

А. В. Крылов, С. А. Чурилин

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСКРЫТИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ

Проведено моделирование процесса раскрытия крупногабаритных космических конструкций с применением современных программных комплексов на примере трех кинематических схем раскрытия солнечных батарей. Дан общий подход к построению моделей таких конструкций.

E-mail: sm11@sm.bmstu.ru

Ключевые слова: *солнечные батареи, трансформируемые космические конструкции, моделирование динамики раскрытия, кинематическая схема раскрытия.*

Современные космические аппараты (КА), как правило, имеют основной блок, к которому крепятся разворачиваемые в рабочее положение выносные элементы: антенны различного назначения, панели солнечных батарей (СБ), штанги с датчиками и другие элементы систем КА. Раскрытие таких трансформируемых космических конструкций из транспортного положения на орбите Земли является важным этапом их эксплуатации. От правильности протекания этого процесса зависит возможность дальнейшего использования изделия.

Кинематическая схема раскрытия трансформируемой конструкции должна обеспечивать надежное разворачивание и фиксацию ее узлов в заданном положении и гарантировать выполнение предъявляемых требований по надежности, прочности и точности взаимного расположения элементов конструкции. Оценить правильность принятых технических решений и параметров систем раскрытия на стадии проектирования КА позволяет математическое моделирование этапов функционирования рассматриваемого изделия. Моделирование разворачивания трансформируемых конструкций дает возможность рассмотреть различные схемы раскрытия и выявить их преимущества и недостатки. Для этого построенная модель должна обеспечивать эффективное выполнение проектировочных расчетов конструкций и анализ различных вариантов их укладки и раскрытия из компактного транспортного положения в рабочее.

В общем случае число этапов приведения в рабочее положение штанг, антенн, панелей солнечных батарей может быть достаточно большим, а движение выносных элементов на каждом этапе — не обязательно только вращательным или поступательным. Для численного анализа раскрытия трансформируемых конструкций целесообразно использовать возможности современных пакетов моделирования динамики механических систем, таких как “EULER” и MD.Adams.

Было рассмотрено три кинематических схемы раскрытия солнечных батарей (рис. 1): конфигурация топологического дерева с системой тросовой синхронизации (а), конфигурация топологического дерева с дополнительными боковыми панелями (б) и H-образная схема раскрытия солнечных батарей (в).

Схема солнечных батарей, имеющих конфигурацию топологического дерева с системой тросовой синхронизации, показана на рис. 2. Основными конструктивными элементами пакета СБ являются: четыре плоские панели

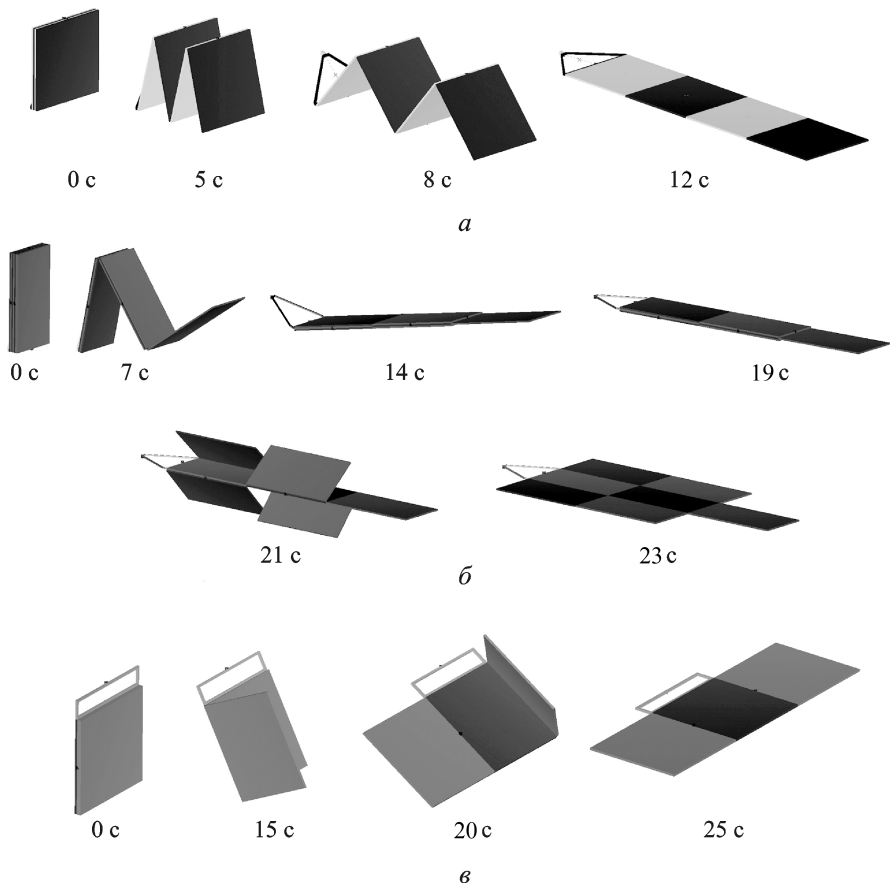


Рис. 1. Кинематические схемы раскрытия солнечных батарей

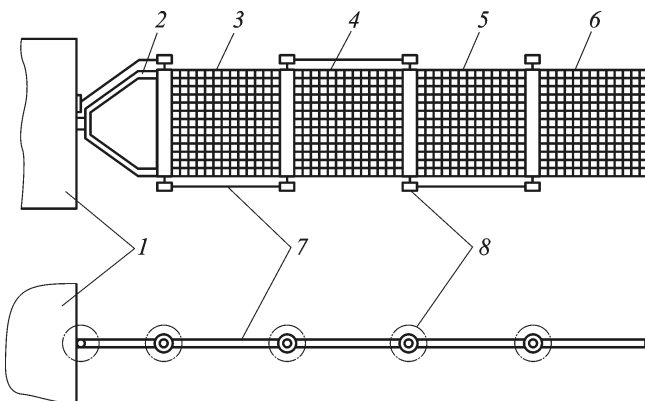


Рис. 2. Схема солнечных батарей, имеющих конфигурацию топологического дерева с системой тросовой синхронизации:

1 – корпус КА, 2 – рама, 3... 6 – панели СБ, 7 – тросовые петли, 8 – шкивы

для крепления фотоэлектрических преобразователей, рама, механизмы разворачивания панелей (узлы раскрытия). Для предотвращения появления больших моментов в узлах раскрытия система ориентации КА отключается на время разворачивания панелей. Накопленная в пружинах кручения механизмов разворачивания во время укладки в компактное положение потенциальная

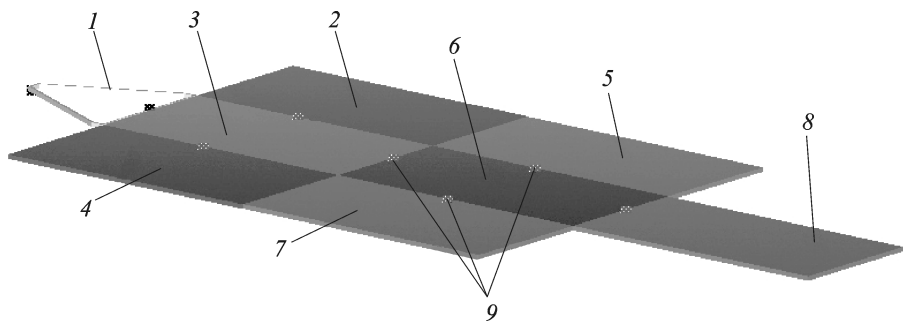


Рис. 3. Схема солнечных батарей, имеющих конфигурацию топологического дерева с дополнительными боковыми панелями:

1... 8 — звенья, 9 — узлы раскрытия

энергия позволяет раскрывать панели СБ на орбите, в то время как тросовые петли ограничивают движение, синхронизируя углы поворота панелей.

Первая тросовая петля связывает панель 1 с корпусом КА, вторая петля связывает раму и панель 2, третья связывает панели 1 и 3, а четвертая — панели 2 и 4. Эти тросовые петли синхронизируют углы поворота каждой панели, создавая пассивный управляющий момент, пропорциональный разности углов поворота. Рабочий угол раскрытия для панелей составляет 180° , для рамы — 90° .

На рис. 3 показана схема солнечных батарей, имеющих конфигурацию топологического дерева с дополнительными боковыми панелями. Данная система включает в себя раму и семь плоских панелей СБ. Развертывание СБ происходит в два этапа. Первоначально происходит расчеховка звеньев 1, 3, 6 и 8 и за счет установленных в узлах раскрытия пружин кручения происходит их развертывание в рабочее положение. По достижении своего рабочего положения звенья ставятся на упор и фиксируются, после чего расчеховываются дополнительные боковые панели СБ (звенья 2, 4, 5 и 7), и за счет энергии упругих элементов, расположенных в узлах раскрытия, происходит их переход в рабочее положение с последующей фиксацией.

Конструкция солнечных батарей Н-образной схемы показана на рис. 4. Основными ее элементами являются рама и три панели для крепления фотоэлектрических преобразователей. Рама 1 и панель 2 связаны жестко, панели 3 и 4 связаны с панелью 2 шарнирными узлами. Процесс раскрытия такой солнечной батареи можно разделить на три этапа:

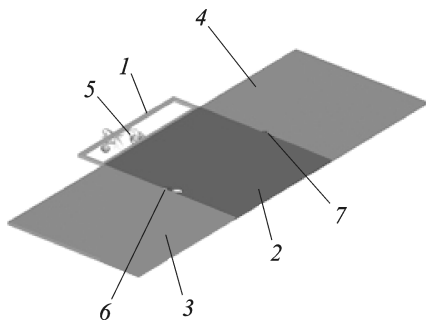


Рис. 4. Конструкция солнечных батарей Н-образной схемы раскрытия:

1 — рама, 2... 4 — панели СБ, 5... 7 — узлы раскрытия

1. Расчеховка рамы с последующим ее раскрытием.

2. Расчеховка панели 3 после достижения определенного значения угла раскрытия рамы.

3. Расчеховка панели 4 после достижения определенного значения угла раскрытия панели 3 с последующим раскрытием всего пакета СБ и фиксацией всех звеньев.

Несмотря на то что процесс раскрытия солнечных батарей в каждом отдельном случае достаточно индивидуален, можно определить общий подход к построению моделей таких конструкций.

Наиболее простой, но в то же время достаточно хорошо учитывающей особенности конструкции СБ расчетной схемой является система абсолютно твердых тел, связанных между собой шарнирными узлами, влияние трения в которых пренебрежимо мало. Массы и моменты инерции твердых тел принимаются равными массам и моментам инерции реальных панелей СБ. Под шарнирным узлом здесь понимается не только шарнирное соединение, допускающее относительное вращение смежных панелей, но и пружины кручения, накапливающие в процессе укладки необходимую для последующего развертывания энергию, которые являются составной частью каждого шарнирного узла. При определенном относительном положении смежных панелей СБ во время раскрытия на панели накладываются связи, ограничивающие их взаимное угловое смещение. Техническое исполнение связей может быть самым разным — различного рода упоры или фиксаторы. Реальные физические процессы, протекающие во время установки панелей СБ на упоры или фиксаторы, достаточно сложны. Простейшая модель таких устройств может быть представлена в виде упругого и демпфирующего элементов с соответствующими характеристиками¹.

Пружины кручения, расположенные в узлах раскрытия и отвечающие за развертывание панелей, моделируются упругими элементами. Силовая характеристика каждого упругого элемента (зависимость момента от угла раскрытия) определяется следующим соотношением:

$$M_i(\varphi_i) = c_i(\varphi_{\text{закр}i} - \varphi_i),$$

где c_i — коэффициент жесткости i -го упругого элемента; φ_i — текущий угол раскрытия; $\varphi_{\text{закр}i}$ — предварительный угол закрутки i -го упругого элемента.

Когда угол раскрытия смежных звеньев достигает определенного значения $\varphi_{\text{упор}i}$, соответствующего их рабочему положению, происходит постановка звеньев на упоры с последующей фиксацией. Постановка на упор и фиксация моделируется упругодиссипативным элементом и описывается следующей зависимостью момента от угла раскрытия и угловой скорости:

$$M_{\text{упор}i}(\varphi_i, \omega_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } \varphi_i < \varphi_{\text{упор}i}; \\ -c_{\text{упор}i}(\varphi_i - \varphi_{\text{упор}i}) - \mu_i\omega_i, & \text{если } \varphi_i \geq \varphi_{\text{упор}i}, \end{cases}$$

где $c_{\text{упор}i}$ — коэффициент жесткости i -го упругодиссипативного элемента; φ_i — текущий угол раскрытия; $\varphi_{\text{упор}i}$ — значение угла раскрытия, при котором происходит постановка на упор; μ_i — коэффициент вязкого демпфирования i -го упругодиссипативного элемента, моделирующего упор; ω_i — относительная угловая скорость смежных панелей.

По достижении панелями СБ рабочего положения их движение может носить как аperiodический, так и колебательный характер в зависимости от величины коэффициента μ_i диссипативной составляющей в выражении для $M_{\text{упор}i}$. При колебательном характере движения несмотря на затухание возможен случай, когда панель СБ под действием внешних сил достигнет положения $\varphi_i < \varphi_{\text{упор}i}$, что приведет к значению удерживающего момента $M_{\text{упор}i} = 0$. Для того чтобы после первого достижения панелью угла раскрытия $\varphi_i = \varphi_{\text{упор}i}$ всегда выполнялось равенство

$$M_{\text{упор}i} = -c_{\text{упор}i}(\varphi_i - \varphi_{\text{упор}i}) - \mu_i\omega_i,$$

в том числе, если $\varphi_i < \varphi_{\text{упор}i}$, выражение для удерживающего момента $M_{\text{упор}i}$

¹З и м и н В. Н. К вопросу моделирования и расчета динамики раскрытия трансформируемых космических конструкций // Оборонная техника. — 2006. — № 1, 2. — С. 123–127.

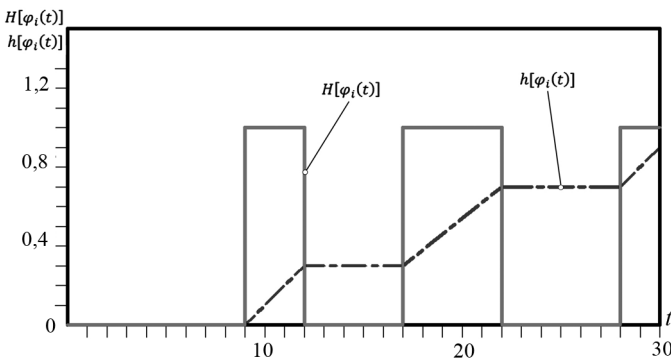


Рис. 5. Вид функций $H[\varphi_i(t)]$ и $h[\varphi_i(t)]$

можно записать в виде

$$M_{\text{упор}_i}(\varphi_i, \omega_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } h[\varphi_i(t)] = 0; \\ -c_{\text{упор}_i}(\varphi_i - \varphi_{\text{упор}_i}) - \mu_i \omega_i, & \text{если } h[\varphi_i(t)] > 0, \end{cases}$$

где $h[\varphi_i(t)]$ – неубывающая функция (рис. 5) – интеграл по времени от функции Хевисайда

$$h[\varphi_i(t)] = \int_0^{t^*} H[\varphi_i(t)] dt,$$

где

$$H[\varphi_i(t)] = \begin{cases} 0, & \text{если } \varphi_i(t) < \varphi_{\text{упор}_i}; \\ 1, & \text{если } \varphi_i(t) \geq \varphi_{\text{упор}_i}; \end{cases}$$

t^* – текущее время; $\varphi_i(t)$ – текущий угол раскрытия i -й панели.

В процессе движения смежные звенья системы могут совершать вращения навстречу друг другу и соприкасаться. В модели предусмотрены упоры, препятствующие контакту звеньев. Они представляют собой упругие элементы с нелинейной зависимостью момента от угла раскрытия:

$$M_{\text{упр}_i}(\varphi_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } \varphi_i > \varphi_{\text{упр}_i}; \\ -c_{\text{упр}_i}(\varphi_i - \varphi_{\text{упр}_i}), & \text{если } \varphi_i \leq \varphi_{\text{упр}_i}, \end{cases}$$

где $c_{\text{упр}_i}$ – коэффициент жесткости i -го упругого элемента; $\varphi_{\text{упр}_i}$ – значение i -го угла раскрытия, при котором происходит контактное взаимодействие между смежными панелями СБ.

Фиксаторы панелей СБ в транспортном положении моделируются наложением на требуемые звенья пакета СБ (ведомые панели) связей вида $\varphi_i = 0$ или $\omega_i = 0$ (i – номер звена), которые действуют с момента начала раскрытия пакета t_0 и снимаются по сигналу программного датчика ($\varphi_j = \varphi_{\text{расч}_j}$), реагирующего на установленное событие – достижение ведущей панелью (панелью, к параметрам движения которой привязывается расчеховка) заданного значения угла раскрытия $\varphi_{\text{расч}_j}$.

Моменты, развиваемые тросами системы тросовой синхронизации (рис. 6) при разворачивании панелей, моделируются упругими элементами и описываются следующими зависимостями:

$$T_1 = R(2\varphi_1 - \varphi_2) + F_1 r_{\text{шквив1}}; \quad T_2 = R(\varphi_2 - \varphi_3) + F_2 r_{\text{шквив2}};$$

$$T_3 = R(\varphi_3 - \varphi_4) + F_2 r_{\text{шквив2}}; \quad T_4 = R(\varphi_4 - \varphi_5) + F_2 r_{\text{шквив2}},$$

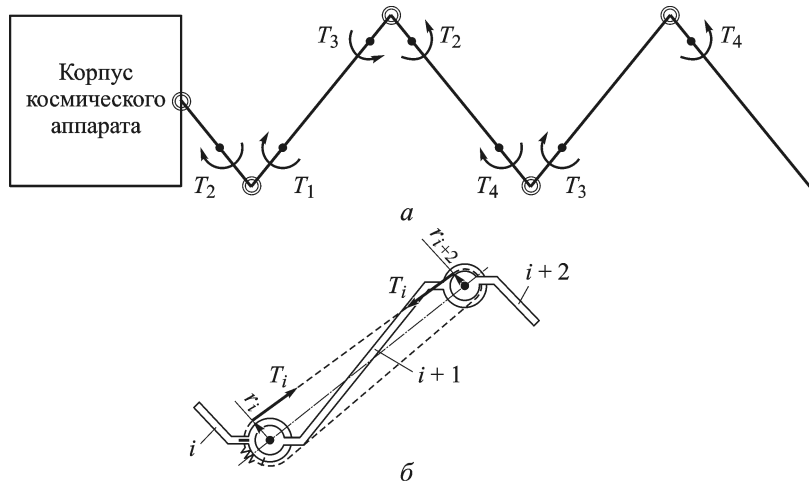


Рис. 6. Моменты, развиваемые тросами системы тросовой синхронизации при разворачивании панелей (а) и схема механизма тросовой петли (б)

где R — эквивалентная жесткость троса на кручение, $\varphi_1 \dots \varphi_5$ — текущие углы раскрытия элементов; $r_{\text{шкив1}}, r_{\text{шкив2}}$ — радиусы шкивов, к которым крепится тросовая петля; F_1, F_2 — начальная сила натяжения тросовых петель.

В результате проведенных исследований выявлены зависимости углов раскрытия элементов конструкций от времени, которые представлены на рис. 7. Сравнение полученных в результате расчета в программных комплек-

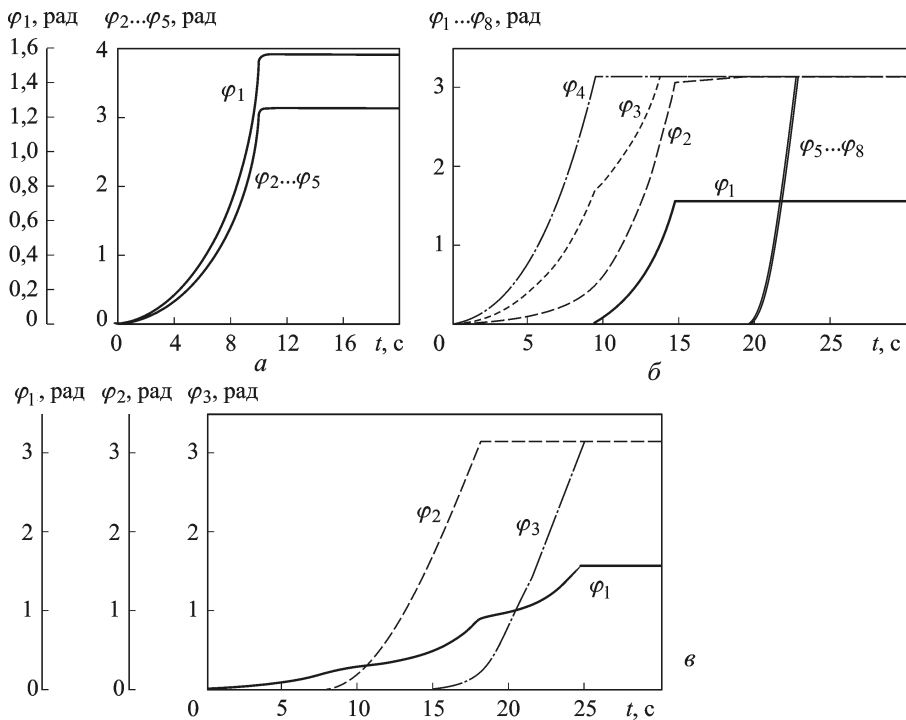


Рис. 7. Зависимость от времени углов раскрытия звеньев солнечных батарей, имеющих конфигурацию топологического дерева с системой тросовой синхронизации (а), с дополнительными боковыми панелями (б) и Н-образной схемы (в)

сах EULER и MD.Adams зависимостей показало возможность получения с использованием этих программ оценочных характеристик процесса раскрытия идеализированных моделей солнечных батарей. Расчеты с использованием таких моделей дают возможность определять длительность процесса раскрытия СБ и относительные угловые скорости панелей, а также последовательность их фиксации. Эти параметры могут быть использованы в качестве исходных данных при разработке конструкций элементов, обеспечивающих раскрытие. Кроме того, следует отметить, что теоретические модели являются единственным способом анализа раскрытия солнечных батарей при нештатных ситуациях.

Статья поступила в редакцию 24.12.2010



Алексей Владимирович Крылов родился в 1982 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2005 г. Аспирант кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 14 научных работ в области конструирования и динамики крупногабаритных космических конструкций.

A.V. Krylov (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2005. Post-graduate of “Spacecrafts and Launch Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 14 publications in the field of construction and dynamics of large space structures.



Сергей Александрович Чурилин родился в 1982 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Аспирант кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 9 научных работ в области конструирования и динамики крупногабаритных космических конструкций.

S.A. Churilin (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2006. Post-graduate of “Spacecrafts and Launch Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 9 publications in the field of construction and dynamics of large space structures.