

УДК 620.9.001.5:51-7

UDC 620.9.001.5:51-7

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В MATLAB/SIMULINK****SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC MODULES CHARACTERISTICS IN MATLAB/SIMULINK**

Козюков Дмитрий Александрович  
аспирант  
[kozyukov\\_dmitrii@mail.ru](mailto:kozyukov_dmitrii@mail.ru)  
РИНЦ SPIN-код: 4366-3994

Kozyukov Dmitry Alexandrovich  
postgraduate student  
[kozyukov\\_dmitrii@mail.ru](mailto:kozyukov_dmitrii@mail.ru)  
RSCI SPIN-code: 4366-3994

Цыганков Борис Константинович  
к.т.н., профессор  
*Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия*

Tsygankov Boris Konstantinovich  
Cand.Tech.Sci., professor  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

В связи с расширением области применения солнечных фотоэлектрических модулей в ряде случаев возникает необходимость точного определения их параметров и характеристик. Для анализа характеристик конкретных солнечных модулей при различных уровнях освещенности и значениях температуры целесообразно использовать метод компьютерного моделирования. В статье представлен порядок разработки имитационной модели фотоэлектрических модулей в среде Matlab/Simulink. Имитационная модель строится на основе пятипараметрической аналитической модели вольт-амперной характеристики солнечного элемента. Разработанная модель позволяет исследовать вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики солнечных модулей в зависимости от уровней интенсивности солнечного излучения, температуры, значений тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, внутренних сопротивлений солнечных элементов, а также диодного параметра. Расхождение данных результатов моделирования с техническими характеристиками не превышает 7%

The necessity of an exact determination of their parameters and characteristics appear in the connection with the extension of the sphere of application of solar photovoltaic modules in some cases. It is reasonable to use the method of computer modeling for the analysis of characteristics of specific solar modules at different levels of illumination and values of temperature. In the article there was presented the order of working out of a simulation model of photovoltaic modules in the medium Matlab/Simulink. The simulation model is based on the basis of pentaparametric analytical model of the volt-ampere characteristics of a solar cell. The worked out model allows to research the volt-ampere and volt-watt characteristics of solar modules in dependence on levels of intensity of solar radiation, temperature, values of short-circuit current, tension of single step, internal resistances of solar elements and a diode parameter as well. The discrepancy of data of results of modeling with technical characteristics does not exceed 7%

Ключевые слова: ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СОЛНЕЧНЫЙ МОДУЛЬ, ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Keywords: PHOTOVOLTAIC SOLAR MODULE, VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS, SIMULATION MODELING

## Введение

Солнечная энергетика стремительно развивается по всему миру. Наряду с маломощными установками (до 10 кВт), предназначенными для питания локальных удаленных объектов, вводятся в строй *фотоэлектрические солнечные электростанции (ФСЭ)* мощностью более 1 МВт, присоединенные к сетям централизованного электроснабжения.

По данным [1] средний годовой темп роста мощности ФСЭ в мире за пятилетний период 2007-2012 гг. составил 60%. В 2012 году совокупная установленная мощность солнечных фотоэлектрических систем в мире составила более 100 ГВт. Лидерами рынка солнечной энергетики стали такие страны как Германия, Китай, Италия, США, Япония.

Что касается производства солнечных батарей, то до недавнего времени, в основном, оно было сосредоточено в Европе, Японии и Америке. За последние несколько лет, существенно увеличил свои производственные мощности Китай. При возросшем спросе на фотоэлементы и модули, российские производители также наращивают объемы выпуска продукции. Так, производство солнечных элементов и модулей в России сконцентрировано главным образом в трех регионах: Краснодарском крае, Московской и Рязанской областях.

В связи с возрастающими объемами выпуска и коммерциализации солнечных *фотоэлектрических преобразователей (ФЭП)* возникает необходимость точного определения их параметров и характеристик. Измерение *вольт-амперных характеристик (ВАХ)* – основной метод оценки качества и эксплуатационных характеристик солнечных элементов и модулей. При исследовании ФЭП стадию прямого измерения ВАХ и *ватт-вольтной характеристики (ВВХ)* можно заменить процессом компьютерного моделирования, что снимает необходимость иметь в наличии дорогостоящие имитаторы солнечного излучения [2].

Задача разработки с помощью современных программно-инструментальных средств имитационных математических моделей систем электроснабжения на основе ВИЭ является актуальной. Такие модели позволят производить сравнительный анализ вариантов построения систем, а также осуществлять оптимизацию параметров и режимов их функционирования.

### **Постановка задачи**

На основании известных технических характеристик солнечных модулей (напряжения холостого хода и тока короткого замыкания) в среде Matlab/Simulink построить математическую имитационную модель снятия семейства вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик при различных уровнях освещенности. Полученные результаты сравнить с реальными вольт-амперными характеристиками, предоставленными производителем.

### **Метод исследования**

При исследовании характеристик фотоэлектрических преобразователей использован метод математического имитационного моделирования с использованием возможностей среды Matlab/Simulink.

### **Математическое описание ФЭП**

*Солнечные фотоэлектрические модули (СМ) и солнечные фотоэлектрические батареи (СБ) состоят из множества отдельных солнечных фотоэлектрических элементов (СЭ), которые соединяются последовательно и параллельно с целью обеспечения требуемых выходных значений тока и напряжения. Согласно [3] солнечный фотоэлектрический элемент (solar photovoltaic cell) – солнечный элемент на основе фотоэффекта, преобразующий энергию солнечного излучения в электрическую энергию. Действие фотоэлемента основывается на внутреннем фотоэффекте [4]. Именно *внутренний фотоэффект*, а точнее процесс разделения генерируемых квантами света электронно-дырочных пар на p-n переходе, лежит в основе процесса генерации электрического тока в солнечных фотоэлементах.*

Наиболее распространены сегодня солнечные панели на основе моно- и поликристаллического кремния, на долю которых приходится около 80 % мирового рынка. При этом интенсивно внедряются новые инновационные технологии производства различных типов тонкопленочных солнечных элементов.

СЭ может быть представлен в виде функционального блока, имеющего внешние, внутренние и выходные параметры (рис. 1). К внешним параметрам относят освещенность СЭ ( $G$ ) и температуру СЭ ( $T$ ). К внутренним параметрам относят напряжение холостого хода ( $U_{xx}$ ) и ток короткого замыкания ( $I_{кз}$ ). Выходные параметры – выходное напряжение ( $U$ ), ток нагрузки ( $I$ ) и выходная мощность ( $P$ ) [5].

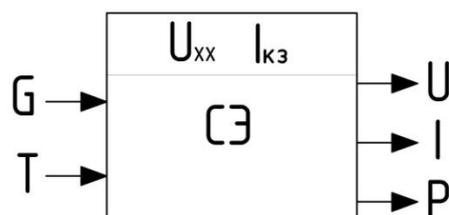


Рисунок 1 – Солнечный элемент в виде функционального блока

Основной характеристикой солнечного элемента (модуля) является ВАХ – зависимость между током нагрузки и напряжением на клеммах ФЭП при постоянных значениях температуры и интенсивности поступающего солнечного излучения. В определении ВАХ ФЭП важными факторами являются интенсивность солнечного излучения и температура. Для измерения интенсивности солнечного излучения ( $Вт/м^2$ ) используются специальные приборы. На рисунке 2 представлена принципиальная схема снятия ВАХ ФЭП.

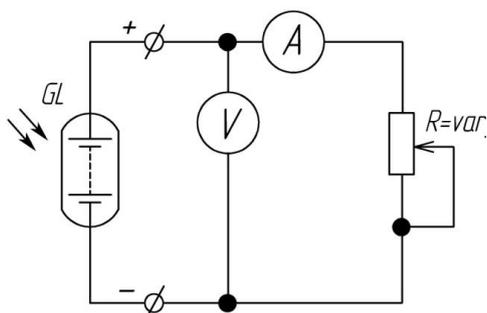


Рисунок 2 – Принципиальная схема снятия ВАХ ФЭП

Напряжение холостого хода ( $U_{xx}$ ) – напряжение, при котором ток равен нулю. С другой стороны, ток, при котором напряжение равно нулю, называется *током короткого замыкания* ( $I_{кз}$ ). Это крайние точки ВАХ, в

которых мощность ФЭП равна нулю. Максимальные значения тока и напряжения ( $I_{max} U_{max}$ ) при постоянных значениях освещенности и температуры определяют *точку максимальной мощности (ТММ)*. На рисунке 3 показаны типовые ВАХ и ВВХ фотоэлектрических преобразователей.

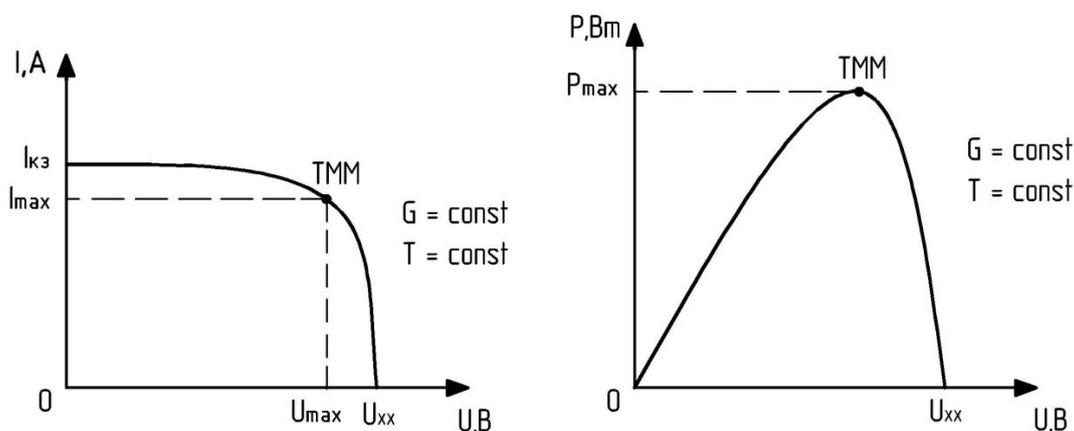


Рисунок 3 – Типовые ВАХ и ВВХ ФЭП

*Максимальная мощность ФЭП* – мощность в ТММ на вольт – амперной характеристике, где значение произведения тока на напряжение максимально [3].

Установлено, что интенсивность солнечного излучения оказывает влияние на величину выходного тока, а температура – на выходное напряжение солнечного элемента. Так, при уменьшении интенсивности светового потока в 2 раза ток короткого замыкания СЭ уменьшается в 2 раза, в то время как напряжение холостого хода изменяется незначительно. Существует температурный коэффициент, учитывающий разницу температур и составляющий порядка нескольких миллиампер на один градус Цельсия.

Математическая модель фотоэлектрического элемента строится на основе классической эквивалентной схемы замещения с сосредоточенными параметрами (рис. 4). Данная эквивалентная схема включает в себя генератор фототока  $I_{\phi}$ , диод, шунтирующее ( $R_{ш}$ ) и последовательное ( $R_{п}$ ) сопротивления [8].

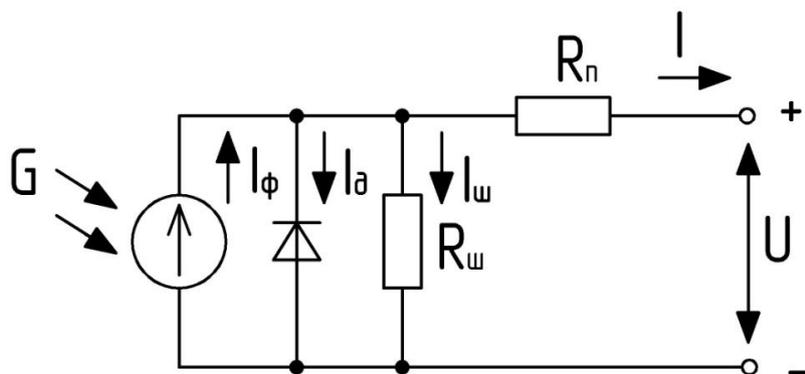


Рисунок 4 – Классическая эквивалентная схема замещения СЭ

В соответствии с эквивалентной схемой замещения СЭ, представленной на рис. 2 можно записать

$$I = I_{\phi} - I_{a} - I_{ш}, \tag{1}$$

где  $I$  – ток нагрузки;

$I_{\phi}$  – фототок;

$I_{a}$  – ток, протекающий через диод;

$I_{ш}$  – ток, протекающий через шунтирующее сопротивление  $R_{ш}$ .

Выразив величины токов через физические параметры ФЭП, получим аналитическое выражение ВАХ в следующем виде [8].

$$I = I_{\phi} - I_{o} \left[ \exp \left( \frac{q(U + IR_{п})}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{U + IR_{п}}{R_{ш}}, \tag{2}$$

где  $I_{o}$  – обратный ток насыщения;

$U$  – выходное напряжение;

$R_{ш}$  – шунтирующее сопротивление ФЭП;

$R_{п}$  – последовательное сопротивление ФЭП;

$q$  – заряд электрона;

$k$  – постоянная Больцмана;

$A$  – параметр ВАХ ФЭП, называемый диодным фактором;

$T$  – абсолютная температура СЭ, К.

В силу того, что КПД СЭ зависит от формы его ВАХ (рис. 3), параметры СЭ, входящие в уравнение ВАХ (2), определяют эффективность СЭ.

Выражение (2) представляет собой пятипараметрическую модель ВАХ ФЭП, представляющая особый интерес лишь для разработчиков солнечных элементов и модулей.

Эффективность фотоэлектрического преобразования определяется световой вольт-амперной характеристикой СЭ, форма которой зависит от ряда параметров: последовательного и параллельного (шунтирующего) сопротивлений СЭ, плотности тока насыщения диода, диодного коэффициента и некоторых других [6, 7].

Соответственно мощность, вырабатываемая солнечным элементом равна

$$P = I \cdot U \quad (3)$$

Удовлетворительная точность модели может быть получена при условии, что известны значения внутренних сопротивлений фотоэлементов. Как правило, при моделировании наблюдаются систематические отклонения теоретической кривой ВАХ от экспериментальной, являющиеся следствием переменных величин плотностей токов и градиентов напряжения [9].

Рассмотренная модель широко используется при анализе солнечных элементов, модулей и батарей, однако характеристики, полученные на основании этой модели, имеют незначительные, но порой нежелательные отклонения от характеристики реального солнечного элемента или модуля. Одна из причин отклонений – трудность точного измерения последовательного сопротивления элемента  $R_n$  [15].

Следует отметить, что из дополнительных параметров, входящих в (2), существенное влияние на форму ВАХ СЭ оказывает  $R_{ш}$ . Шунтирующее сопротивление принимают достаточно большим, а последовательное сопротивление – относительно малым.

Моделирование характеристик ФЭП используется при решении таких задач, как [9]:

- оптимизация схемы ФЭП;
- определение оптимальной рабочей точки в условиях меняющейся освещенности и температуры;
- оценка схемных потерь;
- определение влияния частичного затенения на выходные характеристики ФЭП и изменения его мощности;
- расчет и моделирование фотоэлектрических систем электроснабжения;
- анализ и прогнозирование работы фотоэлектрической станции.

При моделировании ВАХ и ВВХ необходимо знать базовые параметры солнечного модуля: напряжение холостого хода ( $U_{xx}$ ) и ток короткого замыкания ( $I_{кз}$ ). Эти параметры указываются производителем в паспорте на солнечный элемент или модуль. Из практики известно, что особое влияние на характеристики ФЭП имеют последовательное сопротивление  $R_n$ , температура  $T$  и диодный параметр  $A$ . Чем меньше величина  $R_n$ , тем больше мощность, вырабатываемая СЭ, а следовательно, и КПД. С увеличением температуры  $T$  уменьшается величина  $U_{xx}$ , при этом  $I_{кз}$  практически не меняет своего значения [2].

### **Разработка имитационной модели солнечного модуля**

Построение имитационной модели солнечного фотоэлектрического модуля выполнено в программной среде Matlab/Simulink. При разработке настоящей модели нами использованы материалы ряда публикаций [10-14].

Разработанная Simulink-модель, позволяющая регистрировать основные характеристики солнечного фотоэлектрического модуля, представлена на рисунке 5.

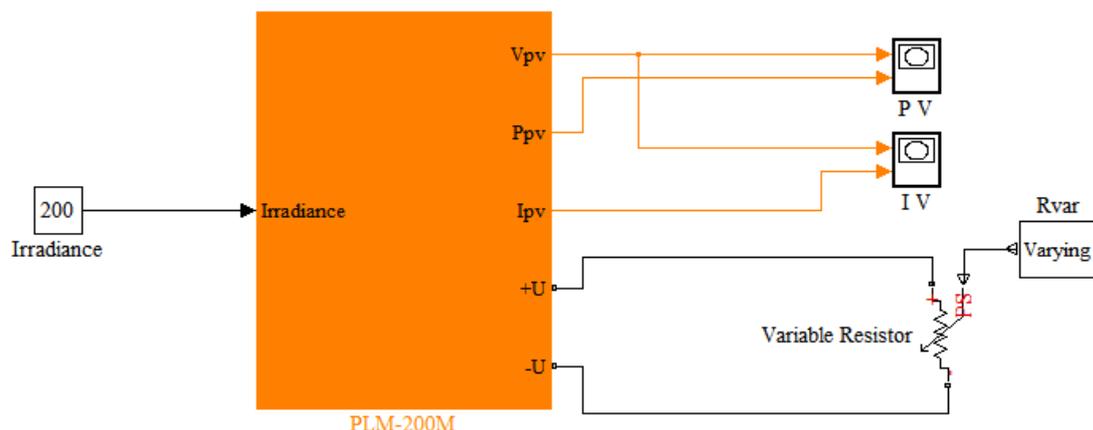


Рисунок 5 – Simulink-модель измерения характеристик солнечного модуля

Построенная модель включает в себя следующие подсистемы и блоки.

Блок «*Irradiance*» (*Constant*) задает значение интенсивности солнечного излучения  $G$ , Вт/м<sup>2</sup>. Задающий блок связан со входным портом подсистемы солнечного модуля.

Подсистема «*PLM-200M*» реализует собой собственно солнечный модуль. Развернутая структура предлагаемой подсистемы солнечного модуля представлена на рисунке 6.

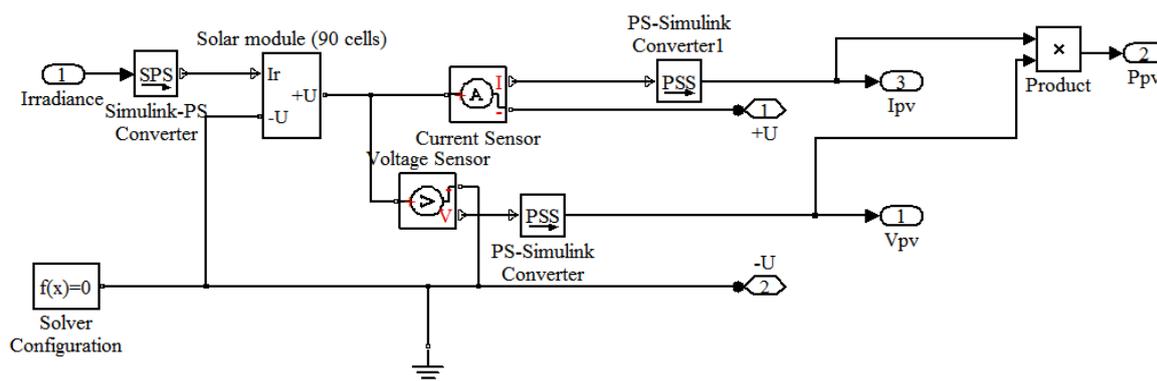


Рисунок 6 – Структура подсистемы солнечного модуля

Подсистема содержит следующие блоки: «*Simulink-PS Converter*», «*PS-Simulink Converter*» – преобразователи сигналов; «*Voltage Sensor*»,

«*Current Sensor*» – измерители напряжения и тока; «*Solver Configuration*» – блок конфигурации; «*Product*» – блок умножения [16].

Построим в Simulink подсистему солнечного модуля, выходные параметры которого будут соответствовать параметрам реального поликристаллического солнечного модуля PLM-200M (Perlight Solar) при освещенности 1000 Вт/м<sup>2</sup>:  $P=200 \text{ Вт}$ ;  $U=37,8 \text{ В}$ ;  $I=5,3 \text{ А}$ ;  $U_{xx}=45,5 \text{ В}$ ;  $I_{кз}=5,6 \text{ А}$ .

Из библиотеки *Simscape* программы выбираем имеющийся универсальный блок «*Solar Cell*» («*Солнечный элемент*»). Настройка блока производится в окне параметров, представленном на рисунке 7. Данный элемент описывается математическим выражением, показанным в верхней части окна параметров. Значения температурных параметров выставляются в следующей вкладке (рис. 8).

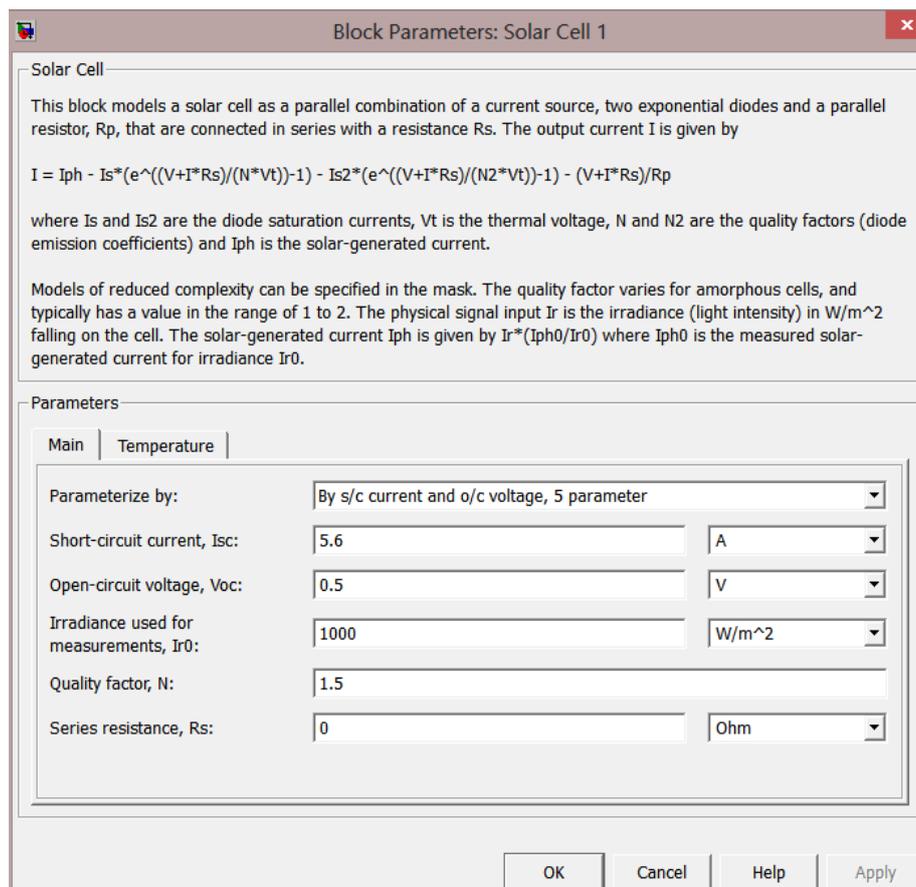


Рисунок 7 – Окно установки параметров блока «Solar Cell»

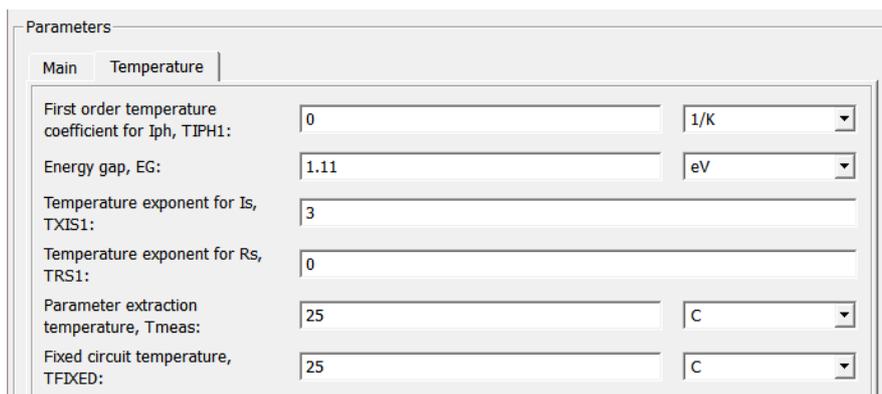
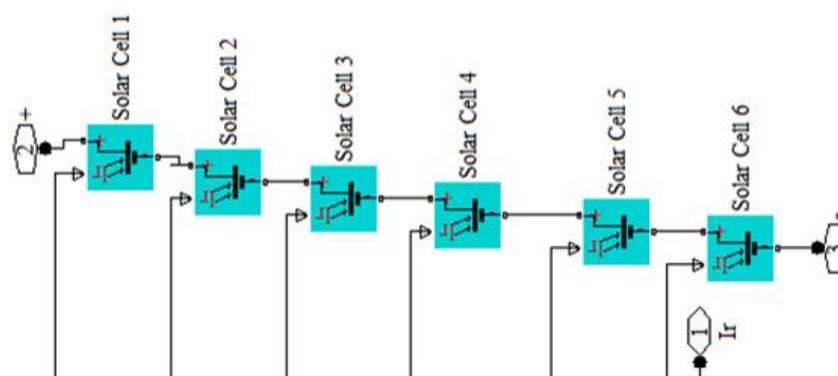
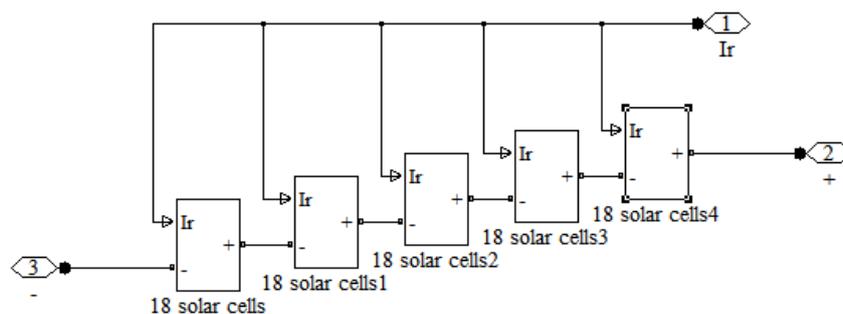


Рисунок 8 – Установка значений температурных параметров

Блоки солнечных элементов соединяются последовательно и объединяются в подсистемы (рис. 9).



а)



б)

Рисунок 9 – Подсистемы из блоков «Solar Cell»: а) из 6 элементов; б) из 90 элементов

Структура подсистемы регулируемого сопротивления  $Rvar$  включает в себя блок «*Ramp*», который формирует линейный сигнал и преобразующий блок «*Simulink-PS Converter*».

Результаты моделирования отображают блоки «PV», «IV» (*XY Graph-графопостроитель*), выполняющие построение графиков значений одного сигнала в функции другого.

### Результаты моделирования

При моделировании принимались следующие допущения: ВАХ и ВВХ моделировались без учета частичного затенения воспринимающей поверхности ФЭП и без возможного ее повреждения. Данные допущения дают возможность применять классические аналитические выражения для моделирования характеристик ФЭП.

Принимаем температуру солнечных элементов равной 25°C (рис. 8). Следует также отметить, что точность моделирования зависит от возможных технологических разбросов для каждого элемента и модуля в целом.

Ниже представлены результаты моделирования (рис. 10) с указанием значений точек максимальной мощности (ТММ). Кривые ВАХ и ВВХ получены при следующих уровнях освещенности: 200; 400; 600; 800; 1000 Вт/м<sup>2</sup>.

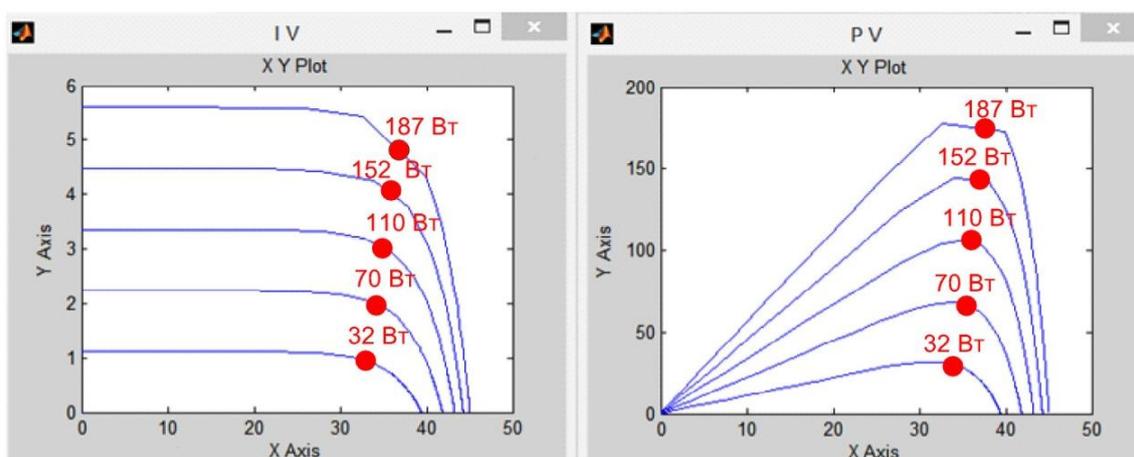


Рисунок 10 – Результаты моделирования ВАХ и ВВХ солнечного модуля

На рисунке 11 показано семейство вольт-амперных характеристик монокристаллического солнечного модуля PLM-200M (Perlight Solar) при

различных уровнях освещенности (200; 400; 600; 800; 1000 Вт/м<sup>2</sup>) и температуре 25°C.

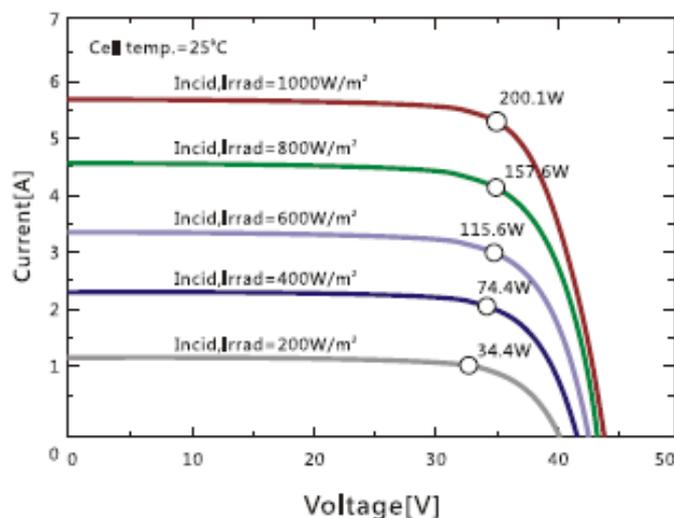


Рисунок 11 – Семейство вольт-амперных характеристик монокристаллического солнечного модуля PLM-200M (Perlight Solar)

Выявим соответствие характеристик солнечного модуля, предоставленных производителем и характеристик, полученных в при моделировании в Matlab/Simulink. Для этого составим таблицу сравнения реальных значений мощности модуля в точках максимальной мощности со значениями, полученными в результате имитационного моделирования (табл.1).

Таблица 1 – Сравнение реальных значений ТММ с результатами моделирования

№ ТММ	Технические характеристики, Вт	Результаты моделирования, Вт	Расхождение значений, %
1	200,1	187	6,5
2	157,6	152	3,2
3	115,6	110	5
4	74,4	70	7
5	34,4	32	7

### Выводы

Получена имитационная модель, позволяющая отображать семейство ВАХ и ВВХ солнечных модулей в зависимости от уровня интенсивности солнечного излучения и температуры. Разработанная модель описывает реальный солнечный модуль лишь с некоторой степенью приближения,

с учетом принятых допущений. Наблюдаются отклонения полученных при моделировании вольт-амперных характеристик от экспериментальных. Основной причиной отклонений является трудность точного измерения последовательного и шунтирующего сопротивлений солнечных элементов.

Выявлено соответствие характеристик солнечного модуля, предоставленных производителем и характеристик, полученных при моделировании в среде Matlab/Simulink. Расхождение результатов моделирования с паспортными характеристиками не превышает 7%, что допустимо и является общепринятым для инженерных расчетов. Тем самым подтверждается адекватность предлагаемой имитационной модели.

### Литература

1. Renewables 2013. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century – [Электронный ресурс]. Адрес доступа: [www.ren21.net](http://www.ren21.net).
2. Л.С. Лунин, А.С. Пащенко. Моделирование и исследование характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе GaAs и GaSb // Журнал технической физики, 2011, том 81, вып. 9. – С.71-76.
3. ГОСТ Р 51594-2000 «Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Термины и определения». Издательство стандартов, 2000.
4. М. М. Колтун. Фотоэлемент // БСЭ. – 3-е изд. М., 1977. – Т.27. – С.607.
5. В.И. Иванчура, А.В. Чубарь, С.С. Пост. Энергетические модели элементов автономных систем электропитания // Журнал СФУ. Техника и технологии. №2. 2012.– С. 179-190.
6. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. М., 1984.
7. Fahrenbrugh A.L., Bube R.H. Fundamentals of Solar Cells: Photovoltaic Solar Energy Conversion. New York, 1983.
8. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. – М.: Советское радио., 1976. – 246 с.
9. А.Б. Базилевский, М.В. Лукьяненко. Моделирование вольт-амперных характеристик солнечных батарей // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. № 4. 2005. – С.63-66.
10. S.Said, A.Massoud, M.Benammar, S.Ahmed. A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox // Journal of Energy and Power Engineering 6 (2012). – pp. 1965-1975.
11. M. Seifi, A.Bt. Che Soh, N. Izzrib. Abd. Wahab, M. Khair B. Hassan. A Comparative Study of PV Models in Matlab/Simulink // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. №7(2). 2013. – pp. 97-102.
12. T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli, A. Masmoundi. MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell // International Journal of Renewable energy research. №2.2012.– pp. 213-218.

13. Patil Sahebrao N., R. C. Prasad. Design and simulation of MPPT algorithm for solar energy system using Simulink model // International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences, Vol. 02, Issue 01, Jan 2014 – pp.37-40.

14. А. М. Трещ. Моделирование солнечных батарей в среде MATLAB/SIMULINK // «Информационные технологии в образовании, науке и производстве» [Электронный ресурс] : Международная научно-техническая интернет-конференция, Минск, 16-17 ноября 2013 г. / Белорусский национальный технический университет, Международный институт дистанционного образования. – Минск, 2013. – Режим доступа : <http://www.bntu.by/news/39-conference/951-mntk-mido-16-17.html>.

15. Фалеев, Д.С. Основные характеристики солнечных модулей : метод. указания / Д.С. Фалеев. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. – 28 с.: ил.

16. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.

## References

1. Renewables 2013. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century – [Jelektronnyj resurs]. Adres dostupa: [www.ren21.net](http://www.ren21.net).

2. L.S. Lunin, A.S. Pashhenko. Modelirovanie i issledovanie harakteristik fotojelektricheskikh preobrazovatelej na osnove GaAs i GaSb // Zhurnal tehnichekoj fiziki, 2011, tom 81, vyp. 9. – S.71-76.

3. GOST R 51594-2000 «Netradicionnaja jenergetika. Solnechnaja Jenergetika. Terminy i opredelenija». Izdatel'stvo standartov, 2000.

4. М. М. Koltun. Fotojelement // BSJe. – 3-e izd. M., 1977. – T.27. – S.607.

5. V.I. Ivanchura, A.V. Chubar', S.S. Post. Jenergeticheskie modeli jelementov avtonomnyh sistem jelektropitanija // Zhurnal SFU. Tehnika i tehnologii. №2. 2012.– S. 179-190.

6. Koltun M.M. Optika i metrologija solnechnyh jelementov. M., 1984.

7. Fahrenbrugh A.L., Bube R.H. Fundamentals of Solar Cells: Photovoltaic Solar Energy Conversion. New York, 1983.

8. Vasil'ev A.M., Landsman A.P. Poluprovodnikovye fotopreobrazovateli. – М.: Sovetskoe radio., 1976. – 246 s.

9. A.B. Bazilevskij, M.V. Luk'janenko. Modelirovanie vol't-ampernyh haraktristik solnechnyh batarej // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva. № 4. 2005. – S.63-66.

10. S.Said, A.Massoud,M.Benammar, S.Ahmed. A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox // Journal of Energy and Power Engineering 6 (2012). – rr. 1965-1975.

11. M. Seifi, A.Bt. Che Soh, N. Izzrib. Abd. Wahab, M. Khair B. Hassan. A Comparative Study of PV Models in Matlab/Simulink // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. №7(2). 2013. – rr. 97-102.

12. T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli, A. Masmoundi. MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell // International Journal of Renewable energy research. №2.2012.– rr. 213-218.

13. Patil Sahebrao N., R. C. Prasad. Design and simulation of MPPT algorithm for solar energy system using Simulink model // International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences, Vol. 02, Issue 01, Jan 2014 – rr.37-40.

14. А. М. Трещ. Моделирование солнечных батарей в среде MATLAB/SIMULINK // «Информационные технологии в образовании, науке и производстве» [Электронный ресурс] : Международная научно-техническая интернет-конференция, Минск, 16-17 ноября 2013

g. / Belorusskij nacional'nyj tehničeskij universitet, Meždunarodnyj institut distancionnogo obrazovanija. – Minsk, 2013. – Rezhim dostupa : <http://www.bntu.by/news/39-conference/951-mntk-mido-16-17.html>.

15. Faleev, D.S. Osnovnye harakteristiki solnechnyh modulej : metod. ukazanija / D.S. Faleev. – Habarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2013. – 28 s.: il.

16. Chernyh I.V. Modelirovanie jelectrotehničeskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. – M.: DMK Press; SPb.: Piter, 2008. – 288 s.: il.