

Статистическая оценка характеристик поврежденных солнечных батарей космических аппаратов

© А.А. Абдурахимов, А.В. Левандович

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского Министерства обороны РФ,
197198 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: vka@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2022 г.

В окончательной редакции 27 ноября 2022 г.

Принято к публикации 16 декабря 2022 г.

Рассмотрено изменение характеристик солнечной батареи в результате случайного скачкообразного изменения свойств отдельных солнечных элементов, произошедшего вследствие однократного или систематического воздействия неблагоприятных факторов околоземного космического пространства. Обоснован выбор расчетной схемы для построения модели единичного солнечного элемента. Для данной ситуации разработаны аналитические математические модели типовых соединений солнечных элементов. С помощью разработанных моделей проанализированы вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики солнечной батареи в случае скачкообразного снижения фототока солнечных элементов с различной вероятностью. Проведен статистический анализ характеристик поврежденных солнечных батарей с использованием упрощенных логико-аналитических моделей с введенным коэффициентом схемных потерь. Приведены оценки значений коэффициента схемных потерь для типовых схем соединения солнечных элементов.

Ключевые слова: солнечный элемент, вольт-амперная характеристика, модель функционирования, поврежденная солнечная батарея.

DOI: 10.21883/JTF.2023.02.54502.121-22

Введение

Под действием различных факторов околоземного космического пространства наблюдается существенная деградация солнечных батарей (СБ) космических аппаратов (КА). В связи с этим как на этапе проектирования, так и в ходе эксплуатации КА необходим инструмент для прогнозирования технического состояния СБ, адекватно учитывающий процессы деградации составляющих СБ солнечных элементов (СЭ).

В процессе функционирования КА может наблюдаться два вида процессов деградации отдельных элементов СБ: плавное изменение свойств СЭ по мере накопления повреждений в результате действия неблагоприятных факторов (НФ) или скачкообразное изменение свойств СЭ. Методический аппарат, позволяющий смоделировать процесс функционирования СБ при плавном изменении свойств СЭ достаточно проработан [1–9], однако отсутствуют модели, позволяющие описать процесс функционирования СБ в случае скачкообразного изменения свойств СЭ. Перечень характеристик СЭ, причины и примеры их скачкообразного изменения представлены в работе [10]. Поэтому целью настоящей работы является разработка способов, позволяющих выполнять оценку характеристик поврежденных СБ систем электроснабжения КА в условиях неопределенности характеристик СЭ, обусловленной случайным характером деградации их свойств в результате воздействия НФ.

1. Моделирование функционирования отдельных элементов СБ

Прогнозирование состояния СБ может быть выполнено по результатам вычисления интегральных характеристик СБ на основе характеристик составляющих ее элементарных фрагментов. Под элементарным фрагментом СБ здесь понимается такая часть батареи, в пределах которой ее деградацию можно принять равномерной. В качестве элементарных фрагментов СБ целесообразно рассматривать СЭ. Это обусловлено тем, что СЭ обладает достаточно стабильными характеристиками по всей площади. К тому же существует возможность выполнения экспериментальных исследований влияния воздействия НФ на его свойства.

Под интегральной характеристикой СБ следует понимать вычисляемую на основе характеристик поврежденных элементарных фрагментов статистическую характеристику СБ в целом, определяющую ее свойства при функционировании в составе системы электроснабжения КА.

При моделировании функционирования СБ в условиях воздействия НФ целесообразно выбрать универсальную вольт-амперную характеристику (ВАХ) батареи, определяющую ее способность к генерации электроэнергии на различных режимах. В состав данной модели целесообразно включить отдельные ВАХ СЭ:

$$I^{SB}(U) = f_{VAC}^{SB}(I_{(n)}^{SC}(U)), \quad (1)$$

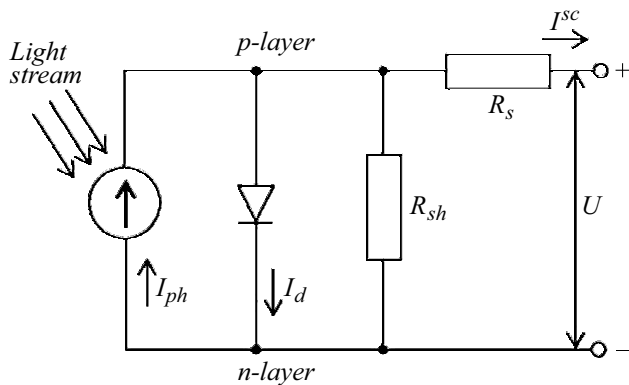


Рис. 1. Эквивалентная схема СЭ.

где $I_{(n)}^{SC}(U)$ — множество ВАХ СЭ, входящих в состав СБ; n — количество СЭ, составляющих СБ; f_{VAC}^{SB} — функция, связывающая характеристики СЭ с характеристиками СБ в целом.

Выбор эквивалентной схемы и комплекса допущений для описания СЭ осуществляется в зависимости от решаемой задачи. Достаточно полный обзор решаемых задач и подходящих для их решения моделей элементов представлен в работах [1–9]. Для построения модели (1) при исследовании функционирования СЭ в условиях внешних воздействий, способных привести к возникновению повреждений различных типов, хорошо подходит эквивалентная схема, представленная на рис. 1.

Математическая модель для этой эквивалентной схемы может быть представлена выражением [1]:

$$I^{SC} = I_{ph} - I_{rev} \left(e^{\frac{q_e(U+I^{SC}R_s)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{sh}}, \quad (2)$$

где I^{SC} — ток нагрузки или выходной ток СЭ; I_{ph} — фототок, созданный генерированными светом неосновными носителями; I_{rev} — обратный ток насыщения; $q_e = 1.60217653 \cdot 10^{-19}$ С — заряд электрона; U — напряжение на выходе СЭ; R_s — последовательное сопротивление СЭ; A — экспериментально полученный коэффициент, принимающий значения от 1 до 5; $k = 1.3806505 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — температура СЭ; R_{sh} — шунтовое сопротивление СЭ.

В случае рассмотрения современных гетероструктурных СЭ модель (2) может быть дополнена соответствующими слагаемыми [5,7–10].

Для определения параметров, входящих в уравнение (2), возможно использовать подход, основанный на построении нормализованной ВАХ [1,10].

Еще одна важная интегральная характеристика СЭ и СБ — вольт-ваттная характеристика (ВВХ):

$$N^{SC}(U) = I^{SC}(U) \cdot U.$$

Мощность СБ складывается из выходных мощностей отдельных СЭ. Выходной ток СБ в батарее определяется

числом элементов, соединенных параллельно, а выходное напряжение — числом элементов, соединенных последовательно. Для удобства анализа функционирования СБ ее целесообразно представить в виде последовательно и параллельно соединенных СЭ.

При параллельном соединении СЭ все объединенные в элементарную цепь элементы генерируют электрический ток при одном и том же рабочем напряжении:

$$I^C(U) = \sum_{i=1}^m I_i^{sc}(U), \quad N^C(U) = I^C(U) \cdot U, \\ N_{max}^C = I^C(U_{opt}^C) \cdot U_{opt}^C, \quad (3)$$

где $I^C(U)$ — ВАХ m параллельно соединенных СЭ; $N^C(U)$ — ВВХ m параллельно соединенных СЭ; N_{max}^C — максимальная электрическая мощность, которую способно генерировать параллельное соединение m СЭ в расчетных условиях; U_{opt}^C — оптимальное напряжение, при котором параллельное соединение генерирует максимальную мощность.

При последовательном соединении в элементарную цепь СЭ с различными ВАХ генерируют электроэнергию при одном и том же значении тока:

$$U^S(I) = \sum_{i=1}^n U_i^{SC}(I), \quad N^S(I) = U^S(I) \cdot I, \\ N_{max}^S = U^S(I_{opt}^S) \cdot I_{opt}^S, \quad (4)$$

где $U^S(I)$ — ВАХ n последовательно соединенных СЭ; $N^S(I)$ — ВВХ n последовательно соединенных СЭ; N_{max}^S — максимальная электрическая мощность, которую способно генерировать последовательное соединение n СЭ в расчетных условиях; I_{opt}^S — оптимальный ток, при котором последовательное соединение СЭ генерирует максимальную мощность.

Построение зависимости рабочего напряжения от генерируемого СЭ тока для используемой модели может быть получено из решения уравнения (2) относительно напряжения:

$$U^{SC} = R_{sh} \left(I_{ph} - I - I_{rev} \left(e^{\frac{q_e(U^{SC}+IR_s)}{AkT}} - 1 \right) \right). \quad (5)$$

Таким образом, для получения интегральных характеристик СБ, представляющих собой в электрическом плане различные комбинации последовательных и параллельных соединений большого числа СЭ, необходимо получение ВАХ СБ в целом.

2. Моделирование функционирования поврежденных СБ при случайном характере изменении свойств отдельного элемента

В условиях неопределенности характеристик СЭ, обусловленной случайным характером деградации их

свойств в результате воздействия НФ, состоятельную оценку математических ожиданий значений ВАХ батареи позволяет сформировать статистический анализ результатов численных экспериментов [11], поставленных на математической модели батареи, построенной с использованием соотношений (2)–(5):

$$\tilde{I}^{SB}(U) = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{I}_i^{SB}(U)}{n},$$

где $\tilde{I}_i^{SB}(U)$ — случайная реализация ВАХ СБ при проведении i -го эксперимента; n — число опытов.

При плавном изменении свойств СЭ в зависимости от параметров НФ разброс характеристик соседних элементов в большинстве случаев окажется незначительным в силу того, что при комплектовании СБ в элементарные цепочки последовательного и параллельного соединения СЭ производитель подбирает элементы с близкими характеристиками. В этом случае в моделях СЭ (2) и (5) в качестве параметров могут быть использованы их средние значения, состоятельными оценками которых являются их математические ожидания:

$$I^{SC} = M(I_{ph}) - M(I_{rev}) \left(e^{\frac{q_e(U+I^{SC}M(R_s))}{M(A)kT}} - 1 \right) - \frac{U}{M(R_{sh})},$$

$$U^{SC} = M(R_{sh}) \left(M(I_{ph}) - I - M(I_{rev}) \left(e^{\frac{q_e(U^{SC}+IM(R_s))}{M(A)kT}} - 1 \right) \right), \quad (6)$$

где $M(I_{ph})$, $M(I_{rev})$, $M(R_s)$, $M(R_{sh})$, $M(A)$ — математические ожидания параметров СЭ после воздействия НФ.

Использование экспериментально полученных функций математических ожиданий параметров поврежденных СЭ при различных значениях параметров НФ $\lambda_{(m)}$, $h_{I_{ph}}$, $h_{I_{rev}}$, h_{R_s} , $h_{R_{sh}}$, h_A , на месте соответствующих математических ожиданий в выражении (6) позволяет выполнять расчет ВАХ СБ при значениях параметров НФ, ведущих к плавной деградации свойств СЭ:

$$I^{SC}(U|\lambda_j) = h_{I_{ph}}(\lambda_j) - h_{I_{rev}}(\lambda_j) \left(e^{\frac{q_e(U+I^{SC}h_{R_s}(\lambda_j))}{h_A(\lambda_j)kT(\lambda_j)}} - 1 \right) - \frac{U}{h_{R_{sh}}(\lambda_j)},$$

$$U^{SC}(I|\lambda_j) = h_{R_{sh}}(\lambda_j) \cdot \left(h_{I_{ph}}(\lambda_j) - I - h_{I_{rev}}(\lambda_j) \times \left(e^{\frac{q_e(U^{SC}+Ih_{R_s}(\lambda_j))}{h_A(\lambda_j)kT(\lambda_j)}} - 1 \right) \right), \quad (7)$$

где $T(\lambda)$ — зависимость температуры СЭ от параметров НФ.

Температура СЭ может меняться после воздействия НФ, если в результате воздействия происходит изменение оптических характеристик лицевой или тыльной поверхностей СЭ, а также вследствие омического нагрева незащищенных СЭ и их сборок.

Далее однажды посчитанные с помощью модели (6) ВАХ отдельных СЭ при определенных значениях параметров НФ используются для расчета последовательных и параллельных соединений фрагментов СБ с использованием моделей (3), (4) для получения ВАХ батареи в целом.

При скачкообразном изменении параметров СЭ в результате воздействия НФ в моделях элементарных соединений, содержащих большое число СЭ, вместо случайных значений параметров СЭ могут быть использованы их средние значения только в случаях, когда эти параметры входят в уравнения (2) или (5) в виде слагаемых в первой степени. Например, для расчета ВАХ последовательного соединения n СЭ модель (4) с учетом (5) в общем случае примет вид:

$$U^G(I) = \sum_{i=1}^n U_i^{SC}(I) = \sum_{i=1}^n \left(R_{sh_i} \left(I_{ph_i} - I - I_{rev_i} \times \left(e^{\frac{q_e(U_i^{SC}+IR_{s_i})}{A_i k T_i}} - 1 \right) \right) \right) = \sum_{i=1}^n (R_{sh_i} I_{ph_i}) - I \sum_{i=1}^n R_{sh_i} - \sum_{i=1}^n \left(R_{sh_i} I_{rev_i} \left(e^{\frac{q_e(U_i^{SC}+IR_{s_i})}{A_i k T_i}} - 1 \right) \right). \quad (8)$$

Модель (8) представляет собой систему из n трансцендентных уравнений, каждое из которых необходимо решить несколько раз для получения ВАХ каждого СЭ в интересующем диапазоне параметров. Однако если в результате анализа механизма воздействия НФ выяснится, что при рассматриваемых значениях параметра фактора λ_j скачкообразно меняется лишь значение одного из параметров СЭ — R_{sh} , I_{ph} , I_{rev} или несколько параметров меняются одновременно, то модель (8) может быть существенно упрощена. Например, если скачкообразному изменению подвергается лишь величина генерируемого фототока для каждого элемента:

$$\tilde{U}^G(I|\lambda_j) = nR_{sh}(\overline{I_{ph}}(\lambda_j) - I + I_{rev} - I_{rev}\overline{E}(I|\lambda_j)),$$

$$\overline{I_{ph}}(\lambda_j) = \frac{\sum_{i=1}^n I_{ph_i}}{n} \approx I_{ph_1}(\lambda_j)M\left(\frac{\hat{r}_G - 1}{n}\right) + I_{ph_3}(\lambda_j)M\left(\frac{n - \hat{r}_G + 1}{n}\right) = I_{ph_1}(\lambda_j)(1 - F_\lambda^{SC}(\lambda_j)) + I_{ph_3}(\lambda_j)F_\lambda^{SC}(\lambda_j),$$

$$\begin{aligned} \bar{E}(I|\lambda_j) &= \frac{\sum_{i=1}^n e^{\frac{q_e(U_1^{SC} + IR_s)}{AKT}}}{n} \approx e^{\frac{q_e(U_1^{SC} + IR_s)}{AKT}} M\left(\frac{\hat{r}_G - 1}{n}\right) \\ &+ e^{\frac{q_e(U_3^{SC} + IR_s)}{AKT}} M\left(\frac{n - \hat{r}_G + 1}{n}\right) = e^{\frac{q_e(U_1^{SC} + IR_s)}{AKT}} (1 - F_\lambda^{SC}(\lambda_j)) \\ &+ e^{\frac{q_e(U_3^{SC} + IR_s)}{AKT}} F_\lambda^{SC}(\lambda_j), \end{aligned} \quad (9)$$

где I_{ph1} значения фототока, генерируемого СЭ, при отсутствии скачкообразного изменения параметра в результате воздействия НФ; I_{ph3} — значения фототока, генерируемого СЭ, при скачкообразном изменении параметра в результате воздействия НФ; U_1^{SC} , U_3^{SC} напряжение, генерируемое поврежденным СЭ, при протекающем через него ток I , если генерируемый фототок СЭ составляет I_{ph1} или I_{ph3} соответственно; \hat{r}_G — ранг первого элемента группы значений характеристик поврежденных элементарных фрагментов в ряду характеристик всех СЭ, упорядоченном от I_{ph1} к I_{ph3} . Тогда $\hat{r}_G - 1$ соответствует числу элементарных фрагментов соединения, для которых не произошло скачкообразного изменения свойств после воздействия НФ; $F_\lambda^{SC}(\lambda_j)$ — функция распределения критического значения НФ, при котором происходит скачкообразное изменение свойств СЭ.

Параметры СЭ в модели (9) могут быть заменены функциями их математических ожиданий от параметров НФ $h_{I_{ph}}$, $h_{I_{rev}}$, h_{R_s} , $h_{R_{ph}}$, h_A , что позволит сформировать модель деградации последовательного соединения СЭ при различных уровнях воздействия НФ λ_j :

$$\begin{aligned} \bar{U}_G(I|\lambda_j) &= nh_{R_{sh}}(\lambda_j) \left(\bar{I}_{ph}(\lambda_j) - I + h_{I_{rev}}(\lambda_j) (1 - \bar{E}(I|\lambda_j)) \right), \\ \bar{I}_{ph}(\lambda_j) &= h_{I_{ph}}^1(\lambda_j) (1 - F_\lambda^{SC}(\lambda_j)) + h_{I_{ph}}^3(\lambda_j) F_\lambda^{SC}(\lambda_j), \\ \bar{E}(I|\lambda_j) &= e^{\frac{q_e(U_1^{SC} + Ih_{R_s}(\lambda_j))}{h_A(\lambda_j)kT(\lambda_j)}} (1 - F_\lambda^{SC}(\lambda_j)) \\ &+ e^{\frac{q_e(U_3^{SC} + Ih_{R_s}(\lambda_j))}{h_A(\lambda_j)kT(\lambda_j)}} F_\lambda^{SC}(\lambda_j). \end{aligned} \quad (10)$$

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчета ВАХ и ВВХ последовательного соединения 100 СЭ.

Расчеты выполнялись с использованием модели (10). Сравнение полученных оценок с результатами расчетов по точным моделям [9] показывает, что погрешность вычислений укладывается в рамки доверительного интервала по напряжению, соответствующему объему выборки. Аналогично могут быть получены характеристики для случая изменения любого другого параметра.

В случае одновременного скачкообразного изменения нескольких параметров СЭ, являющегося следствием одного физического процесса, происходящего в результате воздействия НФ, оценки значений напряжений точек ВАХ последовательного или параллельного соединения СЭ могут быть получены на основе сложения двух

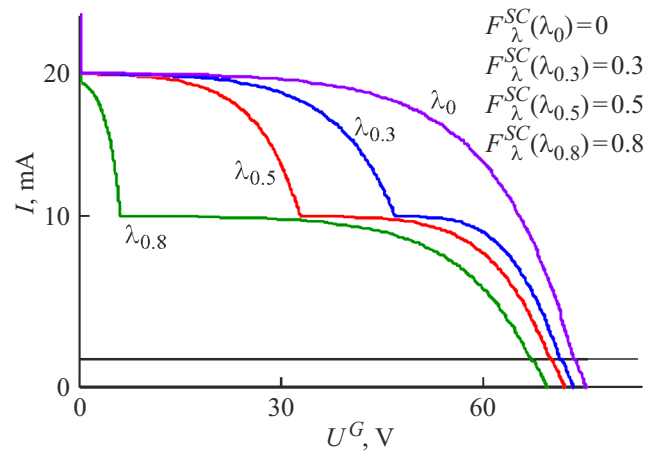


Рис. 2. ВАХ группы последовательно соединенных СЭ при скачкообразном двукратном снижении фототока СЭ с различной вероятностью.

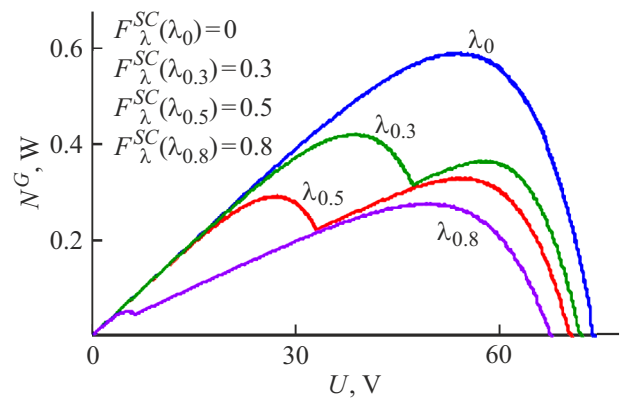


Рис. 3. ВВХ группы последовательно соединенных СЭ при скачкообразном двукратном снижении фототока СЭ с различной вероятностью.

ВАХ для отдельного элемента. Для последовательного соединения СЭ:

$$\bar{U}_G(I|\lambda_j) = n \left(U_1^{SC}(I|\lambda_j) (1 - F_\lambda^{SC}(\lambda_j)) + U_3^{SC}(I|\lambda_j) F_\lambda^{SC}(\lambda_j) \right), \quad (11)$$

где $U_1^{SC}(I|\lambda_j)$ — ВАХ СЭ, не претерпевшего скачкообразного изменения параметров в результате воздействия НФ; $U_3^{SC}(I|\lambda_j)$ — ВАХ СЭ, при скачкообразном изменении параметров преобразователя в результате воздействия НФ.

Для параллельного соединения элементов:

$$\bar{I}^c(U|\lambda_j) = n \left(I_1^{SC}(U|\lambda_j) (1 - F_\lambda^{SC}(\lambda_j)) + I_3^{SC}(U|\lambda_j) F_\lambda^{SC}(\lambda_j) \right), \quad (12)$$

где $I_1^{SC}(U|\lambda_j)$ — ВАХ СЭ, не претерпевшего скачкообразного изменения параметров в результате воздействия НФ; $I_3^{SC}(U|\lambda_j)$ — ВАХ СЭ, при скачкообразном изменении параметров преобразователя в результате воздействия НФ.

ВАХ СЭ представляют собой решение соответствующего типу соединения уравнения (7) с соответствующими наборами функций математических ожиданий параметров СЭ от параметров воздействия.

В случае достаточно большого числа СЭ в составе параллельных и последовательных электрических соединений элементов нижнего уровня при моделировании функционирования СБ допустимо использовать оценки (11), (12). В противном случае, если требуемая точность моделирования не обеспечивается, то построение ВАХ должно выполняться на основе статистического моделирования повреждения элементов соединений нижнего уровня и использования случайных реализаций их ВАХ в моделях (3), (4).

Для генерации числа поврежденных элементов в составе электрического соединения нижнего уровня используется биномиальный закон распределения [11], в котором в качестве вероятности успешного наступления события p используется соответствующее уровню воздействующего фактора значение функции распределения критического значения НФ, при котором происходит скачкообразное изменение свойств СЭ $F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)$:

$$B(k|\lambda_j) = \frac{n!}{(n-k)!k!} F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)^k (1 - F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j))^{n-k}.$$

Все представленные модели СБ построены с расчетом на наличие в схеме соединения СЭ исправных блокирующих и шунтирующих защитных элементов. Потери на современных защитных элементах намного ниже потерь в результате повреждения СЭ и не учитываются в моделях. Такой подход допустим в случаях, когда защитные элементы, обладающие малой площадью и более безопасным размещением, не меняют своих характеристик при воздействии НФ. В противном случае защитные элементы должны быть включены в модель СБ [10].

3. Статистический анализ характеристик поврежденных СБ с использованием упрощенных логико-аналитических моделей

При моделировании поврежденных СБ часто требуется получение лишь одной точки ВАХ. Эта точка может соответствовать максимальной электрической мощности СБ, либо определенному значению напряжения, которое батарея способна отдавать в бортовую сеть КА. В этом случае характеристика СБ может быть определена на основе расчета соответствующих характеристик отдельных СЭ, с учетом схемных потерь, которые возникают из-за различия параметров отдельных СЭ [10]. Например, выражение максимальной мощности СБ может быть записано в следующем виде:

$$N_{\max}^{SB} = k_{CL} \sum_{i=1}^{n_{SB}} N_{\max,i}^{SC}, \quad (13)$$

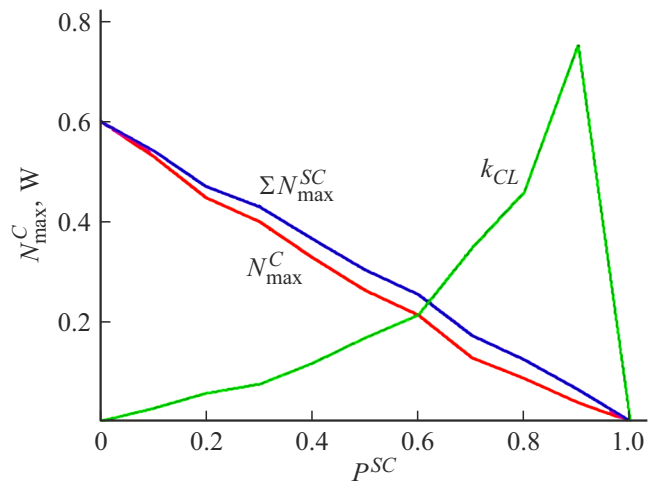


Рис. 4. Зависимость коэффициента схемных потерь от вероятности скачкообразной деградации свойств СЭ при параллельном соединении элементов.

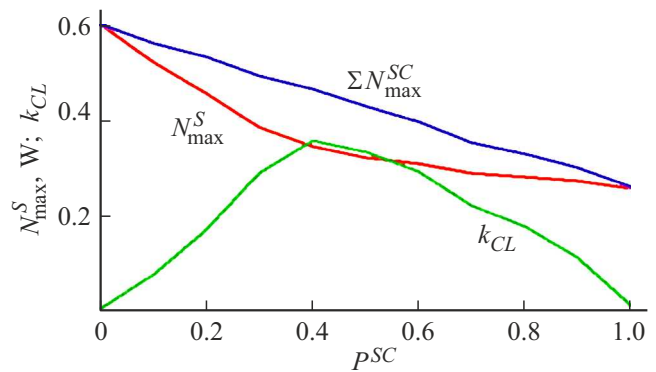


Рис. 5. Зависимость коэффициента схемных потерь от вероятности скачкообразной деградации свойств СЭ при последовательном соединении элементов.

где $N_{\max,i}^{SC}$ — максимальная электрическая мощность, генерируемая i -м СЭ в оптимальной для него точке ВАХ; n_{SB} — количество СЭ в составе СБ; k_{CL} — коэффициент схемных потерь.

Коэффициент схемных потерь уникален для каждой комбинации схемы коммутации СБ и механизма повреждающего действия НФ. На рис. 4 приведен расчет коэффициента схемных потерь для параллельного соединения СЭ, которые в результате воздействия НФ скачкообразно теряют способность к генерации электрической энергии, сохраняя при этом прежние значения остальных своих параметров.

Для сравнения на рис. 5 приведен расчет коэффициента схемных потерь для последовательного соединения СЭ, которые в результате воздействия НФ могут вдвое скачкообразно снизить фототок, сохраняя при этом неизменными значения остальных своих параметров.

В большинстве случаев зависимость коэффициента схемных потерь от вероятности повреждения СЭ имеет

экстремум, наличие которого объясняется тем, что схемные потери проявляются только при наличии разности значений характеристик элементов в батарее, а его положение может меняться в зависимости от соотношения абсолютных величин потерь и мощности батареи.

Очевидно, что коэффициент схемных потерь является функцией вероятности скачкообразного изменения характеристик СЭ P^{SC} , которая в свою очередь зависит от параметров воздействующего НФ $\lambda_{(m)}$. Поскольку при скачкообразном изменении параметров СЭ каждому значению λ_j может быть сопоставлено два значения максимальной мощности СЭ, выражение (13) может быть представлено в более удобном для вычисления виде:

$$\tilde{N}_{\max}^{SB}(\lambda_j) = k_{CL}(F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)) \cdot (N_{\max_1}^{SC}(\lambda_j)(1 - F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)) + N_{\max_3}^{SC}(\lambda_j)F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)),$$

$$N_{\max_i}^{SC}(\lambda_j) = I_i^{SC}(U_{opt_i}^{SC}(\lambda_j)|\lambda_j) \cdot U_{opt_i}^{SC}(\lambda_j), \quad i = 1, 3,$$

где $I_1^{SC}(U|\lambda_j)$ — ВАХ СЭ, не претерпевшего скачкообразного изменения параметров в результате воздействия НФ; $I_3^{SC}(U|\lambda_j)$ — ВАХ СЭ, при скачкообразном изменении параметров преобразователя в результате воздействия НФ; $U_{opt_i}^{SC}(\lambda_j)$ — оптимальное напряжение на выходе СЭ с i -й ВАХ, соответствующее максимальной генерируемой преобразователем электрической мощности.

ВАХ СЭ представляют собой решения уравнения (7) с соответствующими функциями математических ожиданий параметров СЭ. Оптимальное напряжение на выходе СЭ определяется его состоянием и является различным не только для случаев, когда происходит скачкообразное изменение параметров СЭ, но и, в общем случае, для разных значений параметров НФ, приводящих к плавной деградации свойств СЭ.

В свою очередь, коэффициент схемных потерь определяется на основе результатов вычислительного эксперимента:

$$\tilde{k}_{CL}(F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\hat{N}_{\max_i}^{SB}(\lambda_j)}{\sum_{s=1}^{n_{SB}} \hat{N}_{\max_{si}}^{SC}(\lambda_j)}, \quad (14)$$

где m — число выполненных вычислительных экспериментов; $\hat{N}_{\max_i}^{SC}(\lambda_j)$ — случайная реализация максимальной мощности s -го СЭ в i -м опыте; $\hat{N}_{\max_i}^{SB}(\lambda_j)$ — случайная реализация максимальной мощности СБ, вычисленная с использованием математической модели СБ на основе сгенерированных параметров СЭ.

При большом числе СЭ в составе СБ сумма максимальных мощностей отдельных СЭ может быть заменена ее оценкой:

$$\sum_{s=1}^{n_{SB}} \hat{N}_{\max_{si}}^{SC}(\lambda_j) \approx N_{\max_1}^{SC}(\lambda_j)(1 - F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)) + N_{\max_3}^{SC}(\lambda_j)F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j).$$

Выражение (14) в этом случае примет вид

$$\tilde{k}_{CL}(F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)) = \frac{\sum_{i=1}^m \hat{N}_{\max_i}^{SB}(\lambda_j)}{m(N_{\max_1}^{SC}(\lambda_j)(1 - F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)) + N_{\max_3}^{SC}(\lambda_j)F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j))}.$$

При этом необходимое число вычислительных экспериментов для каждого значения λ_j рассчитывается исходя из требуемой точности получения оценки математического ожидания коэффициента [10]:

$$m \geq \left(\frac{\tilde{\sigma}_{k_{CL}}(F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j))}{\varepsilon_M} t_{\beta, m-1} \right)^2,$$

$$\tilde{\sigma}_{k_{CL}}^2(F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)) = \frac{\sum_{i=1}^m \left(k_{CL_i}(F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)) - \frac{\sum_{s=1}^m k_{CL_s}(F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j))}{m} \right)^2}{m-1},$$

$$k_{CL_i}(F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)) = \frac{\hat{N}_{\max_i}^{SB}(\lambda_j)}{N_{\max_1}^{SC}(\lambda_j)(1 - F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)) + N_{\max_3}^{SC}(\lambda_j)F_{\lambda}^{SC}(\lambda_j)}.$$

Представленный способ определения характеристик СБ с использованием коэффициента схемных потерь является, по сути, единственным путем использования результатов экспериментальных исследований стойкости СЭ к воздействию неблагоприятных факторов, выполненных ранее без выделения участка скачкообразного изменения свойств СЭ и соответствующей статистической обработки полученных результатов. Для использования этих результатов достаточно провести единичные экспериментально-теоретические исследования с целью определения механизмов деградации СЭ и необходимое число численных экспериментов на моделях интересующих СБ для определения коэффициента схемных потерь.

Заключение

Из множества возможных ситуаций воздействия НФ на СБ КА рассмотрены случаи, в которых возможно использование упрощенной логико-аналитической модели СБ, позволяющей существенно снизить трудоемкость статистического моделирования процессов функционирования КА в условиях воздействия факторов космического пространства:

— когда скачкообразное изменение отдельных параметров СЭ обусловлено одними и теми же физическими процессами, протекающими при воздействии НФ, допустимо считать, что скачкообразное изменение всех параметров, каждое из которых является случайным событием, происходит одновременно. Тогда каждому СЭ, входящему в состав СБ, будет соответствовать одна из двух возможных ВАХ, а процесс моделирования функционирования СБ сведется к их сложению в соответствии с представленными в работе моделями соединений;

— когда для моделирования функционирования системы электроснабжения КА достаточно одной характерной точки ВАХ СБ, для статистического моделирования функционирования КА может быть использована упрощенная модель с предложенным коэффициентом схемных потерь, позволяющая рассчитать параметры характерной точки ВАХ СБ по характерным точкам ВАХ СЭ. Предложенный подход в частности может быть применен для использования результатов выполненных ранее экспериментальных исследований воздействия на СЭ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Г. Раушенбах. *Справочник по проектированию солнечных батарей* (Энергоатомиздат, М., 1983)
- [2] Я.Н. Мигунов, В.В. Онуфриев. *Космическая техника и технологии*, **4** (27), 56 (2019).
DOI: 10.33950/spacetech-2308-7625-2019-4-56-64
- [3] А.В. Юрченко, А.В. Волгин, А.В. Козлов. *Известия Томского политех. ун-та*, **314** (4), 142 (2009).
- [4] В.В. Сазонов. *Математическое моделирование*, **33** (9), 87 (2001).
- [5] Е.В. Слыщенко, А.А. Наумова, А.А. Лебедев, М.А. Генали, Н.Т. Вагапова, Б.В. Жалнин. *Сибирский журнал науки и технологий*, **19** (2), 308 (2018).
- [6] В.А. Летин. *Модель космоса*, **2** (8), 568 (2007).
- [7] Н.М. Бордина, В.А. Летин. *Электротехн. промышленность. Сер. 22, Хим. и физ. источники тока. Обзор информ.*, **1** (7), 1 (1986).
- [8] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. *Солнечные элементы: Теория и эксперимент* (Энергоатомиздат, М., 1987)
- [9] L.E. Herbert. *Physica E*, **5**, 215 (2000).
- [10] А.А. Абдурахимов, А.В. Левандович. *Вестник НПО /им. С.А. Лавочкина*, **2**, 90 (2019).
DOI: 10.26162 LS.2019.44.2.010
- [11] Р.М. Юсупов (ред.). *Статистические методы обработки результатов наблюдений. Учебник для вузов* (МО СССР, М., 1984)