

УТОЧНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РАСКРЫТИЯ БАТАРЕИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ПОДАТЛИВОСТИ ШАРНИРНОГО УЗЛА И НЕЛИНЕЙНОСТИ ЕГО ЖЁСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Л. И. Ерёмин, И. Ю. Пугач, Е. П. Минчакова

Работа посвящена уточнению математической модели процесса раскрытия батареи фотоэлектрической (БФ) путём учёта угловых жёсткостей шарнирного узла. Жёсткость шарнирного узла влияет на величину динамических нагрузок, возникающих в процессе раскрытия батареи фотоэлектрической и фиксации её створок, и, как следствие, на величину напряжений в несущих элементах конструкции. Из-за особенности конструкции, шарнирный узел имеет различные жёсткости на раскрытие и складывание. Обе величины были определены расчётным путём и использованы для проведения уточнённого математического моделирования процесса раскрытия БФ. Уточнение модели позволило получить более точные данные для проведения повторного прочностного расчёта и сделать выводы о запасе прочности несущих элементов конструкции, а также оценить влияние жёсткостных характеристик шарнирного узла на распределение нагрузок по конструкции и конфигурацию раскрытия.

Ключевые слова: космический аппарат, механизм раскрытия, угловая жёсткость, конечно-элементная модель, батарея фотоэлектрическая, прочностной расчёт.

Введение

На этапе наземной отработки космического аппарата (КА) выполняется моделирование процесса раскрытия батареи фотоэлектрической (БФ) с целью определения кинематических и динамических параметров процесса раскрытия (время полного раскрытия БФ, время фиксации её элементов, угловые скорости, динамические нагрузки, действующие на элементы БФ в процессе раскрытия) и подтверждения прочности элементов конструкции при раскрытии.

Для математического моделирования используется программный комплекс анализа механизмов MSC.Adams и программный комплекс конечно-элементного (КЭ) моделирования MSC.Nastran/Patran. MSC.Adams позволяет учитывать упругие свойства элементов механизма, которые предварительно моделируются в MSC.Patran/Nastran и импортируются в MSC.Adams для моделирования кинематики и динамики. Такой подход позволяет создавать модели с различной степенью детализации.

При построении модели используется эволюционный подход (от простой модели к более сложной): на первом этапе создаётся относительно простая модель, включающая в себя створки БФ, смоделированные упругими элементами, а также шарниры, упоры, замки и пружины, смоделированные в виде взаимосвязей с использованием встроенных функций Adams. Такая модель позволяет определить конфигурацию БФ при раскрытии, выявить возможные проблемы в виде зацеплений или соударений, определить время полного раскрытия, время фиксации её элементов, угловые скорости, а также определить динамические нагрузки, действующие на элементы конструкции в процессе раскрытия.

После моделирования процесса раскрытия проводится прочностной расчёт конструкции и

выявляются её наиболее нагруженные элементы.

Величины нагрузок, определённые в ходе первоначального моделирования, являются предварительными, поскольку более точное определение нагрузок требует учёта большого количества факторов, которые заранее неизвестны, таких как жёсткость соединительных элементов, контактная жёсткость в упорах и замках, параметры демпфирования. Для получения более достоверных значений нагрузок необходимо уточнение расчётной модели. В работе рассмотрено уточнение модели путём учёта жёсткостных особенностей шарнирного узла (ШУ) – податливости ШУ и нелинейности его жёсткостных свойств. После уточнённого моделирования процесса раскрытия БФ был проведён повторный прочностной расчёт её элементов.

Модель процесса раскрытия БФ

БФ КА «Метеор-М» № 3 состоит из шести створок и двух рам, фиксирующих створки в зачехленном положении. Элементы БФ соединяются между собой поворотными механизмами – цилиндрическими шарнирами. При транспортировке БФ находится в сложенном состоянии, после выведения КА на орбиту БФ раскрывается. Раскрытие происходит под действием упругих сил от предварительно взведённых пружин, расположенных на поворотных механизмах. Изображения БФ в раскрытом и закрытом состояниях, а также вид конструкции шарнирных механизмов приведены на рис. 1.

ШУ состоит из двух петель, крепящихся к фитингам каркаса БФ вала; соединяющего петли; крючка, осуществляющего фиксацию створки в раскрытом положении; пружины, осуществляющей раскрытие створки; осей крепления и фиксации крючка. Трёхмерная модель ШУ с обозначением несущих элементов представлена на рис. 2.

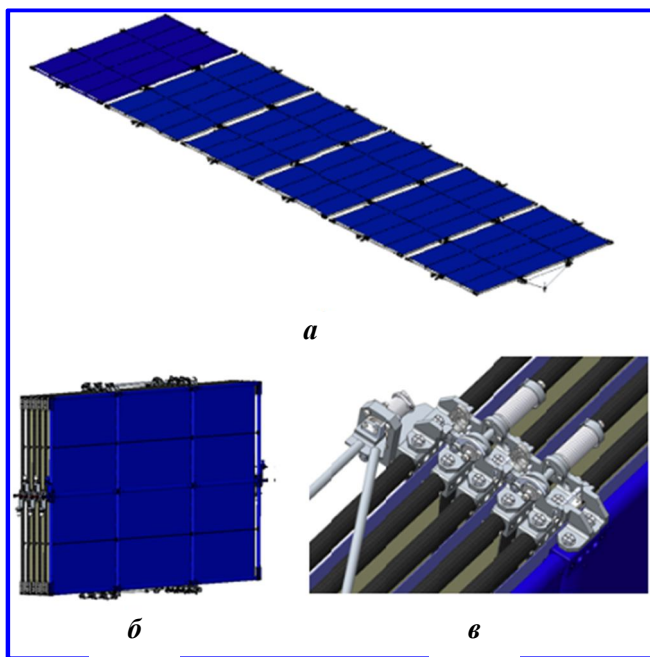


Рис. 1. Батарея фотоэлектрическая: *а* – в раскрытом состоянии; *б* – в закрытом состоянии; *в* – шарнирные механизмы БФ

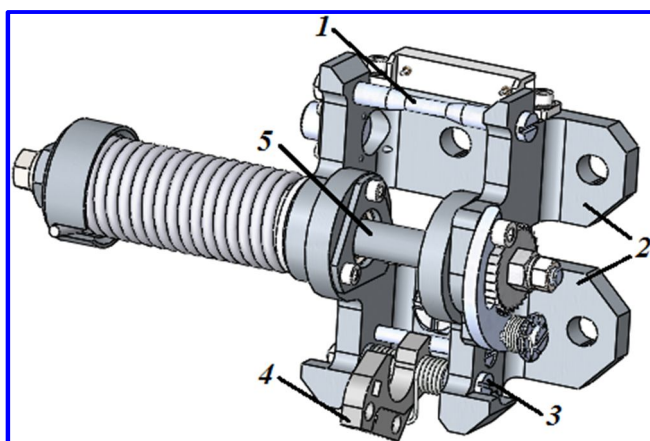


Рис. 2. Конструкция ШУ: 1 – ось фиксации крючка; 2 – петли; 3 – ось крепления крючка; 4 – крючок; 5 – вал

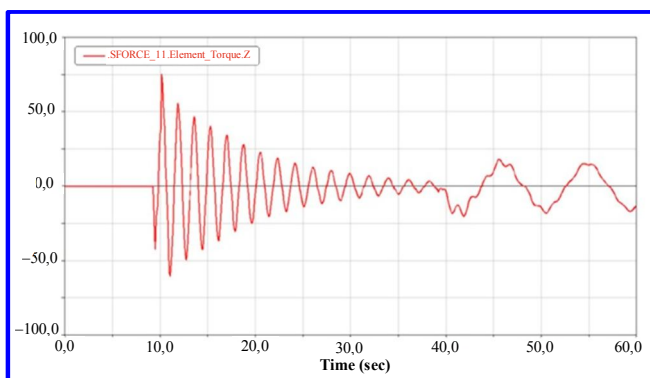


Рис. 3. Зависимость максимального момента, возникающего в ШУ в процессе раскрытия, от времени

Жёсткость ШУ оказывает влияние на динамические нагрузки, возникающие в момент полного раскрытия и фиксации створки БФ.

В математической модели процесса раскрытия БФ шарнирный узел не моделируется в чистом виде, вместо него используются модель цилиндрического шарнира и функция двустороннего контакта BISTOP [1], позволяющая моделировать фиксацию створки в раскрытом положении. При предварительном моделировании особенности жёсткостных характеристик ШУ не учитывались. Для предварительной модели была принята жёсткость функции двустороннего контакта из модели процесса раскрытия БФ аналогичной конструкции, разработанной ранее [2].

Динамические нагрузки, возникающие в процессе раскрытия БФ (рис. 3) были использованы для проведения прочностного расчёта элементов БФ. Максимальный момент, возникающий в ШУ в момент фиксации створки, составил 75,5 Н·м, самым нагруженным оказался ШУ между 3-й и 4-й створками.

По результатам прочностного расчёта максимальные напряжения в каркасе створок составили 13,4 МПа.

Модель шарнирного узла

Для оценки прочности ШУ была разработана соответствующая конечно-элементная (КЭ) модель узла. По результатам прочностного расчёта максимальные напряжения в ШУ – 1240 МПа. Наиболее нагруженными элементами ШУ являются крючок и ось фиксации крючка.

Разработанная для прочностного расчёта модель позволила также провести оценку жёсткости ШУ.

Особенностью ШУ является его несимметричность, с точки зрения восприятия нагрузок, конструкции: при работе шарнира на раскрытие момент воспринимается упорами, осью кронштейнов и самими кронштейнами. При работе узла в обратную сторону (на складывание) крутящий момент воспринимается преимущественно крючком и осью крючка. В связи с этим шарнирный узел имеет различную жёсткость при работе на раскрытие (полная расчеховка створки) и складывание (фиксация створки в раскрытом положении).

Для определения жёсткостных характеристик ШУ было рассмотрено два расчётных случая, отличие которых заключается в направлении приложенного крутящего момента M относительно оси шарнира (рис. 4).

Полученные угловые перемещения θ_1 и θ_2 были использованы для определения жёсткостей ШУ на раскрытие и складывание, составивших соответственно 7042,25 Н·м/рад и 2976,19 Н·м/рад.

Уточнённое моделирование и сравнение результатов

Полученные величины жёсткостей ШУ были использованы в качестве аргументов функции

двустороннего контакта BISTOP при уточнённом моделировании процесса раскрытия БФ.

В ходе уточнённого моделирования были получены более точные результаты динамических нагрузок, возникающих в процессе раскрытия БФ (рис. 5).

Из рис. 5 можно сделать вывод, что максимальный момент в ШУ увеличился и реализуется теперь не в момент фиксации створки, а несколько позже.

В таблице приведено сравнение основных результатов предварительного и уточненного моделирования.

Учёт жёсткостных особенностей ШУ не повлиял на последовательность раскрытия створок. Время фиксации отдельных створок и полного раскрытия БФ изменилось незначительно. При этом несколько изменилось распределение нагрузок по створкам и шарнирным узлам, в частности – наиболее нагруженным стал ШУ между 4-й и 5-й створками (в предварительном расчёте – между 3-й и 4-й створками), максимальный момент в котором составил 90 Н·м при работе шарнира на раскрытие и 80 Н·м при работе шарнира на складывание. Был проведён повторный расчёт элементов БФ на прочность. По результатам прочностного расчёта максимальные напряжения в каркасе створок составили 15,5 МПа, в ШУ – 1320 МПа.

Заключение

В статье рассмотрено поэтапное моделирование процесса раскрытия БФ от простой модели к более подробной.

Более подробный учёт конструктивных особенностей ШУ позволил уточнить модель процесса раскрытия БФ. Путём математического моделирования процесса раскрытия был выявлен недостаточный запас прочности элементов конструкции БФ на раннем этапе проектирования, определены

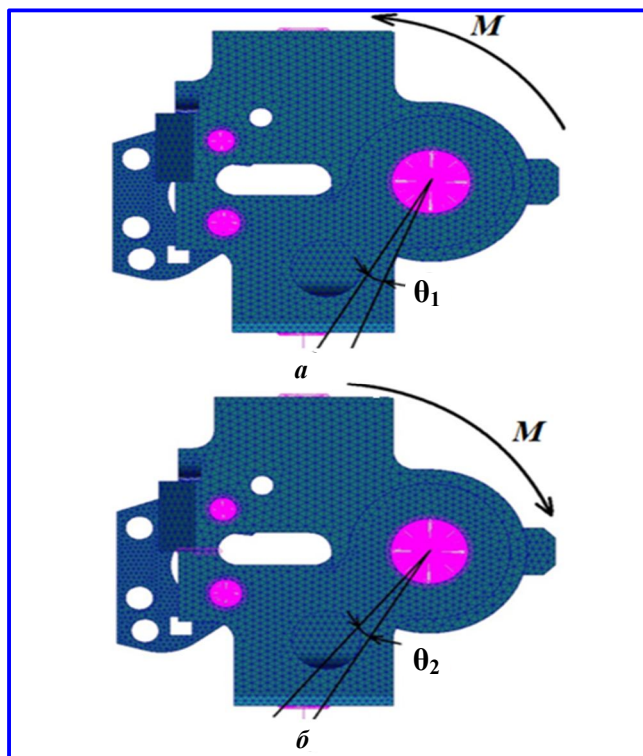


Рис. 4. Расчётные случаи определения жёсткости ШУ: а – на раскрытие; б – на складывание

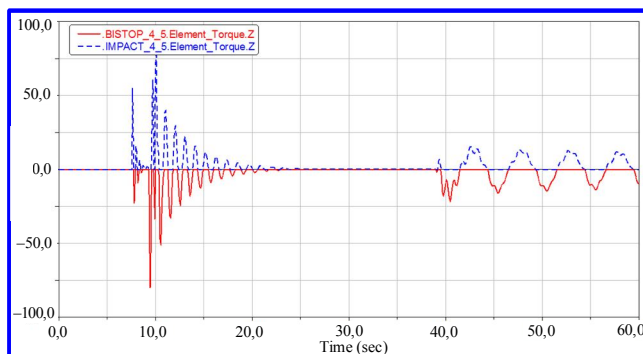


Рис. 5. Зависимость максимального момента, возникающего в ШУ в процессе раскрытия, от времени: при работе шарнирного узла на раскрытие (пунктирная линия); при работе шарнирного узла на складывание (сплошная линия)

Характеристика	Предварительный расчёт	Уточнённый расчёт	Относительное изменение
Максимальный момент в ШУ при работе на раскрытие	75,5 Н·м	90 Н·м	19,2%
Максимальный момент в ШУ при работе на складывание	75,5 Н·м	80 Н·м	6,0%
Максимальные напряжения в крючке ШУ	981 МПа	1050 МПа	7,0%
Максимальные напряжения в оси фиксации крючка ШУ	1240 МПа	1320 МПа	6,5%
Максимальные напряжения в каркасе створок БФ	13,4 МПа	15,5 МПа	15,7%
Максимально нагруженный ШУ	Между створками 3 и 4	Между створками 4 и 5	–
Время полного раскрытия БФ	38 с	40,2 с	5,8%

элементы конструкции, нуждающиеся в доработке. В совокупности с экспериментальным методом определения характеристик ШУ [2, 3], предложенный подход позволяет повысить достоверность результатов, получаемых при моделировании процесса раскрытия крупногабаритных трансформируемых конструкций, уменьшить затраты ресурсов на отработку.

Данный подход оправдывает себя в практической деятельности и позволяет делать оценки на раннем этапе отработки КА.

Поступила в редакцию 27.10.2017

*Леонид Игоревич Ерёмин, младший научный сотрудник, т. (495) 366-33-61,
e-mail: nace71179@yandex.ru.*

*Игорь Юрьевич Пугач, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
т. (495) 366-33-66, e-mail: lab186@mcc.vniiem.ru.*

*Екатерина Петровна Минчакова, инженер, т. (495) 366-33-61, e-mail: minchakovakaty@mail.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

Литература

1. Иванов А. А. MSC.Adams: теория и элементы виртуального конструирования и моделирования. – 2003. – 97 с.
2. Ерёмин Л. И., Пугач И. Ю., Мещихин И. А. Экспериментальное определение параметров механизмов раскрытия солнечной батареи // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2014. – № 5. – С. 43.
3. Канунникова Е. А., Пугач И. Ю. Расчётно-экспериментальное исследование динамических характеристик антенных устройств космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 109. – С. 17 – 20.

IMPROVEMENT OF PHOTOVOLTAIC ARRAY DEPLOYMENT MATHEMATICAL MODEL CONSIDERING THE FLEXIBILITY OF JOINT COUPLING AND NON-LINEARITY OF ITS STIFFNESS PARAMETERS

L. I. Eremin, I. Iu. Pugach, E. P. Minchakova

The article considers the improvement of the mathematical model of photovoltaic array deployment process by means of taking into consideration the tangent stiffness of joint coupling. The stiffness of joint coupling affects the dynamic loads observed during the deployment of photovoltaic array and fixation of its wings, and therefore influences the stress on the load-carrying structural components. Due to peculiarities of its structure, the joint coupling has different values of stiffness for deployment and stowing. Both values have been determined by means of calculation and were used for improved mathematic modeling of the photovoltaic array deployment process. The improvement of the model allowed obtaining more accurate data for recalculation of structural strength and making conclusions about the strength margins of the load-carrying components, as well as assessing the influence of the joint coupling stiffness properties on the distribution of loads over the structure and deployment configuration.

Key words: spacecraft, deployment mechanism, tangent stiffness, finite element model, photovoltaic array, strength calculation.

List of References

1. Ivanov A. A. MSC.Adams: theory and elements of virtual design and modeling. – 2003. – 97 p.
2. Eremin L. I., Pugach I. Iu., Meshchikhin I.A. Experimental determination of solar array deployment parameters // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2014. – No. 5. – 43 p.
3. Kanunnikova E. A., Pugach I. Iu. Calculation and experimental assessment of dynamic characteristics of antennas for satellites // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – М.: FGUE «NPP VNIIEEM», 2009. – Vol. 109. – Pp. 17 – 20.

*Leonid Igorevich Eremin, Junior Researcher, tel.: +7 (495) 366-33-61,
e-mail: nace71179@yandex.ru.*

*Igor Iurievich Pugach, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher,
tel.: +7 (495) 366-33-66, e-mail: lab186@mcc.vniiem.ru.*

*Ekaterina Petrovna Minchakova, Engineer, tel.: +7(495) 366-33-61,
e-mail: minchakovakaty@mail.ru.
(JC «VNIIEEM Corporation»).*