

УДК 621.315.592

О.С. КОВАЛЬ, М.С. ТИВАНОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ИЗ ЕГО СВЕТОВОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

A method for the calculation of the solar cell parameters (series resistance, diode coefficient, reverse current density) from a single current-voltage characteristic at a fixed illumination intensity is proposed. This method is based on the approximation of the solar cell current-voltage characteristic by expansion of its equation in a Taylor series.

Значительный рост промышленного производства и освоение космического пространства наряду с истощением природных ресурсов и ухудшением экологической обстановки [1] приводят к необходимости поиска новых способов энергообеспечения с использованием возобновляемых источников энергии. Среди таких источников наиболее крупным потенциалом обладает солнечное излучение [2, 3].

Повышение эффективности преобразования энергии солнечного излучения в электроэнергию солнечными элементами (СЭ) является основной задачей солнечной энергетики. Рост рынка СЭ напрямую связан с успешностью решения этой задачи. Эффективность фотоэлектрического преобразования определяется световой вольт-амперной характеристикой (ВАХ) СЭ, форма которой зависит от ряда параметров: последовательного и параллельного (шунтирующего) сопротивлений СЭ, плотности тока насыщения диода, диодного коэффициента и некоторых других [4–6]. В связи с этим существенное значение имеет задача контроля и оптимизации этих параметров при производстве СЭ, что требует создания системы контроля характеристик СЭ и совершенствования способов определения их параметров.

Вольт-амперная характеристика солнечного элемента

Световая ВАХ СЭ демонстрирует зависимость выходного тока, генерируемого при освещении СЭ и протекающего через подключенную нагрузку, от падения напряжения на этой нагрузке [4, 5]. Уравнение, описывающее световую ВАХ СЭ, можно представить в следующем виде [5, 6]:

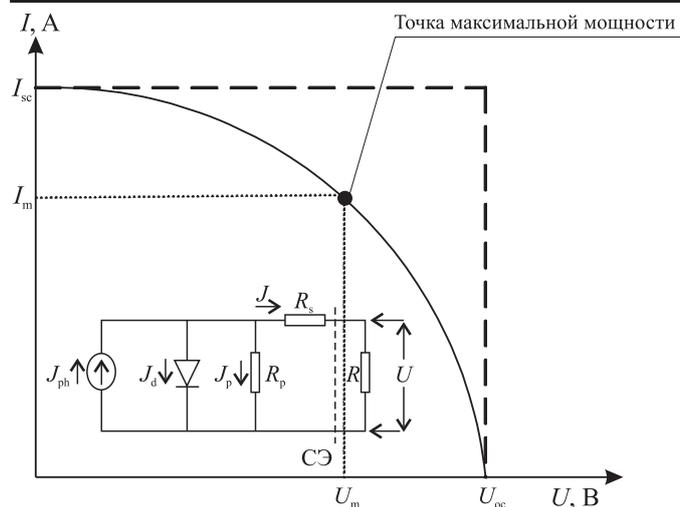


Рис. 1. ВАХ и эквивалентная схема СЭ:

I_{sc} – ток короткого замыкания, U_{oc} – напряжение холостого хода

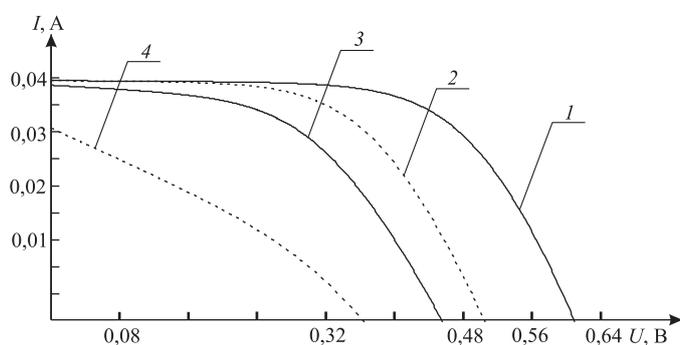


Рис. 2. ВАХ СЭ при различных значениях его параметров:

- 1 – $I_0 = 0,22$ мкА, $R_s = 1,7$ Ом, $R_p = 1,2$ кОм, $A = 1,9$;
- 2 – $I_0 = 1$ мкА, $R_s = 2$ Ом, $R_p = 1,2$ кОм, $A = 1,8$;
- 3 – $I_0 = 1,5$ мкА, $R_s = 2,5$ Ом, $R_p = 120$ Ом, $A = 1,7$;
- 4 – $I_0 = 2$ мкА, $R_s = 3$ Ом, $R_p = 12$ Ом, $A = 1,6$

В силу того что КПД СЭ зависит от формы его ВАХ (см. (2) и (3)), параметры СЭ, входящие в уравнение ВАХ (1), определяют эффективность СЭ. Построение ВАХ в соответствии с уравнением (1) (рис. 2) при различных значениях параметров СЭ демонстрирует, что ее форма существенно зависит от параметров СЭ, точные значения которых необходимы для прогнозирования работы прибора. Поэтому при разработке и производстве СЭ требуется использование методик достоверного определения их параметров.

Основные способы определения параметров солнечного элемента из его вольт-амперной характеристики

Существует множество способов определения параметров СЭ из его ВАХ [10–20]. Некоторые из них основаны на использовании нескольких ВАХ [18–20], полученных при различных интенсивностях облучения либо при разных значениях внешнего электрического смещения, что неприемлемо в силу зависимости параметров СЭ от уровня облучения, температуры и плотности протекающего тока [4, 10, 12, 13]. Следовательно, более предпочтительными способами определения параметров СЭ являются те, в которых для расчета используется единственная ВАХ [11–18]. Поэтому, проводя сравнительный анализ основных способов определения параметров СЭ из его ВАХ, остановимся на основанных на использовании единственной ВАХ.

Определение параметров СЭ из единственной ВАХ возможно с помощью метода наименьших квадратов, однако он, как правило, не применяется, поскольку может давать различные комбинации значений параметров СЭ при совмещении экспериментальной и теоретической ВАХ [11].

Рассмотрим способы нахождения параметров СЭ, изложенные в работах [13, 15–18]. Приближения, используемые при реализации этих способов, а также перечень величин, определяемых экспериментально и применяемых в расчетах, приведены в табл. 1.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{U + IR_s}{m} \right) - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p}, \quad (1)$$

где $m = AkT / e$, I – величина тока, протекающего через нагрузку, U – падение напряжения на нагрузке, I_{ph} – величина генерируемого фототока, I_0 – величина тока насыщения диода, A – диодный коэффициент, e – модуль заряда электрона, k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура, R_p – параллельное (шунтирующее) сопротивление, R_s – последовательное сопротивление.

На рис. 1 представлены ВАХ СЭ и эквивалентная схема СЭ, соответствующие уравнению (1) [7, 8]. ВАХ является важнейшей характеристикой СЭ, поскольку определяет эффективность преобразования энергии солнечного излучения в электроэнергию – КПД СЭ η [7, 9]:

$$\eta = \frac{P_m}{P} = \frac{ff \cdot I_{sc} U_{oc}}{P}, \quad (2)$$

где P – мощность падающего на СЭ излучения, P_m – максимальная выходная мощность СЭ, ff – фактор заполнения ВАХ, I_{sc} – ток короткого замыкания и U_{oc} – напряжение холостого хода,

$$ff = \frac{I_m U_m}{I_{sc} U_{oc}}, \quad (3)$$

где I_m и U_m – величина тока и напряжение, соответствующие точке наибольшей мощности P_m (см. рис. 1).

Некоторые способы определения параметров СЭ

Способ	Используемые	
	допущения	экспериментальные данные
Определение параметров СЭ с использованием углов наклона его ВАХ к осям координат [14]	$R_s / R_p + 1 \approx 1$, $I_{ph} \approx I_{sc}$	$U'_I _{U=0}$, $U'_I _{I=0}$, I_{sc} , U_{oc} , I_m , U_m
Определение последовательного сопротивления с использованием производной от напряжения по току [15]	$\frac{m}{I_{sc} + I_0 \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{m}\right)} \approx 0$	$U'_I _{I=0}$
Определение последовательного сопротивления с использованием трех нагрузочных сопротивлений [16]	–	I_m , U_m , I_{sc} , U_{oc}
Определение последовательного сопротивления с использованием коэффициента заполнения [17]	$I_{sc} R_s \ll m$, $U_{oc} \gg m$	I_m , U_m , I_{sc} , U_{oc}
Определение параметров СЭ с использованием площадей под ВАХ и графиком мощности СЭ [12]	$I_0 \ll I_{ph}$, $R_s / R_p \ll 1$, $I_{ph} R_s / m \sim 1$, $R_p \ll U_{oc} / I_{ph}$	$P_{IV} = \int_0^{U_{oc}} I(U) dU$, $P_P = \int_0^{U_{oc}} I(U) U dU$, $U'_I _{I=0}$, I_{sc} , U_{oc}

Для того чтобы оценить точность какого-либо способа определения параметров СЭ из ВАХ, необходимо априори знать значения этих параметров. Поэтому для оценки точности определения параметров СЭ различными способами была использована не экспериментальная, а рассчитанная с помощью математического пакета ВАХ (1) для СЭ с заданными параметрами (рис. 2, кривая 1). Значения параметров были выбраны близкими к параметрам реального СЭ: $R_s = 1,7$ Ом, $R_p = 1,2$ кОм, $I_0 = 0,22$ мкА, $A = 1,9$, а $I_{sc} = 0,04$ А и $U_{oc} = 0,595$ В. Полученная ВАХ использовалась для расчета параметров СЭ рассматриваемыми в табл. 1 способами. Результаты этих расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения параметров СЭ с помощью различных способов

Параметр	Заданные значения	Способ				
		[14]	[15]	[16]	[17]	[12]
R_s , Ом	1,7	1,9	3,1	2,6	2,9	2
R_p , кОм	1,2	∞	–	–	–	–
A	1,9	1,91	–	–	–	1,7
I_0 , мкА	0,22	0,23	–	–	–	0,23

Как следует из табл. 2, наиболее точным для определения параметров выбранного СЭ оказался способ, основанный на использовании углов наклона ВАХ к осям координат [15]. Однако данный способ имеет несколько существенных недостатков: во-первых, сложность точного определения используемых при расчете углов наклона ВАХ; во-вторых, невозможность независимого выражения всех параметров СЭ, т. е. цикличность метода. В данном способе диодному коэффициенту изначально должно быть задано некое значение, затем рассчитываются остальные параметры, после чего при использовании найденных значений параметров снова рассчитывается диодный коэффициент [15]. Цикл должен сходиться и расчет продолжаться до достижения заданной точности. Однако сходимость цикла зависит от удачности выбора стартового значения диодного коэффициента, что очень трудно сделать при работе с неизвестным типом СЭ.

Чтобы получить удобный для расчетов и достаточно точный способ определения параметров СЭ, позволяющий независимое их определение, необходимо использование уникальных величин для СЭ, которые могут быть достаточно просто найдены из ВАХ. Такими величинами являются площади под графиками ВАХ и мощности. Однако их использование согласно [13] дает недостаточно точные результаты (см. табл. 2), что, вероятно, связано с выбранными приближениями и упрощением конечных формул для расчета параметров.

Определение параметров солнечного элемента с использованием разложения уравнения вольт-амперной характеристики в ряд Тейлора

Рассмотрим расчет параметров СЭ с помощью значений площадей под ВАХ и под графиком мощности, но без упрощений, использованных в работе [13].

Выражения для площади под кривой ВАХ P_{IV} и площади под графиком мощности СЭ P_p имеют вид

$$P_{IV} = \int_0^{U_{oc}} I(U)dU, \quad P_p = \int_0^{U_{oc}} I(U)UdU, \quad (4)$$

где кривые ВАХ $I(U)$ задаются уравнением (1). Для нахождения интегралов (4) в символьной форме упростим подынтегральные выражения путем аппроксимации уравнения ВАХ разложением в ряд Тейлора вблизи некоторой точки U^* , ограничившись членом, содержащим вторую производную. Тогда

$$I(U) = a - b(U - U^*) - c(U - U^*)^2, \quad (5)$$

где a, b, c определяются следующими выражениями:

$$a = I_{sc} - I_0 \left(\exp\left(\frac{U^* + I^* R_s}{m}\right) - 1 \right) - \frac{U^* + I^* R_s}{R_p},$$

$$b = \frac{I_0 \exp\left(\frac{U^* + I^* R_s}{m}\right) + \frac{m}{R_p}}{m \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) + I_0 R_s \exp\left(\frac{U^* + I^* R_s}{m}\right)},$$

$$c = \frac{1}{2} \frac{I_0 m \exp\left(\frac{U^* + I^* R_s}{m}\right)}{\left(m \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) + I_0 R_s \exp\left(\frac{U^* + I^* R_s}{m}\right) \right)^3},$$

где I^* – значение силы тока, соответствующее напряжению U^* .

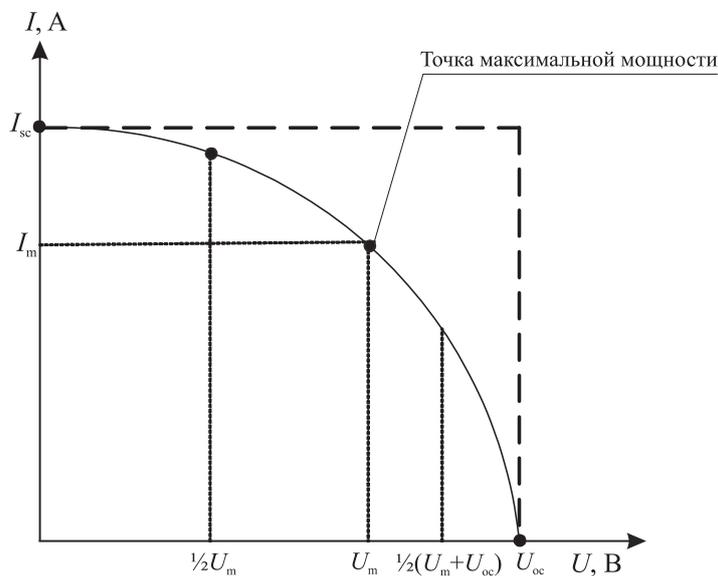


Рис. 3. Разбивка ВАХ СЭ на интервалы

Разобьем ВАХ на интервалы (рис. 3): $[0, \frac{1}{2}U_m]$, $[\frac{1}{2}U_m, U_m]$, $[U_m, \frac{1}{2}(U_{oc} + U_m)]$, $[\frac{1}{2}(U_{oc} + U_m), U_{oc}]$. Аппроксимируем зависимость силы тока, описываемую уравнением (1), от напряжения на каждом из полученных интервалов разложением в ряд Тейлора (5) вблизи точек

$U = 0; \frac{1}{2}U_m; U_m; U_{oc}$. Расчет интегралов (4) на каждом из заданных интервалов, исходя из полученных аппроксимаций $I(U)$, дает систему уравнений, решение которой при выполнении известных условий для реальных СЭ [10, 15]

$$I_0 \ll I_{sc}, I_{ph} \approx I_{sc}, R_s / R_p + 1 \approx 1$$

дает следующие выражения для расчета их параметров:

$$R_s = \frac{1}{I_m} \left(\frac{I_{sc}}{s_2} - \frac{I_{sc} - I_m}{s_1} \right), \quad (6)$$

$$A = \frac{e}{kT} \left(\frac{I_{sc}}{s_2} - R_s I_{sc} \right), \quad (7)$$

$$I_0 = I_m - I_{sc} - \frac{s_1 m}{s_1 R_s - 1}. \quad (8)$$

Параметры s_1 и s_2 определяются значениями площадей под аппроксимированными кривыми ВАХ $P_{IV}^{(1)}, P_{IV}^{(2)}$ и графиков мощности $P_p^{(1)}, P_p^{(2)}$ на соответствующих интервалах (вычисляются с использованием математического пакета MathCad):

$$s_1 = \frac{P_{IV}^{(1)} t_3 - P_p^{(1)} y_3 - y_1 t_3 + t_1 y_3}{t_2 y_3 + y_2 t_3}, \quad s_2 = \frac{P_{IV}^{(2)} t_5 - P_p^{(2)} y_3}{t_4 y_3 + y_2 t_5},$$

где

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{1}{2} I_m (U_{oc} - U_m), \quad y_2 = \frac{1}{8} (U_{oc} - U_m)^2, \quad y_3 = \frac{1}{24} (U_{oc} - U_m)^3, \\ t_1 &= \frac{1}{8} I_m (U_{oc} - U_m) (U_{oc} + 3U_m), \quad t_2 = \frac{1}{24} (U_{oc}^3 - 3U_m^2 U_{oc} + 2U_m^3), \\ t_3 &= \frac{1}{4} \left(\left(\frac{U_{oc} + U_m}{2} \right)^4 - U_m^4 \right) - \frac{2}{3} U_{oc} \left(\left(\frac{U_{oc} + U_m}{2} \right)^3 - U_m^3 \right) + \frac{1}{2} U_{oc}^2 \left(\left(\frac{U_{oc} + U_m}{2} \right)^2 - U_m^2 \right), \\ t_5 &= -\frac{1}{4} \left(\left(\frac{U_{oc} + U_m}{2} \right)^4 - U_{oc}^4 \right) + \frac{2}{3} U_{oc} \left(\left(\frac{U_{oc} + U_m}{2} \right)^3 - U_{oc}^3 \right) - \frac{1}{2} U_{oc}^2 \left(\left(\frac{U_{oc} + U_m}{2} \right)^2 - U_{oc}^2 \right), \\ t_4 &= -\frac{1}{24} (2U_{oc}^3 - 3U_m U_{oc}^2 + U_m^3), \\ P_{IV}^{(1)} &= \int_{U_m}^{\frac{U_m + U_{oc}}{2}} I(U) dU, \quad P_{IV}^{(2)} = \int_{\frac{U_m + U_{oc}}{2}}^{U_{oc}} I(U) dU, \\ P_p^{(1)} &= \int_{U_m}^{\frac{U_m + U_{oc}}{2}} I(U) U dU, \quad P_p^{(2)} = \int_{\frac{U_m + U_{oc}}{2}}^{U_{oc}} I(U) U dU. \end{aligned}$$

Расчет параметров СЭ с помощью уравнений (6), (8) из ВАХ, построенной по заданным значениям параметров СЭ из табл. 2, дает следующие результаты: $R_s = 1,6 \text{ Ом}$, $I_0 = 0,24 \text{ мкА}$, $A = 2$. Таким образом, значения параметров СЭ, рассчитанные с помощью уравнений (6), (8), более близки к заданным, чем при расчете с помощью способов, указанных в [13, 15–18] (см. табл. 2).

При выводе уравнений (6), (8) предполагалось, что значение параллельного сопротивления утечки много больше значения последовательного сопротивления (т. е. фактически ток утечки считался ничтожно малым). Поэтому важно проанализировать, как будет изменяться точность определения параметров СЭ с помощью уравнений (6), (8) в зависимости от величины R_p , так как условие $R_s / R_p + 1 \approx 1$ для реальных СЭ не всегда выполнимо. Из результатов этой проверки, представленной в табл. 3, следует, что с ростом значения параллельного сопротивления точность определения данным способом остальных параметров СЭ, входящих в уравнение (1), возрастает.

Результаты расчета параметров известного СЭ при различных значениях его параллельного сопротивления

Параметр	Заданные значения	$R_p = 500 \text{ Ом}$	$R_p, \text{ кОм}$		
			1	10	100
$R_s, \text{ Ом}$	1,7	1,4	1,58	1,68	1,69
A	1,9	2,3	2,1	1,91	1,9
$I_0, \text{ мкА}$	0,22	0,25	0,24	0,24	0,24

Таким образом, достоинством предлагаемого способа является использование единственной ВАХ и однозначность определения параметров СЭ, а его недостатком – низкая точность определения параметров СЭ при малых значениях параллельного сопротивления.

* * *

Предложен способ расчета последовательного сопротивления, диодного коэффициента и обратного диодного тока солнечного элемента, основанный на использовании площадей под кривой его вольт-амперной характеристики и графиком мощности. В данном способе предполагается равенство значений фототока и тока короткого замыкания, а также малость значения обратного диодного тока в сравнении со значением тока короткого замыкания. Погрешность определения параметров солнечного элемента предложенным способом уменьшается с увеличением значения его параллельного сопротивления.

1. Sims R. E. H. // Solar Energy. 2004. Vol. 76. P. 9.
2. Sen Z. // Progress in Energy & Combustion Science. 2004. Vol. 30. P. 367.
3. Gremenok V. F. // Proceedings of the VI International Youth Environmental Forum «ECOBALTICA'2006», Saint-Petersburg, 27–29 June 2006. St.-Petersburg, 2006. P. 24.
4. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. М., 1984.
5. Fahrenbruch A. L., Bube R. H. Fundamentals of Solar Cells: Photovoltaic Solar Energy Conversion. New York, 1983.
6. Green M. A. Silicon solar cells: Advanced principles and practice. Sydney, 1995.
7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 т. / Пер. с англ. В.А. Гергеля, В.В. Ракинина; Под ред. Р.А. Суриса. М., 1984. Т. 2.
8. Рейкви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / Пер. с англ. В.В. Высоцкой и др.; Под ред. С.Н. Горина. М., 1984.
9. Васильев А. М., Ландсман А. П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М., 1971.
10. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент: Пер. с англ.; Под ред. М.М. Колтуна. М., 1987.
11. Appelbaum J., Chait A., Tompson D. // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. February 1993. Vol. 1. Iss. 2. P. 93.
12. Горбань А. П., Костылев В. П., Николин И. Б. и др. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. 1991. № 19. С. 85.
13. Евдокимов В. М. // Гелиотехника. 1972. № 6. С. 16.
14. Бордина Н. М., Зайцева А. К., Стрельцова В. Н. // Гелиотехника. 1977. № 1. С. 17.
15. Tivanov M., Patryn A., Drozdov N. et al. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2005. Vol. 87. P. 457.
16. Shirland F. A. // Ibid. 1996. № 1. P. 179.
17. Cape J. A., Zehr S. W. // 14th IEEE Photovolt. Spec. Conf. San Diego, Calif, 1980. New York, 1980. P. 449.
18. Пикус Г. Е. Основы теории полупроводниковых приборов. М., 1965.
19. А. с. 268541 СССР, МКИ С 01 Р 27/00. Способ определения последовательного сопротивления фотопреобразователя / В.С. Егоров, А.К. Зайцева и др. Оpubl. в БИ. 1970. Бюл. № 14.
20. Wolf M., Rauschenbach H. // Adv. Energy. Conv. 1963. № 2. P. 455.

Поступила в редакцию 07.12.11.

Ольга Сергеевна Коваль – студентка 4-го курса физического факультета.

Михаил Сергеевич Тиванов – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры энергофизики.