

А. Б. Базилевский, М. В. Лукьяненко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Рассмотрены вопросы математического моделирования характеристик солнечной батареи в диапазоне освещенностей и температур, соответствующих реальным условиям космического пространства.

Солнечная батарея (СБ) является основным источником электроэнергии для большинства космических аппаратов (КА). Для решения таких задач, как оптимизация схемы СБ, определение оптимальной рабочей точки СБ в условиях меняющейся освещенности и температуры, оценка схемных потерь, определение влияния частичного затенения на выходные характеристики СБ и изменения ее мощности из-за воздействия на нее частиц высоких энергий, расчет и моделирование системы электропитания (СЭС) КА, анализ и прогнозирование работы СЭС, необходимо моделирование вольт-амперной характеристики (ВАХ) СБ [1]. Моделирование ВАХ СБ выполняется на основе моделирования ВАХ солнечного элемента (СЭ). При этом необходимо располагать следующими математическими моделями:

- исходной моделью СЭ, описывающей соответствующие характеристики элементов, не подвергавшихся воздействию факторов космического пространства;
- ресурсной моделью, описывающей относительные изменения характеристик СЭ под действием этих факторов.

Теоретическая (физическая) модель СЭ, исходящая из схемы замещения, представляет интерес в основном только для разработчиков СБ. Эта модель описывается уравнением

$$I_n = I_\phi - I_{o,n} \left\{ \exp \left[\frac{e(U + I_n R_n)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U}{R_{ш}}, \quad (1)$$

где I_n – ток нагрузки; I_ϕ – фототок, или ток короткого замыкания СЭ; $I_{o,n}$ – обратный ток насыщения; e – заряд электрона; U – напряжение на СЭ; R_n – последовательное сопротивление (сопротивление толщи полупроводника и контактной сетки); k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура СЭ; $R_{ш}$ – индуктирующее сопротивление; A – коэффициент, полученный при сравнении теоретической и экспериментальной кривых.

Эквивалентная схема замещения (рис. 1) с сосредоточенными параметрами – очевидно, является лишь более или менее хорошим приближением к реальному СЭ.

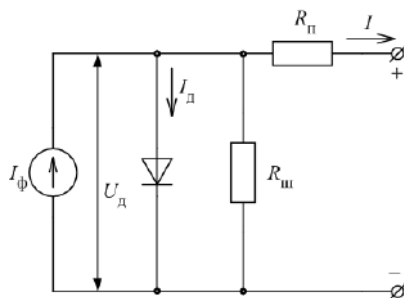


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения солнечного элемента

Удовлетворительная точность модели (1) может быть получена при условии, что $I_n R_n \leq 10\%$, однако и в этом случае наблюдаются систематические отклонения теоретической кривой от экспериментальной, являющиеся следствием переменных величин плотностей токов и градиентов напряжения.

Одной из задач, стоящих перед разработчиками СЭ, является задача обеспечения оптимальной геометрии, т. е. такой геометрии, при которой удельные характеристики СЭ, Вт / м², достигают максимума (рис. 2).

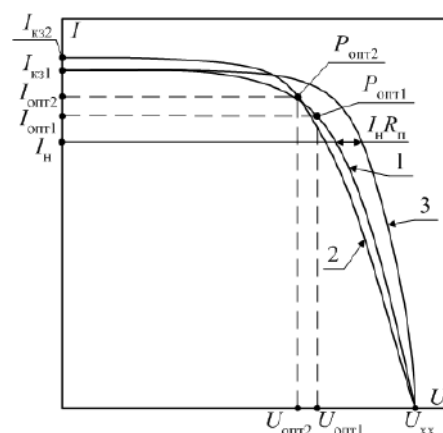


Рис. 2. Влияние геометрии контактной сетки на форму ВАХ СЭ

Следует отметить, что из дополнительных параметров, входящих в (1), существенное влияние на форму ВАХ СЭ оказывает $R_{ш}$ [2]. Поскольку СЭ изготавливают из полупроводников более низкого качества по сравнению, например, с теми, что используются для микросхем, количество дефектов в $p-n$ -переходе большой площади существенно больше, а плотность тока меньше, чем в полупроводниковых приборах. Попытка уменьшить влияние $R_{ш}$, используя для изготовления СЭ более высококачественные материалы, считается экономически нецелесообразной, так как работа в условиях облучения СБ потоками частиц высоких энергий быстро сводит к нулю затраты, связанные с повышением качества исходного полупроводника.

В настоящее время не существует ни одной модели, точно описывающей существующие СЭ во всех диапазонах изменения температуры, интенсивности освещения и степени радиационного повреждения. Попытка уточнения аналитического описания ВАХ СЭ при переходе от модели с сосредоточенными параметрами к модели с распределенными параметрами оказалась малоэффективной, поскольку возросшая громоздкость выражений не окупилась достигнутой точностью по причине зависимости параметров $I_{o,n}$, R_n , A от указанных факторов,

причем эти параметры очень трудно измерить во всех представляющих интерес диапазонах.

Аналитическую форму описания ВАХ СБ, обеспечивающую достаточную точность в широком диапазоне значимых факторов, оказалось возможным получить также с помощью формализованного выражения, удовлетворяющего ряду требований, всегда имеющих место для специфически нелинейных кривых подобного вида. В этой связи прежде всего встает вопрос о выборе вида аппроксимирующей функции, которая должна давать наилучшее приближение к экспериментальным данным, являющихся критериями. Этому требованию удовлетворяет экспоненциальная функция, поскольку СБ как полупроводниковый прибор описывается экспонентой [3].

Для удобства использования и наглядности выбрана характеристическая форма, т. е. такая форма записи, в которой вся кривая описывается по трем вполне определенным точкам ВАХ СБ: напряжению холостого хода, току короткого замыкания, точке максимальной мощности. Максимальная мощность характеризуется параметрами i, j , которые описываются простыми соотношениями: $i = \frac{I_{\text{опт}}}{I_{\text{к.з}}}$, $j = \frac{U_{\text{опт}}}{U_{\text{х.х}}}$, где $I_{\text{опт}}$, $U_{\text{опт}}$ – ток и напряжение в оптимальной точке (точке максимальной мощности); $U_{\text{х.х}}$ – напряжение холостого хода; $I_{\text{к.з}}$ – ток короткого замыкания.

Экспоненциальную модель СБ можно записать в общем виде как

$$I = I_{\text{к.з}} [1 - e^{f(U)}], \quad (2)$$

где $f(U)$ – функция текущего напряжения и параметров характеристической ВАХ

$$f(U) = \frac{(U - U_{\text{х.х}}) \ln(1-i)}{U_{\text{х.х}}(j-1)}. \quad (3)$$

Анализ сходимости экспериментальных значений и данных, полученных по выражению (2), показал, что здесь имеют место систематические отклонения, которые сохраняются во всем диапазоне температур и освещенностей. При этом было установлено, что между указанными выражениями и теоретической моделью (1) таких отклонений не наблюдается. Данная особенность позволила сделать заключение, что эти результаты получены по условию прохождения формализованной кривой через характеристические точки теоретической модели (рис. 3).

Систематические отклонения подтверждают непредставимость СЭ схемой с сосредоточенными параметрами. С целью повышения точности описания ВАХ формализованным выражением (2) было введено условие, которому всегда удовлетворяет точка наибольшей мощности: $\left. \frac{dP}{dU} \right|_{U=U_{\text{опт}}} = 0$.

Функция $f(U)$ описывается следующим выражением:

$$f(U) = \left\{ \left[\frac{i}{1-i} - \frac{\ln(1-i)}{\ln j} \right] \left(\frac{U}{U_{\text{х.х}} j} - 1 \right) + \ln(1-i) \right\} \frac{\ln \left(\frac{U}{U_{\text{х.х}}} \right)}{\ln j}. \quad (4)$$

Аналитические зависимости $I_{\text{к.з}} = f_1(t, C)$, $I_{\text{опт}} = f_2(t, C)$, $U_{\text{х.х}} = f_3(t, C)$, $U_{\text{опт}} = f_4(t, C)$ получены авторами экспериментальным путем. Для этой цели была разработана и изготовлена установка для исследования фрагментов СБ.

Зависимости для кремниевых СЭ 11-й группы ($P_{\text{уд}} \approx 120$ Вт/м²) приведены на рис. 4, 5, 6, 7, где введены следующие обозначения: 0,2 – 200 Вт/м²; 0,4 – 400 Вт/м²; 0,6 – 600 Вт/м²; 0,8 – 800 Вт/м²; 1,0 – 1 000 Вт/м²; 1,2 – 1 200 Вт/м²; 1,4 – 1 400 Вт/м².



Рис. 3. Семейство ВАХ для кремниевой СБ: 1 – кривые для освещенности, равной $C = 1\ 360$ Вт/м² (одна солнечная постоянная); 2 – кривые для освещенности $2/3 C$; 3 – кривые для освещенности $1/3 C$

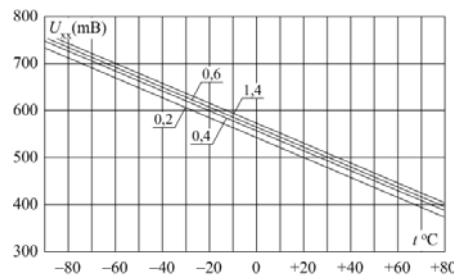


Рис. 4. Зависимости напряжения холостого хода $U_{\text{х.х}}$ кремниевых СЭ от температуры и освещенности

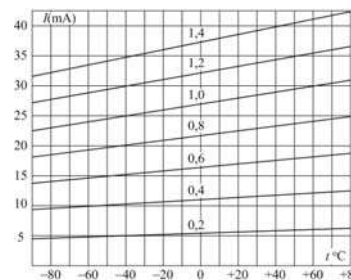


Рис. 5. Зависимости тока короткого замыкания $I_{\text{к.з}}$ кремниевых СЭ от температуры и освещенности

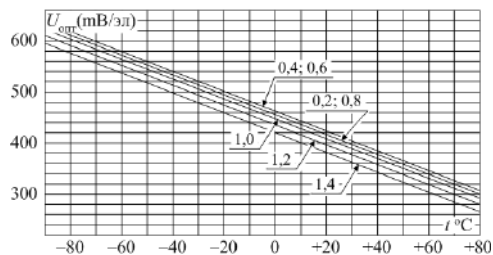


Рис. 6. Зависимости напряжения в точке наибольшей мощности $U_{\text{опт}}$ для кремниевых СЭ от температуры и освещенности

Экспериментальным путем также были получены зависимости относительного оптимального тока i и оптимального напряжения для кремниевых СЭ от температуры и освещенности (рис. 8, 9).

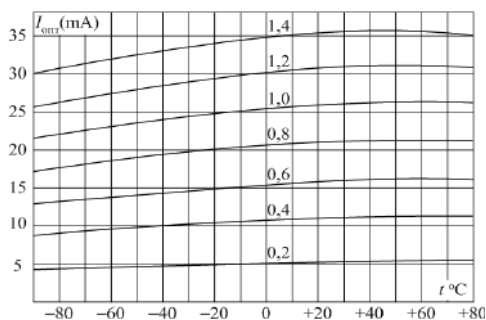


Рис. 7. Зависимости тока в точке наибольшей мощности $I_{\text{опт}}$ для кремниевых СЭ от температуры и освещенности

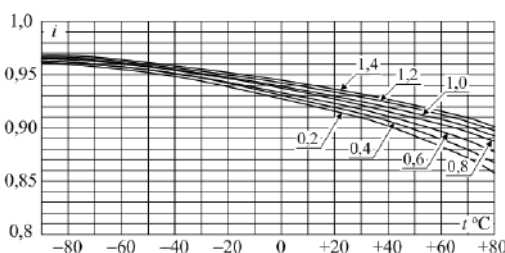


Рис. 8. Зависимости относительного оптимального тока i для кремниевых СЭ от температуры и освещенности

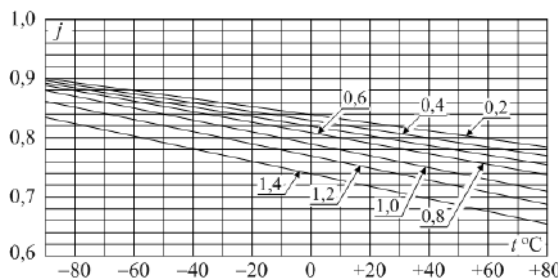


Рис. 9. Зависимости относительного оптимального напряжения j для кремниевых СЭ от температуры и освещенности

На основании полученных экспериментальных зависимостей был выбран следующий вид аппроксимирующих функций:

$$U_{x,x} = (A_1 C + A_2 - A_3 t) N_{\text{пос}},$$

$$I_{k,3} = \frac{C \cdot S \cdot P_{\text{уд}} (1 + A_5 t)}{A_4 \cdot N_{\text{пос}}},$$

$$j = A_6 - C (A_7 + A_8 t) - A_9 t,$$

$$i = A_{10} - C \cdot A_{11} e^{A_{12} t} - A_{13} t,$$

где $A_1 \dots A_{13}$ – эмпирические безразмерные коэффициенты аппроксимации; $N_{\text{пос}}$ – количество СЭ в СБ, соединенных последовательно; $P_{\text{уд}}$ – удельная мощность СБ; S – площадь СБ.

При описании ВАХ СБ по параметрам i и j характеристической кривой теряется наглядность зависимости коэффициента прямоугольности от распределенного последовательного сопротивления схемы замещения. Поскольку величину $R_{\text{н}}$ оптимизируют с целью получения

наибольшей мощности с единицы площади (см. рис. 2) и диапазон изменения i и j сравнительно невелик, то для эмпирических коэффициентов, зависящих от $R_{\text{н}}$, определены границы варьирования. Значения коэффициентов аппроксимации следующие: $A_1 = 2,734 \cdot 10^{-5}$, $A_2 = 0,5447$, $A_3 = 2,045 \cdot 10^{-3}$, $A_4 = 424,8$, $A_5 = 1,763 \cdot 10^{-3}$, $A_6 = 8,14 \cdot 10^{-1}$... $8,84 \cdot 10^{-1}$, $A_7 = 6,59 \cdot 10^{-4}$... $10,54 \cdot 10^{-4}$, $A_8 = 2,246 \cdot 10^{-7}$... $2,884 \cdot 10^{-7}$, $A_9 = 6,362 \cdot 10^{-4}$... $7,092 \cdot 10^{-4}$, $A_{10} = 0,937$, $A_{11} = 7,142 \cdot 10^{-6}$, $A_{12} = 2,05 \cdot 10^{-2}$, $A_{13} = 3,21 \cdot 10^{-4}$... $3,75 \cdot 10^{-4}$.

Приведенные выше выражения, описывающие семейство ВАХ, являются формализованной моделью СБ. Если на практике использовать эту модель непосредственно (при указанных значениях коэффициентов аппроксимации), то, поскольку СЭ подвержены ресурсной деградации, через некоторое время эксплуатации в условиях космического пространства будет иметь место дефицит энергии СБ и энергобаланс в системе «СЭС – нагрузка» выполняться не будет. Следовательно, начальные параметры СБ нужно выбирать с некоторым запасом, обеспечивающим требуемую энергоотдачу СБ на конец срока активного существования КА. Выбор начальных значений параметров СБ можно также осуществить на основе некоторой формализованной модели, однако это целесообразно делать исходя именно из теоретической модели, поскольку ресурсным изменениям подвержены реальные компоненты схемы замещения. Установление взаимнооднозначного соответствия между теоретической и формализованной моделями, т. е. их идентификация, позволяет полностью выразить ресурсный спад характеристик по параметрам схемы замещения. Следует отметить, что некоторые параметры, входящие в теоретическую модель, не поддаются непосредственному измерению и могут быть определены лишь косвенно. Идентификация моделей позволяет объяснить механизм явления и определить значимость отдельных факторов, а также уменьшить громоздкость выражений и упростить расчет [4].

Наиболее точной моделью, применяемой для инженерных расчетов, является выражение (1). В связи с тем что обычно $R_{\text{ш}}$ велико ($5 \dots 10$ кОм/см²) и $I_{\text{о.н}} \ll I_{\text{ф}}$, выражение (1) без ущерба для точности можно упростить:

$$I_{\text{н}} = I_{\text{ф}} - I_{\text{о.н}} \cdot \exp\left[\frac{e(U + I_{\text{н}} R_{\text{н}})}{AkT}\right]. \quad (5)$$

Для полученных зависимостей $I_{\text{ф}}$, $I_{\text{о.н}}$, $R_{\text{н}}$ и A как функций температуры T и освещенности C принимаем

$$K_1 U_{x,x} = \frac{AkT}{e}, K_2 I_{k,3} = I_{\text{о.н}}, I_{\text{ф}} = I_{k,3}, \text{ тогда}$$

$$I_{\text{н}} = I_{k,3} \left[1 - K_2 \exp\left(\frac{U - I_{\text{н}} R_{\text{н}}}{K_1 U_{x,x}}\right) \right]. \quad (6)$$

На экспериментально полученной ВАХ СЭ наибольший интерес представляют характеристические точки $I_{k,3}$, $U_{x,x}$, $P_{\text{опт}}$ и их изменения при различных температурах и освещенностях. Произведя замену переменных $i_{\text{н}} = \frac{I_{\text{н}}}{I_{k,3}}$, $V = \frac{U}{U_{x,x}}$, $r = \frac{R_{\text{н}} I_{k,3}}{U_{x,x}}$, получим:

$$i_{\text{н}} = 1 - K_2 \cdot \exp\left(\frac{V + i_{\text{н}} r}{K_1}\right). \quad (7)$$

В выражении (7) необходимо описать параметры r , K_1 , K_2 по относительным координатам точки максималь-

ной мощности i и j , причем должны выполняться следующие условия:

- 1) $I_n = I_{к.з}$ при $U = 0$ или $V = 0$ при $i_n = 1$;
- 2) $I_n = 0$ при $U = U_{х.х}$ или $i_n = 0$ при $V = 1$;
- 3) $I_n = I_{онт}$ при $U = U_{онт}$ или $i_n = i$ при $V = j$;
- 4) $\frac{dP}{dU} = 0$ при $U = U_{онт}$ или $\frac{dV}{di_n} = \frac{j}{i}$ при $i_n = j$.

Для выполнения условия 1 необходимо, чтобы $K_2 \cdot e^{r/K_1} \ll 1$. Опыт показывает, что те значения K_1, K_2 и r , которые получаются по условиям 2, 3 и 4, удовлетворяют автоматическому выполнению условия 1 с достаточной точностью (в пределах 1 %).

Подставляя в (7) $V = 1, i_n = 0$, по условию 2 получим

$$K_2 = \exp\left(-\frac{1}{K_1}\right). \quad (8)$$

По условию 3 $i_n = I, V = j$ и, подставляя выражение для $U_{х.х}$ в (4), имеем

$$i = 1 - \exp\left(\frac{j + ir - 1}{K_1}\right), \quad (9)$$

откуда

$$r = \frac{K_1 \cdot \ln(1-i) + 1 - j}{i}. \quad (10)$$

Для определения значения по выражению (10) в оптимальной точке выразим V как функцию от i_n :

$$V = 1 + K_1 \cdot \ln(1 - i_n) - i_n \cdot r. \quad (11)$$

Выражение (11) про дифференцируем:

$$\frac{dV}{di_n} = -\left(r + \frac{K_1}{1 - i_n}\right). \quad (12)$$

С учетом условия 4 имеем

$$r = \frac{j}{i} - \frac{K_1}{1 - i}. \quad (13)$$

По выражениям (10) и (11) получим

$$K_1 = \frac{2j - 1}{\frac{i}{1 - i} + \ln(1 - i)}. \quad (14)$$

Используя выражения (8), (13) и (14), по экспериментальным данным можно описать все необходимые для практики зависимости.

Таким образом, идентифицированная теоретическая модель содержит элемент формализации, поскольку реальные СЭ по своей сути являются элементами с распределенными параметрами. Однако для практических расчетов эта модель вполне применима, так как разница в значениях мощности, вычисленной по формализованной и теоретической моделям, не превышает 1,5 % в диапазоне от холостого хода до короткого замыкания. Следовательно, указанная формализация вполне допустима.

Библиографический список

1. Системы электроснабжения космических аппаратов / Б. П. Соустин, В. И. Иванчура, А. И. Чернышев, Ш. Н. Исляев. Новосибирск : ВО «Наука», 1994. 318 с.
2. Исследование статических характеристик фотопреобразователей : отчет по НИР. Красноярск, 1984. 43 с. № ГР 01.83.0004550.
3. Бородина, Н. М. Моделирование вольт-амперных характеристик солнечных элементов и солнечных батарей / Н. М. Бородина, В. А. Летин // Электротехническая промышленность. М., 1986. 64 с.
4. Базилевский, А. Б. Анализ и идентификация моделей солнечной батареи / А. Б. Базилевский, М. В. Лукьяненко // Электрооборудование автономных объектов : сб. науч. тр. / Моск. энерг. ин-т. М., 1987. С. 29–33.

A. V. Basilevsky, M. V. Lukyanenko

THE MODELING OF VOLTAGE-CURRENT CHARACTERISTIC OF SOLAR BATTERIES

This article describes problems of mathematical modeling of characteristic of solar batteries in range of light intensity and temperature which corresponds to real space conditions.