

Улучшение методики испытаний механических систем космических аппаратов

Романенко И.В.

*Компания «Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнева», ул. Ленина, 52, Железногорск,
Красноярский край, 662972, Россия
e-mail: ivrmail@mail.ru*

Аннотация

Предложен метод анализа динамики раскрытия механических систем с учетом влияния испытательного оборудования. Суть метода заключается в моделировании механической системы и испытательного оборудования, прогнозировании результатов испытаний, определении влияния испытательного оборудования, оценке эффективности планируемых испытаний. Применение метода позволяет сократить временные затраты на этапе проектирования, выбрать наиболее эффективное испытательное оборудование, провести испытания максимально результативно. Приводится пример анализа динамики раскрытия крыла батареи солнечной с учетом системы обезвешивания.

Ключевые слова: космический аппарат, наземная экспериментальная отработка, анализ динамики раскрытия.

Космический аппарат (КА) содержит множество механических устройств и систем, без успешной работы которых невозможно выполнение целевых задач аппарата. На этапе выведения КА на орбиту механические системы находятся в

транспортировочном положении. После выхода КА на заданную орбиту механические системы раскрываются в рабочее положение. Основными механическими системами в составе КА являются: крылья батарей солнечных (БС) и трансформируемые антенны. [1]

Для обеспечения успешного перевода механических систем из транспортировочного в рабочее положение необходимо на этапе изготовления КА провести наземную экспериментальную отработку систем. Одним из видов проводимых испытаний являются испытания по проверке функционирования механических систем.

Основные задачи испытаний по проверке функционирования:

- Проверить превышение движущих сил в шарнирных узлах над силами сопротивления с определенным запасом;
- Проверить соблюдение логики раскрытия;
- Проверить зачеховку шарнирных узлов в рабочем положении.

Также в процессе наземной экспериментальной отработки появляется необходимость определить различные характеристики механической системы, например, максимальные изгибающие нагрузки при зачеховке в рабочем положении.

При проведении испытаний в наземных условиях необходимо минимизировать действие силы тяжести на шарнирные узлы механической системы. Для выполнения данной задачи применяются системы обезвешивания.

Система обезвешивания оказывает влияние на результаты испытаний механической системы. Влияние вызвано инерционностью подвижных объектов

системы обезвешивания, наличием трения в месте их контакта, отклонением обезвешивающего усилия от заданного номинального значения, отклонением вектора обезвешивающего усилия от вертикали. Все эти факторы могут исказить получаемые результаты и даже привести к невыполнению основных задач испытаний. Для учета перечисленных выше факторов и оценки их влияния предлагается в методику проведения испытаний ввести этап анализа динамики раскрытия механической системы с учетом системы обезвешивания.

На этапе проектирования анализ динамики позволит получить информацию о поведении механической системы, ее работоспособности, назначить требования к разрабатываемому испытательному оборудованию с целью минимизации его влияния на процесс испытаний. На этапе подготовки к испытаниям анализ динамики раскрытия может использоваться для нахождения наиболее результативной схемы испытаний. На этапе проведения испытаний использование предлагаемого анализа позволит выполнить эффективный анализ результатов испытаний, оценить влияние испытательного оборудования.

Рассмотрим аспекты применения анализа динамики раскрытия на примере крупногабаритного трансформируемого крыла БС космического аппарата.

На этапе проектирования оборудования, необходимого для испытаний по проверке функционирования крыла БС, основными задачами анализа динамики являются:

- Определение параметров функционирования крыла БС в условиях невесомости (время раскрытия, угловые скорости элементов, нагрузки в критических сечениях конструкции);

- Определение параметров функционирования крыла БС с учетом влияния системы обезвешивания, сравнение с параметрами раскрытия в условиях невесомости;

- Определение требований к системе обезвешивания. Определение ключевых параметров, оказывающих максимальное влияние на процесс раскрытия.

Анализ динамики состоит из следующих основных этапов:

- Формирование исходных данных для моделирования по исходной механической системе;

- Формирование геометрической модели в программном комплексе;

- Задание массово-инерционных характеристик объектов модели;

- Задание кинематических связей между объектами модели;

- Задание всех активных сил.

Модель крыла БС и модель стендового оборудования представлена абсолютно жесткими телами, соединенными шарнирами с вращательной или линейной степенью свободы.

Активными силами для крыла БС являются: движущие моменты в пружинных приводах, внутренние моменты сопротивления в ШУ, моменты в ШУ от системы синхронизации, аэродинамическое сопротивление панелей. Для стенда обезвешивания активными силами являются: силы трения в движущихся объектах, усилия в пружинах вывески.

Основные проблемы, усложняющие моделирование раскрытия крыла БС на стенде:

- описание работы системы синхронизации крыла БС;

- описание работы электромеханического привода;
- описание трения между подвижными объектами стенда.

Для определения величины моментов в ШУ от системы синхронизации в программном комплексе создана функция, в которой задан следующий закон:

$$\begin{aligned} M_{CC}^i &= C_{CC} \cdot r_i (\varphi_{i+1} \cdot r_{i+1} - \varphi_i \cdot r_i) \\ M_{CC}^{i+1} &= C_{CC} \cdot r_{i+1} (\varphi_{i+1} \cdot r_{i+1} - \varphi_i \cdot r_i), \text{ где} \end{aligned}$$

- M_{CC}^i, M_{CC}^{i+1} - моменты от системы синхронизации в паре синхронизируемых ШУ;

- C_{CC} - жесткость тяги системы синхронизации;
- φ_i, φ_{i+1} - углы раскрытия пары синхронизируемых ШУ;
- r_i, r_{i+1} - радиусы роликов системы синхронизации пары синхронизируемых ШУ.

ШУ.

Для описания работы электромеханического привода, регулирующего общую скорость раскрытия крыла БС, в программном комплексе была создана функция, в которой задан следующий закон:

$$\begin{cases} C_{ЭМП} \cdot (\omega_{ЭМП} \cdot time - \varphi_{ШУ-2}) & \text{при } M_{ЭМП} < M_{муфта} \\ M_{ЭМП, мин} & \text{при } M_{ЭМП} > M_{муфта} \end{cases}, \text{ где}$$

- $C_{ЭМП}$ - жесткость выходного вала ЭМП;
- $\omega_{ЭМП}$ - угловая скорость выходного вала ЭМП;
- $time$ – текущее время раскрытия крыла БС;
- $\varphi_{ШУ-2}$ - угол раскрытия ШУ-2, в котором установлен ЭМП;
- $M_{муфта}$ - момент, при котором срабатывает муфта ЭМП.

- $M_{ЭМП.мин}$ – момент, возникающий после срабатывания муфты ЭМП.

Усилие трения в подвижных объектах стенда описывается функцией с заданным законом:

$$F = k \cdot N, \text{ где}$$

- k - коэффициент трения;

- N - нормальная реакция в месте контакта объектов.

В программном комплексе созданы датчики, измеряющие значения реакций N в процессе расчета.

После создания всех необходимых геометрических тел, задания их массово-инерционных характеристик, силовых элементов и взаимосвязей между ними проведен расчет динамики раскрытия.

С использованием расчетной модели определены траектории движения раскрываемых элементов, угловые скорости, время раскрытия и нагрузки, возникающие в критичном сечении при зачековке крыла БС в рабочем положении. Основной характеристикой крыла БС является остаточный движущий момент в шарнирных узлах – это движущий момент, за вычетом всех моментов сопротивления движению. Данный параметр определяет характер раскрытия механической системы, а также нагрузки, возникающие при зачековке в рабочем положении.

По результатам анализа динамики раскрытия, ключевым параметром системы обезвешивания является угол отклонения вектора обезвешивающего усилия от вертикали. При этом горизонтальные составляющие усилия от вывески создают моменты сопротивления раскрытию элементов крыла БС. При значительном

отклонении вектора обезвешивающего усилия от вертикали раскрытие может вовсе остановиться, потому что момент сопротивления от системы обезвешивания превысит движущий момент в ШУ крыла БС.

Наибольшее влияние на этот параметр оказывают усилия трения, возникающие в подвижных объектах системы обезвешивания. В процессе анализа разработаны меры по уменьшению влияния усилий трения на процесс раскрытия крыла БС, определены максимально допустимые значения.

На этапе проектирования механической системы и проектирования испытательного оборудования с использованием анализа динамики раскрытия определены характерные особенности функционирования испытываемого крыла БС, выбрана система обезвешивания и назначены требования к ее ключевым параметрам. Следующим этапом является корректировка и уточнение расчетной модели на этапе подготовки к испытаниям. Как правило, на этом этапе конструкция объекта испытаний окончательно определена и объект изготовлен. Появляется возможность уточнить исходные данные и провести корректировку расчетной модели. Уточнение исходных данных происходит по средствам экспериментального измерения характеристик испытываемой механической системы.

На этапе подготовки к испытаниям уточняется итоговая масса раскрываемых элементов крыла БС, пересчитывается момент инерции элементов относительно оси вращения ШУ, а также измеряются действительные значения остаточного движущего момента в каждом ШУ. Проведенные корректировки расчетной модели обеспечат результаты, наиболее приближенные к результатам испытаний.

Этап испытаний предоставляет возможность провести верификацию составленной расчетной модели. Неотъемлемой частью верификации является измерение параметров механической системы во время испытаний и сравнение их с расчетными значениями. Наиболее полный объем измеренных параметров механической системы позволяет провести более качественную верификацию расчетной модели.

Результаты проведенных испытаний по проверке функционирования крыла БС доказали адекватность разработанной расчетной модели. Подтвержден порядок зачековки ШУ и логика раскрытия элементов крыла БС. Разница между измеренными и рассчитанными угловыми скоростями движения панелей крыла БС составила не более 8%. На рисунке 1 приведены графики угловой скорости одной из панелей крыла БС, полученные по результатам испытаний и расчета.

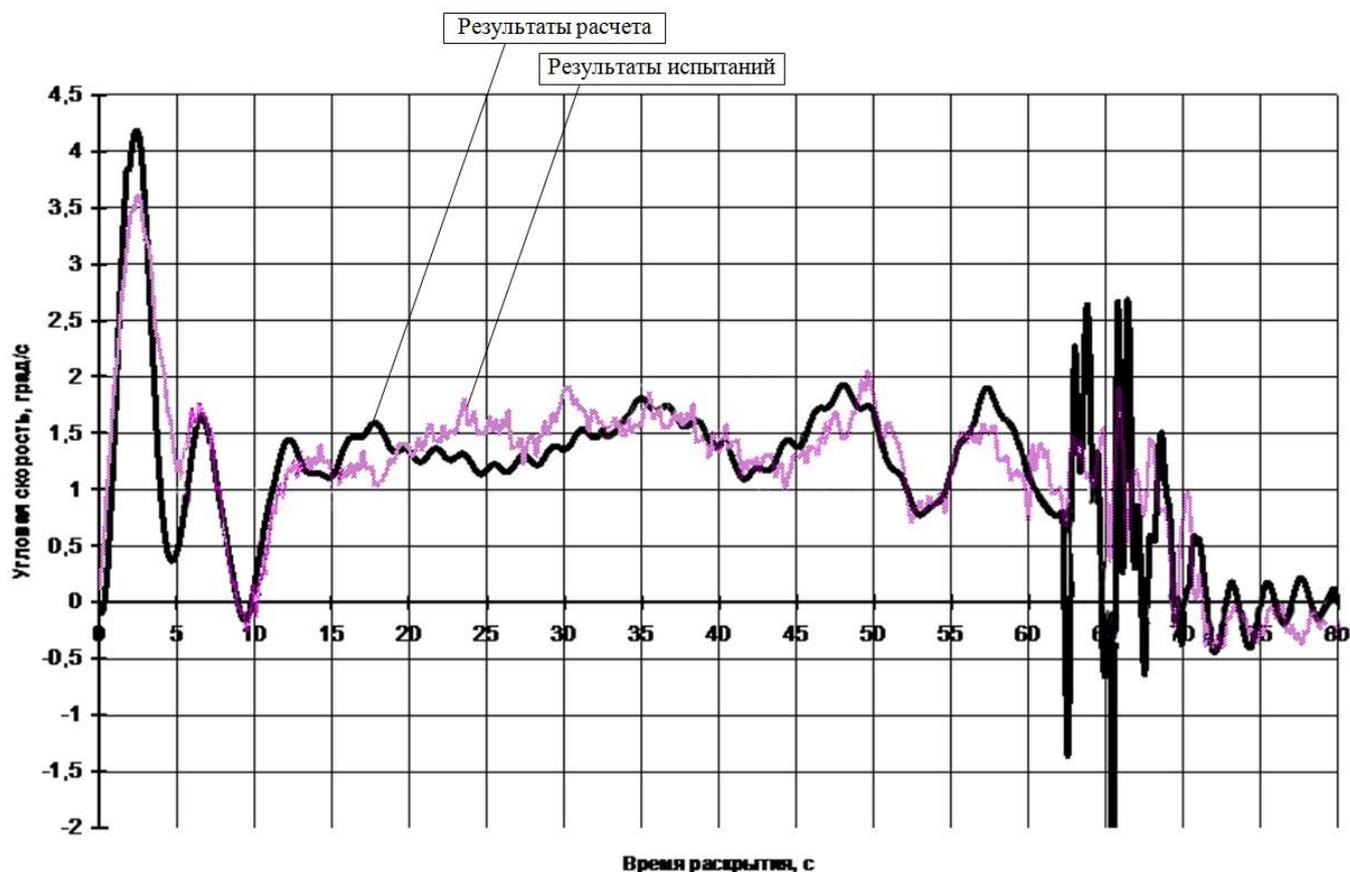


Рис. 1. Графики угловых скоростей в одном из ШУ крыла БС

С использованием расчетной модели определено критичное сечение конструкции и максимальные моментные нагрузки, действующие в нем во время зачеховки крыла солнечной батареи. Для подтверждения величины нагрузок экспериментальным путем разработана схема испытаний, имитирующих раскрытие крыла БС со штатной скоростью при зачеховке. График изгибающего момента от времени раскрытия, полученный по результатам испытаний представлен на рисунке 2. График, полученный по результатам расчета – на рисунке 3. Разница между расчетным и испытательным значением составляет 6%. Хорошая сходимость результатов подтверждает корректность составленной расчетной модели.

С использованием расчетной модели крыла БС и системы обезвешивания стало возможным провести дополнительный анализ полученных результатов испытаний. Одной из поставленных перед анализом задач являлось определение компонентов, составляющих моментные нагрузки на выходной вал электромеханического привода, установленного в одном из ШУ крыла БС.

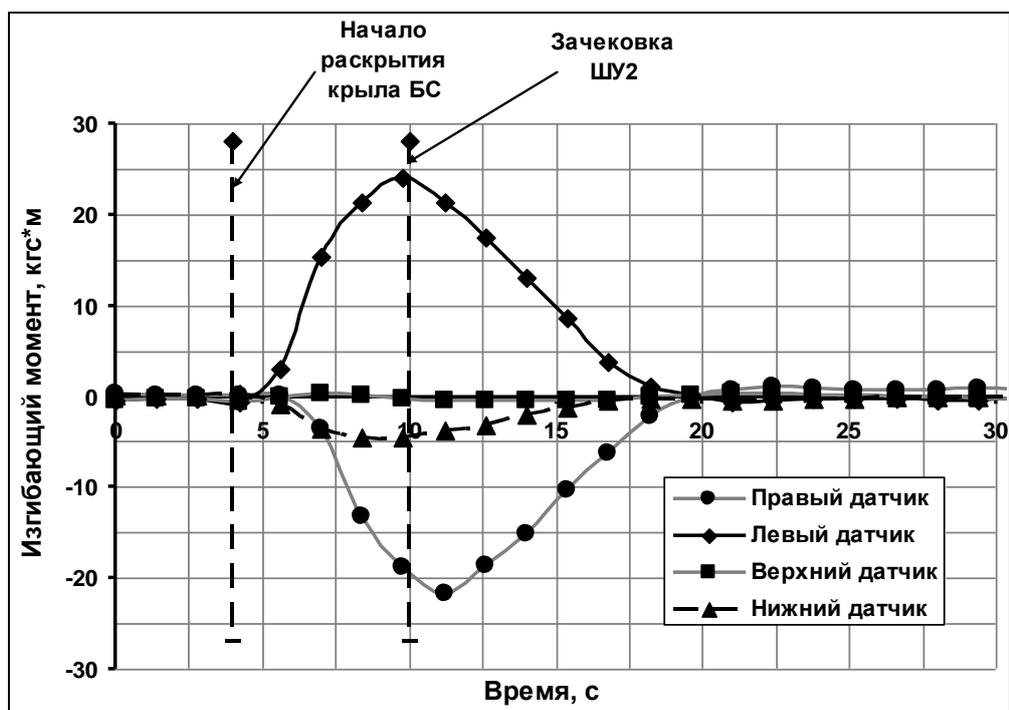


Рис. 2. График изгибающего момента, измеренный на испытаниях



Рис. 3. График изгибающего момента, полученный по результатам расчета

В расчетной модели имеется возможность оценить влияние на искомый параметр каждого из заданных испытательных условий. В ходе анализа определены

величины момента на выходном валу привода от действия системы обезвешивания, собственных раскрывающих сил и действия системы синхронизации. Провести оценку влияния на искомый момент усилий от действия системы обезвешивания аналитическим путем достаточно проблематично. Измерение экспериментальным путем также представляет проблему, потому что нет возможности изолировать влияние системы обезвешивания от составляющих момента на выходном валу привода. С использованием верифицированной на предыдущем этапе расчетной модели определена каждая составляющая момента. Разница между измеренными на испытаниях и расчетными значениями момента составила 9%. Проведенный анализ позволил получить более полную информацию о поведении испытанной механической системы.

В процессе выполнения описанных в данной статье работ была разработана методика анализа поведения механической системы с учетом наземных испытательных условий. Основным средством анализа является математическое моделирование динамики раскрытия крупногабаритных трансформируемых механических систем и работы систем обезвешивания. Определены характерные особенности каждого этапа моделирования, отработан процесс построения и верификации расчётной модели. На рисунке 4 представлен общий вид крыла БС на испытаниях и расчетной модели, составленной в программном комплексе.

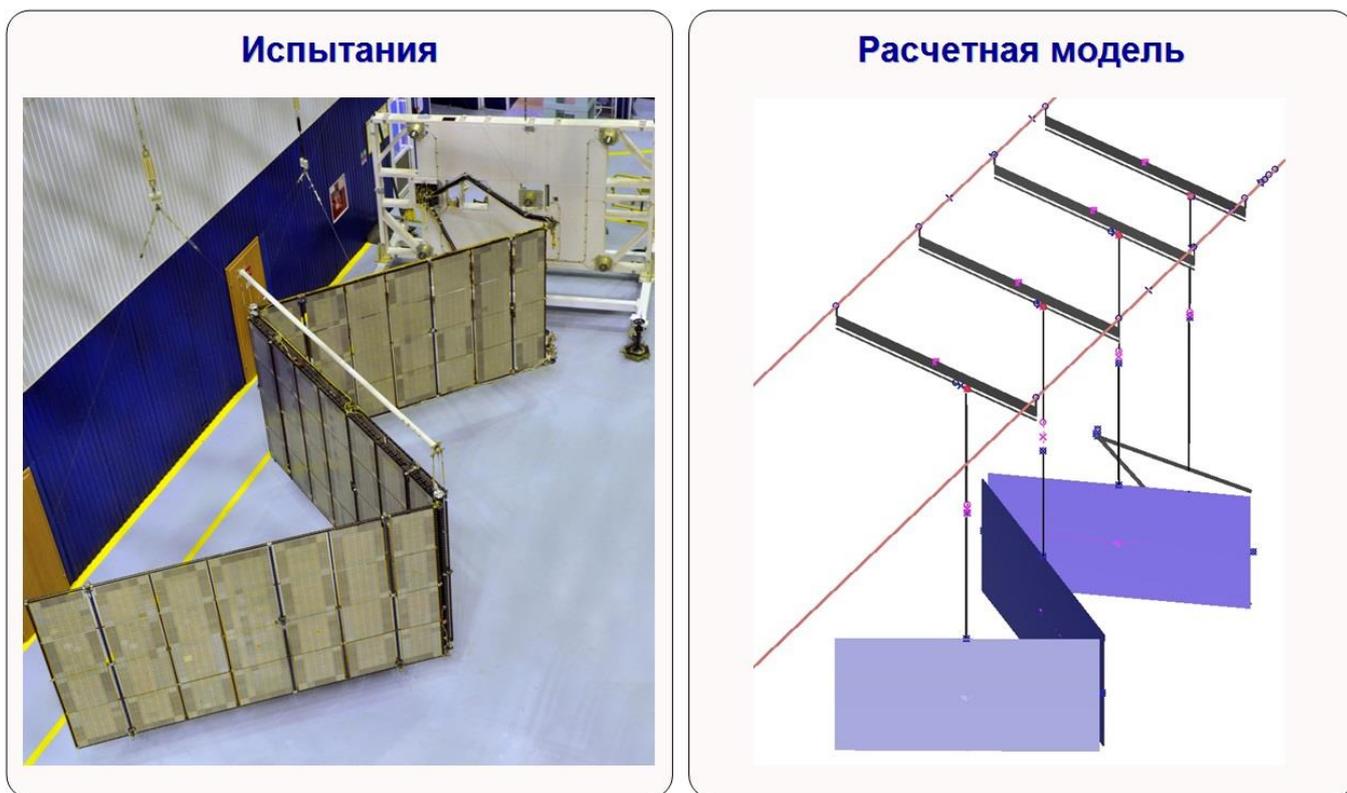


Рис. 4. Крыло БС в процессе раскрытия

С применением моделирования на этапе проектирования определены закономерности движения, основные параметры функционирования и возникающие нагрузки при раскрытии крыла БС в рабочее положение. На этом этапе также выбрана наиболее эффективная для данного объекта испытаний система обезвешивания и назначены требования к ее ключевым параметрам.

На этапе испытаний уточненная расчетная модель успешно прошла верификацию и с ее помощью определены максимальные нагрузки, возникающие в критическом сечении конструкции. Проведен анализ нескольких схем испытаний для подтверждения величин этих нагрузок и выбрана наиболее эффективная их них. Разница между расчетным и измеренным значением составила 6%.

В заключении следует отметить полезные эффекты от усовершенствования методики испытаний введением анализа динамики раскрытия:

- Сокращение времени проектирования системы обезвешивания. С применением компьютерного анализа появилась возможность оценить работоспособность разрабатываемых испытательных схем и оборудования. Оценить верность принятых конструктивных решений;

- Определение ключевых параметров системы обезвешивания перед началом испытаний и обеспечение минимального влияния системы обезвешивания на результаты испытаний;

- Оценка влияния системы обезвешивания на результаты испытаний;

- Повышение эффективности анализа результатов испытаний.

Разработанные расчетные модели являются универсальными и с минимальными доработками могут применяться для анализа динамики раскрытия различных механических систем производства ОАО «ИСС».

Библиографический список

1. Spacecraft systems engineering / edited by Peter Fortescue, Graham Swinerd, John Stark.- 4th ed. 2011.- 691 p.

2. Михалкин В.М., Романенко И.В. Анализ применимости системы обезвешивания пассивного типа для крупногабаритного крыла батареи солнечной // Материалы XVII международной научной конференции «Решетнёвские чтения». Красноярск, Россия, 14 ноября 2013, Ч.1, С. 88–89.