электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 621.311.6

Моделирование солнечного элемента в графической среде Simulink

Мигунов Я.Н., *аспирант*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»

Научный руководитель: Онуфриев В.В., д.т.н., профессор
Россий, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Onufryev@bmstu.ru

Введение

Математическое моделирование является эффективным методом анализа существующих недостатков уже созданных приборов, а также способ прогнозировать характеристики проектируемых приборов. По сравнению с экспериментом моделирование является более гибким, дешевым и простым способом исследования параметров как солнечных элементов (СЭ), так и солнечных батарей.

Существует несколько широко распространенных моделей солнечного элемента. Прежде всего, это – физическая модель СЭ. Она интересна в основном разработчикам солнечных батарей и ученым, занимающимся физикой твердого тела. Физическая модель позволяет исследовать процессы, протекающие в СЭ при генерации электричества под действием солнечного света, а также влияние свойств материала СЭ на его выходные характеристики. Физическая модель требует знания таких параметров как концентрация и состав примесей, подвижность основных и неосновных носителей в каждой зоне, точный спектральный состав падающего света в каждый момент времени. Поэтому из-за своей сложности и громоздкости подобная модель не годится для исследования работы солнечных элементов.

Статистическая модель основывается на результатах опытов, в ходе которых записывается большое количество показаний приборов. После чего весь этот массив данных обрабатывается и анализируется методами математической статистики и теории вероятностей. Очевидно, что главный недостаток подобной модели – необходимость проведение большого числа экспериментов и наличие сложных приборов и образцов солнечных элементов из различных материалов. Как следствие, такая подобная модель также не пригодная для практического анализа солнечных элементов.

На практике, для изучения характеристик солнечных элементов и солнечных

батарей широкое распространение получила аналитическая модель, основанная на эквивалентной электрической схеме СЭ и формуле полного тока СЭ с единичной площади:

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{eU}{kT} \right) - 1 \right),$$

где I_{ph} – фототок, зависящий от плотности излучения, А; I_s – ток насыщения, А; T – рабочая температура, К.

Однако в этом уравнении не учитывается влияние последовательного и параллельного (шунтирующего) сопротивлений, что приводит к недостаточно высокой, для инженерных расчетов, точности. Поэтому на практике обычно используют основное уравнение СЭ с включенными в него дополнительными параметрами:

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{e\left(U + IR_S\right)}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{U + IR_S}{R_{sh}}, \qquad (1)$$

где e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; n – диодный коэффициент, зависящий от материала СЭ; R_S – последовательное сопротивление, Ом; R_{sh} – шунтирующее сопротивление, Ом

Эквивалентная схема, приведенная на рисунке 1, представляет собой диод, включенный параллельно источнику фототока и два сопротивления: последовательное $R_П$ и шунтирующее $R_Ш$. Однако степень влияния последовательного и параллельного сопротивления различна. Последовательное паразитное сопротивление весьма сильно влияет на форму ВАХ и, как следствие, на мощность; может снижать ток короткого замыкания [1].

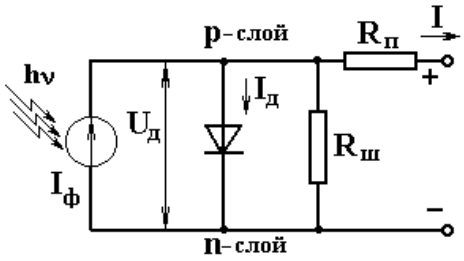


Рис. 1. Эквивалентная схема солнечного элемента

Диодный коэффициент или коэффициент идеальности n позволяет учитывать отличие реального солнечного элемента от идеального. Его значение зависит от материала СЭ и технологии изготовления и, как правило, лежит в пределах от 1 до 2, хотя в

некоторых случаях может быть больше двух. Значения диодного коэффициента для некоторых материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость параметра *n* от материала СЭ и технологии изготовления [2]

Материал	Диодный коэффициент *n*	Ширина запрещенной зоны E_g, эВ
Монокристаллический Si	1,2	1,12
Поликристаллический Si	1,3	1,12
α-Si:H	1,8	1,7
α-Si:H тандемные	3,3	1,7
α-Si: тройные	5	1,7
CdTe	1,5	1,45
CIGS	1,5–1,6	1,38
GaAs	1,3	1,43
InSe	1,6	1,23
GaAs-InSe	1,8	–

Принципы реализации модели солнечного элемента

Важными этапами построения математической модели являются выбор входных и выходных параметров модели и формулировка математической задачи. Главные же составляющие модели – математические соотношения, описывающие работу солнечного элемента и солнечной батареи. Кроме того, любая математическая модель нуждается в верификации, которая может проводиться либо при помощи экспериментов (экспериментальных данных), либо теоретических выкладок, уже нашедших свое подтверждение.

Для рассматриваемой модели СЭ выходными параметрами являются электрические характеристики, дающие возможность количественный анализ СЭ: максимальная мощность P_{max} при рабочей температуре и освещенности, коэффициент полезного действия η, коэффициент заполнения *FF*, показывающий насколько форма вольт-амперной характеристики близка к прямоугольной, график вольт-амперной характеристики ВАХ *I(V)*; график вольт-ваттной характеристики (ВВХ) *P(V)*. Поскольку одним из наиболее важных параметров, необходимых для анализа работы СБ является освещенность, к выходным характеристикам добавляются ток короткого замыкания I_{sc} и напряжение холостого хода V_{oc} при фактической освещенности и – для более детального анализа влияния освещенности на работу СЭ – графики изменения $P_{max,}$ и η во времени.

Входные характеристики выбирают исходя из целей и задач моделирования. В рассматриваемой модели входными характеристиками являются: текущий уровень

освещенности (плотность светового потока на единицу площади) G, эталонный (при G=1000 Вт/м^2, T=25 °С) ток короткого замыкания I_{sc}, эталонное напряжение холостого хода V_{oc}, шунтирующее сопротивление R_{sh}, эталонная максимальная мощность P_{max} , рабочая температура T, температурный коэффициент короткого замыкания α, площадь солнечного элемента S, диодный коэффициент n и ширина запрещенной зоны E_g, позволяющие моделировать работу солнечных элементов из различных материалов [3]. Для построения временных зависимостей задаётся закон изменения освещенности во времени $G=f(t)$. Стоит отметить, что чаще всего изменение освещенности имеет вид прямой пропорциональности: $G(t) = a + b \cdot t$.

Математическое описание характеристик солнечных элементов и батарей

Как правило, производители солнечных элементов для своей продукции указывают значения тока короткого замыкании и напряжения холостого хода для стандартных (эталонных) условий: температура 25 °С, освещенность 1000 Вт/м^2. При этом, значение тока короткого замыкания I_{sc} очень близко к значению фототока I_{ph}, и лишь в случае очень больших плотностей последовательного сопротивления, порядка 10 Ом/см^2, I_{sc} становится меньше I_{ph}. С учетом этого справедливо выражение, позволяющие определить значение фототока при заданных значениях температуры и освещенности [4]:

$$I_{ph}(t) = I_{sc}(T_Э, G_Э) \cdot \frac{G(t)}{G_Э} + I_{sc}(T_Э, G_Э) \cdot \alpha \cdot (T - T_Э), \quad (2)$$

где $T_Э$ – эталонная температура, 25 °С; $G_Э$ – эталонная освещенность, 1000 Вт/м^2; $I_{sc}(T_Э, G_Э)$ – ток короткого замыкания при эталонных значениях освещенности и температуры, А; α – температурный коэффициент тока короткого замыкания, %/°С; $G(t)$ – закон изменения освещенности во времени.

Поскольку в общем случае освещенность может быть не постоянной величиной, а некоторой, как правило, убывающей, функцией времени, то и фототок также в общем случае является функцией времени

Производители солнечных элементов обычно редко публикуют данные о токе насыщения и для того, чтобы определить I_s, выразим его из основного уравнения СЭ (1) примененного к солнечному элементу в режиме холостого хода, при эталонных условиях (25 °С, 1000 Вт/м^2) [5].

$$I_s\left(T_Э\right)=\frac{I_{sc}\left(G_Э,T_Э\right)-V_{oc}\left(G_Э,T_Э\right)/R_{sh}}{\left(\exp\left(\frac{eV_{oc}\left(G_Э,T_Э\right)}{n\cdot k\cdot T_Э}\right)-1\right)}.$$

Так как ток насыщения зависит от физических характеристик солнечного элемента, например, коэффициента диффузии электронов в полупроводнике, времени жизни неосновных носителей, но не от освещенности, то пересчитывать I_s для заданной освещенности нет нужды, однако необходимо учесть его зависимость от температуры, которая описывается следующей формулой [4]:

$$I_s=I_s\left(T_Э\right)\cdot\left(\frac{T}{T_Э}\right)^{\frac{3}{n}}\cdot\exp\left(\frac{eE_g\big|_{T_Э}}{nk\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_Э}\right)}\right), \qquad (3)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны, эВ.

Получив из выражения (3) значение тока насыщения, можно определить напряжение холостого хода для заданных условий (освещенность и температуры) из основного уравнения солнечного элемента (1), используя значение фототока, полученное из выражения (2).

$$0=I_{ph}\left(t\right)-I_s\cdot\left(\exp\left(\frac{e\left(V_{oc}\right)}{nkT}\right)-1\right)-\frac{V_{oc}}{R_{sh}}. \qquad (4)$$

Поскольку выражение (4) относительно напряжения холостого хода записано в неявном виде, определять V_{oc} будем при помощи метода Ньютона, позволяющего получить решение за минимальное число итераций [6]. Начиная с исходного значения $V_{oc}(T_Э,G_Э)$ справедлива формула: $V_{i+1}=V_i-f\left(V_i\right)/f'\left(V_i\right)$. Итерации заканчиваются после достижения некоторого условия, в данном случае – это абсолютная величина разности двух соседних значений $|V_{i+1}-V_i|<\varepsilon$. На практике, как правило, достаточно 5–10 итераций.

Прежде чем построить вольт-амперную и вольт-ваттную характеристики солнечного элемента, необходимо определить последний неизвестный член выражения (1) – величину последовательного сопротивления, наличие которого влияет, главным образом, на величину коэффициента заполнения.

Есть несколько различных подходов к определению R_s: фотоэлектрический метод, использующий наличие максимума КПД от степени концентрирования солнечного излучения; графический расчет из эталонной ВАХ; графический расчет из семейства ВАХ

при различных уровнях освещенности и т.д. Однако все эти способы либо требуют экспериментальных данных, либо являются косвенными и, как следствие, позволяют получить не слишком точные данные, поэтому будем использовать следующее выражение [7]:

$$R_S = \frac{V_{oc}\left(T_Э, G_Э\right)}{I_{sc}\left(T_Э, G_Э\right)} - \frac{P_{\max}\left(T_Э, G_Э\right)}{FF_0 \cdot \left(I_{sc}\left(T_Э, G_Э\right)\right)^2}. \quad (5)$$

FF_0 в выражении (5) – это эталонный коэффициент заполнения. Для его определения, как правило, используют эмпирическую формулу [5]:

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln\left(v_{oc} + 0.72\right)}{1 + v_{oc}},$$

где $v_{oc} = \dfrac{e \cdot V_{oc}\left(T_Э, G_Э\right)}{n \cdot k \cdot T_Э}$ – нормализованное напряжение холостого хода.

Ток короткого замыкания и напряжение холостого хода – это максимальные ток и напряжение, которые можно получить от СЭ, однако мощность в обеих этих точках равна нулю. Коэффициент заполнения, который обозначается как *FF* (от англ. «Filling Factor»), – это параметр, который в сочетании с I_{sc} и V_{oc} определяет максимальную мощность солнечного элемента: $P_{\max} = FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}$. Для модели идеального солнечного элемента справедливо равенство $FF=FF_0$, однако в реальном СЭ на коэффициент заполнения оказывают влияние последовательное и параллельное сопротивление. Учесть их влияние можно при помощи зависимости, полученной из предположения, что максимальная мощность СЭ равна мощности в отсутствии сопротивлений минус мощность, теряемая на них [7]:

$$FF\left(t\right) = FF_o\left(t\right)\left(1 - \frac{R_S \cdot I_{sc}\left(t\right)}{V_{oc}\left(t\right)}\right)\left(1 - \frac{V_{oc}\left(t\right)}{R_{sh} \cdot I_{sc}\left(t\right)}\right). \quad (6)$$

При этом следует отметить, что, во-первых, влияние шунтирующего сопротивления при его значениях типичных для промышленных солнечных элементов (порядка 1 кОм) невелико и составляет менее 1%, а, во-вторых, в выражении (6) для определения эталонного коэффициента заполнения использовалось нормализованное напряжение холостого хода при текущих, а не эталонных значениях температуры и освещенности. Именно поэтому эталонный коэффициент заполнения в данном случае также является функцией времени.

Таким образом, выражение для максимальной мощности при заданных температуре и освещенности, с учетом последовательного и шунтирующего

сопротивлений, имеет вид:

$$P_{\max}(t) = FF(t) \cdot I_{sc}(t) \cdot V_{oc}(t),$$

где I_{sc} и V_{oc} – функции времени тока короткого замыкания и напряжения холостого хода при текущей температуре.

Одна из важнейших характеристик солнечного элемента, показывающая эффективность преобразования энергии солнечного излучения в электричество – коэффициент полезного действия – определяется отношением максимальной мощности при заданных условиях к мощности падающего излучения:

$$\eta(t) = \frac{P_{\max}(t)}{G \cdot S},$$

где S – площадь СЭ.

Определив значение фототока, тока насыщения и последовательного сопротивления при заданных значениях температуры и освещенности из выражений (2), (3) и (5) соответственно, можно построить вольт-амперную характеристику солнечного элемента, решив основное уравнение СЭ для I в диапазоне от 0 до I_{sc} и V в диапазоне от 0 до V_{oc}. Поскольку уравнение (1), решение которого необходимо для построения ВАХ и ВВХ, записано в неявной форме, оно, как и (4), решается методом Ньютона, начиная с I_0:

$$I_{i+1} = I_i - \frac{f(I_i, V)}{\frac{\mathrm{d}f(I_i, V)}{\mathrm{d}I}}.$$

Построение графической модели в среде Simulink

Программа Simulink – это приложение к пакету MATLAB. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. Преимущество Simulink заключается в том, что он позволяет пополнять библиотеки блоков с помощью подпрограмм написанных как на языке MATLAB, так и на языках C++, Fortran и Ada [8].

Поскольку структурная реализация рассмотренной математической модели солнечного элемента будет весьма громоздкой, что затруднит отладку, то для создания графической модели СЭ предлагается использовать блок MATLAB function.

Преимущество MATLAB function заключается в том, что при помощи языка MATLAB пользователь может создать описание сколь угодно сложного блока и подключить его к Simulink-модели, при этом с точки зрения взаимодействия пользователя с моделью, блок на основе MATLAB function ничем не отличается от стандартного

библиотечного блока Simulink. Входные параметры модели задаются при помощи блоков типа Constant, описывающих постоянный по уровню сигнал. Напряжение вводится при помощи блока Ramp, формирующего монотонно возрастающий или убывающий с некоторого момента времени сигнал. Для построения зависимостей I_{sc}, V_{oc}, P_{max} и η от времени использовался блок Subsystem, в котором реализован закон изменения освещенности следующего вида: $G(t) = G_{нач} - \Delta G \cdot t / t_{мод}$, поскольку, как уже было указано ранее, изменение освещенности носит обычно линейный характер. Значения $G_{нач}$ – величина освещенности в начальный момент времени, ΔG – величина потерь освещенности за время моделирования, $t_{мод}$ – время моделирования передаются в Subsystem из трех блоков Constant.

Выходные параметры модели визуализируются при помощи блоков Display – P_{max}, η, FF, I_{sc}, V_{oc}; при помощи графопостроителя XY Graph – ВАХ и ВВХ и $I_{sc}=f(t)$, $V_{oc}=f(t)$, $P_{max}=f(t)$, $\eta=f(t)$ при помощи блока Scope, который позволяет наблюдать за изменениями сигналов в процессе моделирования. Общий вид модели приведен на рисунке 2.

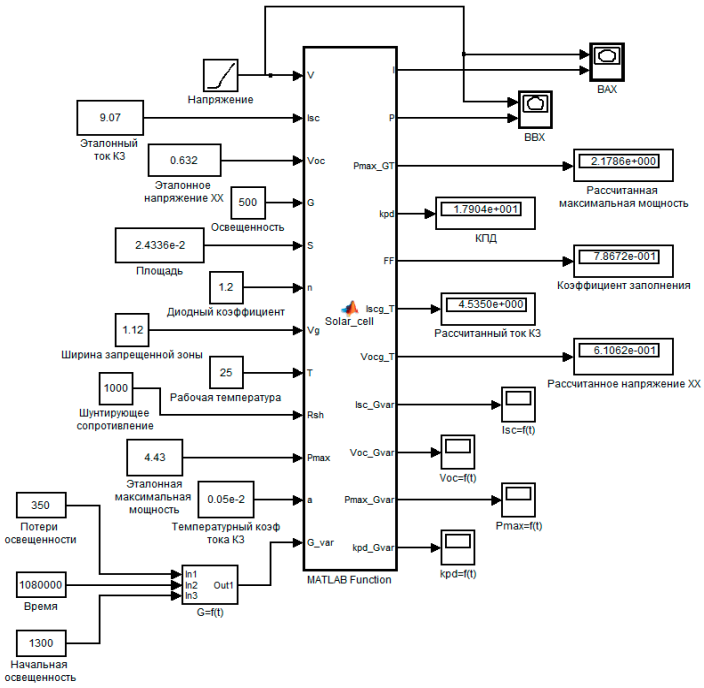


Рис. 2. Общий вид структурной Simulink-модели солнечного элемента

В качестве примера рассмотрим солнечный элемент серии Q6LMXP3-G3 производства компании Hanwha Q-Cells GmbH, характеристики которого приведены в таблице 2 [9].

Таблица 2

Параметры солнечного элемента из монокристаллического кремния (1000 Вт/м^2, 25 °С)

P_{max}, Вт	I_{sc}, А	V_{oc}, В	η, %	S, м^2	α, %/К
4,43	9,07	0,632	18,2	$2{,}4336 \cdot 10^{-2}$	+0,05

Определение характеристик солнечного элемента проводится для постоянной температуры при освещенности 1000, 750, 500 и 200 Вт/м^2, и для постоянной освещенности при рабочей температуре от 25 °С до 40 °С с шагом 5 °С. Результаты расчета приведены в таблицах 3 и 4. на рисунке 3 приведены полученные семейства вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик при рабочей температуре 25 °С.

Таблица 3

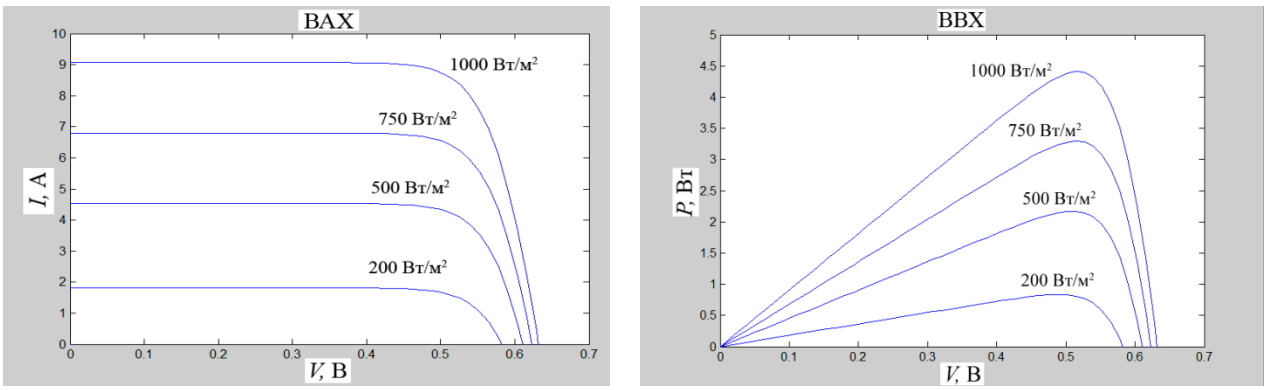
Характеристики солнечного элемента из монокристаллического кремния при различной освещенности и постоянной температуре (25 °С)

G, Вт/м^2	P_{max}, Вт	I_{sc}, А	V_{oc}, В	η, %	FF
1000	4,430	9,070	0,632	18,2	0,773
750	3,307	6,803	0,623	18,1	0,780
500	2,179	4,535	0,611	17,9	0,787
200	0,836	1,814	0,582	17,2	0,792

Таблица 4

Характеристики солнечного элемента из монокристаллического кремния при различных рабочих температурах и постоянной освещенности (1000 Вт/м^2)

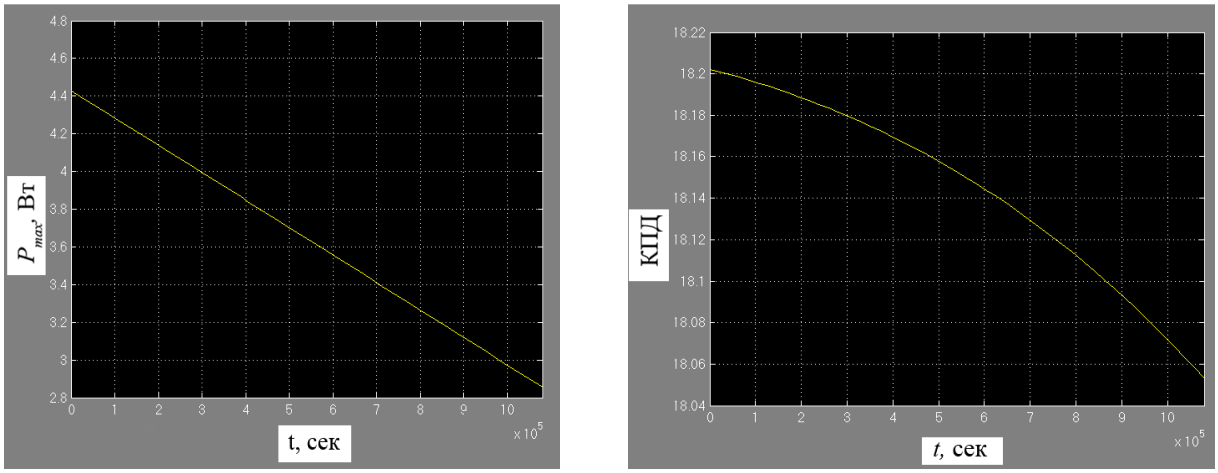
T, °С	P_{max}, Вт	I_{sc}, А	V_{oc}, В	η, %	FF
25	4,430	9,070	0,632	18,2	0,773
30	4,348	9,093	0,623	17,9	0,768
35	4,265	9,115	0,613	17,5	0,763
40	4,182	9,138	0,604	17,2	0,758



а *б*

Рис. 3. Семейства вольт-амперных (*а*) и вольт-ваттных (*б*) характеристик монокристаллического СЭ при различной освещенности

На рисунке 4 представлены графики $P_{max}=f(t)$ и $\eta=f(t)$, полученные в результате моделирования линейного изменения освещенности от 1000 Вт/м^2 до 650 Вт/м^2 за 1000 часов.



а *б*

Рис. 4. Графики максимальной мощности (*а*) и КПД (*б*) как функций времени в условиях линейно убывающей освещенности: $G_{нач}$=1000 Вт/м^2; ΔG=350 Вт/м^2; $t_{мод}$=1000 ч

Для верификации разработанной модели, используются дополнительные характеристики, указанные изготовителем: максимальной мощностью солнечного элемента при некоторых значениях освещенности, а также температурными коэффициентами напряжения (−0,33 %/К) и мощности (−0,42 %/К)

Для оценки точности модели при определении характеристик солнечного элемента в условиях различной освещенности, определим максимальную мощность СЭ и рассчитаем относительную погрешность, считая данные изготовителя номинальными

значениями: $\delta(P_{\max}) = |P_{\max}^{nom} - P_{\max}^{calc}| \cdot 100 / |P_{\max}^{nom}|$. Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5

Сравнение измеренной (номинальной) максимальной мощности СЭ и рассчитанной на основе математической модели

G, Вт/м^2	Номинальная P_{max}, Вт	Рассчитанная P_{max}, Вт	$\delta(P_{max})$, %
800	3,530	3,532	0,06
500	2,180	2,179	0,05
400	1,729	1,728	0,06
300	1,284	1,280	0,31
200	0,839	0,836	0,36
100	0,404	0,402	0,50

Для оценки точности модели при расчете характеристик солнечного элемента в условиях различной рабочей температуры, определим максимальную мощность и напряжение холостого хода СЭ и рассчитаем относительную погрешность, считая, как и в предыдущем случае, данные производителя номинальными значениями. Результаты расчетов приведены в таблице 6.

Таблица 6

Сравнение измеренного (номинального) напряжения холостого хода и рассчитанного на основе математической модели

T, °C	Номинальный V_{oc}, В	Рассчитанный V_{oc}, В	$\delta(V_{oc})$, %
30	0,622	0,623	0,23
35	0,611	0,613	0,30
40	0,601	0,603	0,38
45	0,590	0,594	0,63
50	0,580	0,585	0,83
100	0,476	0.489	2,73

Как видно из таблиц 5 и 6 точность простроенной модели находится в пределах нескольких процентов для характерных значений освещенности 100–1000 Вт/м^2 и температуры 25–100 °C. Постепенный рост погрешности при более сильном отклонении температуры и освещенности от эталонных значений говорит о том, что в модели не учитываются влияние рабочих условий на свойства материала солнечного элемента и *p-n*–перехода. Вместе с тем стоит отметить, что достигнутой точности достаточно для

проведения инженерных расчетов солнечных энергосистем.

Выводы

Построена математическая модель солнечного элемента, позволяющая при помощи доступных характеристик (ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, максимальная мощность при эталонных условиях и т.д.), публикуемых производителями СЭ, определять выходные параметры СЭ при рабочей температуре и заданной освещенности. Кроме того, модель позволяет анализировать влияние изменений освещенности во времени на параметры СЭ путем построения графиков зависимости максимальной мощности, КПД, тока короткого замыкания и т.д. от времени.

В математической модели учитывается влияние технологических факторов – благодаря учету последовательного и параллельного сопротивлений, а за счет изменения диодного коэффициента и ширины запрещенной зоны возможно моделирование солнечных элементов из различных материалов.

Список литературы

1. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
2. Ковалюк З.Д., Политанская О.А., Сидор О.Н., Маслюк В.Т. Электрические и фотоэлектрические характеристики структур на основе слоистых полупроводников InSe и GaSe при облучении электронами с энергией 12,5 МэВ // Физика и техника полупроводников. 2008. Т. 42, вып.11. С. 1321–1326.
3. Frolkova N.O., Frolkov O.A. Modeling different types of PV modules // 13th International Conference on Elektromechanics, Elektrotechnology, Electromaterials and Components. ICEEE–2010. P.152.
4. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / под ред. Алфёрова Ж.И. Л.: Наука, 1989. 310 с.
5. Фролкова Н.О. Моделирование солнечных батарей на основе различных полупроводников: дис. … канд. техн. наук. М., 2011. 179 с.
6. Quaschining V. Numerical simulation of photovoltaic generators with shaded cells // 30th universities power engineering conference, Greenwich, 1995. P. 583–586.
7. Green M.A. Solar cell fill factors: General graph and empirical expressions // Solid-State Electronics. 1981. Vol. 24. P. 788–789. DOI: 10.1016/0038-1101(81)90062-9.

8. Черных И.В. «Simulink: Инструмент моделирования динамических систем». Режим доступа: http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/1.php (дата обращения 31.03.2015).
9. Официальный сайт компании Hanwha Q CELLS GmbH: https://www.q-cells.com/uploads/tx_abdownloads/files/Hanwha_Q_CELLS_Data_sheet_Q6LMXP3-G3_2013-04_Rev01_EN_08.pdf (дата обращения 09.04.2015).