

УДК 004.94 : 629.78

## РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО МОДЕЛИРУЮЩЕГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СОЗДАНИЯ СТЕНДОВ ОТЛАДКИ И ПОДДЕРЖКИ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д.В. Гриневич, А.В. Лебедев, О.В. Мороз  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

*Рассматривается структура универсального моделирующего программного комплекса, разработанного в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» и предназначенного для имитации динамики движения космических аппаратов (КА). Представлены лежащие в основе данного комплекса численные алгоритмы моделирования движения КА с учётом гибких элементов переменной структуры, позволяющие производить моделирование в реальном и ускоренном масштабе времени. Рассмотрены примеры применения данного моделирующего комплекса для создания наземных стендов отладки систем ориентации существующих и находящихся в разработке КА.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, математическая модель, компьютерное моделирование.

Процесс ориентации космических аппаратов (КА) является крайне важным с точки зрения их живучести и выполнения целевых задач. Сложившаяся практика отработки аппаратуры и программного обеспечения системы ориентации (СО) включает этап наземных испытаний [1]. Он, в свою очередь, включает в себя компьютерное моделирование движения КА на специальном стенде – вычислительном комплексе программной отладки (ВКПО) в замкнутом контуре с бортовой вычислительной машиной, на которой выполняются алгоритмы управления ориентацией. Помимо штатных режимов работы СО, на данном стенде моделируются различные нештатные ситуации, такие как отказ одного или нескольких датчиков или органов управления, которые должны по возможности парироваться алгоритмами СО и не должны приводить к потере КА.

Наличие стенда ВКПО необходимо и после введения КА в эксплуатацию. В случае возникновения непредвиденной ситуации на этапе наземной отработки она может быть промоделирована на стенде ВКПО. На основе результатов данного моделирования принимаются решения о дальнейших корректировках СО эксплуатируемого КА.

Космические аппараты разного класса обладают системами ориентации с различным набором датчиков и органов управления с разными интерфейсами и бортовыми вычислительными машинами. В большинстве случаев, при создании нового КА, это влечёт за собой длительный процесс разработки с нуля моделирующего программного обеспечения (ПО) и стенда отладки СО. Это обусловлено недостаточным уровнем абстракции моделирующего ПО от конфигурации СО.

В данной работе рассматривается разработанный в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» моделирующий программный комплекс, обладающий универсальной модульной структурой, что позволяет в сжатые сроки создавать наземные отладочные стенды для СО новых или уже существующих КА.

### Структура моделирующего программного комплекса

Стенд ВКПО, базирующийся на моделирующем программном комплексе, функционирует согласно схеме, изображённой на рис. 1.

Фактически, структура стенда определяется с помощью специальных конфигурационных файлов. Ядро системы моделирования загружает нужные модули из уже существующих библиотек компонент и располагает их согласно иерархии, определённой в файлах конфигурации. Далее происходит формирование дифференциальных уравнений движения КА в форме Коши. После чего пользователем может быть запущен процесс интегрирования, который, в зависимости от конфигурации, может протекать в реальном или ускоренном масштабе времени.

Ядро системы моделирования и библиотеки компонент реализованы на языке C++. Каждая библиотека экспортирует набор функций, создающих экземпляры соответствующих компонент. Компоненты наследуются от одного или нескольких абстрактных интерфейсов, каждый из которых, в свою очередь, наследуется от одного базового интерфейса, описывающего иерархическую логику и функции преобразования между интерфейсами. Реализации компонент независимы между собой, но могут использовать при этом ссылки и указатели на любые публичные интерфейсы (рис. 2).

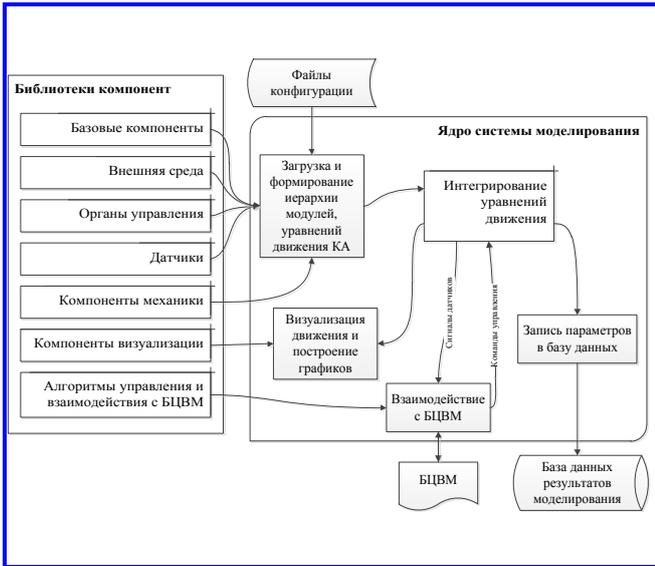


Рис. 1. Функциональная схема моделирующего стенда

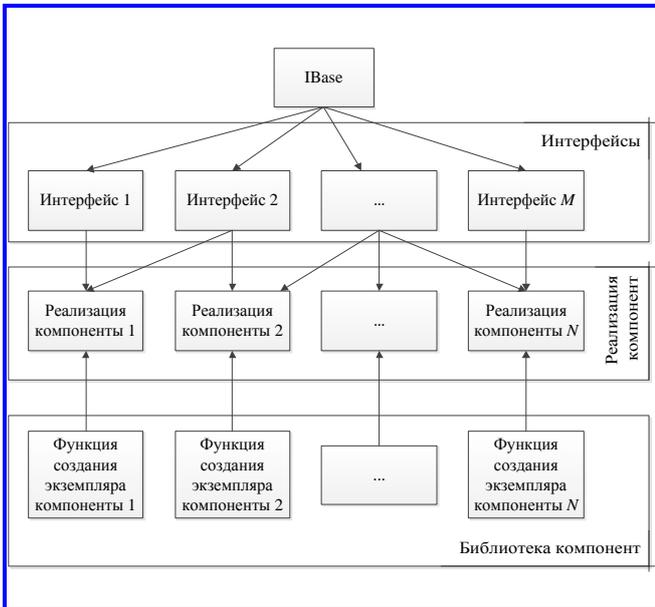


Рис. 2. Схема наследования и организации библиотек компонент

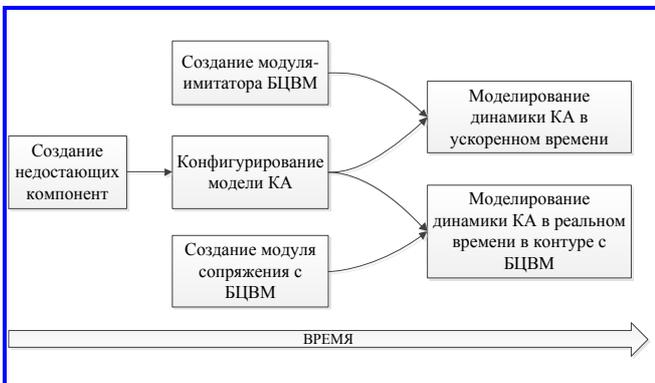


Рис. 3. Рабочий процесс создания ПО ВКПО на базе моделирующего программного комплекса

Выбранная компонентная модель во многом повторяет технологию ComponentObjectModel (COM) [2], но не использует при этом глобальные идентификаторы компонент. Вместо этого для запроса интерфейсов используется технология RuntimeTypeInfo (RTTI) с кешированием.

Выбранная схема позволила создать масштабируемый, платформенно-независимый моделирующий программный комплекс, на базе которого разработчики могут в сжатые сроки создавать отладочные стенды для различных типов КА.

На рис. 3. схематически изображён рабочий процесс создания такого стенда. В первую очередь, на базе открытых интерфейсов, создаются недостающие компоненты, моделирующие специфические приборы системы ориентации КА, которых нет в существующих библиотеках компонент. При этом разработчик может не иметь доступа к исходному коду ядра моделирующей системы и других компонент. Далее, с помощью конфигурационных файлов, создаётся модель КА. Данная работа может быть выполнена параллельно с созданием модуля-имитатора бортовой центральной вычислительной машины (БЦВМ) (для возможности моделирования динамики КА в ускоренном времени) и созданием модуля сопряжения с БЦВМ (для моделирования динамики КА в реальном времени в замкнутом контуре с БЦВМ).

Следует отметить, что создание модуля-имитатора БЦВМ возможно только при наличии исходного кода (или пригодного исполняемого кода) системы ориентации КА.

На рис. 4 для примера приведена иерархия модулей, используемая на стенде ВКПО СО КА «Ионосфера».

Поведение каждого модуля определяется его положением внутри иерархии, интерфейсами, которые он реализует, и его настройками, загружаемыми из файлов конфигурации. Например модуль «Возмущающий момент» реализует интерфейс «Внешний момент» и принадлежит модулю «Твёрдое тело», который, в свою очередь, во время выполнения шага интегрирования в цикле проверяет все дочерние модули, реализующие интерфейс «Внешний момент», суммирует моменты, формируемые ими, и использует полученную сумму в правой части системы дифференциальных уравнений.

Для многих КА характерно наличие раскрываемых элементов – солнечных батарей, антенн. Такие элементы зачастую нельзя считать абсолютно

твёрдыми телами из-за наличия ярко выраженных частот упругих колебаний, которые возбуждаются при каких-либо движениях аппарата. Данные упругие элементы нельзя не учитывать при разработке системы управления ориентацией, поскольку они существенно влияют на динамику движения аппарата и теоретически могут приводить к разрушению устойчивости алгоритмов стабилизации.

В связи с этим необходимо построить математическую модель КА, учитывающую наличие гибких раскрываемых конструкций, которую можно было бы использовать для моделирования движения в реальном времени в рамках стенда отладки системы управления ориентацией, что накладывает определённые ограничения на сложность производимых вычислений.

#### Математическая модель КА с учётом динамики гибких элементов

Построим модель движения КА с учётом влияния упругих элементов. Представим КА в виде совокупности центрального тела, которое будем считать абсолютно твёрдым, и прикреплённых к нему гибких элементов. Будем полагать, что внешние моменты и моменты, создаваемые системой ориентации, прикладываются только к центральному телу, а гибкие элементы выступают в роли пассивных конструкций, жёстко соединённых с центральным телом.

Уравнения динамики движения центрального твёрдого тела вокруг центра масс без учёта гибких элементов можно описать в следующей форме [3]:

$$\frac{d\vec{\omega}}{dt} = I_c^{-1}(\vec{M} - \vec{\omega} \times I_c \vec{\omega}), \quad (1)$$

где  $\vec{\omega}$  – вектор угловой скорости центрального тела относительно связанной с КА системы координат;  $I_c$  – тензор инерции центрального тела относительно его центра масс;  $\vec{M}$  – вектор суммарного момента, приложенного к центральному телу, заданный в связанной с КА системе координат.

Суммарный момент  $\vec{M}$  включает в себя как внешние моменты (гравитационный, аэродинамический и иные возмущающие моменты), так и моменты, создаваемые системой ориентации (момент от двигателей-маховиков, момент от взаимодействия включённых электромагнитов с магнитным

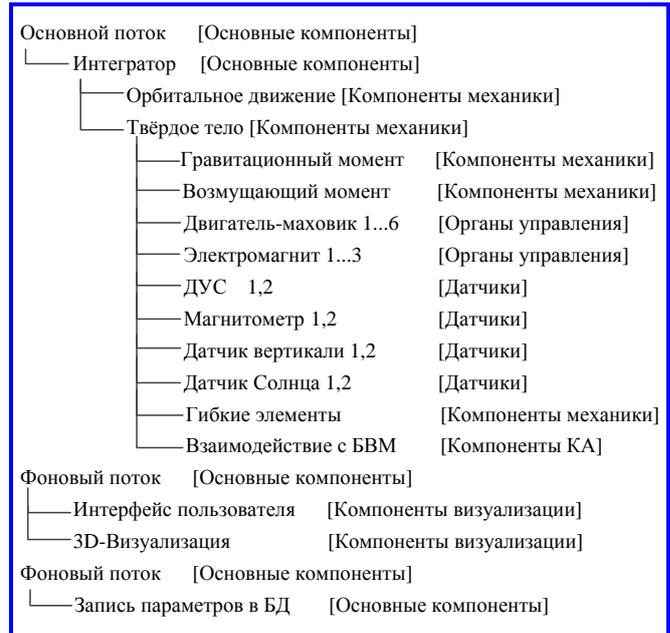


Рис. 4. Иерархия модулей моделирующего ПО стенда ВКПО для КА «Ионосфера»

полем Земли). Момент  $\vec{M}$  можно записать в следующей форме:

$$\vec{M} = \vec{M}_u + \vec{M}_G + \vec{M}_v + \sum_i \left( -\frac{d\vec{H}_i}{dt} - \vec{\omega} \times \vec{H}_i \right), \quad (2)$$

где  $\vec{M}_u$  – управляющий момент, создаваемый элементами СО;  $\vec{M}_G$  – гравитационный момент;  $\vec{M}_v$  – суммарный возмущающий момент неучтённых внешних сил;  $\vec{H}_i$  – кинетический момент  $i$ -го вращающегося элемента (например двигателя-маховика).

В общем случае движение присоединённого гибкого тела описать обыкновенными дифференциальными уравнениями не удаётся, поэтому необходимо использовать методы конечно-элементного анализа. Но в первом приближении динамику гибкого тела можно моделировать конечным набором осцилляторов, описываемых линейными дифференциальными уравнениями второго порядка с возбуждением в правой части:

$$\frac{d^2\varphi_i}{dt^2} = -2k_i v_i \frac{d\varphi_i}{dt} - v_i^2 \varphi_i + \left( \vec{\delta}_i \frac{d\vec{\omega}}{dt} \right), \quad (3)$$

где  $\varphi_i$  – переменная, характеризующая угловое отклонение  $i$ -го осциллятора от положения равновесия;

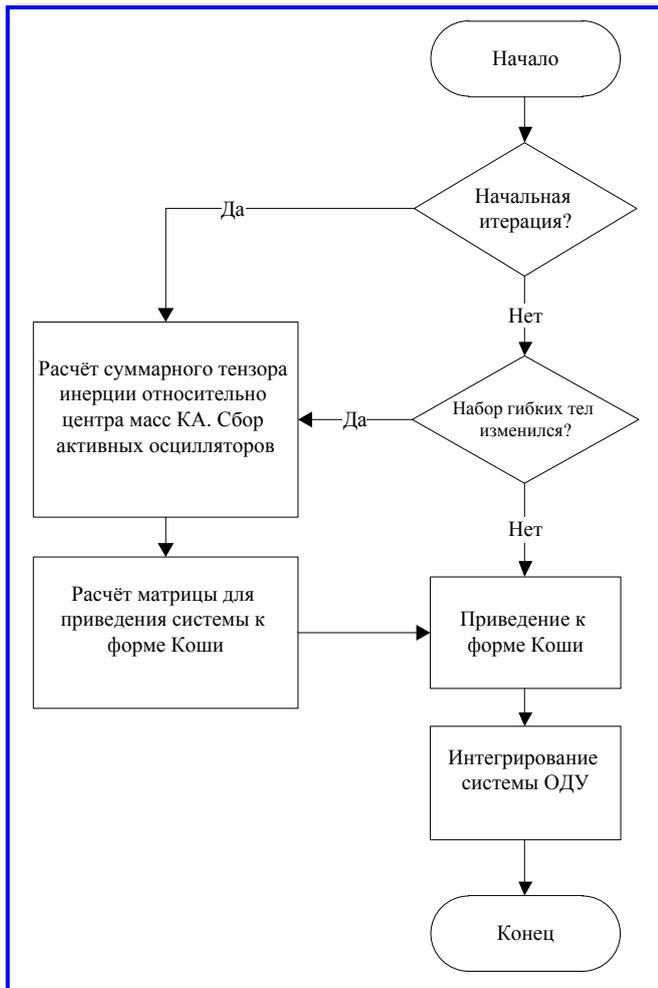


Рис. 5. Блок-схема алгоритма численного моделирования движения КА с учётом динамики гибких элементов

$k_i$  – коэффициент демпфирования  $i$ -го осциллятора;  $v_i$  – собственная частота;  $\vec{\delta}_i$  – вектор коэффициентов влияния, имеющих размерность (кг·м);  $\frac{d\vec{\omega}}{dt}$  – угловое ускорение центрального тела. Коэффициенты влияния  $\vec{\delta}_i$  зависят от положения центра масс КА и рассчитываются заранее в программных пакетах для конечно-элементного анализа (например в программе Nastran).

Также необходимо учесть влияние осцилляторов (3) на динамику центрального тела, что приведёт к модификации уравнений (1):

$$\frac{d\vec{\omega}}{dt} = I_s^{-1} \left( \vec{M} - \vec{\omega} \times I_s \vec{\omega} + \sum_i \vec{\delta}_i \frac{d^2 \varphi_i}{dt^2} \right), \quad (4)$$

где  $I_s$  – суммарный тензор инерции КА с раскрытыми гибкими элементами относительно центра масс КА.

Выпишем совокупную систему уравнений с учётом кинематических соотношений:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{\omega}}{dt} = I_s^{-1} \left( \vec{M} - \vec{\omega} \times I_s \vec{\omega} + \sum_i \vec{\delta}_i \frac{d^2 \varphi_i}{dt^2} \right) \\ \frac{d^2 \varphi_i}{dt^2} = -2k_i v_i \frac{d\varphi_i}{dt} - v_i^2 \varphi_i + \left( \vec{\delta}_i \frac{d\vec{\omega}}{dt} \right) \\ \frac{dq}{dt} = \frac{1}{2} q q_{\omega} \end{cases} \quad (5)$$

Система уравнений (5) представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, размерность которой зависит от количества осцилляторов, которые аппроксимируют динамику гибких элементов.

Последнее уравнение в (5) описывает кинематическое движение центрального тела в терминах кватернионов [3].

Уравнения (5) записаны в неявной форме и для того, чтобы применять стандартные методы численного интегрирования, необходимо привести её к форме Коши.

#### Алгоритм численного моделирования движения КА вокруг центра масс с учётом влияния гибких элементов

Алгоритм моделирования движения КА должен учитывать возможность изменения множества активных гибких элементов и состоит из нескольких подзадач: расчёта суммарного тензора инерции относительно центра масс и сбора активных осцилляторов; расчёта матрицы для приведения системы дифференциальных уравнений (5) к форме Коши; алгоритма численного интегрирования.

Блок-схема данного алгоритма изображена на рис. 5.

**Расчёт суммарного тензора инерции относительно центра масс КА и сбор активных осцилляторов.** Данная подзадача выполняется в случае изменения состава гибких элементов и в момент инициализации алгоритма (до начала процесса моделирования). Целью подзадачи является расчёт суммарного тензора инерции текущей конфигурации КА с учётом активных гибких элементов, а также сбор и нумерация осцилляторов, входящих в их состав.

Входными параметрами подзадачи являются:  $I_c$  – тензор инерции центрального тела относительно точки начала координат в связанной с КА системе координат;  $M_c$  – масса центрального тела;  $\vec{d}_c$  – вектор смещения центра масс центрального тела

относительно точки начала координат в системе координат, связанной с КА;  $I_j$  – тензор инерции  $j$ -го гибкого элемента относительно точки начала координат в связанной с КА системе координат;  $M_j$  – масса  $j$ -го гибкого элемента;  $\vec{d}_j$  – вектор смещения центра масс  $j$ -го гибкого элемента относительно точки начала координат в связанной с КА системе координат.

К выходным параметрам подзадачи относятся:  $\vec{\delta}_i$  – векторный коэффициент влияния  $i$ -го активного осциллятора;  $k_i$  – коэффициент демпфирования  $i$ -го активного осциллятора;  $\nu_i$  – собственная частота  $i$ -го активного осциллятора;  $I_s$  – суммарный тензор инерции КА относительно центра масс.

Для расчёта суммарного тензора инерции относительно центра масс необходимо рассчитать смещение центра масс КА относительно начала координат (суммирование ведётся по активным гибким элементам):

$$\vec{d} = \frac{M_c \vec{d}_c + \sum_j \vec{d}_j M_j}{M_c + \sum_j M_j}.$$

Затем рассчитать суммарный тензор инерции КА относительно начала координат:

$$I_0 = I_c + \sum_j I_j.$$

После этого необходимо рассчитать элементы тензора  $I_s$ , применив теорему Штейнера:

$$\begin{aligned} I_s^{xx} &= I_0^{xx} - M(d_y^2 + d_z^2); \\ I_s^{yy} &= I_0^{yy} - M(d_x^2 + d_z^2); \\ I_s^{zz} &= I_0^{zz} - M(d_x^2 + d_y^2); \\ I_s^{xy} &= I_0^{xy} - M d_x d_y; \\ I_s^{zx} &= I_0^{zx} - M d_z d_x; \\ I_s^{yz} &= I_0^{yz} - M d_y d_z. \end{aligned}$$

Процедура сбора параметров осцилляторов для активных гибких элементов является тривиальной и сводится к простому проходу по набору активных гибких элементов и записи в память соответствующих им параметров  $\vec{\delta}_i$ ,  $k_i$ ,  $\nu_i$ .

**Расчёт матрицы перехода к форме Коши.** Данная подзадача выполняется в случае изменения состава гибких элементов и в момент инициализации алгоритма (до начала процесса моделирования).

Входными параметрами подзадачи являются:  $I_s$  – суммарный тензор инерции КА относительно центра масс;  $\vec{\delta}_i$  – векторный коэффициент влияния  $i$ -го активного осциллятора.

К выходным параметрам подзадачи относятся:  $A^{-1}$  – постоянная матрица для приведения системы (5) к форме Коши.

Обозначим через  $\vec{X}$  вектор, содержащий компоненты переменных  $\frac{d\vec{\omega}}{dt}$  и  $\frac{d^2\varphi_i}{dt^2}$ :

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} \frac{d\vec{\omega}}{dt} \\ \frac{d^2\varphi_i}{dt^2} \end{pmatrix}.$$

Он имеет размерность  $3 + N$ , где  $N$  – количество активных осцилляторов, полученных на выходе предыдущей подзадачи. Перепишем совокупность систем дифференциальных уравнений (3), (4) в матричной форме:

$$A\vec{X} = \vec{B}(t), \quad (6)$$

где  $A$  – постоянная квадратная матрица размерности  $(3 + N)(3 + N)$ , которая имеет следующую структуру:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \xi_1^x & \dots & \xi_N^x \\ 0 & 1 & 0 & \xi_1^y & \dots & \xi_N^y \\ 0 & 0 & 1 & \xi_1^z & \dots & \xi_N^z \\ \delta_1^x & \delta_1^y & \delta_1^z & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ \delta_N^x & \delta_N^y & \delta_N^z & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix},$$

где  $\vec{\xi}_i = -I_s^{-1}\vec{\delta}_i$  – векторный коэффициент при угловых отклонениях активных осцилляторов в правой части системы уравнений (4). Вектор  $\vec{B}(t)$  зависит от времени и имеет размерность  $(3 + N)$ , он имеет вид:

$$\vec{B}(t) = \begin{pmatrix} I_s^{-1} (\vec{M} - \vec{\omega}(t) \times I_s \vec{\omega}(t)) \\ \vdots \\ -2k_i v_i \frac{d\varphi_i(t)}{dt} - v_i^2 \varphi_i(t) \\ \vdots \end{pmatrix}.$$

Будем считать, что параметры систем (3), (4) таковы, что матрица  $A$  является невырожденной.

**Приведение системы дифференциальных уравнений к форме Коши.** Для того чтобы привести систему дифференциальных уравнений (3), (4), входящих в состав системы (5), к форме Коши, необходимо в каждый фиксированный момент времени  $t$  решить систему линейных алгебраических уравнений (6) относительно неизвестного вектора  $\vec{X}$ . Для этого достаточно рассчитать матрицу  $A^{-1}$  и выполнить следующую операцию:

$$\vec{X} = A^{-1} \vec{B}(t).$$

Расчёт матрицы  $A^{-1}$  можно выполнить один раз при инициализации, либо при изменении состава активных осцилляторов (в данном случае размерность систем (5), (6) и матрицы  $A^{-1}$  изменится).

После расчёта матрицы  $A^{-1}$  приведём систему (5) к форме Коши:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \frac{d\vec{\omega}}{dt} \\ \vdots \\ \frac{d\lambda_i}{dt} \\ \vdots \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} I_s^{-1} (\vec{M} - \vec{\omega}(t) \times I_s \vec{\omega}(t)) \\ \vdots \\ -2k_i v_i \lambda_i(t) - v_i^2 \varphi_i(t) \\ \vdots \end{pmatrix} \\ \frac{d\varphi_i}{dt} = \lambda_i \\ \vdots \\ \frac{dq}{dt} = \frac{1}{2} q q_{\omega} \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) имеет вид  $\frac{d\vec{y}}{dt} = f(\vec{y}, t)$  и обладает размерностью  $7 + 2N$ . Она описывает динамику и кинематику КА с учётом гибких элементов при фиксированном наборе осцилляторов.

**Алгоритм численного интегрирования.** Систему (7) можно численно интегрировать, используя, например, метод Рунге – Кутты 4-го порядка [4]:

$$\vec{y}_{i+1} - \vec{y}_i \approx \frac{1}{6} (\vec{k}_1 + 2\vec{k}_2 + 2\vec{k}_3 + \vec{k}_4);$$

$$\vec{k}_1 = h_i f(\vec{y}_i, t_i);$$

$$\vec{k}_2 = h_i f\left(\vec{y}_i + \frac{\vec{k}_1}{2}, t_i + \frac{h_i}{2}\right);$$

$$\vec{k}_3 = h_i f\left(\vec{y}_i + \frac{\vec{k}_2}{2}, t_i + \frac{h_i}{2}\right);$$

$$\vec{k}_4 = h_i f(\vec{y}_i + \vec{k}_3, t_i + h_i),$$

где  $\vec{y}_i$  – приближённое значение вектора состояния системы (7) в момент времени  $t_i$ ;  $\vec{y}_{i+1}$  – приближённое значение вектора состояния системы (7) в момент времени  $t_{i+1} = t_i + h_i$ ;  $h_i$  – шаг интегрирования в момент времени  $t_i$ . Шаг интегрирования может быть выбран исходя из измерения времени, прошедшего между текущей и предыдущей итерацией алгоритма интегрирования. В таком случае процесс интегрирования динамики КА будет происходить в реальном масштабе времени.

### Сравнение результатов моделирования динамики КА «Ионосфера», полученных на программах конечно-элементного анализа и на стенде ВКПО

Согласно методу, изложенному в [5], была создана приближённая математическая модель КА «Ионосфера», имеющая в своём составе 79 осцилляторов (когда все гибкие элементы активны). При этом размерность системы (7) получается равной 165. Данная модель была заложена в конфигурационные файлы моделирующего комплекса, согласно схеме на рис. 4.

Было произведено сравнение результатов моделирования движения КА, полученных следующими способами:

- в программах динамического анализа – связке программных пакетов конечно-элементного анализа (Patran/Nastran), кинематического анализа (Adams) и моделирования систем управления (MATLAB);

- на стенде ВКПО, моделирующее программное обеспечение которого базируется на алгоритме, описанном выше.

В ходе моделирования к центральному телу был приложен постоянный тестовый момент по оси  $u$  равный 0,02 Н·м.

На рис. 6, 7 приведены графики, на которых изображены разность  $\Delta\omega_y = \omega_y - \tilde{\omega}_y$  угловых скоростей,

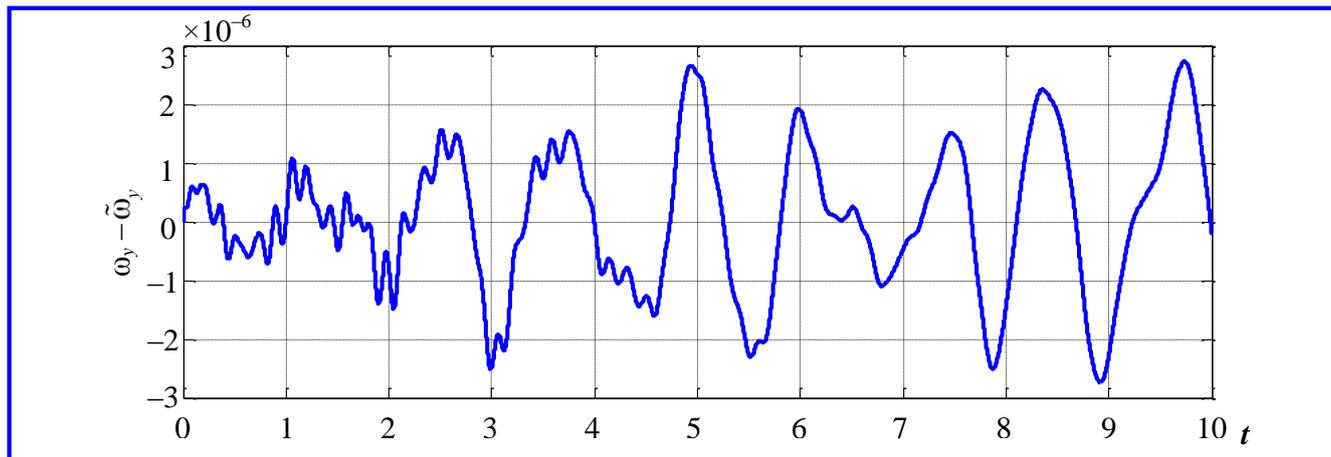


Рис. 6. Разность значений угловой скорости по оси y, полученных разными способами

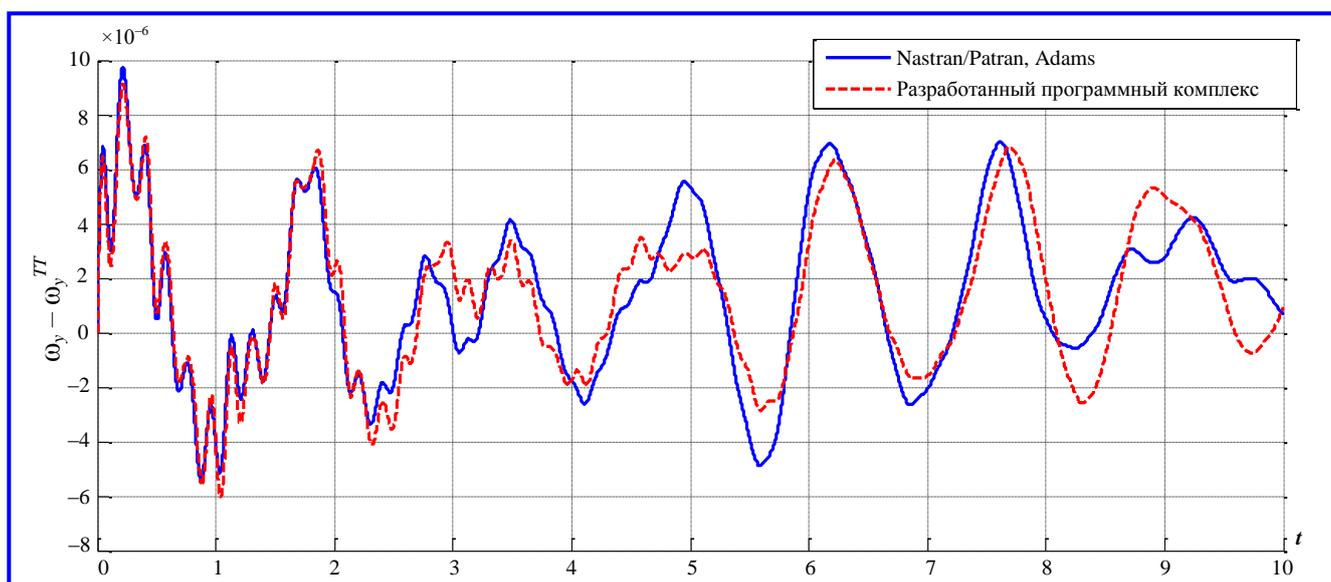


Рис. 7. Влияние гибких элементов на угловую скорость КА при разных способах моделирования

полученных разными способами, в проекции на ось y; влияние гибких элементов на угловую скорость КА (без учёта угловой скорости «замороженного» твёрдого тела).

Значения критериев, характеризующих разность результатов моделирования, полученных различными способами, были следующими: среднее отклонение  $m = 6,98 \cdot 10^{-8}$  рад/с; среднеквадратическое отклонение  $s = 1,23 \cdot 10^{-6}$  рад/с; максимальный модуль отклонения  $p = 2,74 \cdot 10^{-6}$  рад/с; относительная ошибка  $v = 0,42\%$ .

Как можно видеть из полученных результатов сравнения, предложенный алгоритм хорошо аппроксимирует движение КА с учётом гибких элементов (относительная ошибка составляет менее 0,5%). Данный алгоритм можно применять для моделирования динамики КА в реальном и ускоренном масштабе времени на стенде ВКПО.

### Применение моделирующего программного комплекса для создания стенда поддержки КА, находящегося в эксплуатации

Применение программного моделирующего комплекса для КА, уже находящихся в эксплуатации, также является оправданным, поскольку в случае возникновения нештатных ситуаций, не предусмотренных на этапе наземной отработки, необходимо проектировать изменения бортового ПО, для чего требуется производить моделирование движения КА с учётом нештатной работы датчиков и органов управления.

Это особенно актуально, если на КА используется СО стороннего производителя и стенд для её наземной отладки имеет закрытую от заказчика архитектуру. В данном случае на базе моделирующего программного комплекса возможно в сжатые сроки скомпоновать необходимую модель КА, дополнить её моделями нештатно

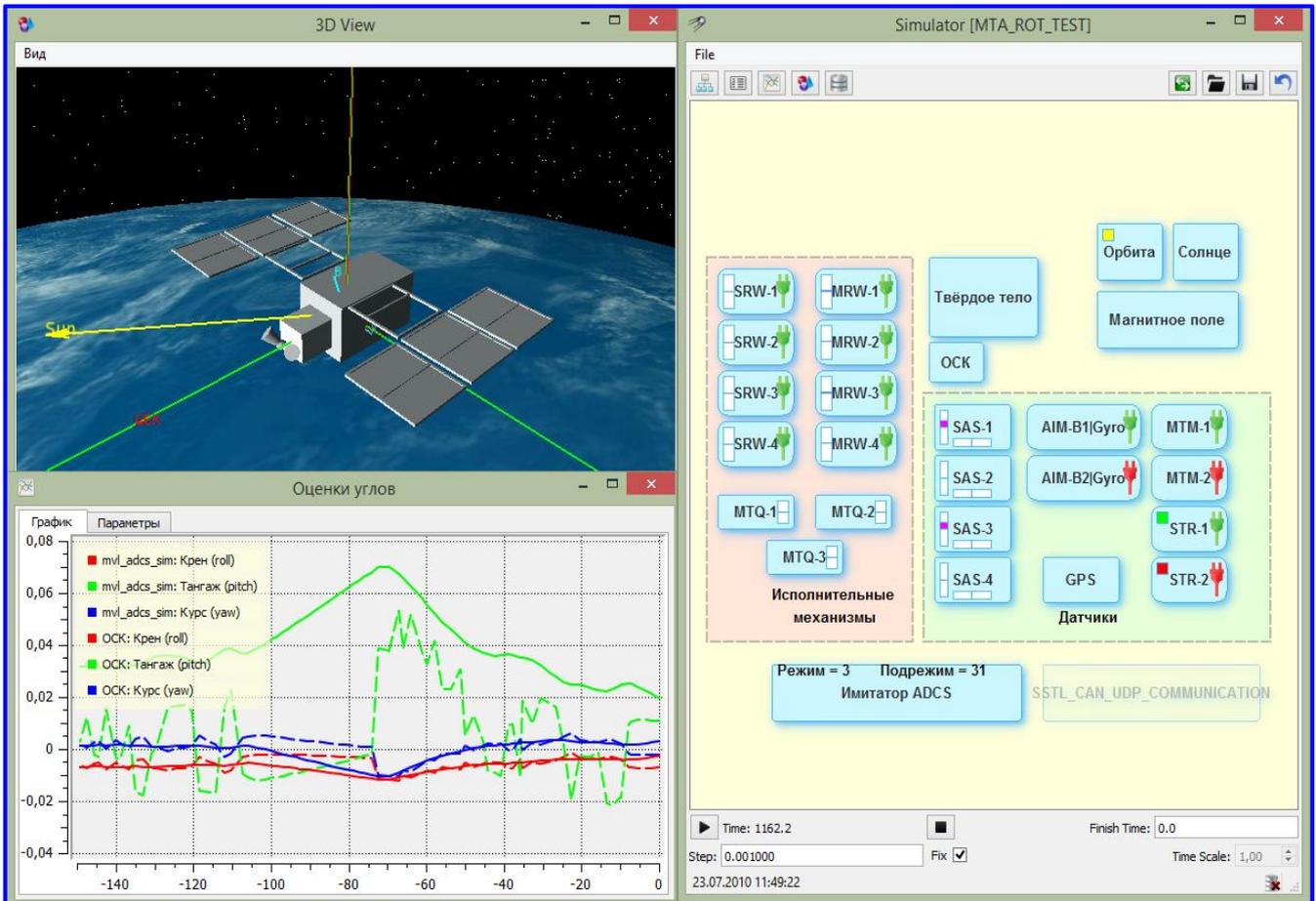


Рис. 8. Пользовательский интерфейс отладочного стенда на базе моделирующего программного комплекса для КА класса «Канопус»

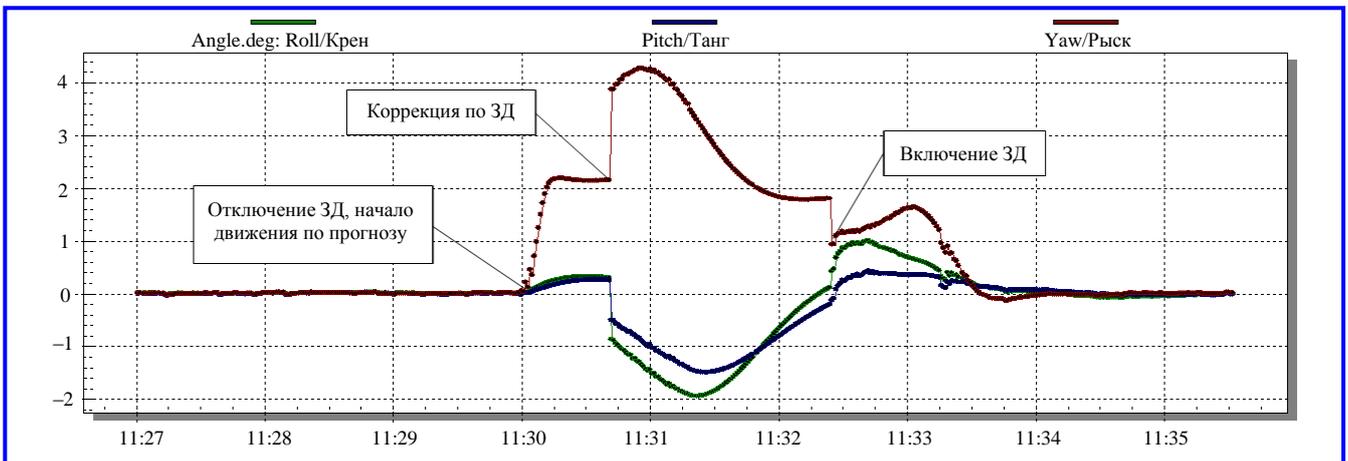


Рис. 9. Отклонение осей КА от расчётной системы координат в случае временного пропадания показаний звёздного датчика (ЗД)

функционирующих приборов и использовать полученную модель для выработки решений по модификации бортового ПО.

В качестве примера, иллюстрирующего данный подход, приведём отладочный стенд, созданный для КА класса «Канопус» на базе моделирующего программного комплекса. На ап-

паратах данного класса установлена система ориентации производства английской фирмы SSTL.

На рис. 8 приведён снимок пользовательского интерфейса созданного отладочного стенда, на котором отображаются основные модули, на базе которых функционирует ПО стенда.

С помощью созданного отладочного стенда были выявлены и исправлены недоработки в бортовом ПО системы ориентации фирмы SSTL. Эти недоработки могли приводить к отклонениям осей КА от расчётной системы координат в случае пропадания показаний звёздного датчика (ЗД) во время выполнения манёвра. Такие пропадания могут быть связаны с засветкой матрицы ЗД Солнцем или Луной, либо высокой угловой скоростью манёвра.

По данным телеметрии с Белорусского космического аппарата, такие отклонения имели вид, изображённый на рис. 9.

После анализа полученных данных была выдвинута гипотеза о том, что данные отклонения могут быть вызваны запаздыванием реальных угловых скоростей роторов двигателей-маховиков от командных значений. Подтвердить данную гипотезу на отладочном стенде фирмы SSTL не представлялось возможным, поскольку

существующие математические модели не позволяли ввести запаздывание в управление двигателями-маховиками. Данная гипотеза была подтверждена моделированием на стенде, базирующемся на разработанном моделирующем программном комплексе. Результаты моделирования приведены на рис. 10.

После произведения необходимых корректировок в бортовом ПО системы ориентации отклонения при совершении манёвров в случае пропадания показаний ЗД значительно уменьшились. Это видно из данных телеметрии, изображённых на рис. 11.

Таким образом, наличие моделирующего программного комплекса, описанного в данной работе, позволило в сжатые сроки создать моделирующий стенд для КА класса «Канопус» и устранить выявленные недоработки бортового ПО СО производства английской фирмы SSTL.

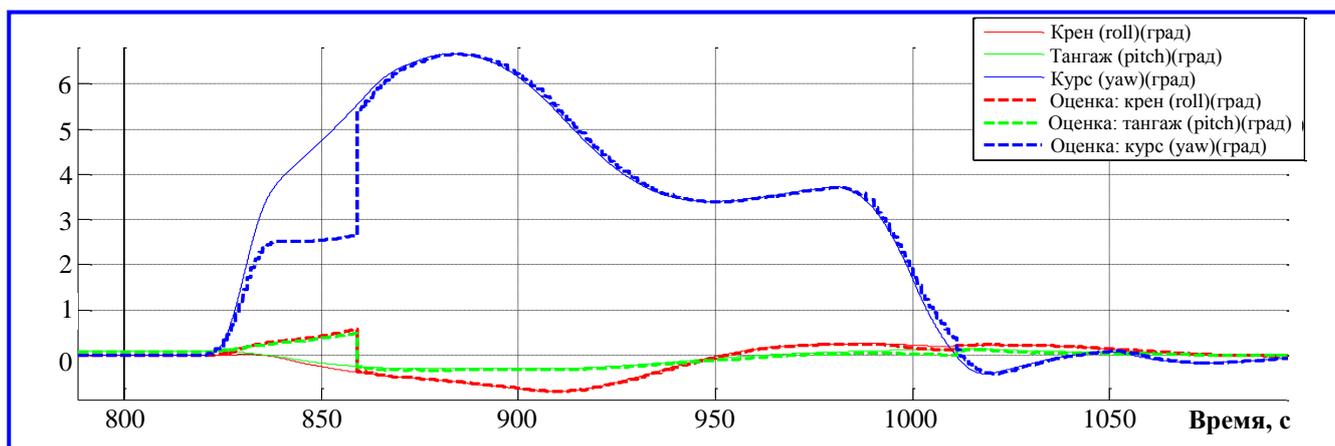


Рис. 10. Отклонение осей КА от расчётной системы координат в случае временного пропадания показаний звёздного датчика (результаты моделирования)

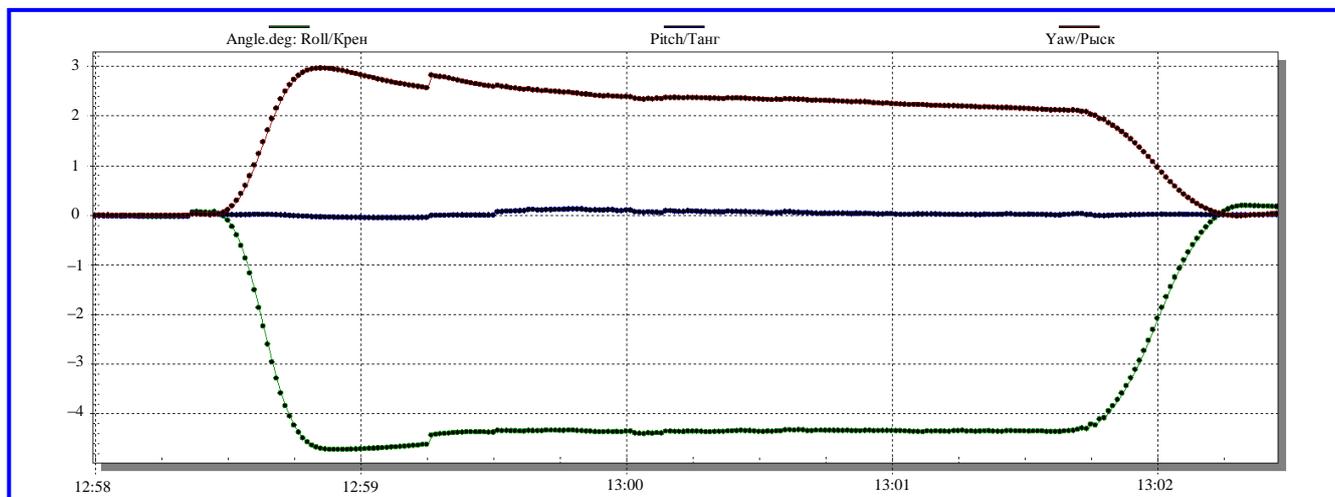


Рис. 11. Углы ориентации КА относительно орбитальной системы координат во время выполнения манёвра при пропадании показаний звёздного датчика

### Заключение

Разработанный в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» универсальный моделирующий программный комплекс позволяет в сжатые сроки создавать наземные моделирующие отладочные стенды для СО разрабатываемых и находящихся в эксплуатации КА.

В настоящий момент в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» данный комплекс используется для моделирования динамики и отладки СО КА «Ионосфера», «Канопус», Белорусского космического аппарата, «Ломоносов». В будущем на базе моделирующего программного комплекса планируется создать отладочные стенды для КА «Ионозонд» и перспективных аппаратов класса «Канопус».

### Литература

1. Полунатурное моделирование системы управления ори-

ентацией метеоспутника / О. М. Мирошник, В. П. Курилович, В. З. Айнбиндер, А. Д. Беленький // Труды ВНИИЭМ. Разработка и исследование электромеханических систем космических аппаратов метеорологического и природно-ресурсного назначения. – М. : НПП ВНИИЭМ, 1987. – Т. 83. – С. 62 – 69.

2. Бокс Д. Сущность технологии СОМ / Дональд Бокс. – СПб. : Питер, 2001. – 400 с. : ил.

3. Аппель П. Теоретическая механика / П. Аппель. – М. : Физматгиз, 1960. – 515 с.

4. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений : в 2 т. / И. С. Березин, Н. П. Жидков. – М. : Издательство физико-математической литературы, 1959 – 1962.

5. Новые возможности создания динамической модели управляемого космического аппарата с учётом упругих свойств и изменяемости конструкции / А. Д. Беленький, В. Н. Васильев, Д. В. Гриневич [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2012 – Т. 127. – № 2. – С. 21 – 26.

Поступила в редакцию 03.10.2013

*Дмитрий Владимирович Гриневич, млад. научн. сотрудник, т. (495) 366-33-61,  
e-mail: d.v.grinevich@gmail.com.*

*Антон Викторович Лебедев, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник, т. (495) 366-21-22,  
e-mail: anton.lebedev@mcc.vniiem.ru.*

*Олег Викторович Мороз, зам. начальника отдела, т. 8 (963) 760-70-15,  
e-mail: oleg.moroz@mcc.vniiem.ru.*