

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЁТОМ УПРУГИХ СВОЙСТВ И ИЗМЕНЯЕМОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Е.А. Канунникова, А.Д. Беленький,
В.Н. Васильев, Д.В. Гриневич
(ОАО «Корпорация ВНИИЭМ»)

Предложены новая постановка и программная реализация создания динамической модели космического аппарата, позволяющие одновременно и в полном объёме учесть уравнения системы ориентации, а также упругие и кинематические особенности конструкции. Модель была создана при помощи интеграции различных программных пакетов: Adams (моделирование кинематики), MATLAB (моделирование системы управления) и Nastran-Patran (моделирование упругих конструкций). Были проведены тестовые расчёты для проверки функциональности модели и для её верификации.

Ключевые слова: космический аппарат, математическая модель, компьютерное моделирование, упругие колебания, система ориентации, стабилизация.

При разработке систем ориентации (СО) космических аппаратов (КА) и оценке достижимой точности стабилизации КА на орбите возникает широкий спектр задач, связанных с анализом движения КА.

Среди них можно выделить три класса задач, относящихся к различным инженерным направлениям:

- движение КА как твёрдого тела под действием системы ориентации;
- упругие колебания элементов конструкции КА [1];
- изменение конфигурации КА – раскрытие трансформируемых конструкций, поворот солнечных батарей [2].

Традиционно эти задачи решаются отдельными группами специалистов по теории регулирования, теории упругости и механике механизмов с применением специализированных программ и программных комплексов. Так наиболее универсальным и развитым для моделирования методом исследования в механике конструкций является метод конечных элементов (МКЭ). Для моделирования сложной кинематики механизмов также используются специализированные программы (Adams), для моделирования систем ориентации – программы MATLAB Simulink и Easy5, т. е. моделирование системы управления КА и динамики упругих элементов конструкции ведутся параллельно и независимо, как это изображено на рис. 1.

Такой подход позволяет вполне успешно решать отдельные задачи динамики КА, однако возможность учёта в модели «смежных» факторов (например влияние упругих колебаний КА на работу системы ориентации или влияние изменчивости конструкции), как правило, ограничена и довольно трудоёмка.

Современные КА могут содержать большое количество упругих элементов (солнечные батареи, антенны), протяжённые раскрывающиеся конструкции, что приводит к необходимости связного решения задач управления движением и динамики упругой системы. Этим объясняется возрастающий в последнее время интерес к созданию универсальных моделей, способных комплексно учитывать разнородные факторы, имитирующие реальный объект.

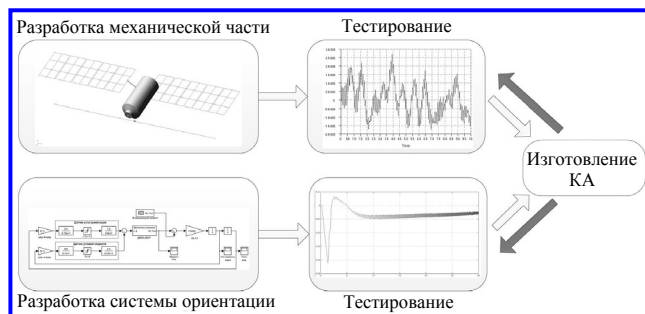


Рис. 1. Раздельная разработка конструкции и системы управления

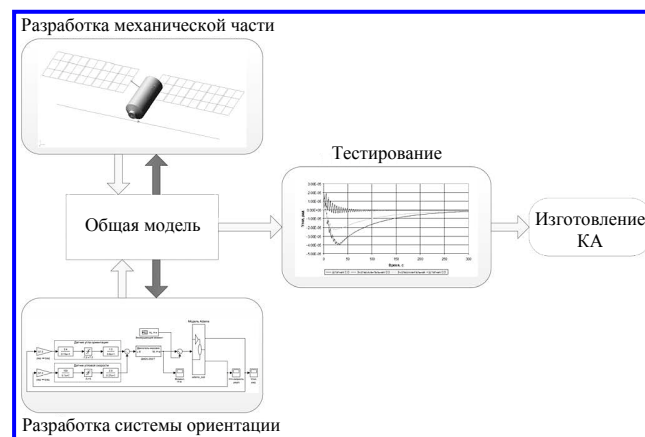


Рис. 2. Совместная разработка конструкции и системы управления

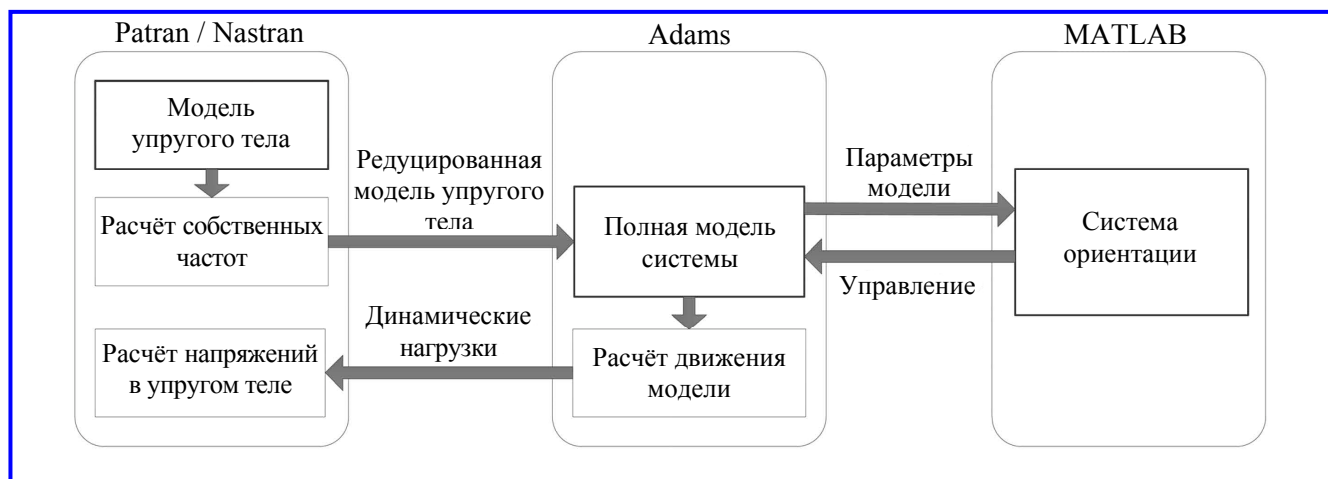


Рис. 3. Алгоритм создания единой динамической модели

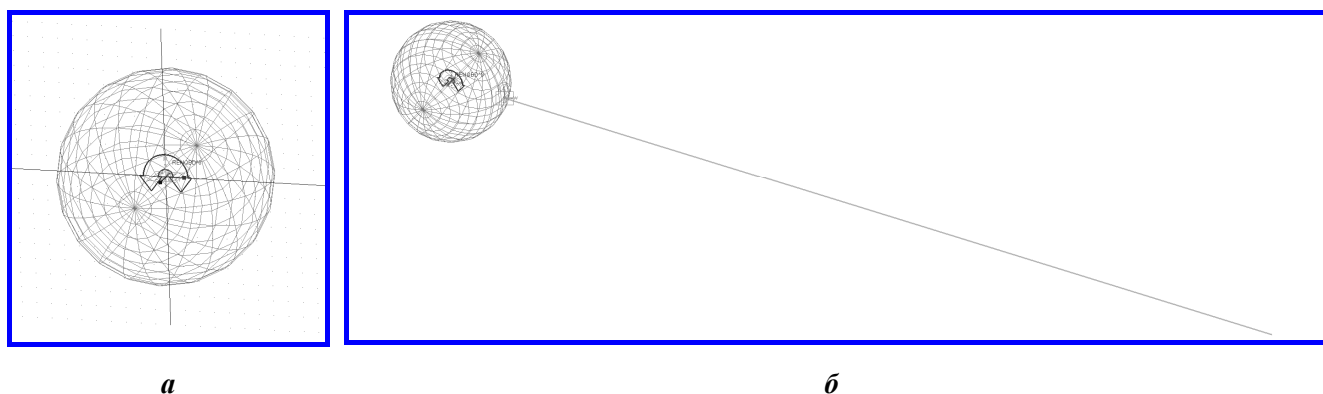


Рис. 4. Тестовые задачи: *a* – абсолютно твёрдое тело; *б* – твёрдое тело с прикреплённой упругой балкой

Основной целью работы являлась разработка и верификация алгоритма создания универсальной модели для анализа динамики управляемого КА с учётом изменяемой геометрии, упругих свойств и системы ориентации. Для этого была сформулирована и реализована в программных комплексах Adams, Nastran и MATLAB Simulink задача совместного решения уравнений движения свободного упругого тела и уравнений системы ориентации КА.

Создание такой модели позволит исследовать взаимодействие системы управления и механической модели (возможно нелинейной и упругой) [3], как это показано на рис. 2.

Выбор программных средств, используемых при разработке модели, был продиктован их распространённостью, наличием опыта применения на предприятии и взаимной совместимостью. В результате были выбраны программы:

- системы Adams и MATLAB – Adams – программа для расчёта кинематики сложных механических систем [3];

- Nastran – конечно-элементный комплекс с широким спектром возможностей для моделирования

конструкций;

- MATLAB Simulink – пакет прикладных программ для моделирования, имитации и анализа динамических систем, наиболее часто используемый разработчиками систем управления.

Системы Adams и MATLAB являются совместимыми и позволяют проводить совместный расчёт управляемой модели [4].

Кроме того в Adams также предусмотрена возможность учёта податливости компонентов исследуемого механизма путём импорта результатов динамического расчёта этих компонентов из Nastran [5].

Таким образом, создаётся возможность реализовать в перечисленных программных комплексах задачу совместного решения уравнений движения свободного упругого тела и уравнения системой ориентации КА. Алгоритм расчёта указан на рис. 3.

Для проверки корректности совместной работы используемых программных средств были рассмотрены следующие тестовые задачи:

- движение управляемого абсолютно твёрдого тела (рис. 4, *a*);

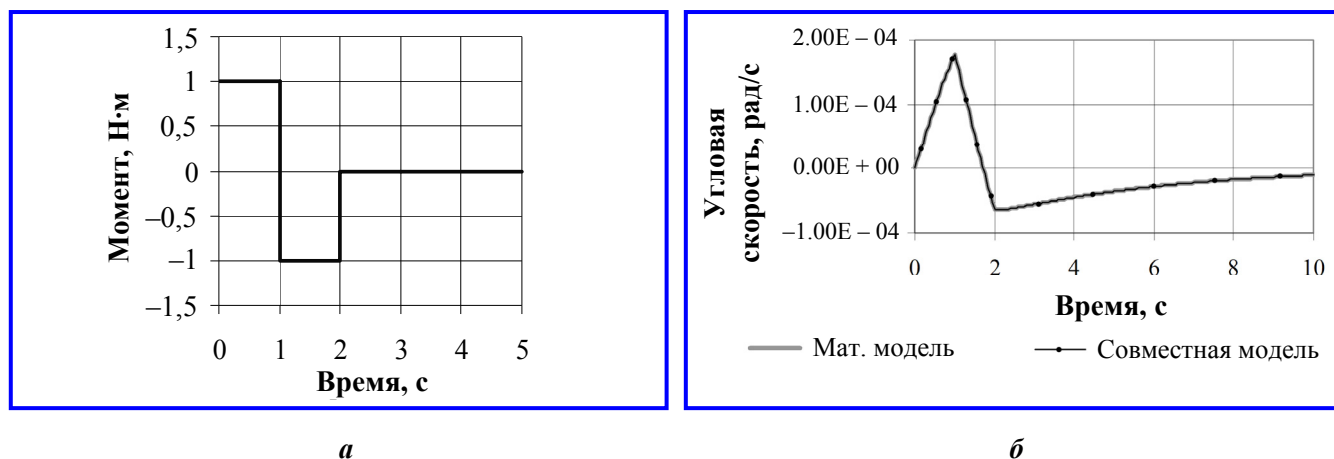


Рис. 5. Расчёт движения твёрдого тела: *a* – приложенный момент; *б* – угловая скорость

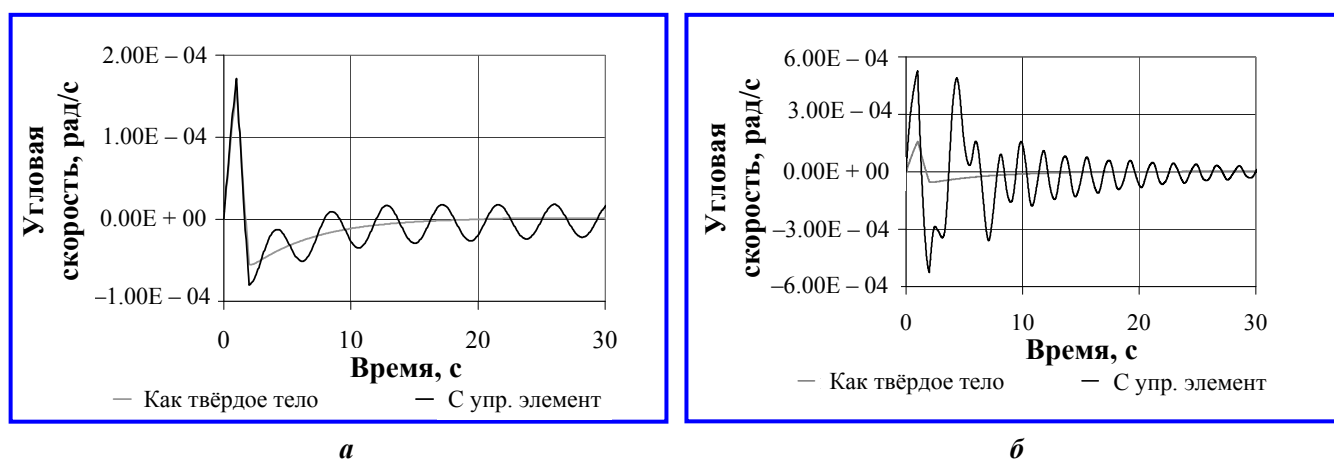


Рис. 6. Угловая скорость тела с упругой балкой: *a* – ($I_{упр}/I_{т.т.} = 1/10$); *б* – ($I_{упр}/I_{т.т.} = 5$)

– движение управляемого твёрдого тела с прикреплённым к нему упругим элементом.

Хотя в данной статье акцент смещён в сторону расчёта динамики системы, а не проблем управления КА, для решения тестовых задач необходимо задать какую-либо систему управления. В качестве такого алгоритма управления использовалась схема системы ориентации КА «Метеор-М» № 1, краткая характеристика которой будет приведена ниже.

Решение для абсолютно твёрдого тела имеет аналитическое выражение, которое должно быть одинаковым в любых применяемых программах. На рис. 5, б показаны результаты расчёта угловой скорости твёрдого тела, к которому в начальный момент времени был приложен импульс момента (рис. 5, а), в программе MATLAB без подключения и с подключением блока Adams. Видно, что они полностью совпадают между собой, следовательно, можно сделать вывод, что обмен данными между программами реализован корректно.

В задаче с упругой балкой было рассмотрено два варианта системы:

– момент инерции центрального твёрдого тела больше момента инерции упругого элемента ($I_{упр}/I_{т.т.} = 1/10$);

– момент инерции центрального твёрдого тела меньше момента инерции упругого элемента ($I_{упр}/I_{т.т.} = 5$).

Представленные на рис. 6 результаты демонстрируют, что при движении тела проявляются упругие колебания балки, вклад которых в общее движение растёт с ростом момента инерции упругого элемента, т. е. упругие параметры системы передаются из Adams в MATLAB, и вид решения отражает физические закономерности.

Успешное решение тестовых задач позволило перейти к более сложным моделям.

Для этой цели был выбран КА «Метеор-М» № 1, так как и модель системы ориентации [6], и расчётная модель в Nastran были к этому моменту разработаны и проверены, что позволило сосредоточить

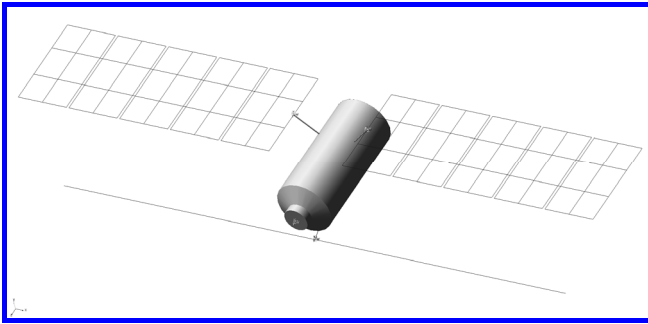


Рис. 7. Модель КА «Метеор-М» № 1 в Adams

Динамическая модель КА «Метеор-М» № 1 в Adams представляет собой центральное твёрдое тело с присоединенными к нему упругими элементами, созданными в Nastran – солнечными батареями (СБ) и антенной локатора (рис. 7), что позволяет учитывать требуемое количество форм колебаний этих элементов. В данной работе вычисляется 50 форм для каждого крыла СБ и 50 форм для антенны локатора.

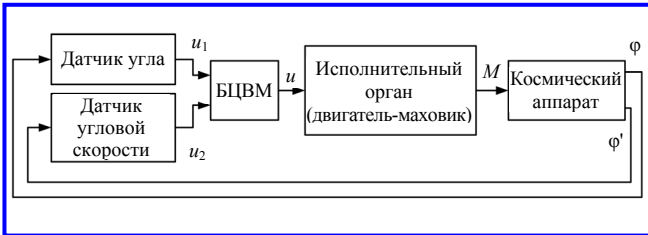


Рис. 8. Схема канала системы ориентации КА

В системе ориентации КА «Метеор-М» № 1 (рис. 8) управляющий момент создается за счёт инерционных вращающихся масс (исполнительные органы – электродвигатели – маховики). Кроме того в её состав входят датчики углов ориентации, датчики угловой скорости и бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ). Датчики угла и угловой скорости выдают информацию u_1 и u_2 об угловом положении и угловой скорости КА. На основе этой информации БЦВМ вырабатывает требуемый сигнал управления двигателя-маховика u . Двигатель-маховик создает управляющий момент M , который действует на КА [6].

внимание на отработку алгоритма взаимосвязи задач управления и динамики в единой модели.

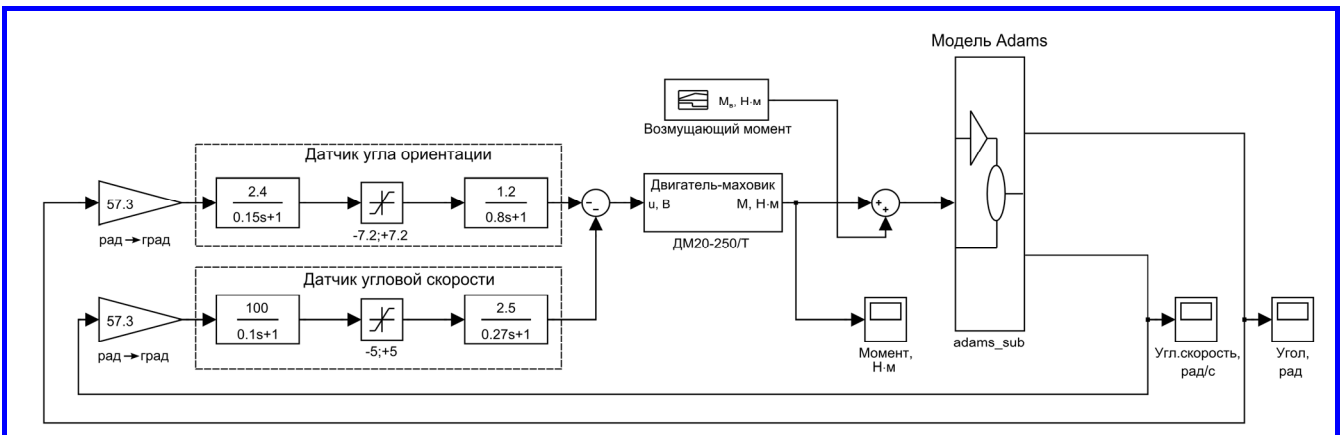


Рис. 9. Математическая модель канала системы ориентации с интеграцией модели Adams

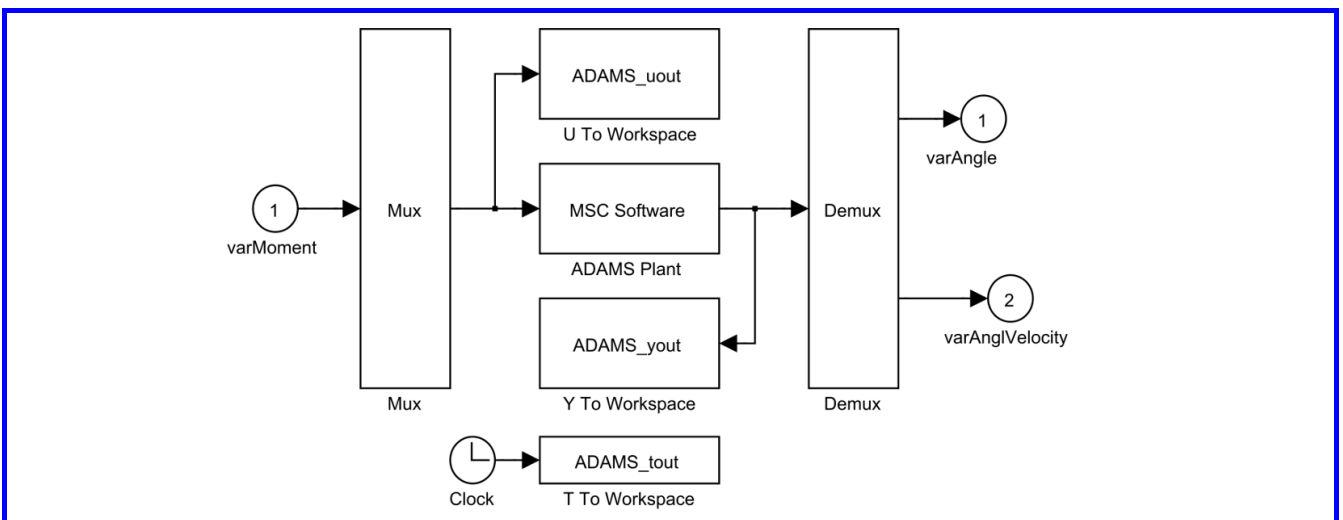
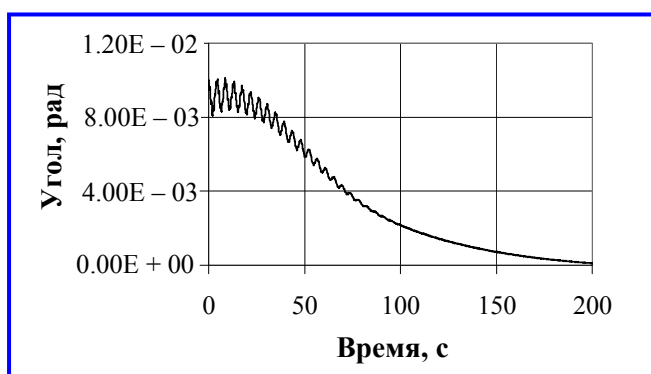
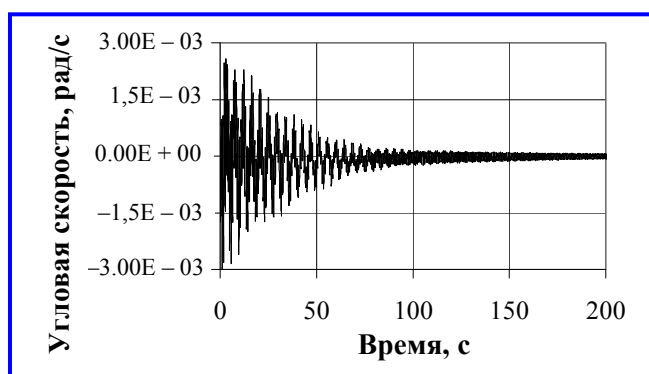


Рис. 10. Блок Adams_sub, обеспечивающий интеграцию модели Adams со средой MATLAB



а



б

Рис. 11. Результаты расчёта: а – угол и угловая скорость; б – поворота КА относительно оси Z

На рис. 9 изображена математическая модель системы ориентации относительно одной оси с интегрированной моделью тела из Adams. На рис. 10 подробно изображён блок, обеспечивающий интеграцию системы управления и механической модели. На каждом шаге происходит обмен переменными: входной переменной – моментом и выходными – углом и угловой скоростью.

Полученная модель позволяет моделировать движение КА под действием начальных условий, приложенных моментов, колебаний упругих элементов и работы системы стабилизации.

Приведём два наиболее показательных примера.

Основной тон колебаний СБ возбуждается при вращении относительно оси гермоотсека (ось Z КА). На рис. 11, 12 показаны угол, угловая скорость и управляющий момент, создаваемый системой ориентации КА, при начальном отклонении угла относительно оси Z на 0,01 рад (0,573 град).

Из рисунков видно, как благодаря действию управляющего момента происходит затухание колебаний по углу и угловой скорости. Наглядным является и график управляющего момента: видно, как очень большой угол отклонения в начальный момент заставляет работать систему ориентации с максимально возможным моментом маховика 0,2 Н·м, а по мере стабилизации КА момент резко падает.

Другим интересным примером, который наглядно демонстрирует возможности представленной модели, является случай поворота СБ КА относительно корпуса. СБ поворачивается за время 100 с от 40° до 21°, как показано на рис. 13, а. Такое вращение СБ приводит к вращению всего КА относительно центра масс. Результаты расчёта угла поворота КА приведены на рис. 13, б для двух случаев: без СО и с подключённым каналом СО по оси X. Как видно из графиков система ориентации не позволяет КА отклониться от требуемого положения.

Угловая скорость КА и управляющий момент, создаваемый системой ориентации, для этого случая приведены на рис. 14, а, б.

Как видим, в обоих случаях полученные результаты весьма наглядны и удобны для физического понимания процессов взаимодействия СО и движущихся элементов (упругих или механизмов) КА.

Основным результатом работы является практическая реализация нового подхода к созданию динамической модели КА на основе совместного применения комплекса современных программных средств. Предложенная постановка позволяет одновременно и в полном объёме учесть уравнения системы ориентации, а также упругие и кинематические особенности конструкции.

На примере КА «Метеор-М» № 1 показано, что модель позволяет смоделировать основные особенности динамического поведения КА – управляемое движение относительно центра масс, упругие колебания элементов конструкции, изменение конфигурации КА (например поворот солнечной батареи) и проанализировать:

– влияние упругих колебаний элементов конструкции на работу системы ориентации;

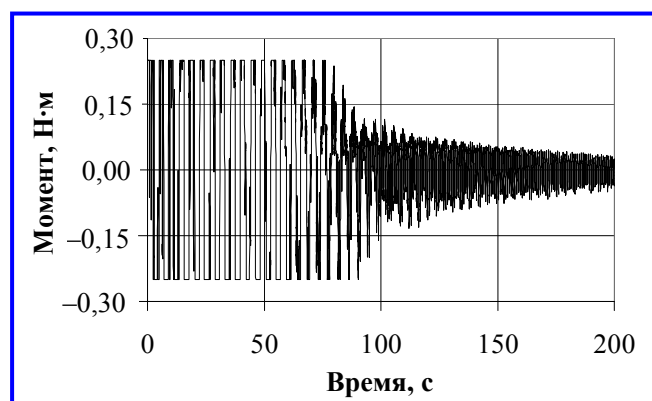
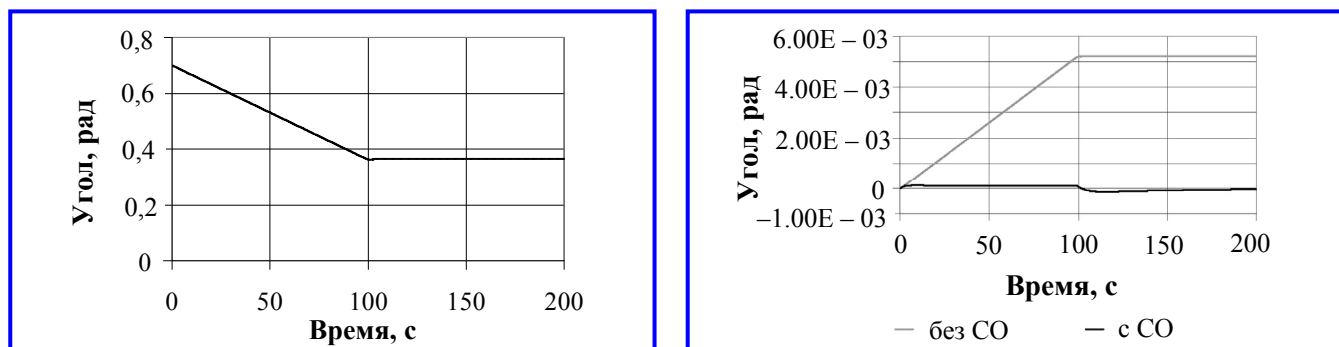
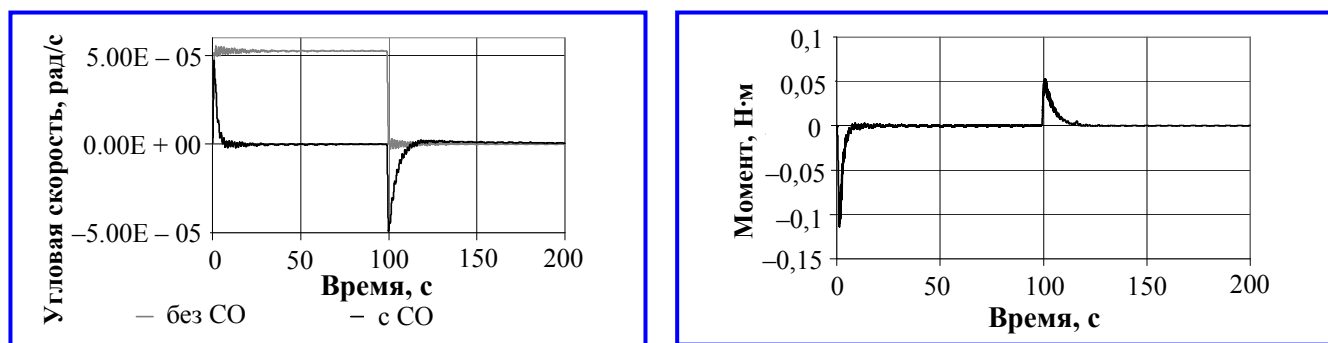


Рис. 12. Управляющий момент СО КА относительно оси Z



а **б**
Рис. 13. Угол поворота относительно оси X СБ (а) и КА (б)



а **б**
Рис. 14. Угловая скорость поворота (а) и управляющий момент (б) СО КА относительно оси X

– стабилизацию КА при изменении конфигурации, например, при раскрытии или повороте солнечной батареи.

Для внедрения предложенного подхода в расчётную практику важно заметить, что использование довольно сложного сочетания программных средств не привело к большому времени счёта. Так подробная модель (три упругих элемента по 50 собственных форм) при интегрировании по времени (порядка 1000 шагов) совместно с системой ориентации занимает около 15 мин на ПК, что сравнимо с проведением подобных расчётов по отдельности.

В заключении отметим, что данная статья является результатом первого этапа работы по созданию таких моделей, и авторы предполагают развивать применение предложенного подхода как для других конструкций КА и их элементов, так и для других систем ориентации.

Литература

1. Малаховский Е. Е. Точность стабилизации гибких

космических аппаратов и нормирование механических воздействий от внутренних источников возмущения / Е. Е. Малаховский // Космические исследования. – М. : Наука, 1997. – Т. 35. – № 5.

2. Геча В. Я. Динамика трёхкомпонентного привода солнечных батарей с упругими элементами / В. Я. Геча, А. Н. Аронзон, Е. А. Канунникова // Электротехника. – М. : ОАО «Фирма знак», 2003. – № 2. – С. 7 – 12.

3. Иванов А. А. MSC.Adams: теория и элементы виртуального конструирования и моделирования / А. А. Иванов. – М. , 2003. – 97 с.

4. Буров А. Г. Совместное использование вычислительных пакетов MSC.Adams и MATLAB / А. Г. Буров. – М. , 2004. – 43 с.

5. Георгиев А. Ф. Моделирование раскрытия солнечных батарей с учётом их упругих свойств в MSC.Nastran и Adams / А. Ф. Георгиев, Е. А. Канунникова. – М. , 2008. – 28с.

6. Васильев В. Н. Системы ориентации космических аппаратов / В. Н. Васильев. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 310 с.

Поступила в редакцию 16.03.2012

Елена Александровна Канунникова, канд. техн. наук,
начальник лаборатории, т. (495)366-33-66.
Арон Давыдович Беленький, канд. техн. наук, начальник лаборатории.
Владимир Николаевич Васильев, канд. техн. наук,
старший научн. сотрудник, т. (495)366-21-22.
Дмитрий Владимирович Гриневич, инженер, т. (495)366-33-61.
E-mail: vniiem@vniiem.ru.