

УДК 620.91

Р.В. Колосов

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

ЗАО «Сормовское электромонтажное предприятие»

Для апробации научно-технических решений в области систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии актуальными являются задачи построения имитационных моделей и их отдельных составляющих. Статья посвящена вопросам построения математической и Matlab-модели солнечных элементов. Приведены математические выражения, описывающие связь между основными параметрами солнечного элемента. Обоснованы преимущества предложенного подхода. Представлена Matlab-модель солнечной батареи, позволяющая исследовать вольт-амперную характеристику солнечного элемента при изменении различных параметров. С помощью Matlab-модели проведены исследования зависимости вольт-амперной характеристики солнечного элемента от последовательного сопротивления. Результаты работы могут использоваться для изучения аварийных режимов и переходных процессов в элементах солнечных батарей.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, вольт-амперная характеристика, имитационная модель, солнечная батарея, Matlab.

1. Введение

При проектировании электротехнических комплексов с солнечными батареями общепринятым подходом, позволяющим исследовать функционирование элементов систем электроснабжения в различных условиях, является имитационное моделирование [1-5]. Изучение характеристик солнечного элемента предполагает создание его имитационной модели, которая будет электрически эквивалентна реальной энергоустановке. Идеальный солнечный элемент можно представить в виде постоянного источника тока, подключенного параллельный диоду. Однако, в действительности идеальные солнечные элементы отсутствуют, поэтому в имитационную модель добавляются шунтирующее и последовательное сопротивление [6-7].

II. Цели и задачи исследования

При проектировании солнечной батареи необходимо начать с разработки эквивалентной цепи, затем составить характеристическое уравнение солнечного элемента, разработать модель солнечной батареи для изучения вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечного элемента, и, наконец, оценить ее пригодность.

III. Методы решения

Имитационная модель солнечного элемента, представленного в виде постоянного источника тока, параллельного диоду, с добавлением шунтирующего и последовательного сопротивления, может быть описана следующими формулами. Ток, вызванный солнечной батареей, эквивалентен току источника, за вычетом тока, текущего через диод и тока, текущего через шунтирующий резистор:

$$I = I_L - I_D - I_{SH}, \quad (1)$$

где I – выходной ток (А); I_L – фотовозбужденный ток (А); I_D – ток диода (А); I_{SH} – ток шунта (А).

Ток через эти элементы управляется напряжением на них:

$$U_j = U + I \cdot R_s, \quad (2)$$

где U – напряжение на выходных клеммах (В), I – выходной ток (А), R_s – сопротивление последовательного резистора (Ω).

Модель для снятия вольт-амперных характеристик солнечных батарей выполнена на основе компонента simscape (Matlab Simulink). Модель основана на соединении солнечной батареи с переменным сопротивлением [8]. Внешний вид модели представлен на рис. 1.

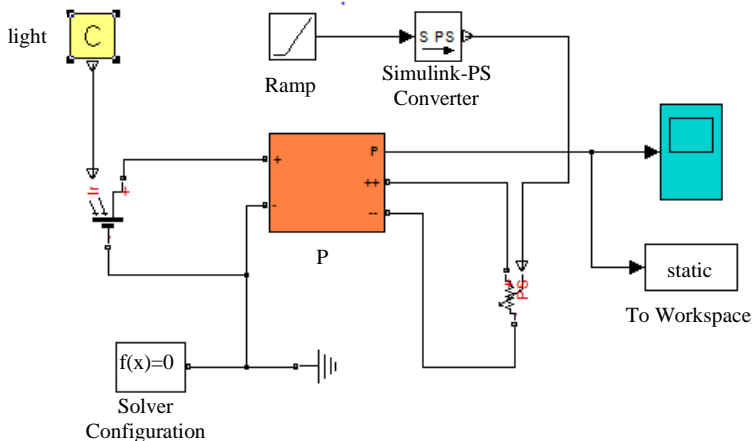


Рис. 1. Модель солнечных батарей

Здесь блок P – блок определения мгновенной мощности. Этот блок в развернутом состоянии представлен на рис. 2.

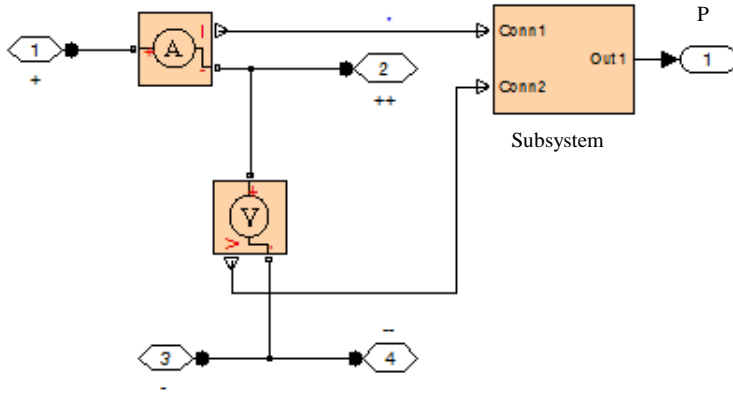


Рис. 2. Блок определения мгновенной мощности

Исходя из уравнений четырехслойного диода, ток, текущий через диод, определяется следующим образом.

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q \cdot V_j}{n \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right\}, \quad (3)$$

где I_0 – обратный ток насыщения (А); n – фактор идеальности диода (1 для идеального диода); q – элементарный заряд; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; для кремния при 25 °С, $k \cdot T / q \approx 0,029\text{В}$.

По закону Ома, ток, текущий через шунтирующий резистор:

$$I_{SH} = \frac{V_j}{R_{SH}}, \quad (4)$$

где R_{SH} – сопротивление шунта (Ω).

Подставляя это в исходное уравнение, получим характеристическое уравнение для солнечного элемента, учитывающее параметры элемента в выходном токе и напряжении.

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{n \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{SH}}. \quad (5)$$

Другие методы приводят к тем же по виду уравнениям, однако с U в левой части. Оба вида уравнений идентичны, их упрощение приводит к одинаковым результатам. Поскольку в обеих частях уравнения присутствует I в трансцендентной функции, его аналитическое решение отсутствует. Однако уравнение может быть решено с помощью численных методов. Если отсутствует возможность прямого измерения параметров I_0 , n , R_S и R_{SH} , то общее применение характеристического уравнения может быть сведено к нелинейной регрессии значений этих параметров на основе их совместного эффекта на поведение солнечного элемента. Значения I_0 , R_S и R_{SH} зависят от физических размеров солнечного элемента. В сравнении с другими такими же элементами, элемент с двойной площадью покрытия в принципе имеет двойной I_0 , поскольку имеет двойную зону перехода, сквозь которую может протекать ток. Также вследствие двойной площади поперечного сечения, через которую протекает ток, такой элемент характеризуется половиной R_S и R_{SH} . Исходя из этого, характеристическое уравнение может быть записано в условиях плотности тока (или тока, протекающего в единице площади):

$$J = J_L - J_0 \left\{ \exp \left[\frac{q \cdot (V + J \cdot r_s)}{n \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + J \cdot r_s}{r_{SH}}, \quad (6)$$

где J – плотность тока (A/cm^2); J_L – плотность обратного тока насыщения (A/cm^2); r_s – удельное сопротивление последовательного резистора ($\Omega \cdot cm^2$); r_{SH} – удельное сопротивление шунта ($\Omega \cdot cm^2$).

Эта формула имеет несколько преимуществ. Одно из них заключается в том, что характеристики элементов с одной общепринятой площадью поперечного сечения могут сравниваться с элементами других физических размеров. Пока существуют ограничения в технологическом семействе, где все элементы должны быть одного размера, можно исследовать и сравнивать элементы между различными производителями. Другое преимущество состоит в том, что вычисления плотности, как и следовало ожидать, изменяют значения параметров к похожим степеням амплитуд, которые могут сделать числовое решение проще и точнее по сравнению с простым методом решения. Практическое ограничение этой формулировки – в том, что размеры элементов уменьшаются и вырастают некие паразитические эффекты, оказывающие влияние на значения извлеченных па-

раметров. Например, рекомбинация и нежелательные примеси в переходе растут с увеличением периметра элемента, поэтому очень маленькие элементы могут показывать высокие значения J_0 или низкие значения r_{sh} , по сравнению с большими элементами, будучи во всём остальном одинаковыми. В таких случаях сравнение между элементами должно быть выполнено внимательно, помня о данном эффекте.

На характеристическое уравнение температура может влиять двумя способами:

- через T по экспоненциальному закону (прямо);
- через эффекты на I_0 (косвенно).

Необходимо уточнить, что температура может оказывать влияние на все параметры, однако в данном случае оно наиболее выражено. Пока увеличение T уменьшает значение экспоненты, в характеристическом уравнении, значение I_0 увеличивается пропорционально $expT$. Результирующий эффект линейно снижает U_{oc} с увеличением температуры. Значение этого снижения обратно пропорционально U_{oc} . Это означает, что элементы с большими значениями U_{oc} меньше страдают от уменьшения напряжения при росте значений температуры. Для большинства кристаллов кремния, из которых состоят солнечные элементы, уменьшение напряжения составляет 0,5 %/°C. Высокоэффективные кристаллы кремния имеют характеризуются значением около 0,35 %/°C. В качестве сравнения может быть приведен аморфный кремний, у которого степень уменьшения напряжения находится в диапазоне 0,20-0,3 %/°C.

С ростом температуры незначительно увеличивается фотовозбужденный ток I_L , поскольку в элементе возрастает количество термовозбужденных носителей. Для кристаллов кремния данный эффект составляет около 0,065 %/°C, а для элементов из аморфного кремния его значение находится около 0,09 %. Совокупное влияние температуры на функционирование солнечного элемента может быть рассчитано на основе данных факторов при использовании характеристического уравнения.

С увеличением последовательного сопротивления падение напряжения, напряжение перехода и напряжение на зажимах становятся больше при том же токе. В результате обусловленная током часть ВАХ свисает к началу, вызывает значительное снижение напряжения на зажимах U и небольшое уменьшение I_{SC} . Снижение в I_{SC} также связано с большими значениями R_s . В этих режимах поведение солнечного элемента будет аналогично сопротивлению. При уменьшении сопротивления шунта ток, протекающий в отвод к шунту, увеличивается для данного уровня напряжения перехода. В результате обусловленная напряжением часть ВАХ спадает к началу, вызывая сильное снижение тока I и лёгкое снижение в U_{oc} . Очень низкие значения R_{sh} приводят к сильному снижению в U_{oc} . В большинстве

случаев для высоких значений последовательного сопротивления плохо шунтированный солнечный элемент изменят свою характеристику к характеристике, похожей на резистор.

Если представить сопротивление шунта бесконечным, характеристическое уравнение может быть решено относительно U_{oc} :

$$U_{oc} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \exp \left\{ \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right\}. \quad (7)$$

Таким образом, при увеличении I_0 значения U_{oc} уменьшаются пропорционально обратному логарифму. Это математически описывает причину уменьшения U_{oc} при увеличении температуры. Физически обратный ток насыщения является мерой утечки зарядов через p - n переход в обратном смещении. Утечка – результат рекомбинаций зарядов в нейтральных областях с обеих сторон перехода.

Коэффициент излучения – подборный параметр, описывающий, насколько точно поведение диода соответствует теории, который предполагает p - n переход в диоде бесконечной плоскостью без рекомбинации в объемно-заряженных областях. Идеальное соответствие теории достигается при $n = 1$. Рекомбинация в объемно-заряженных областях преобладает над остальной рекомбинацией при $n = 2$.

IV. Результаты

Модель без системы управления создана для проведения статических анализов, при неизменном коэффициенте заполнения [9-11]. Внешний вид модели представлен на рис. 3.

V. Заключение

Создана работоспособная модель солнечной батареи для изучения ВАХ солнечного элемента при изменении различных параметров. В результате снижение эффективности находится в пределах 0,20-0,5 %/°C. Увеличение последовательного сопротивления и уменьшение величины шунта приводит к тому, что ВАХ солнечного элемента становится схожей с характеристикой обычного сопротивления.

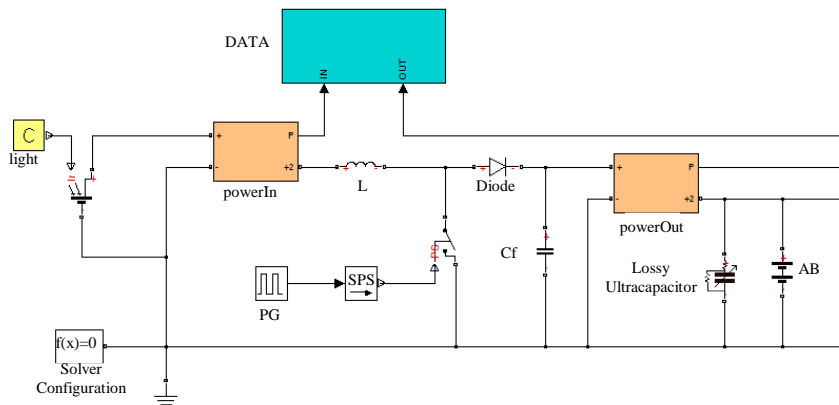


Рис. 3. Модель преобразователя без системы управления

© Колосов Р.В., 2019

Библиографический список

- [1] Уделов С.И. Возобновляемые источники энергии. Новосибирск: НГТУ, 2007. – 432 с.
- [2] Перова М.Б., Воропанова Ю.В. Эффективность объектов нетрадиционной электроэнергетики: Монография. Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2004. – 152 с.
- [3] Минин В.А., Дмитриев Г.С. Перспективы освоения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на Кольском полуострове. Мурманск: Объединение Bellona, 2007. – 92 с.
- [4] Бреусов В.П., Елистратов В.В. Обоснование комбинированных энергосистем, работающих на энергии возобновляемых источников // Известия РАН, серия «Энергетика». 2002. № 6. С. 36-41.
- [5] European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm> (дата обращения 15.05.2019).
- [6] World Energy Outlook 2000. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2008-1994/weo2000.pdf> (дата обращения 15.05.2019).
- [7] World Energy Outlook 2012. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iea.org/textbase/npsum/weo2012sum.pdf> (дата обращения 15.05.2019).
- [8] Колосов Р.В. Возобновляемые источники энергии в системах малой генерации // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 207-211.
- [9] Колосов Р.В. Моделирование ветроэнергетических установок // Вестник Чувашского университета. 2014. № 2. С. 27-32.

- [10] Колосов Р.В. Особенности сопряжения возобновляемых источников (ВИЭ) в контексте развития интеллектуальной энергетической системы России // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2013. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1922> (дата обращения 15.05.2019).
- [11] Колосов Р.В. Проектирование малых энергосистем на основе возобновляемых источников энергии // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2014. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2713> (дата обращения 15.05.2019).

R.V. Kolosov

MODELLING OF SOLAR PANELS

JSC «Sormovskiy electrical enterprises»
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The tasks of creating simulation models of power supply systems with renewable energy sources and their individual components are relevant for approbation of scientific and technical solutions in this field. The article is devoted to the construction of a mathematical and Matlab-model of solar cells. Mathematical formulas describing the relationship between the main parameters of a solar cell are given. The advantages of the proposed approach are substantiated. The Matlab-model of a solar battery which allows to study the current-voltage characteristic of the solar cell as different parameters change is presented. The dependence of the solar cell current-voltage characteristic on the series resistance was studied with the help of the Matlab-model. The results of the research can be used to study the emergency regimes and transients in solar cells.

Keywords: renewable energy sources, current-voltage characteristic, simulation model, solar battery, Matlab.

References

- [1] S.I. Udelov, *Renewable energy sources*. Novosibirsk: Publishing house of NSTU, 2007.
- [2] M.B. Perov and J.V. Voropaeva, *Effectiveness of unconventional objects of electric power industry*. Stary Oskol: LLC «TNT», 2004.
- [3] V.A. Minin and G.S. Dmitriev, *Perspektivy osvoyeniya netraditsionnykh i vozobnovlyayemykh istochnikov energii na Kol'skom poluostrove*, Murmansk, 2007 (in Russian).
- [4] V.P. Breusov and V.V. Elistratov, «Obosnovaniye kombinirovannykh energosistem, rabotayushchikh na energii vozobnovlyayemykh istochnikov», *Izvestiya RAN, seriya Energetika*, vol. 6, pp. 36-41, 2002 (in Russian).
- [5] *European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future*. Luxembourg: Office for Official Publications of the

- European Communities*, 2006. [Online]. Available at: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>. [Accessed: May, 15, 2019].
- [6] *World Energy Outlook*, 2000. [Online]. Available at: <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2008-1994/weo2000.pdf>. [Accessed: May, 15, 2019].
- [7] *World Energy Outlook*, 2012. [Online]. Available at: <http://www.iea.org/textbase/npsum/weo2012sum.pdf>. [Accessed: May, 15, 2019].
- [8] R.V. Kolosov, «Vozobnovlyayemyye istochniki energii v sistemakh maloy generatsii», *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, vol. 3, no. 100, pp. 207-211, 2013 (in Russian).
- [9] R.V. Kolosov, «Modelirovaniye vetroenergeticheskikh ustanovok», *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, vol. 2, pp. 27-32, 2014 (in Russian).
- [10] R.V. Kolosov, «Osobennosti sopryazheniya vozobnovlyayemykh istochnikov v kontekste razvitiya intellektual'noy energeticheskoy sistemy Rossii», *Inzhenernyy vestnik Dona*, vol. 4, 2013. [Online]. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1922>. [Accessed: May, 15, 2019] (in Russian).
- [11] R.V. Kolosov, «Proyektirovaniye malykh energosistem na osnove vozobnovlyayemykh istochnikov energii», *Inzhenernyy vestnik Dona*, vol. 4, 2014. [Online]. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/N4y2014/2713>. [Accessed: May, 15, 2019] (in Russian).