источника тока. Однако в [12, 13] нет четких рекомендаций по определению неизвестных параметров моделей для фотоэлектрических модулей различных марок. Кроме того, авторами не раскрывается проблема ограничений расчетов из-за наличия экспоненциальных функций с большими показателями степени, а также проблема алгебраических циклов, обусловленных обратными связями в структуре модели, из-за чего на некоторых диапазонах изменения входных величин алгоритмы теряют устойчивость.

Цель представленных исследований – создать удобную модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems, позволяющую формировать схемы фотоэлектростанций в составе систем электроснабжения.

Теоретическая вольт-амперная характеристика фотоэлемента

Во всех рассмотренных публикациях [1–13] и в учебнике [14] приводится схема замещения фотоэлемента (одной ячейки фотоэлектрического модуля), показанная на рис. 1.

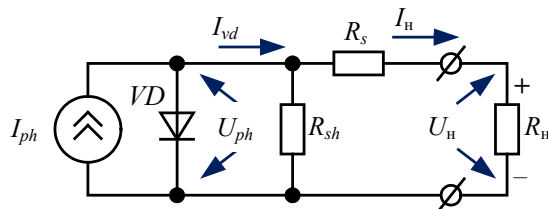


Рис. 1. Схема замещения фотоэлемента

Fig. 1. Equivalent scheme of a photovoltaic cell

Необходимо отметить, что в зарубежных публикациях в схемах замещения источники тока обозначают так, как в отечественных схемах замещения принято изображать источники ЭДС.

В схеме на рис. 1 источник тока I_{ph} и диод (p – n -переход) VD реализуют основную часть вольт-амперной характеристики (ВАХ) фотоэлемента $I_{vd}(U_{ph})$ в соответствии с формулой [14, с. 125]

$$I_{vd} = I_0 \left(e^{\frac{qU_{ph}}{K_B\theta}} - 1 \right) - I_{ph} \approx I_0 \left(e^{\frac{11594,2U_{ph}}{\theta}} - 1 \right) - I_{ph}, \quad (1)$$

где I_{vd} – суммарный ток через p – n -переход фотоэлемента, А; I_0 – обратный ток p – n -перехода при отсутствии солнечного излучения, А; q – заряд элект-

рона, Кл; K_B – постоянная Больцмана, Кл·В/К; U_{ph} – напряжение, генерируемое фотоэлементом, В; θ – температура p - n -перехода, К; I_{ph} – дополнительный ток через p - n -переход, обусловленный солнечным излучением (фототок), А.

Для фототока I_{ph} будем рассматривать упрощенную зависимость от солнечного излучения

$$I_{ph} = K_{ph} S, \quad (2)$$

где K_{ph} – коэффициент пропорциональности, А·м²/Вт; S – солнечное излучение, Вт/м².

Параллельное сопротивление R_{sh} характеризует токи утечки изоляции фотоэлемента, а последовательное сопротивление R_s – качество его контактов. Таким образом, ток нагрузки I_n учитывает как значение тока I_{vd} , так и влияние дополнительных сопротивлений R_{sh} и R_s .

Очевидно, что общая ВАХ фотоэлемента $U_n(I_n)$ представляет собой сумму ВАХ всех элементов на схеме замещения рис. 1. Однако поскольку линейное сопротивление R_{sh} подключено параллельно нелинейному элементу VD и значение этого сопротивления имеет порядок мегаом, его влиянием на напряжение нагрузки U_n можно пренебречь.

Отдельные составляющие и суммарная ВАХ фотоэлемента изображены на рис. 2. При этом на рис. 2а общая ВАХ $U_n(I_n)$ построена как сумма ВАХ $I_{vd}(U_{ph})$ и ВАХ сопротивления R_s по отношению к оси тока.

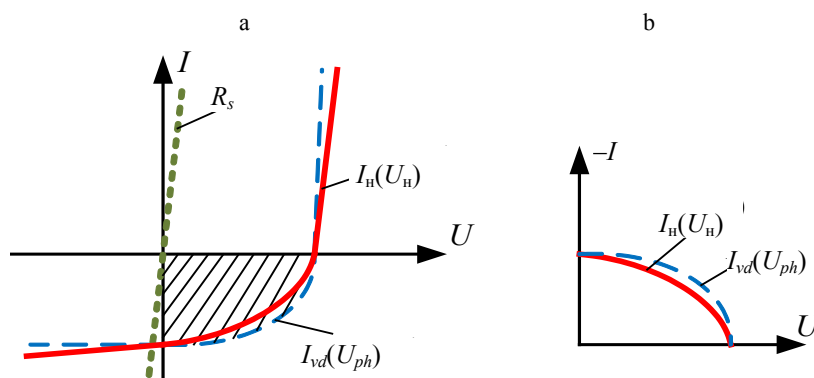


Рис. 2. Теоретические вольт-амперные характеристики фотоэлемента:
а – исходные; б – инверсные

Fig. 2. Theoretical volt-ampere characteristics of a photovoltaic cell:
a – base; b – inverted

Область генерации, заштрихованная на рис. 2а, является рабочей областью фотоэлемента. Ее принято изображать отдельно на инверсной шкале тока (рис. 2б). Далее будем использовать только эту инверсную шкалу.

Расчет параметров модели по экспериментальным данным

Для разрабатываемой Simulink-модели солнечное излучение S и температура фотоэлемента θ являются входными величинами. Их необходимо

изменять в процессе имитации требуемых условий. Результатами работы модели должны быть значения напряжения U_n и тока I_n .

Таким образом, в соответствии с (1) и (2) априори неизвестными параметрами модели являются величины I_0 , I_{ph} и K_{ph} . Разработаем методику их расчета на основе результатов экспериментальных исследований.

Предположим, что имеется экспериментальная ВАХ $I(U)$ некоторого фотоэлектрического модуля, содержащего n фотоэлементов. Рассмотрим две крайние точки на этой ВАХ: одну, близкую к режиму короткого замыкания со значениями I_1 и U_1 , а другую, близкую к режиму холостого хода со значениями I_2 и U_2 . Приняв допущение, что все фотоэлементы модуля идентичны по параметрам, в соответствии с (1) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} I_1 = I_0 \left(e^{\frac{11594,2 U_1}{\theta n}} - 1 \right) - I_{ph}; \\ I_2 = I_0 \left(e^{\frac{11594,2 U_2}{\theta n}} - 1 \right) - I_{ph}, \end{cases} \quad (3)$$

где θ – температура модуля во время проведения эксперимента, К; n – количество фотоэлементов в модуле.

Выразив из (3) неизвестные, с учетом (2) запишем необходимые расчетные соотношения:

$$\begin{cases} I_0 = \frac{I_1 - I_2}{e^{\frac{11594,2 U_1}{\theta n}} - e^{\frac{11594,2 U_2}{\theta n}}}; \\ I_{ph} = I_0 \left(e^{\frac{11594,2 U_1}{\theta n}} - 1 \right) - I_1; \\ K_{ph} = \frac{I_{ph}}{S}, \end{cases} \quad (4)$$

где S – значение солнечного излучения во время эксперимента, Вт/м².

Отметим, что если выражения (4) использовать для всего модуля ($n = 1$), то значения экспонент превысят e^{1000} , что сопряжено с трудностями применения в сложных алгоритмах. В научной литературе [1–13] эта проблема почему-то не раскрыта.

На кафедре «Электроснабжение» ГГТУ имени П. О. Сухого были выполнены измерения ВАХ фотоэлектрического модуля Orange Solar OSP XTP 250, содержащего 60 последовательно соединенных фотоэлементов ($n = 60$), с помощью специального прибора SOLAR I-Vw фирмы HT-ITALIA.

Результаты измерений: $S = 1018,2 \text{ Вт/м}^2$; $\theta = 48,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $I_1 = 8,372 \text{ А}$; $U_1 = 6,5 \text{ В}$; $I_2 = 0,065 \text{ А}$; $U_2 = 33,49 \text{ В}$.

Результаты расчетов по (4): $I_0 = -1,514 \cdot 10^{-8} \text{ А}$; $I_{ph} = -8,372 \text{ А}$; $K_{ph} = 8,222 \cdot 10^{-3} \text{ А}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$.

В соответствии со схемой замещения на рис. 1 неизвестными параметрами модели также являются значения сопротивлений R_{sh} и R_s . Как уже было сказано, значение R_{sh} не оказывает существенного влияния на работу модели, поэтому его можно принять порядка 100 МОм для одного фотоэлемента.

Значение последовательного сопротивления R_s , наоборот, существенно влияет на результаты, особенно при высоких токах нагрузки. Определять это сопротивление будем графически по ВАХ в соответствии с рис. 2. Для этого необходимо построить разность по отношению к оси тока между экспериментальной ВАХ и теоретической ВАХ, рассчитанной по формуле (1). Результаты показаны на рис. 3.

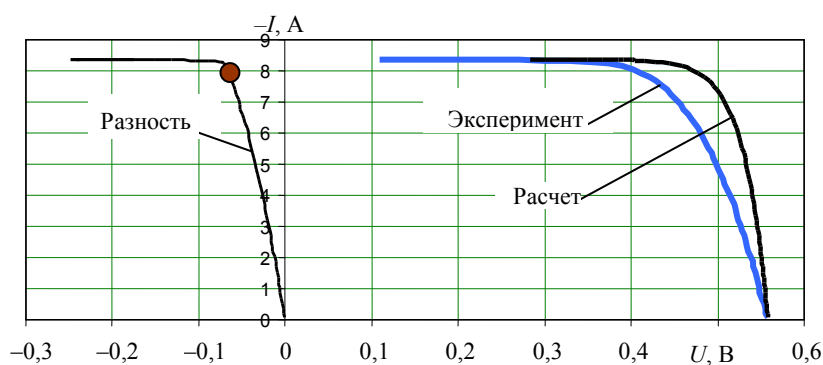


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики для одного фотоэлемента модуля OSP XTP 250

Fig. 3. Volt-ampere characteristics for a photovoltaic cell of the OSP XTP 250 module

Из рис. 3 видно, что в той области, где расчетные значения отличаются от экспериментальных, кривая разности близка к прямой. Это согласуется с рис. 2а.

Расчет значения последовательного сопротивления R_s будем выполнять по крайней точке прямой ВАХ (жирная точка на рис. 3). В результате получим

$$R_s \approx \frac{-0,067}{-8,04} \approx 0,008 \text{ Ом.}$$

Предлагаемая модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems

Внешняя схема предлагаемой Simulink-модели фотоэлемента показана на рис. 4, а внутренняя — на рис. 5.

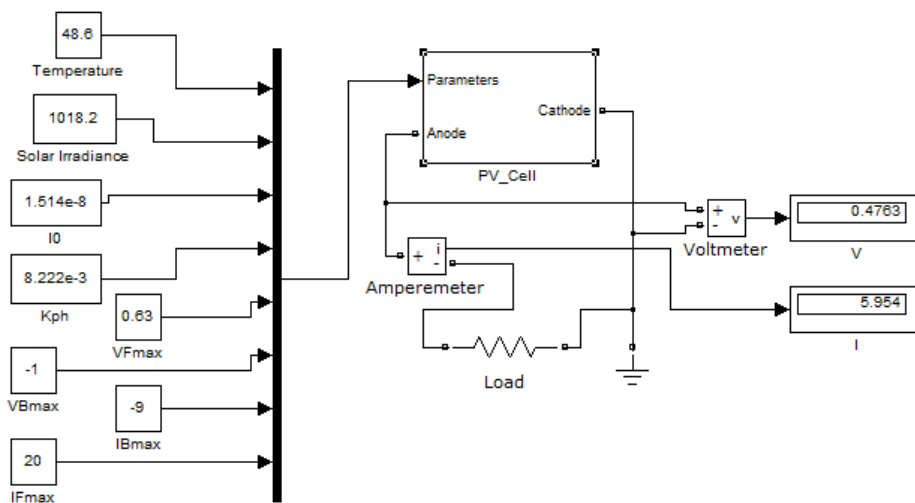


Рис. 4. Внешняя схема разработанной Simulink-модели фотоэлемента

Fig. 4. Outside scheme of the developed Simulink-model of a photovoltaic cell

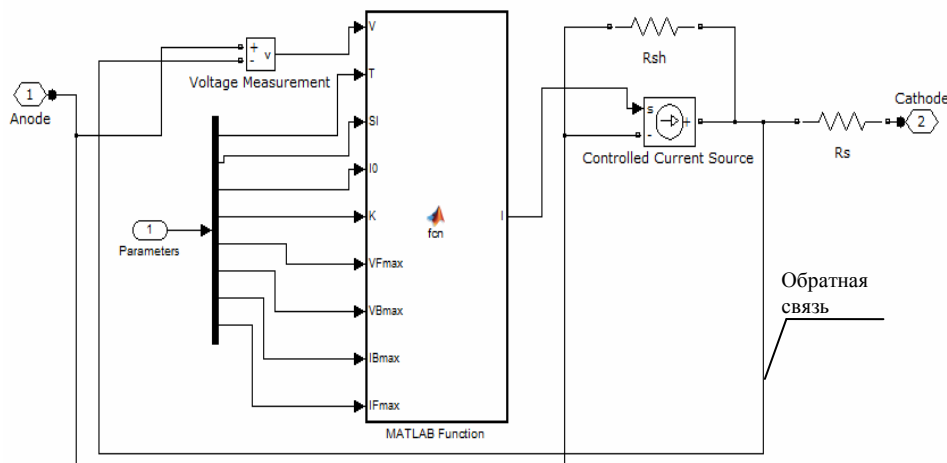


Рис. 5. Внутренняя схема разработанной Simulink-модели фотоэлемента

Fig. 5. Inside scheme of the Simulink-model of a photovoltaic cell that has been developed

Модель работает следующим образом. Для пользователя предложены восемь входных параметров: температура фотоэлемента ($^{\circ}\text{C}$); солнечное излучение ($\text{Вт}/\text{м}^2$); параметры модели I_0 и K_{ph} , расчет которых описан выше; параметры ограничений расчета VF_{\max} , VB_{\max} , IB_{\max} , IF_{\max} .

Параметры ограничений необходимы для предотвращения потери устойчивости алгоритма из-за наличия алгебраического цикла, обусловленного обратной связью (рис. 5). Эти параметры имеют следующий смысл: VF_{\max} – максимальное прямое напряжение фотоэлемента; VB_{\max} – максимальное обратное напряжение фотоэлемента; IF_{\max} – максимальный прямой ток фотоэлемента; IB_{\max} – максимальный обратный ток фото-

элемента. Значения этих параметров можно принять в соответствии с паспортными характеристиками фотоэлектрического модуля, учитывая, что значения напряжений нужно делить на количество фотоэлементов n в модуле.

Нагрузку фотоэлемента в предлагаемой модели можно изменять с помощью сопротивления Load, контролируя значения напряжения и тока. Связь между математической и электрической частями схемы модели осуществляется по известной методике для библиотеки SimPowerSystems с использованием управляемого источника тока Controlled Current Source.

Сопротивления схемы замещения фотоэлемента (рис. 1) R_{sh} и R_s представлены как электрические элементы библиотеки SimPowerSystems, что принципиально отличает предлагаемую модель от моделей [12, 13]. Для рассматриваемого модуля приняты следующие значения этих параметров: $R_{sh} = 100$ МОм; $R_s = 0,008$ Ом (расчет приведен выше).

Алгоритм расчета вольт-амперной характеристики в соответствии с (1), (2) и с учетом ограничений реализован в блоке MatLab Function на языке программирования «С». Фрагмент листинга программы показан на рис. 6.

```
qb=11594.2; % Заряд электрона, деленный на постоянную Больцмана
% Условия ограничений по напряжению
if (V>VFmax)
V=VFmax;
end
if (V<VBmax)
V=VBmax;
end
% Расчет вольт-амперной характеристики
i=I0*(exp(qb*V/(T+273))-1)-K*SI;
% Условия ограничений по току
if (i<IBmax)
I=IBmax;
else (i>IFmax)
I=IFmax;
end
```

Рис. 6. Фрагмент листинга программы расчета вольт-амперной характеристики

Fig. 6. Part of a program routine for volt-ampere characteristic calculating

Экспериментальная проверка точности разработанной Simulink-модели

Для проверки адекватности предлагаемой модели на кафедре «Электропитание» ГГТУ имени П. О. Сухого выполнены экспериментальные исследования с использованием описанного выше оборудования, которые проводились в яркий солнечный день. Для получения разных значений солнечного излучения осуществлялись изменение и измерение угла поворота фотоэлектрического модуля относительно земли. Измеренные параметры для различных экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия проведения экспериментов
Experimental tests conditions

№ эксперимента	1	2	3	4
Угол, град	90°	60°	45°	20°
S , Вт/м ²	683,9	1018,2	1022,7	970,2
θ , °C	47,7	48,6	48,8	47,7

Экспериментальные и полученные по Simulink-модели ВАХ в соответствии с условиями экспериментов в табл. 1 показаны на рис. 7.

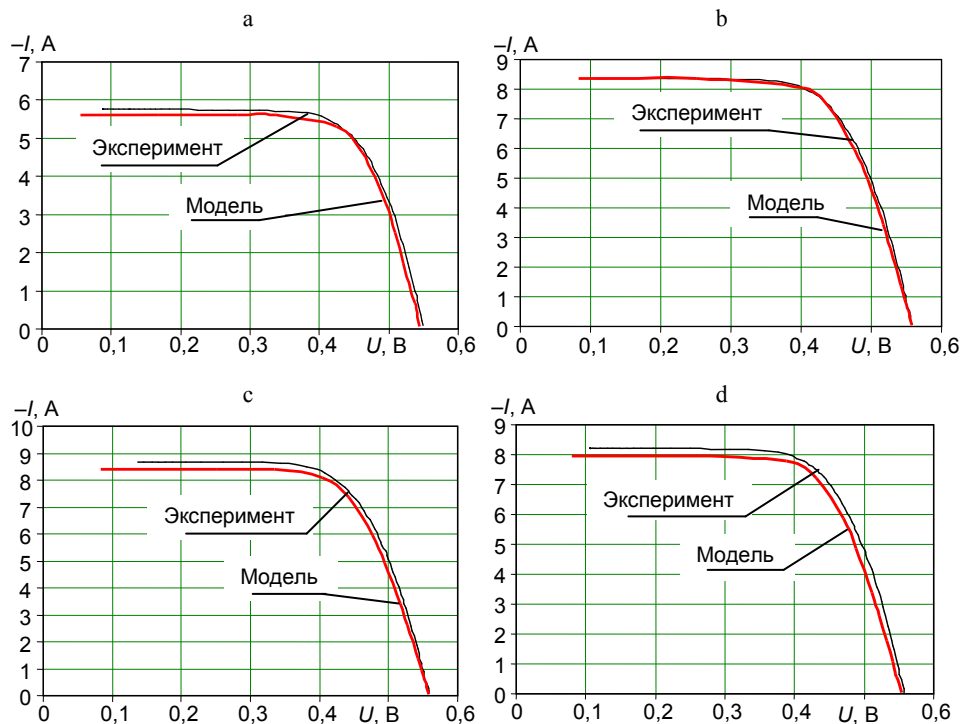


Рис. 7. Экспериментальные и смоделированные вольт-амперные характеристики:
а – эксперимент № 1; б – № 2; с – № 3; д – № 4

Fig. 7. Experimental and simulated volt-ampere characteristics:
а – test No 1; б – No 2; с – No 3; д – No 4

Максимальная абсолютная погрешность расчета тока по предлагаемой Simulink-модели не превысила 0,5 А, т. е. максимальная относительная погрешность по току составила около 12 %. Это можно считать приемлемым результатом для практических целей, однако вместе с тем очевидно, что разработанная модель нуждается в дальнейших усовершенствованиях.

Области применения разработанной Simulink-модели

На основе предложенной модели фотоэлемента можно реализовать модель фотоэлектрического модуля, соединив необходимое количество фотоэлементов последовательно. Затем, соединяя модели модулей параллельно

или последовательно, можно получить имитационную модель генерирующей части фотоэлектростанции.

Изменение сопротивления нагрузки в схеме Simulink-модели позволяет имитировать работу потребителей электроэнергии, а изменение значений солнечного излучения – погодные условия, наличие теней на поверхности модулей или же их загрязнение. Если изменять параметры самой модели, такие как R_s , K_{ph} или I_0 , то можно выполнить имитацию развивающихся неисправностей в модулях электростанции. Например, имитацию снижения КПД модулей из-за их деградации или увеличение последовательного сопротивления из-за ухудшения внутренних контактов.

К сожалению, предложенная Simulink-модель не позволяет рассчитывать текущую температуру фотоэлементов, однако данная тематика – предмет дальнейших разработок автора.

ВЫВОДЫ

1. Существующие Simulink-модели фотоэлементов проблематично использовать в библиотеке SimPowerSystems, предназначенной для создания имитационных моделей систем электроснабжения.

2. В существующих Simulink-моделях фотоэлементов нет однозначной методики расчета всех неизвестных параметров модели фотоэлемента.

3. Разработана новая Simulink-модель фотоэлемента, удобная для использования в библиотеке SimPowerSystems.

4. Предложена новая методика расчета параметров модели фотоэлемента на основе экспериментальных данных.

5. Выполнены экспериментальные исследования, показавшие, что относительная погрешность разработанной Simulink-модели не превышает 12 %.

6. Разработанная Simulink-модель фотоэлемента может быть использована для имитации как нормальных, так и аномальных режимов работы фотоэлектростанций, а также на этапах проектирования и эксплуатации фотоэлектростанций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pandiarajan, N. Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink / N. Pandiarajan, R. Muthu // ICEES. 2011. P. 314–319. <https://doi.org/10.1109/icees.2011.5725339>.
2. Tsai, H-L. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MatLab/Simulink / H-L Tsai, C-S Tu, Su Y-J // WCECS. San-Francisco, 2008. P. 978–984.
3. MatLab/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell / T. Salmi [et al.] // International Journal of Renewable Energy Research. 2012. Vol. 2, No 2. P. 213–218.
4. Photovoltaic Module Modeling Using Simulink/MatLab / Krismadinata [et al.] // Procedia Environmental Sciences. 2013. No 17. P. 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.069>.
5. Sheik, S. M. Modeling and Simulation of Photovoltaic Module Using MatLab/Simulink / S. M. Sheik // International Journal of Chemical and Environmental Engineering. 2011. Vol. 2, No 5. P. 350–355.
6. Nema, S. MatLab/Simulink Based Study of Photovoltaic Cells / Modules / Array and their Experimental Verification / S. Nema, R. K. Nema, A. Gayatri // International Journal of Energy and Environment. 2010. Vol. 1, No 3. P. 487–500.
7. Patel, J. Modeling and Simulation of Solar Photovoltaic Module Using MatLab/Simulink / J. Patel, S. Gaurag // IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. 2013. Vol. 2, No 3. P. 225–228. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0203003>.
8. Habbati, B. A Detailed Modeling of Photovoltaic Module Using MatLab / B. Habbati, Y. Ramdani, F. Moulay // NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics. 2014. No 3. P. 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2014.04.001>.

9. Abdulkadir, M. Modeling and Simulation Based Approach of Photovoltaic System in Simulink Model / M. Abdulkadir, A. S. Samosir, A. H. M. Yatim // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. Vol. 7, No 5. P. 616–623. <https://doi.org/10.1109/pecon.2012.6450231>.
10. Козюков, Д. А. Моделирование характеристик фотоэлектрических модулей в MatLab/Simulink / Д. А. Козюков, Б. К. Цыганков // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2015. Т. 8, № 112. С. 1577–1593.
11. Левшов, А. В. О математическом моделировании фотоэлектрических модулей / А. В. Левшов, А. Ю. Федоров // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика*. 2013. Т. 14, № 1. С. 153–158.
12. A MatLab-Simulink-Based PV Module Model and its Application under Conditions of Nonuniform Irradiance / Kun Ding [et al.] // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2012. Vol. 27, No 4. P. 864–872. <https://doi.org/10.1109/tec.2012.2216529>.
13. A MatLab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox / S. Said [et al.] // *Journal of Energy and Power Engineering*. 2012. Vol. 6. P. 1965–1975.
14. Foster, R. *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment* / R. Foster, M. Ghassemi, A. Cota // CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, 2010. 382 p. <https://doi.org/10.1201/9781420075670>.

Поступила 14.09.2018 Подписана в печать 20.11.2018 Опубликовано онлайн 29.03.2019

REFERENCES

1. Pandiarajan N., Muthu R. (2011) Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink. *1st International Conference on Electrical Energy Systems*, 314–319. <https://doi.org/10.1109/icees.2011.5725339>.
2. Tsai H-L., Tu C-S, Su Y-J. (2008) Development of Generalized Photovoltaic Model Using MatLab/Simulink. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008WCECS 2008*. San-Francisco, 978–984.
3. Salmi T., Bouzguenda M., Gastli A., Masmoudi A. (2012) MatLab/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2 (2), 213–218.
4. Krismadinata, Nasrudin Abd. Rahim, Hew Wooi Ping, Jeyraj Selvaraj (2013) Photovoltaic Module Modeling Using Simulink/MatLab. *Procedia Environmental Sciences*, (17), 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.069>.
5. Sheik S. Mohammed (2011) Modeling and Simulation of Photovoltaic Module Using MatLab/Simulink. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, 2 (5), 350–355.
6. Nema S., Nema R. K., Gayatri Agnihotri. (2010) MatLab/Simulink Based Study of Photovoltaic Cells / Modules / Array and their Experimental Verification. *International Journal of Energy and Environment*, 1 (3), 487–500.
7. Patel J., Gaurag Sharma (2013) Modeling and Simulation of Solar Photovoltaic Module Using MatLab/Simulink. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2 (3), 225–228. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0203003>.
8. Habbati B., Ramdani Y., Moulay F. (2014) A Detailed Modeling of Photovoltaic Module Using MatLab. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, (3), 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2014.04.001>.
9. Abdulkadir M., Samosir A. S., Yatim A. H. M. (2012) Modeling and Simulation Based Approach of Photovoltaic System in Simulink Model. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7 (5), 616–623. <https://doi.org/10.1109/pecon.2012.6450231>.
10. Kozyukov D. A., Tsygankov B. K. (2015) Modeling of Photovoltaic Modules Characteristics by Using MatLab/Simulink. *Nauchnyi Zhurnal Kubanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta = Scientific Journal of KubSAU*, 8 (112), 1577–1593 (in Russian).
11. Levshov A.V., Fedorov A. Yu. (2013) Mathematical Modeling of Photovoltaic Modules. *Naukovi Pratsi Donets'kogo Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Elektrotekhnika i Energetika Research* [Scientific Works of Donetsk National Technical University. Series: “Electrical Engineering and Power Engineering”], 14 (1), 153–158 (in Russian).
12. Kun Ding, XinGao Bian, HaiHao Liu, Tao Peng (2012) MatLab-Simulink-Based PV Module Model and Its Application under Conditions of Nonuniform Irradiance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27 (4), 864–872. <https://doi.org/10.1109/tec.2012.2216529>.
13. Said S., Massoud A., Benammar M., Ahmed S. (2012) A MatLab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox. *Journal of Energy and Power Engineering*, 6, 1965–1975.
14. Foster R., Ghassemi M., Cota A. (2010) *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment*. CRC Press Taylor & Francis Group. 382. <https://doi.org/10.1201/9781420075670>.

Received: 14 September 2018 Accepted: 20 November 2018 Published online: 29 March 2019