



УДК 629.7.018.4

А. В. Романов, В. В. Егоров

*ФГУП Конструкторское бюро «Арсенал» имени М. В. Фрунзе,
г. Санкт-Петербург, Россия*

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрена оценка механических и динамических характеристик космического аппарата (КА) методом трехмерного динамического моделирования. Для этого использован программный комплекс MSC.Software MD Adams. Полученная оценка может быть использована для решения большого круга задач как в ракетно-космической отрасли, так и в смежных с ней областях.

Ключевые слова: динамические характеристики КА, трехмерное моделирование, программный комплекс.

A. V. Romanov, V. V. Egorov

The Arsenal Design Bureau named after M. V. Frunze, St. Petersburg, Russia

METHODS OF CONDUCT STUDY ON THE DIFFERENT STAGES OF OPERATION USING THREE-DIMENSIONAL DYNAMIC MODELING

We have considered the assessment of mechanical and dynamic characteristics of the spacecraft (SC) with the method of three-dimensional dynamic modeling. For this purpose we have used software package MSC Software MD Adams. Received assessment can be used to solve a wide range of problems both in the space industry and related areas.

Key words: dynamic characteristics of the spacecraft, three-dimensional modeling software package.

При разработке КА возникает необходимость в создании методик, которые могли бы адекватно оценить его будущие механические свойства и динамические характеристики. Предварительная оценка будущих свойств и характеристик составных элементов и самого КА в целом позволяет значительно сократить сроки разработки и материальные затраты, связанные с производством.

Одним из способов оценки механических свойств и динамических характеристик

является метод трехмерного динамического моделирования. Согласно этому методу строится трехмерная динамическая модель, механические свойства и динамические характеристики которой отражают аналогичные параметры будущего проектируемого изделия. После проведения исследования динамической модели полученные результаты используются для прогнозирования характеристик реального изделия.

Для динамического моделирования представляется целесообразным использовать вычислительные возможности современных

ЭВМ и пакетов программ для моделирования динамики механических систем. При этом функционал выбираемого программного обеспечения должен удовлетворять требованиям поставленной задачи.

С помощью вышеописанного метода динамического моделирования было выполнено три различных расчета поведения КА, каждый из которых соответствовал определенному этапу его эксплуатации:

- **расчет текущих и конечных углов и угловых скоростей центра масс КА, сил и моментов сил в шарнирах крепления внешних элементов конструкции, изменяющихся в процессе их раскрытия;**
- **расчет собственных частот корпуса КА и его внешних элементов, динамического прогиба на этапе транспортирования;**
- **расчет перемещения контрольных точек конструкции КА, вызванных внешними и внутренними воздействующими факторами, на этапе его штатной эксплуатации.**

Процесс раскрытия внешних элементов конструкции КА, разворачивающихся из транспортного положения в рабочее, происходит на орбите Земли, после отделения от ракетносителя и перед началом штатной эксплуатации КА. В процессе раскрытия внешних элементов КА меняются его характеристики: геометрическая форма, ориентация в пространстве, угловая скорость вращения, положение центра масс, моменты инерции главных осей. Также в процессе раскрытия возникают силы и моменты реакции в шарнирах самих раскрывающихся элементов. От результата процесса приведения внешних элементов КА в рабочее положение зависит возможность его дальнейшей эксплуатации.

В качестве исходных данных для построения трехмерной динамической модели были использованы следующие характеристики центрального тела КА и каждого из его внешних раскрывающихся элементов:

- масса;
- массовые моменты инерции (три главных момента);
- положение центра масс;
- моменты инерции сечения (два главных и крутильный моменты);
- коэффициент рассеяния (логарифмический декремент затухания колебаний);
- **упруго-диссипативные характеристики узлов крепления внешних раскрывающихся элементов;**

- **уравнение движения привода, раскрывающего внешний элемент;**
- **циклограмма (последовательность) раскрытия внешних элементов.**

При выборе пакета программного обеспечения необходимо иметь в виду, что проектируемая динамическая модель должна иметь изменяемую геометрию, причем эти изменения должны выполняться по определенному, заранее заданному закону. Этому требованию отвечает программный комплекс MSC. Software MD Adams [1], предназначенный для проведения расчетов и исследования динамики системы.

В программном комплексе MSC. Software MD Adams была построена динамическая модель, состоящая из совокупности абсолютно жестких тел, соединённых между собой упруго-диссипативными связями балочного типа, имеющими определенные характеристики (крутильный и два основных момента инерции сечения, коэффициент рассеяния). Каждое абсолютно жесткое тело обладает определенными массово-инерционными характеристиками (массой, массовыми моментами инерции и положением центра масс).

Дополнительно в модели использованы следующие типы связей:

- **имитатор закрепления** – позволяет моделировать упруго-диссипативное закрепление двух элементов;
- **шарнир вращения** – соединяет два тела, оставляя одну вращательную степень свободы. Вращение может быть свободным или происходить согласно заранее заданному закону;
- **кинематическая связь типа «ползун»** – соединяет два тела, оставляя одну поступательную степень свободы. Поступательное движение может быть свободным или происходить согласно заранее заданному закону.

Количество использованных в модели элементов приведено в табл. 1.

Схематичное изображение динамической модели КА (с полностью раскрытыми внешними элементами его конструкции) приведено на рис. 1.

На рис. 2 (а–з) изображены различные формы динамической модели в процессе раскрытия:

а – модель находится в транспортном положении;

б – раскрыты пакеты солнечных батарей;
в – солнечные батареи приведены в рабочее положение;
г – штанги отвода рефлекторов приведены в рабочее положение;
д – антенные панели приведены в рабочее положение;
е – электромагнит сброса кинетического момента приведен в рабочее положение;

ж – облучатели приведены в рабочее положение;
з – рефлекторы приведены в рабочее положение.

После построения динамической модели, задания всех уравнений движения ее раскрываемых элементов и проведения исследования модели в программном комплексе MSC.Software MD Adams был получен требуемый результат –

Таблица 1

Количество элементов, использованных при построении динамической модели

	Тип конечного элемента	Количество элементов
Элементы (parts)	Абсолютно жесткое тело (rigid body)	667
Шарниры (joints)	Шарнир вращения (revolute joint)	17
	Ползун (translational joint)	2
Законы движения (motions)	Вращательное движение (rotational motion)	13
Силы (forces)	Имитатор закрепления с определенной жесткостью (bushing)	27
	Безмассовая балка (massless beam)	682

Примечание: в скобках приведены английские (оригинальные) названия типов конечных элементов, использованных в программном комплексе MSC.Software MD Adams.

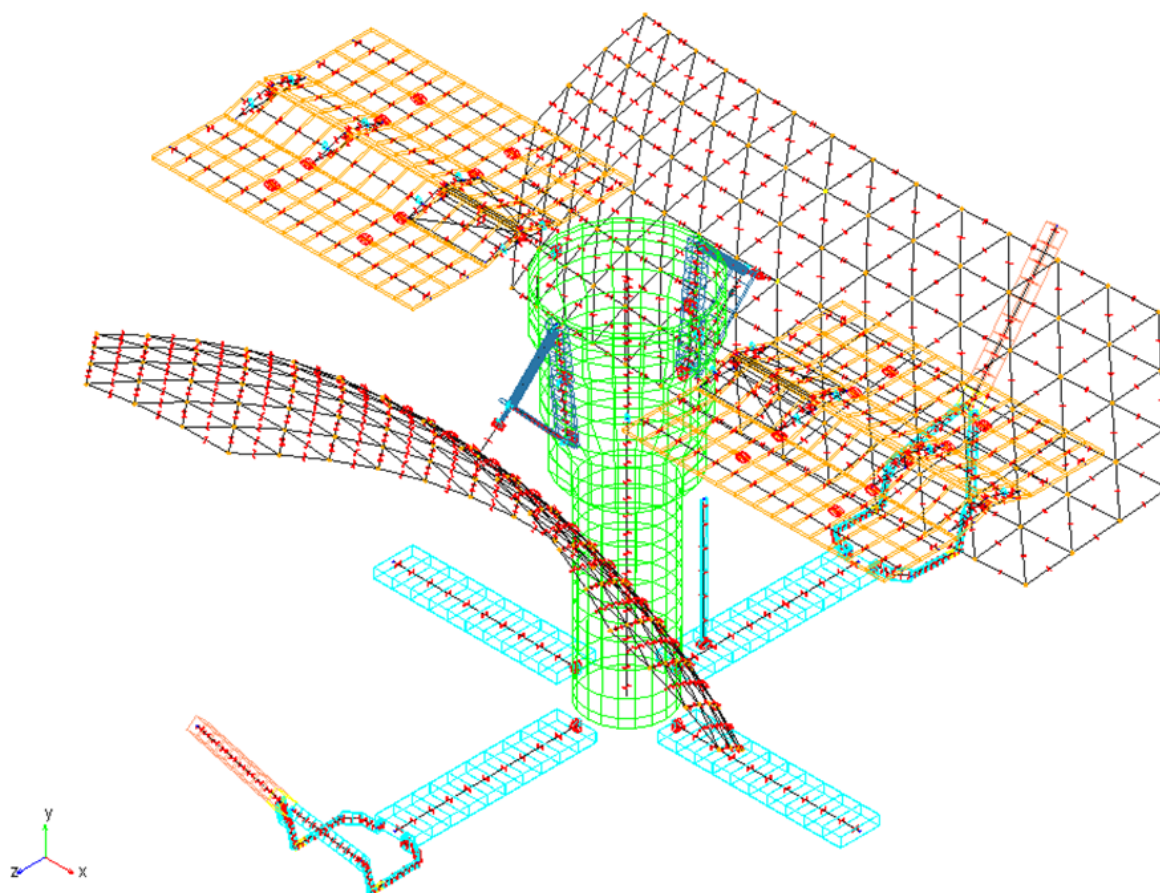


Рис. 1. Схематичное изображение динамической модели КА (с полностью раскрытыми внешними элементами его конструкции)

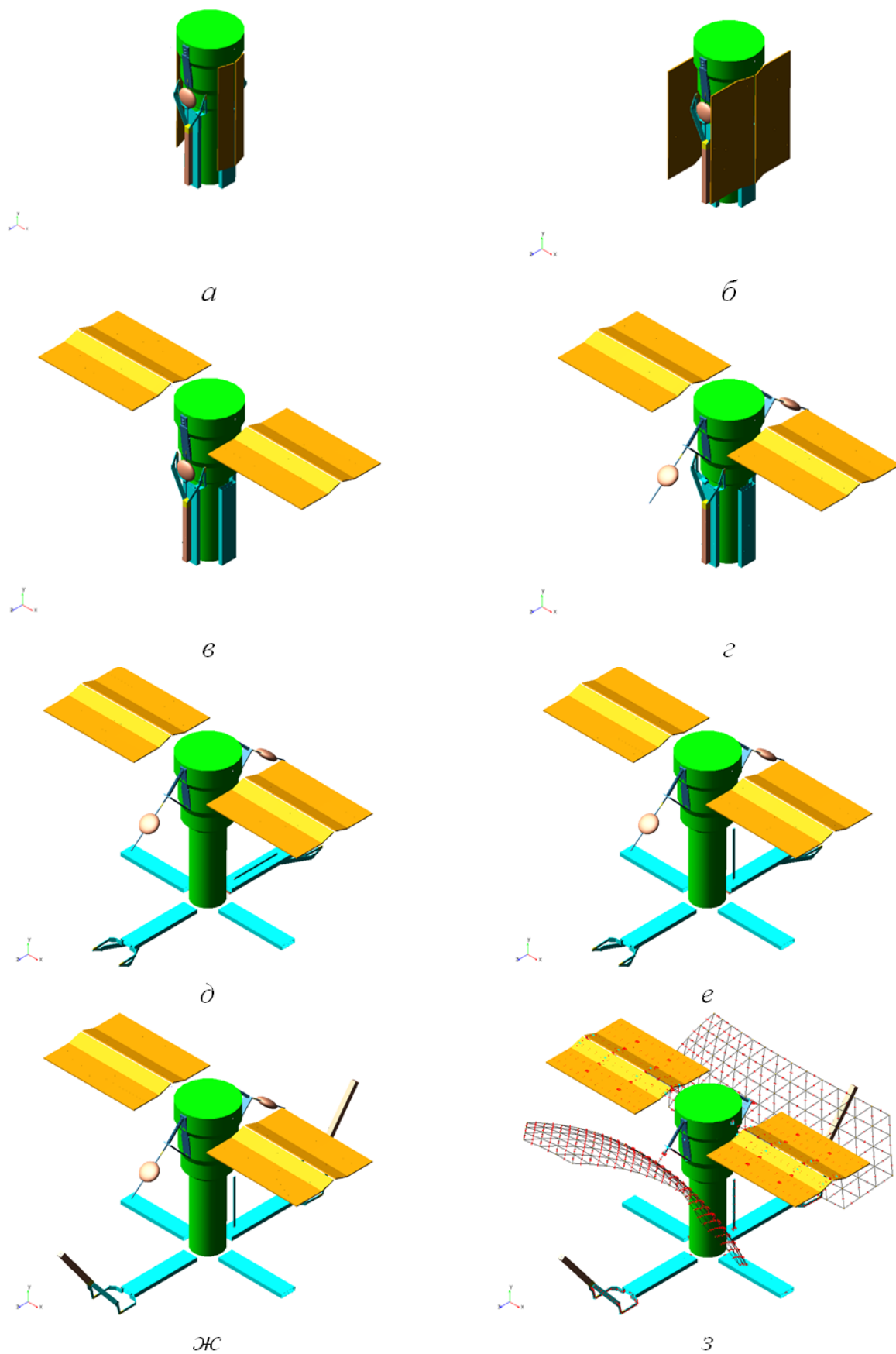


Рис. 2. Различные формы динамической модели в процессе раскрытия

значения текущих и конечных углов и угловых скоростей центра масс КА, сил и моментов сил в шарнирах крепления внешних элементов конструкции, изменяющихся в процессе их раскрытия.

На рис. 3 в качестве примера приведено изменение момента силы, действующее в шарнире:

- а* – панели солнечной батареи в процессе и сразу после ее раскрытия;
- б* – антенной панели в процессе сразу после ее раскрытия;
- в* – электромагнита сброса кинетического момента сразу после его раскрытия;
- г* – штанги отвода рефлектора сразу после ее раскрытия.

На рис. 4, *а, б, в* приведены изменения углов тангажа, крена, рыскания КА. На рис. 4, *г, д, е* приведены изменения угловых скоростей тангажа, крена, рыскания КА.

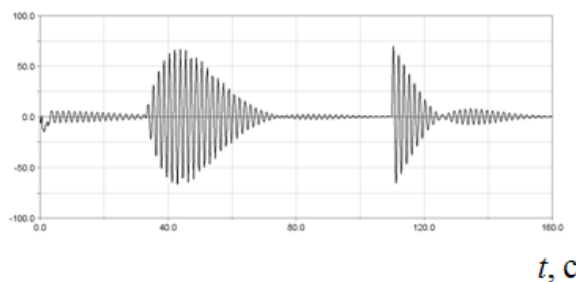
Транспортирование КА от завода изготовителя в эксплуатирующую организацию осуществляется железнодорожным транспортом. В процессе транспортирования на КА действуют возмущающие воздействия, вызванные изменениями тяговых усилий локомоти-

ва, профиля пути и процессами торможения. Вследствие этих воздействий у некоторых элементов КА могут возникнуть резонансные явления, что может привести к выходу этих элементов из строя. Другое явление, возникающее при транспортировании, – изменение габаритных размеров КА, вызываемое его динамическим прогибом.

Для расчета собственных частот колебаний КА и динамического прогиба в процессе транспортирования можно использовать уже построенную динамическую модель с формой геометрии, соответствующей транспортному положению внешних раскрываемых элементов. К модели необходимо добавить элементы, имитирующие закрепление КА на транспортном средстве. Схематичное изображение динамической модели в транспортном положении с элементами, имитирующими закрепление КА в транспортном средстве, приведено на рис. 5.

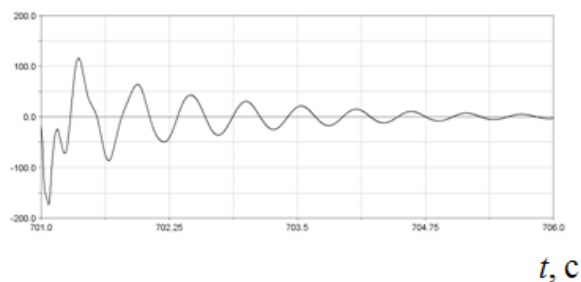
После проведения исследования полученной модели в программном комплексе MSC.Software MD Adams находятся собственные частоты колебаний корпуса КА и его внешних раскрываемых элементов в транс-

М, Н·м



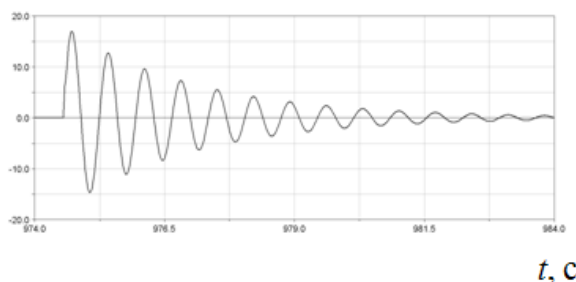
а

М, Н·м



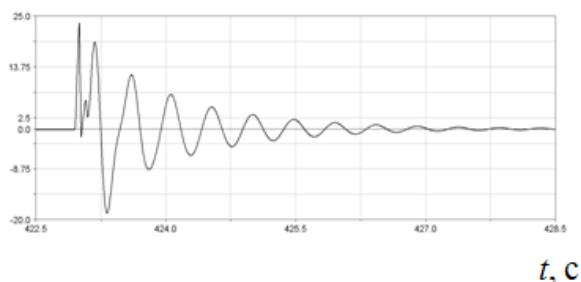
б

М, Н·м



в

М, Н·м



г

Рис. 3. Моменты силы в различных шарнирах крепления внешних раскрываемых элементов

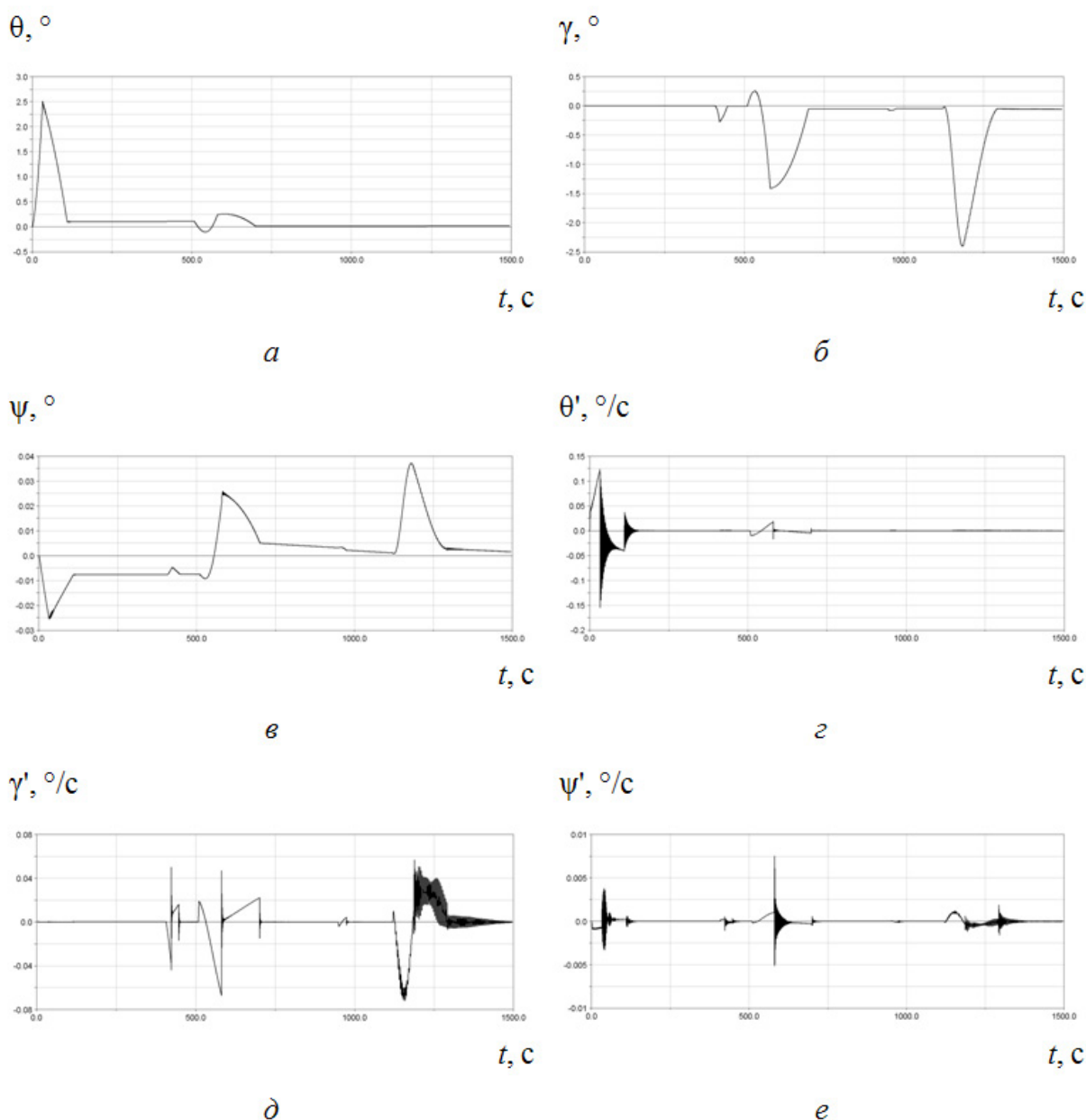


Рис. 4. Изменения углов и угловых скоростей тангажа, крена, рыскания КА

портном положении. Для данного КА его первые тона колебаний составили 9,54 Гц в вертикальном и 9,47 Гц в горизонтальном направлении соответственно.

Для нахождения динамического прогиба необходимо задать уравнение колебания опор, на которых закреплен КА в транспортном средстве, соответствующее их реальному колебанию в процессе транспортирования. Для данного КА динамический прогиб с учетом коэффициентов запаса и действующей силы тяжести составил 9,6 мм в вертикальном и 3,7 мм в горизонтальном направлениях.

В процессе штатной эксплуатации КА подвергается внутренним и внешним воздействиям. К внутренним воздействиям можно отнести работу систем ориентации КА, а к внешним – атмосферное сопротивление и гравитационный момент. Для корректной работы КА необходимо знать, насколько эти воздействия влияют на взаимное расположение пары внешних раскрываемых элементов: облучателя и облучаемого им рефлектора.

Для решения поставленной задачи можно воспользоваться уже построенной динамической моделью с полностью раскрытыми внешними элементами его конструкции

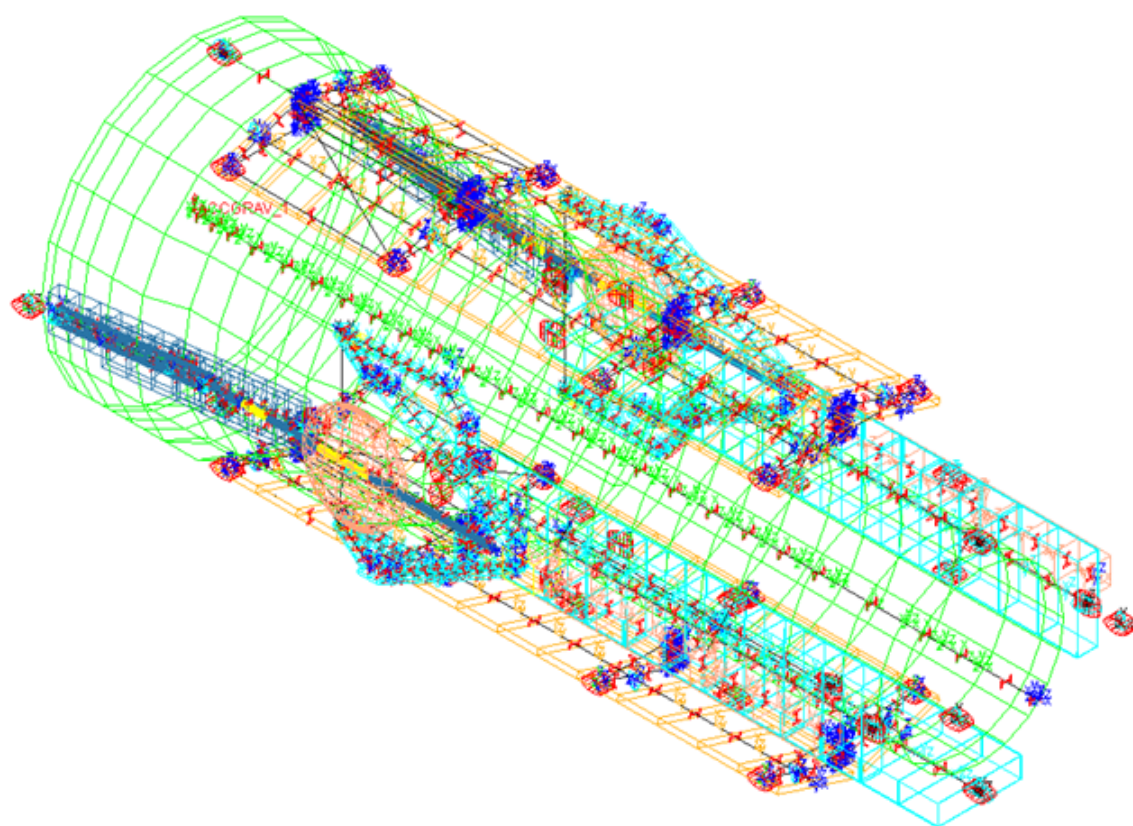


Рис. 5. Схематичное изображение динамической модели в транспортном положении с элементами, имитирующими закрепление КА в транспортном средстве

(рис. 1). Воздействующие на КА внешние и внутренние возмущения были приведены к центру масс КА в виде трех моментов, действующих относительно его главных осей.

Решая задачу, можно получить значения отклонений контрольных точек облучателя и рефлектора. Для данного КА эти расчетные значения не превысили допустимых.

Как было представлено выше, построив динамическую модель КА, с ее помощью можно решать большой круг разнообразных задач. При изменении исходных данных проектируемого КА имеется возможность корректировки соответствующих данных в его модели. Таким образом, методика расчета поведения КА методом динамического моделирования, то есть путем построения трехмерной динамической модели, отражающей его механические свойства и динамические характеристики, является весьма перспективной. Следует особо отметить, что в данной методике используется модель с изменяемыми

ми во времени свойствами, такими, например, как геометрия модели или изменяемые связи между элементами. При выборе пакета программного обеспечения необходимо учитывать данную особенность этой методики.

Данный методический подход может быть также использован при создании машин, агрегатов и анализе процессов не только в ракетно-космической технике, но и в других областях промышленности, например в авиации и судостроении, станкостроении, строительстве, легкой промышленности.

Библиографические ссылки

1. Иванов А. А. MSC.ADAMS: теория и элементы виртуального конструирования и моделирования : учеб. пособие. М. : Московское представительство MSC.Software GmbH, 2003. 97 с.

*Статья поступила в редакцию
05.09.2012 г.*