

УДК 629.78

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА РАСКРЫТИЯ МНОГОЗВЕННЫХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

© 2012 И. Р. Ильясова

ОАО РКК «Энергия» им. С. П. Королёва

Разработана динамическая модель раскрытия солнечных батарей космического аппарата. Получена система уравнений для определения реакций связей в произвольном узле разворота панелей солнечной батареи. Определены основные интегральные параметры процесса раскрытия.

Солнечные батареи, динамика раскрытия, кинематические связи, средства раскрытия.

Введение

Процесс раскрытия солнечных батарей (СБ) непосредственно влияет на выполнение общих задач полета, являясь одной из ключевых динамических операций функционирования космических аппаратов (КА). Так, в случае отказа системы раскрытия внутренние источники энергии КА могут поддерживать его функционирование не более чем в течение нескольких часов, после чего наступают необратимые изменения, приводящие к деградации систем КА и его потере [1, 2]. Это диктует высокие требования к надёжности срабатывания системы раскрытия СБ и обоснованности выбора характеристик элементов системы раскрытия. Возрастание энергопотребления перспективных КА сопровождается ростом размеров и массы СБ [3, 4], что делает вопросы безотказного функционирования системы раскрытия СБ актуальными. Сложные схемы раскрытия, предусматривающие, например, механизмы тросовой синхронизации относительного движения панелей, активного либо пассивного демпфирования, нуждаются в тщательной проработке.

В то же время при наземных экспериментах на стендах не удаётся в достаточной мере воспроизвести реальные условия процесса раскрытия (например, остаточные угловые скорости КА в момент подачи команды на раскрытие) и тем самым полностью подтвердить надёжность

и работоспособность системы раскрытия. В связи с этим для подтверждения правильности принятых технических решений и обоснованности конкретных параметров элементов системы раскрытия необходимо детальное математическое моделирование процесса раскрытия СБ с учётом всех существенных факторов.

Структурные элементы системы раскрытия СБ

В исходном, транспортировочном положении солнечные батареи (СБ) компактно сложены и зафиксированы на корпусе КА. При раскрытии батареи происходит расфиксация, перевод батареи в конечное (раскрытое) рабочее положение и фиксация батареи в нём. Следовательно, система раскрытия должна включать в себя следующие структурные элементы:

1. Средства фиксации в транспортировочном положении, допускающие возможность при подаче соответствующей команды снять наложенные механические ограничения допуская тем самым относительное движение элементов батареи (панелей, штанг). В качестве средств фиксации часто используются пирозамки.

2. Средства инициации разворота элементов батареи. Как правило, относительный разворот пары панелей СБ осуществляется пружинами кручения, установленными на оси вращения. Кроме того, для преодоления на начальном участке сил трения используются короткоходовые

пружинные толкатели.

3. Средства фиксации батареи в раскрытом (рабочем) положении, которые также выполняются в виде устройства замкового типа.

4. Средства тросовой синхронизации относительного углового движения пар элементов солнечной батареи, не позволяющие реализоваться существенному отклонению углов относительного разворота соседних пар. Устройство представляет собой замкнутый подпружиненный (для компенсации температурных деформаций) трос, переброшенный через два шкива, принадлежащих панелям, расположенным не рядом, а через одну. Применение тросовой синхронизации позволяет снизить нагрузки на элементы батареи, а также повысить надёжность системы раскрытия, так как появляется возможность осуществить процесс раскрытия даже при отказе одной из пружин кручения, установленных в осях разворота.

5. Средства торможения (демпфера), предназначены для гашения относительной угловой скорости пары соседних элементов батарей перед фиксацией их в рабочем конечном положении с целью снижения ударных нагрузок в момент фиксации.

Динамическая модель системы

Панели СБ, космический аппарат и штанги, соединяющие КА и СБ, моделируются системой тел, построенной следующим образом. КА принят в качестве базового тела, а элементы каждого “крыла” СБ расположены по типу цепочки и последовательно соединены кинематическими связями с переменным числом степеней свободы. Расположение тел, их условная нумерация и нумерация связей между ними приведены на рис. 1. Расчёт процесса раскрытия батарей сводится к моделированию динамики такой системы тел с учётом наложенных связей и силовых факторов, создаваемых средствами раскрытия, системой тросовой синхронизации и т.д.

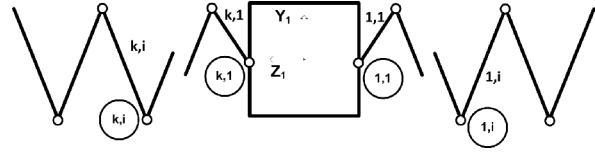


Рис. 1. Структура системы

Введены следующие системы координат (рис. 2):

- $O_{ii}X_{ii}Y_{ii}Z_{ii}$ - инерциальная, расположенная произвольно;
- $O_iX_iY_iZ_i$ - связанные системы координат, начала которых расположены в центрах масс тел системы;
- $O_{ci}X_{ci}Y_{ci}Z_{ci}$ - системы координат связей. В связанной системе координат задаётся единичный вектор \vec{e}_i , определяющий положение оси возможного разворота. Ось X_{ci} совпадает с этим вектором, а оси Y_{ci} и Z_{ci} дополняют систему до правой.

Радиусы-векторы центров масс \vec{r}_{O_i} тел определены в проекциях на оси инерциальной системы координат.

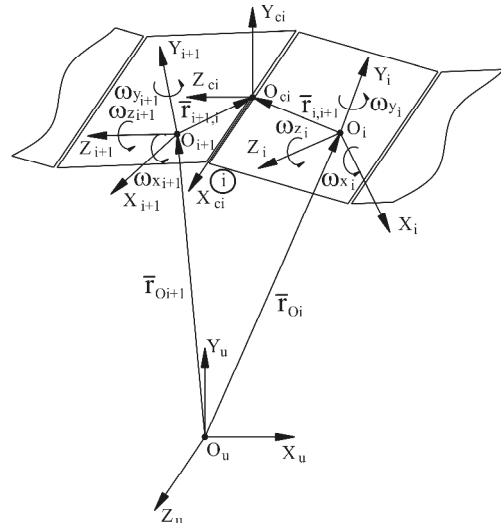


Рис. 2. Системы координат

При описании движения любое тело системы (КА, панели, штанги) рассматривается как свободное, а действие на него других тел осуществляется посредством указанных выше связей. Величина их реакций заранее неизвестна и определяется из специальных дополнительных уравнений.

Поскольку тела системы представляются твёрдыми, с неизменными массово

- инерционными характеристиками, уравнения поступательного перемещения центра масс каждого тела в инерциальных осях и уравнения вращательного движения относительно центра масс в связанных осях соответственно будут иметь вид $m_i \mathbf{a}_{oi} = \mathbf{F}_{oi} + \mathbf{R}_i$,

$$[I_{oi}] \frac{d\tilde{\mathbf{w}}_i}{dt} + \mathbf{w}_i \times ([I_{oi}] \mathbf{w}_i) = \mathbf{L}_{oi} + \mathbf{L}_i + \mathbf{L}_{ci}, \quad (1)$$

где \mathbf{a}_{oi} , $\mathbf{e}_i = \frac{d\tilde{\mathbf{w}}_i}{dt}$ - соответственно ускорение центра масс и угловое ускорение «i»-го тела системы, производная $\frac{d\tilde{\mathbf{w}}_i}{dt}$ берётся в его связанной системе координат; m_i , $[I_{oi}]$ - соответственно масса и тензор инерции «i» - го тела.

Отсюда можно выразить \mathbf{a}_{oi} и \mathbf{e}_i :

$$\mathbf{a}_{oi} = m_i^{-1} (\mathbf{F}_{oi} + \mathbf{R}_i),$$

$$\mathbf{e}_i = [I_{oi}]^{-1} (\mathbf{L}_{oi} + \mathbf{L}_i + \mathbf{L}_{ci} - \mathbf{w}_i \times ([I_{oi}] \mathbf{w}_i)).$$

Результатом интегрирования уравнений (1) будут скорости центров масс тел \mathbf{V}_{oi} , координаты центров масс \mathbf{r}_{oi} в инерциальной системе координат и угловые скорости \mathbf{w}_i тел.

Однако уравнения (1) не могут быть проинтегрированы сразу, так как в их правые части входят неизвестные вектора сил и моментов связей.

Уравнения связей

Для определения реакций связей необходимо записать дополнительно уравнения связи, вид которых определяется конкретным характером связи. Поскольку два последовательно соединённых тела имеют общие точки связи, то радиусы-векторы в инерциальной системе координат и полные скорости этих точек, принадлежащих двум разным телам, должны быть одинаковы. Кроме того, одинаковы должны быть и проекции угловой скорости на оси Y_{ci} , Z_{ci} системы координат связи. Можно получить посредством дифференцирования этих равенств

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{i,i+1} - \mathbf{a}_{i+1,i} &= 0, \\ \mathbf{e}_i - \mathbf{e}_{i+1} + \mathbf{w}_i \times \mathbf{w}_{i+1} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{e}_i, \mathbf{w}_i$ - угловые ускорения и скорости; $\mathbf{a}_{i,i+1}, \mathbf{a}_{i+1,i}$ - значения ускорений «i»-й точки связи, принадлежащей «i»-му и «i+1»-му телам (рис. 3). Появление последнего слагаемого во втором из равенств (2) обусловлено вращением системы координат связи $O_{ci}X_{ci}Y_{ci}Z_{ci}$ относительно систем координат «i»-го и «i+1»-го тел.

В уравнении (2) полные ускорения точек связи «i»-го и «i+1»- тел запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{i,i+1} &= \mathbf{a}_{oi} + \mathbf{w}_i \times (\mathbf{w}_i \times \mathbf{r}_{i,i+1}) + \mathbf{e}_i \times \mathbf{r}_{i,i+1}, \\ \mathbf{a}_{i+1,i} &= \mathbf{a}_{oi+1} + \mathbf{w}_{i+1} \times (\mathbf{w}_{i+1} \times \mathbf{r}_{i+1,i}) + \mathbf{e}_{i+1} \times \mathbf{r}_{i+1,i}. \end{aligned} \quad (3)$$

В выражение (3) входят линейные ускорения центров масс тел и угловые ускорения их вращения относительно центра масс. Их нужно выразить из уравнений движения (1). Входящие в (1) главные вектора реакций связей \mathbf{R}_i , моментов реакций связей \mathbf{L}_i и реактивных моментов \mathbf{L}_{ci} «i»-го определяются соотношениями (рис. 3):

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_i &= [M_{ci \rightarrow i}] \cdot \mathbf{R}_i^c - [M_{ci-1 \rightarrow i}] \cdot \mathbf{R}_{i-1}^c, \\ \mathbf{L}_{ci} &= [M_{ci \rightarrow i}] \cdot \mathbf{L}_i^c - [M_{ci-1 \rightarrow i}] \cdot \mathbf{L}_{i-1}^c, \\ \mathbf{L}_i &= -[\Phi_{i,i+1}] \cdot \mathbf{R}_i^c + [\Phi_{i,i-1}] \cdot \mathbf{R}_{i-1}^c, \\ \mathbf{R}_{i+1} &= -[M_{ci \rightarrow i+1}] \cdot \mathbf{R}_i^c + [M_{ci+1 \rightarrow i+1}] \cdot \mathbf{R}_{i+1}^c, \\ \mathbf{L}_{ci} &= -[M_{ci \rightarrow i+1}] \cdot \mathbf{L}_i^c + [M_{ci+1 \rightarrow i+1}] \cdot \mathbf{L}_{i+1}^c, \\ \mathbf{L}_{i+1} &= [\Phi_{i+1,i}] \cdot \mathbf{R}_i^c - [\Phi_{i+1,i+2}] \cdot \mathbf{R}_{i+1}^c, \end{aligned} \quad (4)$$

в которых компоненты тензоров $[\Phi]$ определяются из выражений:

$$\begin{aligned} [M_{ci \rightarrow i}] \cdot \mathbf{R}_i^c \times \mathbf{r}_{i,i+1} &= [\Phi_{i,i+1}] \cdot \mathbf{R}_i^c, \\ [M_{ci-1 \rightarrow i}] \cdot \mathbf{R}_{i-1}^c \times \mathbf{r}_{i,i-1} &= [\Phi_{i,i-1}] \cdot \mathbf{R}_{i-1}^c, \\ [M_{ci \rightarrow i+1}] \cdot \mathbf{R}_i^c \times \mathbf{r}_{i+1,i} &= [\Phi_{i+1,i}] \cdot \mathbf{R}_i^c, \\ [M_{ci+1 \rightarrow i+1}] \cdot \mathbf{R}_{i+1}^c \times \mathbf{r}_{i+1,i+2} &= [\Phi_{i+1,i+2}] \cdot \mathbf{R}_{i+1}^c. \end{aligned}$$

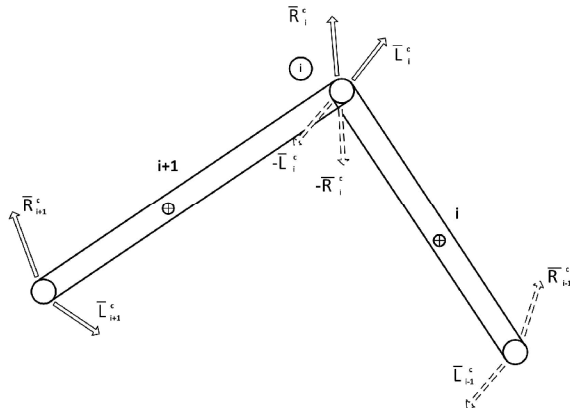


Рис. 3. Индексация внутренних силовых факторов

Подстановки (4) в (3) дают окончательное выражение полного линейного ускорения i -й точки i -го тела, которое не приводится из-за его громоздкости. Выражение ускорения i -й точки $i+1$ -го тела получается аналогично.

В общем виде полученные уравнения связи можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & [A_{i-1}^R] \mathbf{R}_{i-1}^c + [A_i^R] \mathbf{R}_i^c + [A_{i+1}^R] \mathbf{R}_{i+1}^c + \\
 & + [A_{i-1}^L] \mathbf{L}_{i-1}^c + [A_i^L] \mathbf{L}_i^c + [A_{i+1}^L] \mathbf{L}_{i+1}^c = \mathbf{B}_i, \\
 & [C_{i-1}^R] \mathbf{R}_{i-1}^c + [C_i^R] \mathbf{R}_i^c + [C_{i+1}^R] \mathbf{R}_{i+1}^c + \\
 & + [C_{i-1}^L] \mathbf{L}_{i-1}^c + [C_i^L] \mathbf{L}_i^c + [C_{i+1}^L] \mathbf{L}_{i+1}^c = \mathbf{D}_i.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, определение реакций связи, как это видно из структуры соотношений (4), сводится к решению системы линейных уравнений относительно неизвестных компонент векторов реакций связи \mathbf{R}_i^c и реактивных моментов \mathbf{L}_i^c , которые затем подставляются в (1).

Интегральные характеристики процесса раскрытия

Предложенный подход позволяет определить основные интегральные параметры процесса раскрытия солнечных батарей: зависимость энергии системы, углов разворота и угловых скоростей панелей и штанг от времени; последовательность фиксации панелей и штанг, время процесса раскрытия.

На рис. 4-7 приведены основные параметры процесса раскрытия СБ, состоящей из двух идентичных «крыльев».

На рис. 4 можно выделить характерные области: короткий начальный участок роста энергии, обусловленный работой короткоходовых толкателей, инициирующих процесс раскрытия; равномерный рост энергии вследствие работы пружин кручения; участок спада - срабатывание механизмов фиксации панелей; затухающие вследствие диссипации остаточные колебания, от длительности которых зависит время, отводимое на процесс раскрытия батарей в общей программе динамических операций КА на орбите.

На рис. 5 момент выхода относительных углов на предельное значение соответствует моменту фиксации данной пары панелей.

Интенсивные колебания угловой скорости панелей в процессе фиксации (рис.6) объясняются ударным характером фиксации. Большой плавности процесса и снижения уровня нагружения можно добиться за счёт использования двух типов демпфирующих устройств: гасящих угловую скорость панелей на конечном участке относительного разворота и срабатывающих непосредственно в процессе фиксации, которые конструктивно могут быть совмещены с узлом фиксации.

Кроме того, могут быть вычислены силы в тросах системы синхронизации движения, нагрузки элементов СБ в виде эпюр внутренних силовых факторов (рис. 7) и ряд других параметров.

Следует отметить, что теоретическая модель является единственным способом анализа раскрытия СБ при нештатных ситуациях, таких, например, как отказ режима предварительного гашения угловых скоростей, задержка (или даже нераскрытие) одного из «крыльев» СБ.

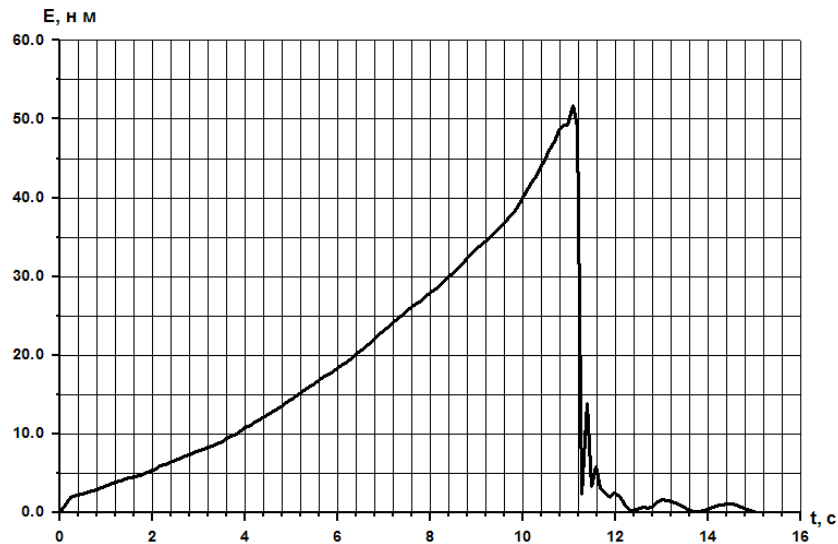


Рис. 4. Энергия системы

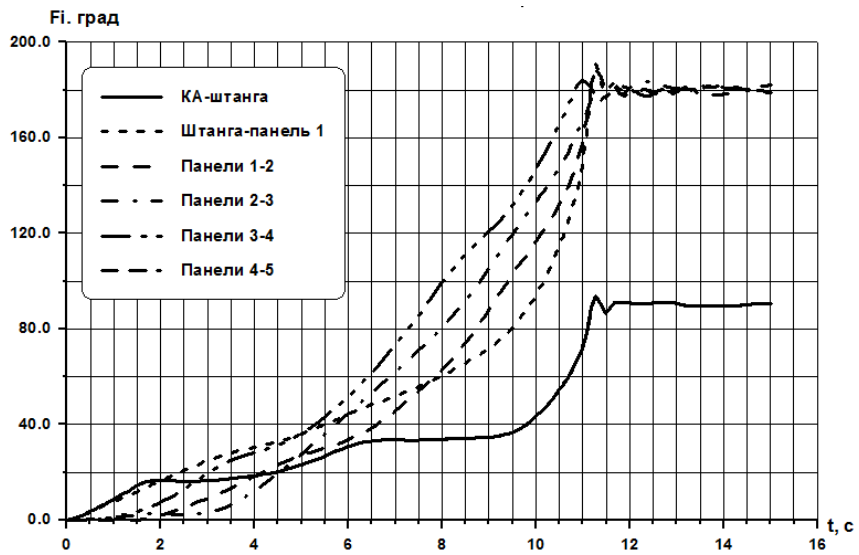


Рис. 5. Относительные углы раскрытия

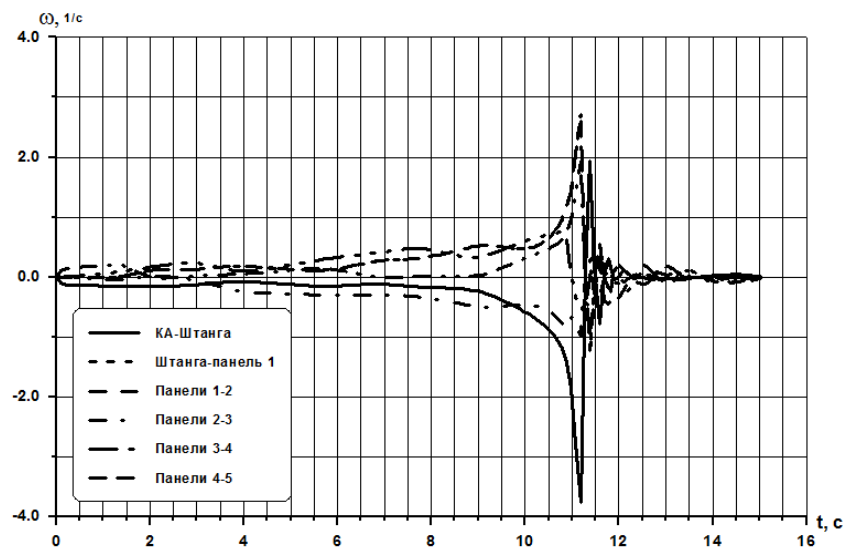


Рис. 6. Относительные угловые скорости раскрытия

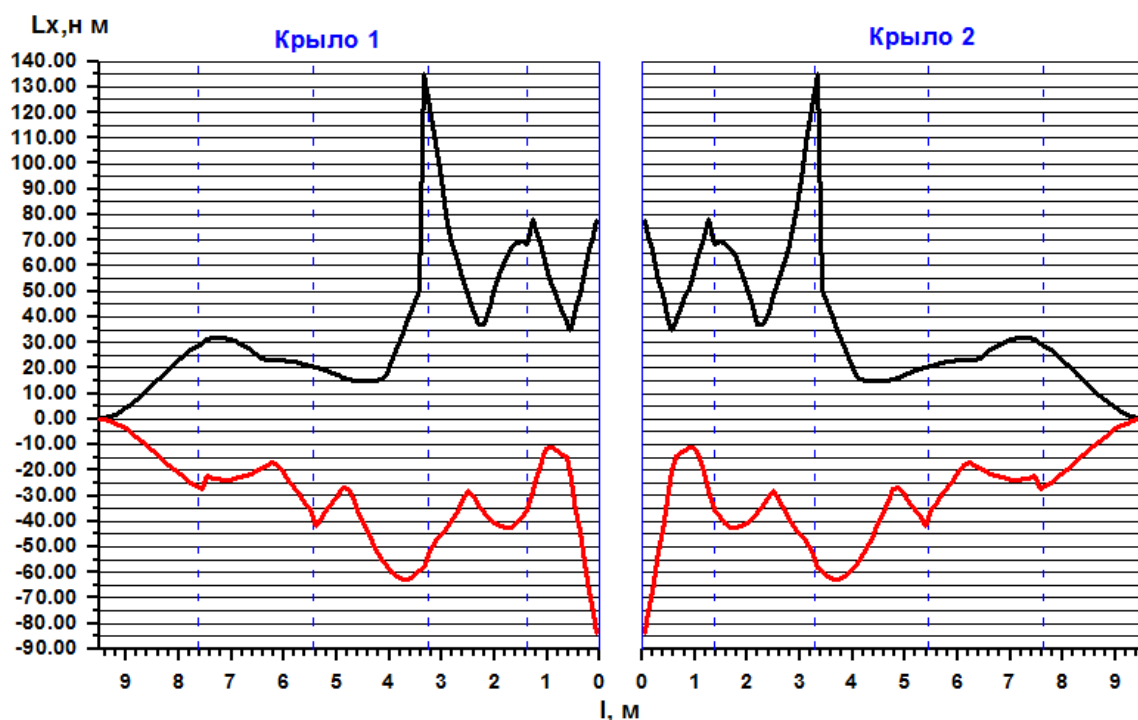


Рис. 7. Огибающая эпюры изгибающего момента

Библиографический список

1. Паничкин, В. И. Математическое моделирование динамики деформирования многостворчатой солнечной батареи в процессе раскрытия [Текст] / В. И. Паничкин // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. - 1992. - № 4. - С. 183-190.
2. Уай, Б. Моделирование и расчет динамики развертывания панелей солнечных батарей космического аппарата [Текст] / Б. Уай, Н. Фурумото, Э. К. Бенерджи // Аэрокосмическая техника. - 1987. - № 5. - С. 161-169.
3. Докучаев, Л. В. Нелинейная динамика летательных аппаратов с деформируемыми элементами [Текст] / Л. В. Докучаев. - М.: Машиностроение, 1987. - 261 с.
4. Никольский, В. В. Проектирование космических аппаратов [Текст] / В. В. Никольский. - СПб: Изд-во Балтийского государственного университета «Военмех», 2003. - 121 с.
5. Щиблев, Ю. Н. Моделирование динамики раскрытия солнечных батарей [Текст] / Ю. Н. Щиблев, Н. С. Ососов, С. В. Борзых // Авиакосмическая техника и технология. - 1999. - № 1. - С. 35-41.
6. Моделирование процесса раскрытия крупногабаритных солнечных батарей [Текст] / С. В. Борзых, В. Н. Бакулин, Ю. Н. Щиблев [и др.] // Математическое моделирование. - 2004. - № 6. - С. 88-92.
7. Динамическое моделирование процесса раскрытия крупногабаритной трансформируемой орбитальной конструкции [Текст] / С. В. Борзых, Ю. Н. Щиблев, Н. С. Ососов [и др.] // Тр. 8-й междунар. конф. «Системный анализ и управление». - Евпатория: Изд-во МАИ, 2003. - С. 117-118.
8. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О. Зенкевич. - М.: Мир, 1975.

DYNAMICS OF MULTILINK SOLAR PANEL DEPLOYMENT PROCESS

© 2012 I. R. Pyasova

Rocket Space Corporation” Energiya” plc.

A dynamic model of spacecraft solar panel deployment is developed. In describing the motion each body of the system (spacecraft, panels, rods) is considered to be a free one. The action of other bodies on it is accomplished by means of imposed kinematic constraints. A system of equations to determine the reaction of constraints in an arbitrary node of solar battery panel deployment is derived. The main integral parameters of the deployment process are identified: the dependence of the system’s energy, deployment angles and angular velocities of panels and rods on time, the sequence of fixing the panels and rods, the time of the deployment process.

Solar panels, deployment process, kinematic constraints, deployment tools.

Информация об авторе

Ильясова Ирина Рашидовна, инженер открытого акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королёва». E-mail: Irina.Pyasova@rsce.ru. Область научных интересов: моделирование динамики космических систем.

Pyasova Irina Rashidovna, engineer of the Rocket Space Corporation “Energiya”. E-mail: Irina.Pyasova@rsce.ru. Area of research: simulation of the dynamics of space systems.