

УДК 629.7.064.56

В.А. Шабохин, И.Т. Перекопский

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ

Энерговооруженность космического аппарата (КА) является одной из его основных характеристик и обеспечивается выбором оптимальных размеров и схемы расположения солнечных батарей (СБ) на базовой платформе КА.

Схемам размещения солнечных батарей на ориентированных на Землю космических аппаратах посвящено ряд работ [1, 2, 3, 4 и др.].

На этих КА целесообразно применение неподвижных панелей СБ, так как в этом случае не требуется разработка аппаратуры управления ориентацией, систем токосъема с подвижной СБ, компенсация кинетических моментов, а, следовательно, требует меньшего энергопотребления; неподвижные СБ повышают вероятность получения гарантированной мощности системы энергоснабжения (СЭС) и выполнения целевой задачи. Указанные особенности неподвижной СБ имеют преимущества и целесообразны, если выбранная форма СБ обеспечивает съем необходимой мощности для обеспечения работы систем КА с учетом выполнения существующих ограничений по площади и размещению панелей СБ.

Результаты исследований показывают, что наилучшие показатели по сравниваемому параметру имеют формы СБ, выполненные в виде конуса, основанием обращенного к центру Земли с углом полу-раствора около 45° .

С целью уменьшения аэродинамических возмущений целесообразно этот конус совместить с цилиндрической частью КА таким образом, чтобы их центры масс и центры давления были наиболее близки друг к другу.

Но боковые поверхности КА используются для размещения бортовой и специальной, например, научной аппаратуры. Поэтому есть необходимость иметь разрезы в конусе. Это приводит к форме КА, приведенной на рис. 1. Величина зазора А и зоны Б

© Шабохин В.А., Перекопский И.Т., 2009

определяются необходимостью размещения под СБ аппаратуры и ограничена габаритами головного обтекателя ракеты-носителя при размещении панелей СБ вдоль зоны Б (на активном участке).

На основании изложенного пространственную ферму, на которой расположены панели СБ, целесообразно выполнить в виде сопряженных между собой усеченных пирамид, основания которых перпендикулярны продольной оси корпуса КА, а вершины направлены в сторону, противоположную направлению на Землю (рис. 2). Частным случаем такой конструктивной схемы могут быть сопряженные панели СБ, выполненные в виде прямоугольников.

Целью настоящей статьи является исследование возможностей более полного использования энергетических характеристик солнечных батарей для предложенной компоновки путем определения оптимальных углов установки панелей СБ на КА.

Критерием эффективности схемы расположения СБ может быть использован среднеинтегральный коэффициент K_c при прочих одинаковых характеристиках солнечной батареи (площадь панелей СБ, коэффициент заполнения СБ фотопреобразователями, одинаковый КПД элементов и др.)

Среднеинтегральный коэффициент K_c может быть определен выражением [5]:

$$K_c = \frac{\int \int_{TF} \cos \gamma(t) dF \cdot dt}{T \cdot F} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \int \cos \gamma dt,$$

где $\Delta \tau_i$ - интервалы времени на освещенном участке орбиты, для которых:

$\gamma(t)$ - текущая характеристика освещенности;

γ - угол падения солнечного потока на элемент поверхности, т.е. угол между направлением на Солнце \bar{S}_0 и нормалью \bar{n} к поверхности панели СБ;

T - период обращения;

F - поверхность, покрытия фотопреобразователями.

С другой стороны $\cos \gamma = f(\beta, \nu)$, где

β - угол между проекцией \bar{S}_0 на плоскость орбиты и радиусом-вектором орбиты (рис. 1);

ν - угол между вектором \bar{S}_0 и нормалью к плоскости орбиты.

Необходимо подчеркнуть, что для подавляющего большинства КА, используемых на околоземных орбитах, диапазон изменения угла ν составляет $0...180^\circ$.

Введем также угол Θ - угол между нормалью к поверхности СБ и радиусом-вектором орбиты и угол φ - угол между проекцией нормали к поверхности панели СБ на плоскость, нормальную к радиусу-вектору и направлением полета КА (для верхней панели Θ_v , и для нижней панели - Θ_n на рис.2).

Положение нормали к рабочей поверхности СБ в орбитальной системе координат (ОСК) может быть неуправляемым (неориентированная СБ), и управляемым (ориентируемая СБ). В последнем случае ориентация может осуществляться поворотом вокруг любой одной или двух осей ОСК.

Зависимость $K_c(\nu)$ для приведенной на рис. 2 схемы, при различных углах $\Theta_v = \Theta_n = \Theta$, показана на рис. 3, а на рис. 4 - график функции

$$f(\Theta) = \min K_c(\gamma, \Theta)$$

Расчеты показали, что значения Θ_{ont} для формы СБ, приведенной на рис. 2, довольно устойчивы к изменению высоты полета и остаются почти постоянными по крайней мере в диапазоне $H=500-2000$ км.

Значение $\cos \gamma$ определялось из выражения [6]:

$$\cos \gamma = \sin \Theta \cos \varphi \sin \nu \sin \beta + \sin \Theta \sin \varphi \cos \nu + \cos \Theta \sin \nu \cos \beta, \quad (2)$$

Из (2) следует, что при $\Theta = \text{const}$ и $\varphi = \text{const}$, K_c зависит только от продолжительности теневого участка орбиты и от положения плоскости орбиты относительно Солнца, то есть от высоты и угла ν .

Следовательно, задача сводится к определению оптимальных значений Θ_i и φ_i панелей СБ для выбранных высоты полета и наклона орбиты.

Рассмотрим вопрос оптимизации углов установки панелей СБ относительно его корпуса для повышения энерговооруженности КА в случае различающихся углов установки отдельных панелей и возможности поворота СБ (либо КА) вокруг радиуса-вектора как без привязки к конкретной конструкции КА, так и с точки зрения возможности практической реализации с использованием конструкции СБ, приведенной на рис. 2.

Выбор оптимальных вариантов осуществлялся по максимальному абсолютному значению минимально возможной величины среднеинтегрального коэффициента $\xi_{ЭВ}$ далее именуемым коэффициентом энерговооруженности. Оптимальным принимается такое сочетание φ и Θ , которое обеспечивает максимум наименьшего значения K_c во всем диапазоне ν , т.е. удовлетворяет условию

$$\max_{\varphi, \Theta} \min_{\nu} K_c(\varphi, \Theta, \nu).$$

При равенстве коэффициентов энерговооруженности нескольких схем установки панелей СБ, сравнение производим по величине суммарной за время эксплуатации энергетической эффективности СЭС – $S_{э}$, характеризуемой интегралом

$$S_{э} = \int_T K_c(\nu(t)) dt$$

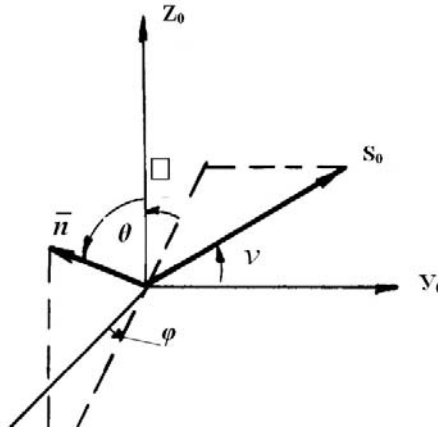


Рисунок 1

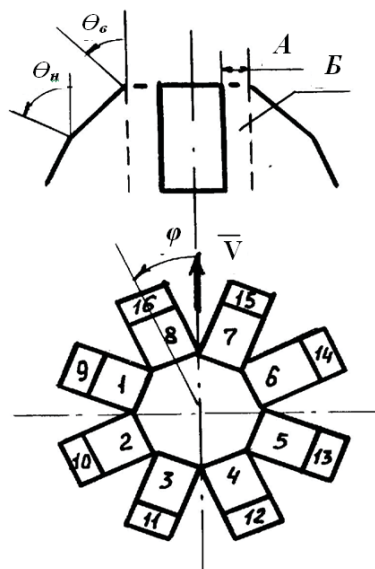


Рисунок 2

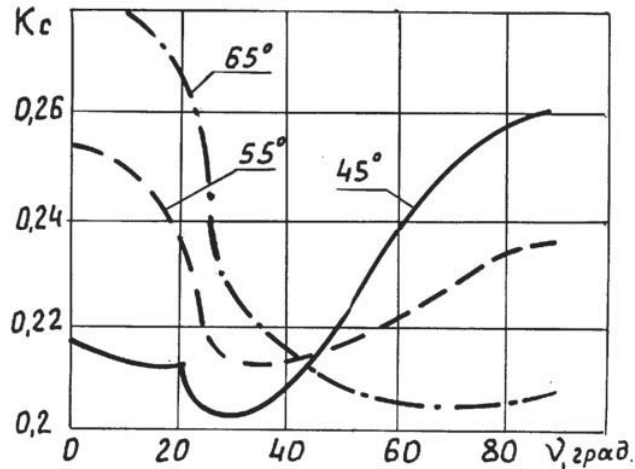


Рисунок 3 - Значения коэффициента интегральной освещенности для значений $\Theta_i = 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ$

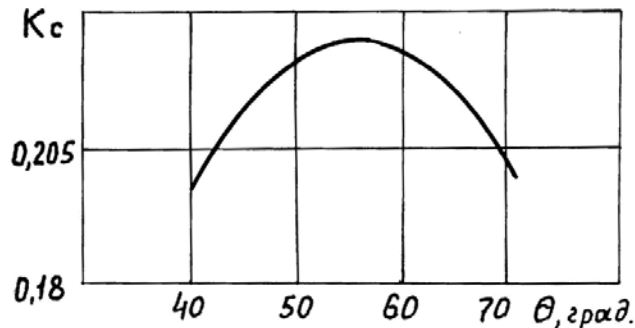


Рисунок 4 - Зависимость минимального значения коэффициента интегральной освещенности от угла установки панелей СБ относительно корпуса КА

Более предпочтительной принимается схема установки панелей СБ, имеющая большую величину S_{Σ} .

Как видно из рис. 3, КА, ориентированный на Землю с неподвижными относительно его корпуса солнечными батареями, имеет нелинейную зависимость энергетической эффективности от освещенности орбиты, определяемой углом между нормалью к плоскости орбиты и направлением на Солнце.

Найдем оптимальные значения угла Θ для следующих случаев:

1 КА не имеет возможности поворота СБ (либо вращения КА);

а) вариация углов Θ лобовых панелей $\Theta_{\text{лоб}}$ (рис. 2, панели № 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 16) при фиксированных углах боковых панелей

(рис. 2, панели № 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14) – несимметричная схема установки СБ.

б) вариация углов одновременно всех нижних панелей Θ_n , при фиксированных углах Θ_v верхних панелей.

2 При возможности поворота СБ (КА) на 90° вокруг вертикальной оси вращения – вариации углов Θ_v при фиксированных углах $\Theta_{\text{лоб}}$.

Решения получены при следующих основных упрощающих допущениях:

- энергетическая эффективность СЭС прямо пропорциональна усредненному за виток суммарному коэффициенту освещенности всех панелей СБ. Указанное допущение позволяет не учитывать внутренних характеристик СЭС различных типов КА;

- в течение одного периода обращения КА положение плоскости орбиты относительно Солнца фиксировано;

- тень Земли принимается в форме кругового цилиндра с диаметром, равным среднему диаметру Земли;

- расчеты проведены для круговой орбиты в диапазоне высот 500-2000 км.

Кроме того, принято, что:

- площадь всех панелей СБ одинакова;

- СБ симметрична относительно плоскости орбиты и углы установки панелей одинаковые с шагом $22,5^\circ$.

Результаты расчетов подтверждают вывод о том, что оптимальное значение $\Theta = 55^\circ$ обеспечивает максимальное значение $\xi_{\text{эв}} = 0,215$ (рис. 3, рис. 4, рис. 5, кривая 2).

При вариации углов установки в соответствии с вариантом 1а получено, что оптимальное значение угла Θ лобовых панелей составляет $\Theta_{\text{лоб}} = 30^\circ$, а боковых панелей $\Theta_{\text{бок}} = 65^\circ$ при этом реализуется коэффициент энерговооруженности $\xi_{\text{эв}} = 0,222$ (рис. 5, кривая 3) $S_{\text{э}} = 408$ ед, что соответствует повышению энерговооруженности КА на 10% по сравнению с существующими схемами установки панелей СБ.

Расчеты для варианта 1б при вариации углов Θ_n нижних панелей и фиксированных углов Θ_v верхних панелей ($\Theta_n > \Theta_v$ из условия незатенения) показали, что подобные вариации углов не

позволяют увеличить коэффициент энерговооруженности $\zeta_{эв}$ больше 0,215, имеющего место при $\Theta_{в} = 50^\circ$ и $\Theta_{н} = 60^\circ$.

При возможности обеспечения поворота панелей СБ (или поворота КА) на 90° в случае 2, из графика рис. 5 следует, что при подобных маневрах может быть увеличена только суммарная за время эксплуатации энергетическая эффективность СЭС – $S_{э}$ (кривая 4 рис. 5), которая получается, если первоначально панели СБ были установлены при $\Theta_{лб} = 30^\circ$, $\Theta_{бок} = 65^\circ$ (кривая 3, рис. 5), а затем при значении $\nu \geq 60^\circ$ произведен поворот СБ (КА) на 90° .

Коэффициент энерговооруженности в этом случае составляет $\xi_{эв} = 0,222$ при значении $S_{э} = 430$ ед, что соответствует увеличению суммарной энергетической эффективности СЭС на $\sim 5,5\%$.

КА с рассмотренными схемами расположения СБ обладают улучшенными функциональными свойствами благодаря увеличению полезной поверхности для размещения аппаратуры и повышению энерговооруженности вследствие более благоприятного расположения панелей СБ относительно солнечного потока при движении КА по орбите с переменной освещенностью, обеспечивая простоту конструкции, отсутствие динамических возмущений от СБ на КА и постоянство сечения миделя в полете.

Таким образом, показана принципиальная возможность повышения энерговооруженности КА путем оптимизации углов установки панелей СБ [7]:

1. Для КА, не имеющих возможности маневра вокруг вертикальной оси, оптимальными углами установки для рассмотренных случаев являются: $\Theta_{бок} = 65^\circ$ для боковых панелей, $\Theta_{лб} = 30^\circ$ для лобовых панелей. Энерговооруженность КА в этом случае повышается на 10% по сравнению с энерговооруженностью КА с симметричной схемой установки панелей СБ.

2. Для КА, имеющих возможность маневра на 90° вокруг вертикальной оси, оптимальными углами являются: для боковых панелей $\Theta_{бок} = 65^\circ$, для лобовых панелей $\Theta_{лб} = 30^\circ$ в сочетании с маневром на 90° при входе в диапазон углов $60^\circ \leq \nu \leq 120^\circ$. Энерговооруженность КА в этом случае соответствует приведенной выше (в пункте 1) при увеличении суммарной за время эксплуатации энергетической эффективности СЭС на $\sim 5,5\%$.

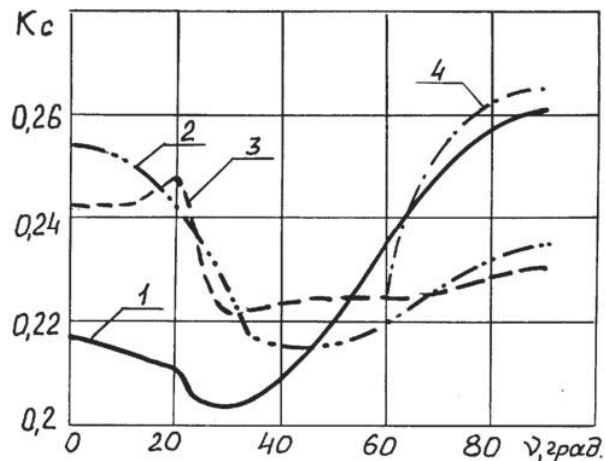


Рисунок 5 - Значение коэффициента интегральной освещенности при различных положениях панелей СБ 1. $\Theta_i=45^\circ$; 2. $\Theta_i=55^\circ$; 3. $\Theta_{\text{лоб.}}=30^\circ$, $\Theta_{\text{бок.}}=65^\circ$; 4. $\Theta_{\text{лоб.}}=30^\circ$, $\Theta_{\text{бок.}}=65^\circ$; при $v=60^\circ$ производится поворот на 90°

Маневр КА может быть заменен на соответствующий разворот панелей на КА, неподвижном в орбитальной системе координат.

Исследования по повышению энерговооруженности КА, по нашему мнению целесообразно продолжить. Одним из направлений может быть создание конструкций с асимметричным расположением панелей СБ, в которых панели солнечных батарей могут быть установлены асимметрично относительно базовой плоскости, проходящей через продольную и одну из поперечных осей, при этом панели, расположенные по одну сторону от указанной плоскости, установлены под разными углами. Ассиметричное расположение панелей БС особенно эффективно для КА, эксплуатируемых на солнечно-синхронных орбитах, для которых диапазон изменения угла между нормалью к орбите и направлением на Солнце существенно меньше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронков О.Г., Чернышенко В.М. Выбор наилучшего расположения солнечных батарей неориентируемых СБ на ИСЗ//Космич. исслед. – 1974, т. 12, № 6.
2. Михалевич В.С., Ржевский С.В., Токарев Г.Н., Юн Г.Н. Определение оптимальных углов установки панелей СБ невыпуклой формы: Изв. ВУЗ, Авиац. Техника. – 1977, № 3.

3. Ржевский С.В., Токарев О.Н., Шор Н.З., Юн Г.Н. Об одной задаче оптимизации углов установки панелей СБ выпуклой формы// Уч. зап. центр. аэрогидродинамического ин-та. – 1977, т. 8, № 3.
4. Белов Д.Г., Гладилин В.С., Медведников С.В., Перекопский И.Т. Прогноз энергетических возможностей системы энергоснабжения// Справочно-информац. бюллетень ОФАП СПР. – 1985, вып. 31.
5. Латайко П.А. Текущая интегральная освещенность поверхности спутника, ориентированного на Землю// Космич. исслед. – 1969. – т. 7, № 3. – с. 450-455.
6. Хок У, Элрод Б. Рабочая характеристика солнечных батарей в функции орбитальных параметров и ориентации КА. Труды Америк. Об-ва инж-ров (русск. пер.). – 1969. – т. 91, сер В, № 1, с. 11-20.
7. Космический аппарат. А.с. 232009 СССР. Д.Г. Белов, С.С. Кавелин, И.Т. Перекопский, В.А. Шабохин. - № 3103607. Заявлено 26.12.84. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений 03.02.86.

Получено 14.02.2009г.