

УДК 629.786.2:001.891.55

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ СВЕТОВОГО ПОТОКА ОТ ЗЕМЛИ

Д.Н. Рулев

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва
Россия, 141070, Королёв Московской области, Ленина ул., 4А
E-mail: dmitry.rulev@rsce.ru

А.И. Спирин

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва
Россия, 141070, Королёв Московской области, Ленина ул., 4А
E-mail: alexander.i.spirin@rsce.ru

Ключевые слова: система электропитания, орбитальный космический аппарат, оценка эффективности солнечных батарей, режим ориентации солнечных батарей.

Аннотация: Наряду с обеспечением непосредственного функционирования системы электропитания (СЭП) космического аппарата (КА) в полете, при управлении СЭП орбитального КА решаются задачи прогнозирования/расчета величины тока, генерируемого солнечными батареями (СБ) КА и оценки/контроля их текущей эффективности, при этом точность решения указанных задач непосредственно влияет на процесс управления полетом и возможности целевого использования КА. В рамках технологии учёта светового потока от Земли при управлении СЭП орбитального КА разработаны расчетные схемы прогнозирования прихода электроэнергии и оценки текущей эффективности СБ и даны рекомендации по режимам управления СЭП КА с учетом возможностей генерации электроэнергии под воздействием уходящего от Земли излучения. Для определения эффективности СБ выполняем специальные сеансы ориентации лицевой и тыльной поверхности СБ на Солнце для необходимого числа комбинаций указанных поверхностей разных СБ при наличии со спутников ДЗЗ измерений яркости всей видимой с КА освещенной подстилающей поверхности. Для максимально точного определения искомых параметров – характеристик эффективности лицевой и тыльной поверхностей СБ – при решении задачи минимизации расхождения расчетного тока СБ от ТМИ массивы данных каждой уникальной комбинации режимов ориентации СБкратно повторяем расчетное число раз так, чтобы отличие суммарного количества моментов/точек ТМИ тока СБ различных комбинаций различались не более чем на задаваемую величину. Методология апробирована при управлении СЭП служебного модуля российского сегмента Международной космической станции.

1. Введение

Наряду с реализацией непосредственного функционирования системы электропитания (СЭП) орбитального космического аппарата (КА) в полете, важнейшими задачами, решаемыми при управлении СЭП КА, являются прогнозирование/расчет величины тока, генерируемого солнечными батареями (СБ)

КА и оценка/контроль их текущей эффективности, при этом точность решения указанных задач непосредственно влияет на процесс управления полетом и возможности целевого использования КА. В начальный период полета сила тока СБ в модели энергоданса принимается равной паспортной, замеренной на Земле в процессе предполетной подготовки КА. Далее эффективность СБ снижается вследствие естественной деградации фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и воздействия факторов космоса. Основными факторами, которые необходимо учитывать при расчете генерации тока СБ, являются: затенение СБ элементами КА, переменная удаленность Земли от Солнца, световой поток от Земли, ток за счет освещения тыла ФЭП, точность управления ориентацией СБ [1,2].

2. Расчетные схемы

С учетом основных факторов, обуславливающих переменность тока от СБ орбитального КА, для оценки эффективности СБ используем параметр $EF(B_{const})$, определяемый как ток, который генерируют СБ за счет освещения лицевой поверхности СБ солнечным излучением эталонной яркости B_{const} под прямым углом к плоскости поверхности СБ. В качестве B_{const} используем значение солнечной постоянной 1360.8 Вт/м^2 [2]. Ток СБ рассчитываем как сумму составляющих, генерируемых за счет освещения лицевой и тыльной сторон СБ Солнцем и излучением, уходящим от Земли [3]

$$I = \frac{B_{тек}}{B_{const}} \left\{ \sum_j K_j [P_j \cos \alpha_j + K_T P_j^* \cos(\pi - \alpha_j)] \right\} + \frac{B_{тек}}{B_{const}} \left\{ \sum_{j,k} K_j \frac{\theta_k d_k \sinh_k}{\pi} [P_{jk} \cos \alpha_{jk} + K_T P_{jk}^* \cos(\pi - \alpha_{jk})] \right\},$$

где $B_{тек}$, B_{const} – текущее и эталонное значения интенсивности солнечного излучения на орбите КА; K_j – коэффициент генерации тока от освещения лицевой поверхности j -го элемента ФЭП СБ; K_T – коэффициент эффективности тыльной поверхности ФЭП относительно лицевой поверхности ФЭП СБ; P_j , P_j^* – освещенная Солнцем площадь лицевой и тыльной поверхностей j -го элемента ФЭП СБ; α_j – угол между направлением на Солнце и нормалью к лицевой поверхности j -го элемента ФЭП СБ; θ_k – телесный угол, под которым k -ая ячейка Земли видна с КА; h_k – угол высоты Солнца в k -ой ячейке Земли; P_{jk} , P_{jk}^* – освещенная излучением от k -ой ячейки Земли площадь лицевой и тыльной поверхностей j -го элемента ФЭП СБ; α_{jk} – угол между направлением от КА на k -ую ячейку Земли и нормалью к лицевой поверхности j -го элемента ФЭП СБ; d_k – коэффициент диффузного отражения k -ой ячейки Земли – значение двулучевой функции отражения BRDF. Значения d_k получаем по калиброванным данным видимых каналов спектра аппаратуры спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – используем данные с геостационарных спутников *Meteosat* и *Электро-Л*, а при их отсутствии альbedo ячеек Земли принимаем равным среднему альbedo Земли 0.29 [3].

Коэффициенты генерации тока находим из условия минимизации отличия расчетного тока СБ от данных телеметрической информации (ТМИ)

$$\|F(x)\|^2 = \sum_{i=1}^n (I_i^{TMI} - I_i(x))^2 \rightarrow \min,$$

где I_i^{TMI} – измеренное значение тока СБ на момент t_i ; $I_i(x)$ – модельное значение тока

СБ под воздействием прямого солнечного и уходящего от Земли излучений на момент t_i , \mathbf{x} – вектор определяемых параметров. Задачу решаем с использованием итерационного метода Ньютона-Гаусса [4].

Для реализации данной расчетной схемы сбор ТМИ тока СБ необходимо выполнять на интервале наличия со спутников ДЗЗ калиброванных измерений яркости всей видимой с КА освещенной подстилающей поверхности. Для обеспечения определения эффективности тыльной поверхности СБ дополнительно выполняем режим ориентации тыльной поверхности СБ на Солнце. Для обеспечения определения эффективности отдельных СБ по ТМИ суммарного тока СБ режимы ориентации лицевой и тыльной поверхности СБ на Солнце выполняем для необходимого числа различных комбинаций лицевой и тыльной поверхностей разных СБ [5] по методике:

- на одном временном отрезке при полной освещенности СБ Солнцем выполняется штатная ориентация лицевой поверхностью СБ на Солнце;
- на другом временном отрезке при полной освещенности СБ Солнцем выполняется разворот тыльной поверхностью СБ на Солнце;
- на других $2n-2$ временных отрезках ($n \geq 2$ – количество СБ) выполняется разворот менее n СБ тыльной поверхностью на Солнце при условии, что для каждой СБ не менее чем на одном временном отрезке к Солнцу обращена лицевая сторона СБ и не менее чем на одном временном отрезке к Солнцу обращена тыльная сторона СБ.

Для максимально точного определения искомым параметров – характеристик эффективности лицевой и тыльной поверхностей СБ – при решении оптимизационной задачи массивы данных каждой уникальной комбинации режимов ориентации СБ кратно повторяем расчетное число раз так, чтобы отличие суммарного количества моментов/точек ТМИ тока СБ различных комбинаций режимов ориентации СБ различались не более чем на задаваемую величину.

При прогнозировании тока СБ используем следующие модели учета альbedo Земли:

- А (учет альbedo Земли путем завышения коэффициентов генерации тока) – расчет тока СБ только с учетом освещения СБ прямым излучением Солнца с применением значений коэффициентов генерации тока, завышенных относительно их точных фактических значений и определяемых из условия получения расчетных значений тока по модели А максимально близких к значениям тока по модели В;
- В (учет среднего альbedo Земли) – применяются характеристики среднего альbedo Земли ко всем ячейкам поверхности Земли;
- С (учет альbedo ячеек Земли) – к ячейкам поверхности Земли применяются индивидуальные характеристики альbedo;
- D (альbedo Земли=0) – расчет тока СБ только от излучения Солнца с применением фактических значений коэффициентов генерации тока моделей В, С.

Модели В и С обеспечивают высокоточный прогноз прихода электроэнергии с точным моделированием потоков уходящего от Земли излучения. Модели А и D обеспечивают прогноз прихода электроэнергии без моделирования потоков уходящего от Земли излучения с получаемыми интегральными значениями прихода электроэнергии за виток, точность которых достаточна для штатного обеспечения полета КА (модель А дает ожидаемый приход электроэнергии, модель D дает гарантированный максимум, не превышающий фактический приход).

Коэффициенты генерации тока для модели А \mathbf{x}^A определяются из условия минимизации отличия расчетных токов СБ, полученных по моделям А и В

$$\|F(\mathbf{x}^A)\|^2 = \sum_{i=1}^n \left(I_i^A(\mathbf{x}^A) - I_i^B(\mathbf{x}^B) \right)^2 \rightarrow \min,$$

где $I_i^A(\mathbf{x}^A)$, $I_i^B(\mathbf{x}^B)$ – значения тока СБ по моделям А и В; \mathbf{x}^B – используемые в модели

В фактические значения коэффициентов генерации тока от освещения лицевой и тыльной поверхностей СБ.

3. Апробация

На рис. 1 представлены результаты анализа данных замеров тока СБ служебного модуля (СМ) российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС) в сеансах оценки эффективности СБ СМ за весь период эксплуатации МКС и полученные по результатам выполненного в 2010-2020 гг. на РС МКС космического эксперимента «Альбедо» значения параметра $EF(B_{const})$ оценки эффективности СБ СМ [2,4].

На рис. 1 также показан график значений $cp.EF(B_{const})$ – среднее оценочное значение параметра эффективности СБ СМ, расчет которого осуществляется в рамках экспресс-обработки сеанса оценки эффективности СБ (предваряет расчет точных значений параметра $EF(B_{const})$):

$$cp.EF(B_{const}) = \frac{[\min \text{Ток}(B_{const}) + \max \text{Ток}(B_{const})]}{2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{K_z}{100} \%\right)}{\cos \theta_s},$$

где K_z (%) – средняя величина в суммарном токе СБ СМ, измеренном в сеансе оценки эффективности СБ составляющей тока, которая генерируется за счет освещения тыльной поверхности СБ уходящим от Земли излучением, соответствующим среднему альбедо Земли, с применением паспортного значения коэффициента относительной эффективности тыльной поверхности СБ; Q_s – среднее отклонение солнечного потока от нормали к лицевой поверхности СБ в сеансе оценки эффективности СБ.

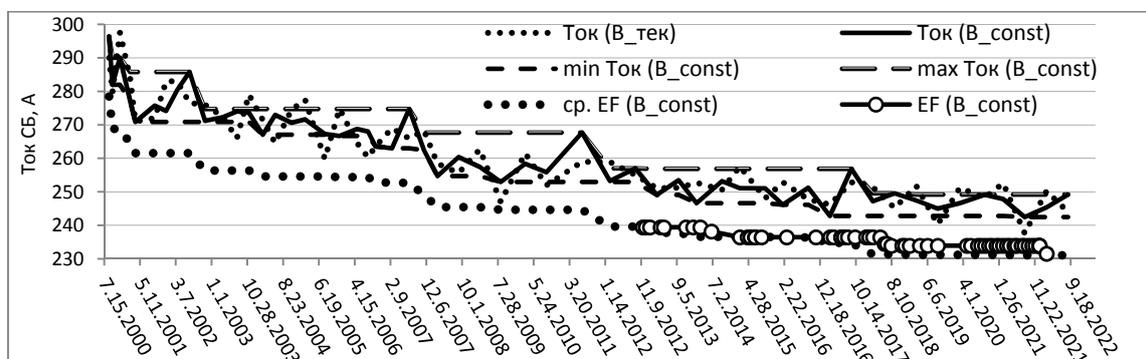


Рис. 1. Результаты анализа замеров тока СБ в сеансах оценки эффективности СБ СМ РС МКС: Ток ($B_{тек}$) – данные замера тока СБ (соответствуют текущей яркости Солнца $B_{тек}$); Ток (B_{const}) – ток СБ, пересчитанный к условию освещения СБ световым потоком эталонной яркости B_{const} ; min/max Ток (B_{const}) – нижняя и верхняя границы значений Ток (B_{const}) от начала полета до текущего момента.

На рис. 2 представлены данные ТМИ и расчетного тока СБ СМ при штатной ориентации СБ на Солнце и режиме специальной ориентации СБ на Землю. Точная модель – Модель С – реализуется на интервале наличия измерений яркости видимой с МКС освещенной подстилающей поверхности со спутников *Meteosat*.

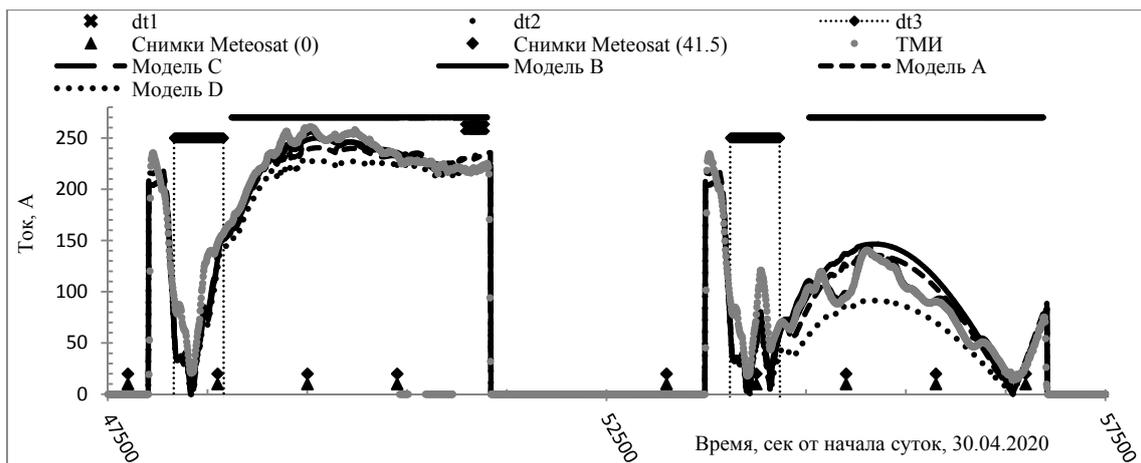


Рис. 2. Графики расчетного тока СБ СМ и данные ТМИ: Модель А, В, С, D и ТМИ – ток СБ по моделям А, В, С, D и данные ТМИ; Снимки *Meteosat* – моменты снимков со спутников *Meteosat* (0 и 41.5° в.д.); dt1 – интервал, когда составляющая тока от освещения СБ уходящим от Земли излучением менее 0.5% тока СБ (1.1 А); dt2 – интервал наличия измерений со спутников *Meteosat*; dt3 – интервалы существенного затенения СБ СМ элементами конструкции американского сегмента МКС.

Анализ зависимости точности моделей С и В от шага разбиения поверхности Земли на ячейки показал, что в штатном полете достаточная точность (среднеквадратическое отклонение $СКО \leq 0.1$ А, $max|\Delta I| \leq 0.5$ А) достигается при шаге $\leq 3^\circ$ для модели В и $\leq 2^\circ$ для модели С. При отворотах СБ от Солнца указанная точность достигается с шагом $\leq 2^\circ$ для модели В и с шагом 1° для модели С. Анализ зависимости точности модели С от состава данных и варианта совместного использования данных по каждой ячейке подстилающей поверхности с 2-х спутников *Meteosat*, *Электро-Л* показал, что наименьшее СКО расчетного тока СБ от ТМИ дает использование осредненных данных видимых каналов аппаратуры спутника и осредненных данных с 2-х спутников.

4. Заключение

В рамках технологии учёта светового потока от Земли при управлении СЭП орбитального КА разработаны расчетные схемы прогнозирования прихода электроэнергии от СБ КА и оценки их текущей эффективности, в том числе разработаны рекомендации по режимам управления СЭП КА с учетом возможностей генерации электроэнергии под воздействием уходящего от Земли излучения.

Расчетные схемы позволяют выполнять как высокоточный расчет прихода электроэнергии от СБ КА с точным моделированием потоков уходящего от Земли излучения, так и расчет прихода электроэнергии без моделирования светового потока от Земли с получаемыми интегральными значениями прихода электроэнергии за виток, точность которых достаточна для штатного обеспечения полета. При апробации данной методологии на РС МКС получены обоснованные значения сформулированного параметра оценки эффективности СБ СМ. Использование данной методологии позволит в дальнейшем максимально точно контролировать эффективность СБ модулей РС МКС.

Методология применима для КА на околоземной и окололунной орбитах.

Список литературы

1. Любинский В.Е., Соловьёв В.А. Управление полетом МКС: развитие методов и средств управления орбитальными комплексами // Полет. 2005. № 6. С. 3-6.
2. Rulev D.N., Spirin A.I. Evolution of the performance monitoring techniques for solar arrays of the service module Zvezda within the ISS Russian segment over the course of its orbital flight // Acta Astronautica. 2022. Vol. 198. P. 680-688, ISSN 0094-5765, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.06.036>.
3. Рулев Д.Н. Учет уходящего от Земли излучения в модели системы электропитания российского сегмента Международной космической станции // Известия РАН. Энергетика. 2021. № 4. С. 90-102.
4. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация / Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 509 с.
5. Спиринов А.И., Рулев Д.Н. Способ оценки эффективности солнечных батарей системы электропитания аппарата, преимущественно космического // Патент на изобретение РФ № 2784977. Бюл. № 34 от 01.12.2022.