

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ РАСКРЫТИЯ КРЫЛЬЕВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

С.В. Елькин, А.В. Воронин
Томский политехнический университет
sve5@tpu.ru

Введение

Современные солнечные батареи космических аппаратов (СБ) представляют собой трансформируемые конструкции, отработку процессов раскрытия которых проводят на специальных испытательных стендах, обеспечивающих высокоточную имитацию условий невесомости. Тем не менее, в ходе испытаний не удается в полной мере воспроизвести реальные условия космического пространства.

Более эффективным представляется подход, сочетающий использование стендов с разработкой математических моделей трансформируемых конструкций и самого стенда [1].

При разработке любой математической модели и ее компьютерной реализации возникает очевидный вопрос оценки достоверности получаемых результатов, что связано как с адекватностью самой модели, так и с выбором методов ее исследования.

Учитывая невозможность применения разовой процедуры проверки адекватности, представляется целесообразным использование верификационного подхода на основе общих законов механики. Для пассивных механических систем можно использовать законы сохранения количества движения или сохранения кинетического момента системы. В тех случаях, когда необходимо учитывать влияние электроприводов, а также влияние различных возмущений, предпочтительным представляется использование закона сохранения энергии системы.

Построение и контроль адекватности компьютерной модели

Обычно, развертывание панелей СБ происходит за счет потенциальной энергии, запасенной в пружинах, расположенных в шарнирных соединениях конструкции.

Соответственно, процесс развертывания механической системы можно рассматривать, с энергетической точки зрения, как преобразование потенциальной энергии пружин в кинетическую энергию панелей, а затем в энергию упругих колебаний механической системы.

В качестве критерия адекватности предлагается взять разность между затраченной потенциальной энергией пружин и энергией, запасенной в деформациях шарниров плюс кинетическая энергия движения панелей. При разворачивании панелей СБ только под действием рабочих пружин кручения, на СБ не наложено никаких внешних связей. Соответственно, суммарная кинетическая энергия всех тел разворачиваемой конструкции, а также потенциальная энергия изгибных колебаний конструкции в каждый момент времени должна быть равна

затраченной потенциальной энергии рабочих пружин.

Контроль энергетики позволяет выявить неадекватность компьютерной модели, связанную не только с упрощенностью, приближенностью или даже ошибками в математической модели, но и неверным выбором метода численного интегрирования, неверным выбором шага интегрирования и т.п.

Построение модели и проверку адекватности предлагается вести параллельно с использованием двух компьютерных моделей. Первая, основная, модель описывает динамику исследуемой конструкции. Эта модель содержит минимум упрощений. Вторая модель представляет компонентную реализацию алгоритмов расчета энергетических характеристик системы. В этой модели нет необходимости использовать детальные модели твердых тел, важны только их инерционные характеристики.

Использование компонентного подхода позволяет строить модель путем ее последовательного усложнения за счет добавления новых элементов и учета новых эффектов. На первом этапе целесообразно рассматривать СБ как механическую цепь абсолютно твердых тел, соединенных пружинами. Предполагается, что очередное усложнение модели, связанное с подключением новых тел или учетом новых эффектов, может осуществляться только после того, как будет обеспечена полная энергетическая адекватность существующего варианта модели.

Расчет кинетической энергии конструкции

Кинетическая энергия механической системы W равна сумме кинетических энергий W_i всех ее звеньев:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

В качестве обобщенных координат примем углы: $\varphi_i, i = \overline{1, 4}$.

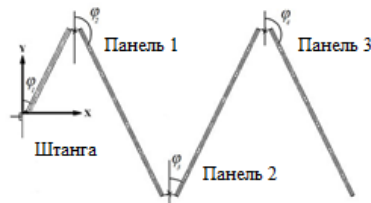


Рис. 1. Общий вид крыла трехпанельной солнечной батареи

Первое звено (штанга) совершает вращательное движение, остальные звенья рассматриваемой системы совершают плоскопараллельное движение:

$$W_1 = J_1 \frac{\dot{\varphi}_1(t)^2}{2},$$

$$W_i = J_i \frac{\dot{\varphi}_i(t)^2}{2} + m_i \frac{V_i(t)^2}{2}, i = 2, 4, \quad (2)$$

где J_1 – момент инерции штанги относительно оси вращения, J_i – центральные моменты инерции, $\dot{\varphi}_i(t)$ – угловая скорость, m_i – масса, $V_i(t)$ – линейная скорость центра масс i -ого тела.

Расчет потенциальной энергии, отдаваемой пружинами

Расчет потенциальной энергии рассмотрим на примере развертывания штанги. Будем считать пружину гуксовой. Момент $M(\varphi_1)$, создаваемый пружиной, включенной между основанием и штангой, в шарнире ШУ1 описывается уравнением

$$M(\varphi_1) = M_{\max} - k_1 \varphi_1, \quad (3)$$

где φ_1 – угол раскрутки пружины, M_{\max} – максимальное значение момента, создаваемое полностью свернутой пружиной, k_1 – жесткость пружины. Считается, что в начальном состоянии $\varphi_1 = 0$. Полный угол раскрутки пружины, при котором момент нулевой, составляет

$$\varphi_{\max} = M_{\max} / k_1 \text{ рад} \quad (4)$$

Штанга развертывается на угол 1.57 рад., соответственно после раскрутки пружина в ШУ1 прикладывает к штанге момент равный

$$M(1.57) = m_{\max} - k_1 * 1.57 \text{ Нм} \quad (5)$$

Теперь рассмотрим энергию. Пусть спиральная пружина жесткостью k_1 растянута на угол φ . Потенциальная энергия растянутой пружины равна $E = k_1 \varphi^2 / 2 \text{ Дж}$. Будем считать, что в нашем случае спиральная пружина закручена в начальный момент на φ_{\max} рад. Это дает полный запас потенциальной энергии

$$E_{\max} = k_1 * \varphi_{\max}^2 / 2 \text{ Дж} \quad (6)$$

После полного развертывания штанги оставшийся запас энергии пружины составляет

$$\Delta E = k_1 * (\varphi_{\max} - 1.57)^2 / 2 \text{ Дж} \quad (7)$$

Истраченную потенциальную энергию пружины проще всего рассчитывать как

$$E_{\max} - \Delta E(\varphi) \quad (8)$$

На рис. 2 представлены энергетические графики, позволяющие оценить адекватность компьютерной модели разворачивающейся штанги. До момента T происходит развертывание штанги на угол $\pi / 2$, затем шарнир чокаруется и конструкция переходит в режим упругих колебаний.

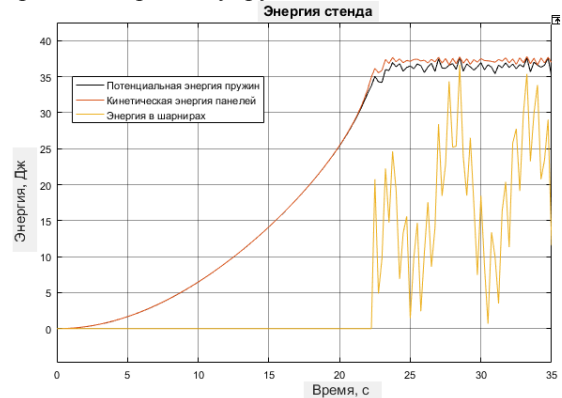


Рис. 2 Графики энергетических процессов

Из графиков истраченной потенциальной энергии пружин (красный график), накопленной кинетической энергии элементов СБ (черный график) и потенциальной энергии в шарнире (желтый график) видно, что разбалансировка имеет место в моменты, когда кинетическая энергия максимальна, а потенциальная минимальна. Это говорит о том, что либо неверно измеряется угловая скорость штанги, либо не совсем неверно определен ее кинетический момент. Подстройка кинетического момента позволила энергетически сбалансировать модель.

Видно, что в точках, где вся основная энергия сосредоточена в деформации шарнира ШУ1 графики практически полностью совпадают. При этом кинетическая энергия минимальна. Большие же расхождения имеют место там, где энергия пружин практически полностью трансформировалась в кинетическую энергию движения штанги и панелей. Учитывая, что момент инерции штанги можно считать достаточно точно известным, причиной отклонения следует предположить неверный расчет кинетической энергии корневой панели.

Список использованных источников

1. С.В. Борзых, Р.И. Ильясова Моделирование и экспериментальная отработка процесса раскрытия крупногабаритных многозвенных солнечных батарей космических аппаратов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012