

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМОВ РАСКРЫТИЯ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Л.И. Еремин, И.Ю. Пугач,
И.А. Мещихин
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Представлен подход экспериментального определения параметров механизмов раскрытия солнечной батареи космического аппарата, позволяющий определить демпфирующие и жёсткостные характеристики механизмов раскрытия для последующего использования при математическом моделировании процесса раскрытия солнечной батареи.

Ключевые слова: космический аппарат, солнечная батарея, механизмы раскрытия, жёсткость, вязкое трение.

Введение

Целью моделирования процесса раскрытия солнечной батареи (СБ) является определение таких параметров, как время раскрытия СБ и фиксации её элементов, угловые скорости, а также определение динамических нагрузок, действующих на элементы СБ в процессе её раскрытия. Для создания математической модели, достоверно отображающей процесс раскрытия, необходимо идентифицировать параметры механизмов раскрытия СБ: жёсткостей пружин, осуществляющих раскрытие, коэффициента вязкого трения, возникающего в шарнирах, и момент постоянной составляющей силы трения. Значения этих параметров могут быть определены только экспериментально.

Полная имитация процесса раскрытия СБ в наземных условиях требует наличия достаточно сложного и дорогостоящего оборудования, такого как пространственный подвес, не стесняющий движения створок (следящий подвес). Такое оборудование является уникальным, и исчисляется единицами не только в нашей стране, но и в мире, поэтому полномасштабный наземный эксперимент по раскрытию практически невозможен. В данной работе предложен подход, позволяющий экспериментальным путём определить параметры механизмов раскрытия СБ при минимальном количестве экспериментального оборудования. Предлагаемый подход реализован на примере СБ КА «Ионосфера» и может быть применен к другим СБ сходной конструкции.

Конструкция СБ

Солнечная батарея КА «Ионосфера» состоит из четырёх створок и поворотной рамы. Элементы СБ соединяются между собой поворотными механизмами – цилиндрическими шарнирами. При транспортировке СБ находится в сложенном состоянии,

после выведения КА на орбиту СБ раскрывается. Раскрытие происходит под действием упругих сил от предварительно взведённых торсионов, расположенных на поворотных механизмах. Изображения СБ в раскрытом и закрытом состояниях, а также вид конструкции шарнирных механизмов приведены на рис. 1.

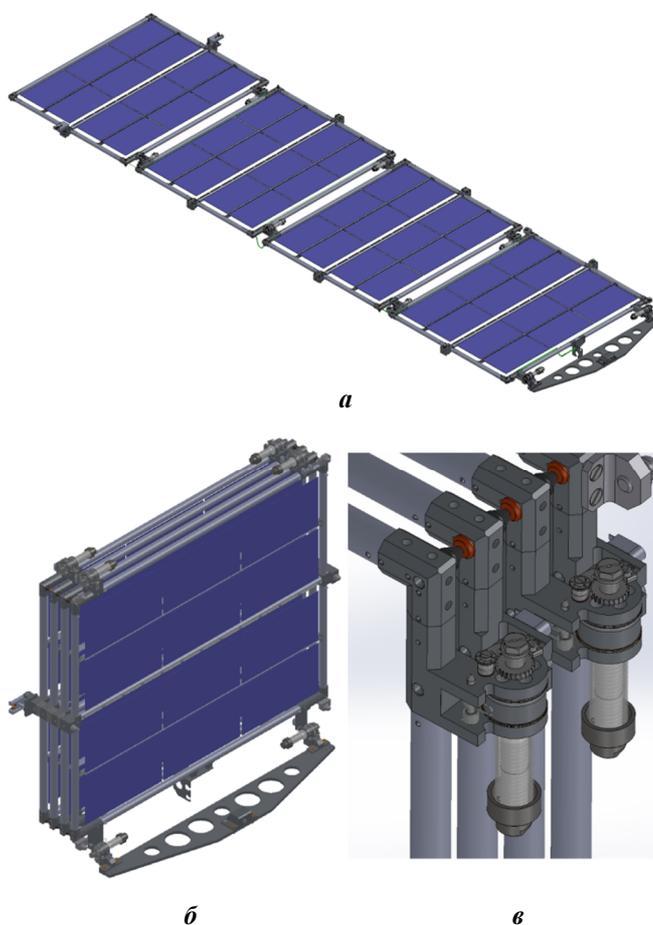


Рис. 1. Солнечная батарея:
а – в раскрытом состоянии; *б* – в закрытом состоянии;
в – шарнирные механизмы СБ

Проведение эксперимента

Эксперимент проводится с крайней створкой СБ, остальные створки фиксируются в зачехленном положении. Испытываемая створка обезвешена путём подвеса в середине верхнего ребра каркаса (рис. 2). При полностью раскрытой створке, торсионы находятся в свободном состоянии. Затем они взводятся на некоторый предварительный угол α . После этого створка закрывается, в следствие чего торсионы получают дополнительный угол закрутки π . Таким образом, при закрытой створке торсионы затянуты на угол $(\pi + \alpha)$.

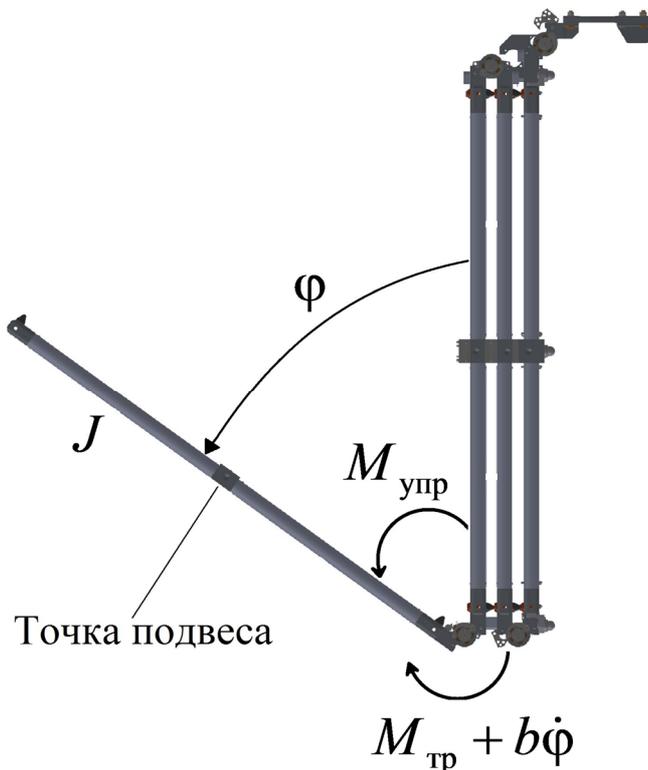


Рис. 2. Расположение СБ при проведении испытаний и действующие на неё моменты (вид сверху)

Определение жёсткости пружин

Жёсткость пружин шарнирных механизмов определяется крутящим моментом в зависимости от угла раскрытия створки, а момент измерением силы, необходимой для удержания створки в неподвижном состоянии. Сила измеряется путём уравновешивания створки при помощи калиброванных грузиков, перекинутых через блок так, чтобы удерживающая их стропа располагалась по нормали к створке. После измерения силы определяется соответствующее значение момента:

$$M_{упр}^{эксп} = mgL,$$

где m – масса груза; g – ускорение свободного падения; L – длина створки. Значение момента определяется при различных значениях угла раскрытия створки, после чего проводится линейная аппроксимация полученных данных (рис. 3).

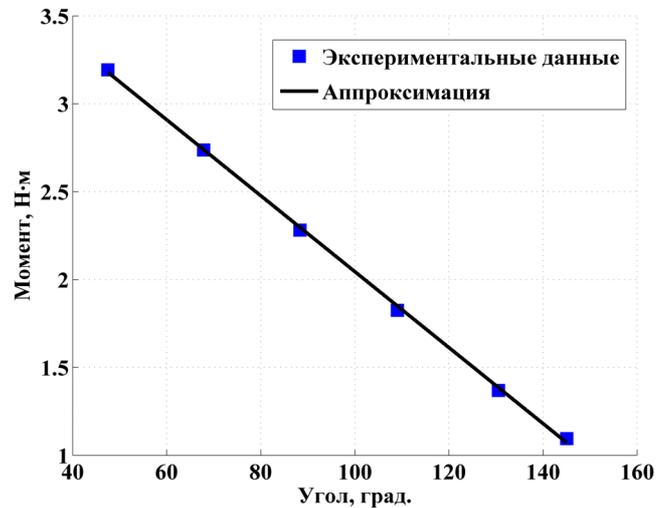


Рис. 3. Аппроксимация экспериментально определённых значений упругого момента

Значение жёсткости пружины получаем дифференцированием аппроксимирующей функции.

Искомая жёсткость пружины определяется как усредненное значение полученного набора. Эксперимент проводится как с каждой пружиной по отдельности, так и при двух одновременно взведённых пружинах, что позволяет оценить суммарную жёсткость, величина которой в дальнейшем используется в уравнении для определения параметров трения. В результате эксперимента определены жёсткости каждой пружины и их суммарная жёсткость. Выявлено различие в жёсткостях верхней и нижней пружин, составляющее 7,7% относительно нижней пружины.

Определение параметров трения в механизмах раскрытия

В ходе эксперимента раскрывается крайняя створка, при этом зависимость угла раскрытия створки от времени фиксируется с помощью специально изготовленного датчика угла поворота на основе прецизионного потенциометра, подключенного к аналого-цифровому преобразователю. Процесс раскрытия повторяется несколько раз, при этом варьируются уровни предварительной закрутки пружины и присоединённые к створке дополнительные массы, сопоставимые с массой самой створки. В ходе каждого эксперимента фиксируется зависимость угла раскрытия створки от времени.

На основе полученных данных определяются параметры механизмов раскрытия батареи. Для этого составим дифференциальное уравнение (ДУ) движения створки с такими коэффициентами, что его решение будет близким к экспериментально полученной кривой.

Исследуемая динамическая система имеет одну степень свободы (угол раскрытия). На створку действуют упругий момент со стороны торсионов $M_{\text{упр}} = c(\pi + \alpha - \varphi)$, моменты вязкого и постоянного трения. Известен момент инерции створки (см. рис. 2).

Дифференциальное уравнение движения створки имеет следующий вид:

$$J\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + M_{\text{тр}} - c(\pi + \alpha - \varphi) = 0, \quad (1)$$

где J – собственный момент инерции створки; φ – координата; $M_{\text{тр}}$ – момент постоянной силы трения; b – коэффициент вязкого трения; c – суммарная жесткость двух пружин; α – угол предварительной затяжки пружин.

Общее решение однородного ДУ:

$$\varphi_{\text{о.о.}} = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t},$$

частное решение неоднородного ДУ:

$$\varphi_{\text{ч.н.}} = \pi + \alpha - \frac{M_{\text{тр}}}{c}.$$

Полное решение уравнения движения створки будет иметь вид [1]:

$$\varphi = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + \pi + \alpha - \frac{M_{\text{тр}}}{c}. \quad (2)$$

Константы определяются из граничных условий, в качестве которых принимаются значения углов раскрытия створки в начальный и конечный моменты времени.

Неизвестными параметрами в уравнении (1) являются коэффициент вязкого трения b и момент $M_{\text{тр}}$ постоянной составляющей силы трения, следовательно, необходимо найти такие величины этих параметров, при которых решение уравнения движения (2) будет максимально близко к экспериментальным данным, в качестве которых принимается аппроксимация экспериментальной кривой по методу наименьших квадратов полиномом 3 – 5 степени (рис. 4).

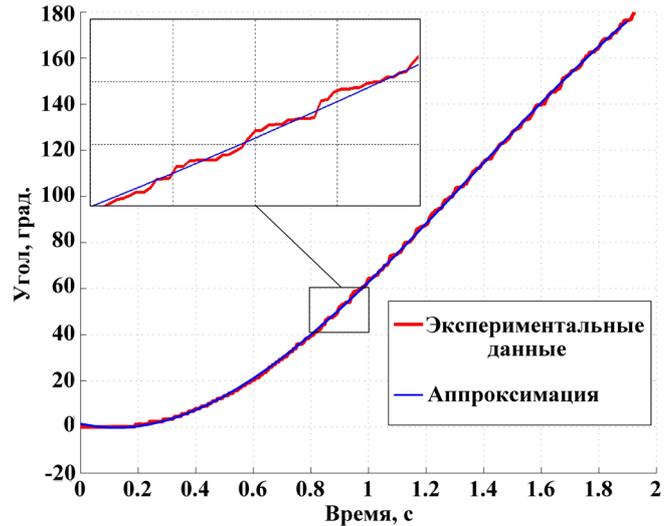


Рис. 4. Экспериментальная зависимость угла раскрытия створки от времени и ее аппроксимация

Способом определения близости функций является введение функционала, представляющего собой среднее квадратичное отклонение между аппроксимацией экспериментальных данных и решением ДУ:

$$g(b, M_{\text{тр}}) = \int_0^{t_{\text{max}}} (\varphi(t, b, M_{\text{тр}}) - \hat{\varphi}(t))^2 dt,$$

где $\varphi(t, b, M_{\text{тр}})$ – решение ДУ; $\hat{\varphi}(t)$ – аппроксимация экспериментальных данных.

Введение функционала позволяет путём решения задачи его минимизации определить такие значения параметров как b и $M_{\text{тр}}$, при которых решение ДУ будет максимально близким к аппроксимации экспериментальных данных, следовательно, и определенные величины будут близки к реальным значениям трения в шарнирных механизмах.

С целью снижения влияния случайных выбросов, в качестве искоемых параметров приняты значения, определенные с помощью устойчивой оценки Ходжеса – Лемана [2].

Уточнение модели и расчёт

Так как створки соединяются между собой идентично (шарнирами и торсионами), параметры, определённые для механизмов соединений при раскрытии крайней створки, можно распространить и на соединения остальных створок.

Полученные в ходе эксперимента параметры использованы для уточнения модели СБ. В результате моделирования процесса раскрытия СБ [3] с учётом уточнённых данных определены время полного раскрытия БФ, последовательность раскрытия створок и моменты времени срабатывания

замков, динамические нагрузки, возникающие в процессе раскрытия, влияние процесса раскрытия на кинематику КА. На рис. 5 приведены относительные углы раскрытия створок в зависимости от времени, полученные в ходе моделирования.

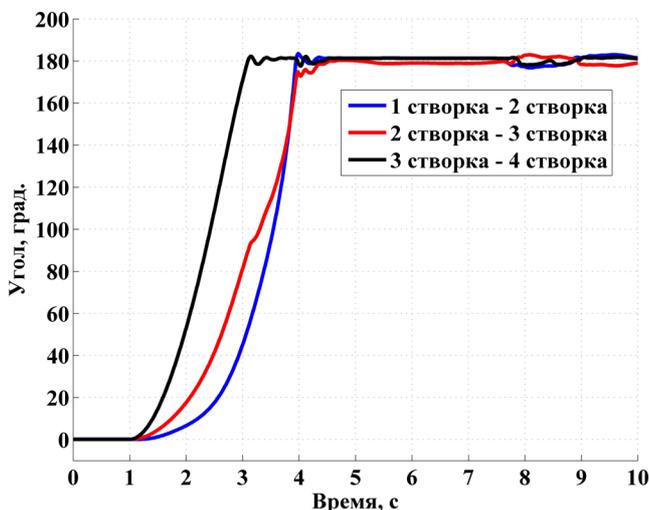


Рис. 5. Относительные углы раскрытия створок в зависимости от времени

Заключение

В работе предложен и реализован метод экспериментального определения значений параметров жёсткости и демпфирования механизмов раскрытия СБ КА «Ионосфера», не требующий наличия

специального оборудования и дополнительных испытательных образцов отдельных деталей.

Определённые в ходе эксперимента параметры использованы для уточнения модели процесса раскрытия СБ КА «Ионосфера», что позволило определить время и скорости раскрытия, силы и моменты в створках и шарнирах, а также дать рекомендации по величине необходимой затяжки пружин.

Предложенный метод может быть применён при проведении виртуальных испытаний на раскрытие солнечных батарей и других крупногабаритных раскрывающихся конструкций, испытания которых в наземных условиях затруднены либо невозможны.

Дальнейшим направлением развития работы является автоматизация алгоритма обработки экспериментальных данных и внедрение предложенного метода в постоянную практику отработки динамики и прочности КА.

Литература

1. Егоров А. И. Обыкновенные дифференциальные уравнения с приложениями. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 384 с.
2. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
3. Иванов А. А. MSC.Adams: теория и элементы виртуального конструирования и моделирования / А. А. Иванов. – М., 2003. – 97 с.

Поступила в редакцию 15.12.2014

*Леонид Игоревич Еремин, инженер.
Игорь Юрьевич Пугач, мл. научн. сотрудник.
Илья Александрович Мещихин, мл. научн. сотрудник,
т. (495) 366-33-66.
E-mail: lab186.vniiem@gmail.com.*