

УДК 621.3

А. Д. М у х и н

## ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СХЕМ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Приведено краткое описание программно-математического комплекса, позволяющего эффективно решать проблемы автоматизации расчетных работ по адаптации ракет космического назначения к запуску различных космических аппаратов при подготовке исходных данных для разработки системы управления.*

Сложной динамической схемой ракет космического назначения (РКН) называется совокупность математических моделей (как линейных, так и нелинейных), описывающих движение РКН относительно номинальной траектории под действием внешних и внутренних возмущений, а также поведение важных с точки зрения динамики движения отдельных внутренних узлов и агрегатов РКН.

**Общее описание программно-математического комплекса.** На рисунке приведена функционально-структурная схема комплекса, где изображены основные элементы данных, содержащихся в базе, и



**Функционально-структурная схема программно-математического комплекса**

основные функциональные модули оболочки, позволяющие пользователю программы в автоматическом или автоматизированном режимах выполнять все необходимые операции цикла расчетных работ при адаптации носителя к конкретному пуску.

Центральная часть такого комплекса — это база данных, предназначенная для хранения разнородной информации и обеспечивающая быстрый доступ к требуемым данным. В базе данных хранится вспомогательная информация, определяющая структуру математических моделей динамической схемы конкретной РКН и взаимосвязь исходных данных с коэффициентами этих математических моделей. Таким образом, представление динамических схем в базе данных является максимально формализованным, что предоставляет конечному пользователю свободу выбора средств решения поставленных задач в рамках единой программной среды. Недостатком столь низкой степени регламентации расчетных процедур является увеличение потерь времени пользователя на освоение всех возможностей программной среды и снижение эффективности их использования. Для устранения этих трудностей в программе предусмотрена иерархическая структура шаблонов действий, определяющих типовые операции над некоторым классом объектов базы данных. Простейшими примерами шаблонов действий являются выбор “типовой” математической модели объекта для автоматизированных расчетов или выбор того или иного метода анализа устойчивости.

Применение одного из таких шаблонов в той или иной степени повышает уровень регламентации процесса расчетов.

Например, на начальных этапах исследования, когда специфика объекта еще недостаточно ясна, или при ознакомлении с программной средой на примере известной задачи можно использовать расчетную технологию “по полной схеме” ее регламентации. Впоследствии, по мере накопления опыта работы с программой, разработчик может по своему усмотрению изменять порядок некоторых вычислений, модифицировать структуру расчетных моделей вплоть до полного отказа от исходного варианта регламентации.

**Формирование базы исходных данных.** Исходными данными для расчета и анализа динамической схемы являются геометрические и массово-инерционные характеристики объекта, номинальная траектория движения; аэродинамические коэффициенты; параметры, характеризующие внутреннюю динамику объекта; характеристики органов управления и т.п. Кроме того, в качестве исходных данных выступают оценки разбросов на перечисленные параметры.

Первый этап работы по автоматизации расчетов состоит в создании базы данных нового объекта, соответствующего рассчитываемой динамической схеме, и занесении в базу описанных исходных данных. При этом в базе данных фиксируются размерности введенных

величин, что позволяет при последующих расчетах автоматически переводить данные в ту размерность, которая требуется для той или иной расчетной формулы.

**Создание математической модели.** Введенные исходные данные — это отправная точка при выборе математических моделей, определяющих структуру рассчитываемой динамической схемы. Как правило, на начальном этапе выбирается одна из “традиционных” математических моделей движения объекта, описываемая системой линеаризованных обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Конкретные формулы расчета коэффициентов этих уравнений определяются составом и структурой исходных данных, принадлежностью исходных данных к одному из априорно заданных классов, а также личным опытом разработчика динамической схемы.

В случае необходимости линейную модель объекта можно дополнять различными нелинейными элементами, т.е. допускается “вложенная” структура математических моделей, что позволяет на начальном этапе анализа устойчивости пользоваться математическим аппаратом для линейных систем.

Далее рассчитываются коэффициенты динамической схемы в рамках заданной модели, после чего результаты расчета заносятся в базу данных вместе с исходными данными.

В случае необходимости можно выполнить сравнительный анализ рассчитанных коэффициентов с контрольной группой динамических объектов с помощью наложения графиков различных параметров объекта с графиками аналогичных параметров объекта, рассчитанных ранее. При этом в случае существенного “выпадения” каких-либо характерных параметров из контрольной группы, разработчиком может быть сделан вывод о модификации расчетной модели. Полученную таким образом математическую модель объекта можно использовать для анализа устойчивости одним из известных методов.

**Типовые операции.** Рассмотрим типовые операции, выполняемые в программно-математическом комплексе.

Пусть объект управления описывается системой уравнений, которую в векторно-матричной форме можно представить в виде [1]:

$$\begin{cases} A_1 \ddot{x}_1 + B_1 \dot{x}_1 + C_1 x_1 = d_1 u + v_1; \\ y = F_1 \dot{x}_1 + G_1 x_1; \\ L_u(u) = L_y(y), \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_1$  — вектор состояния объекта;  $y$  — вектор наблюдаемых параметров;  $u$  — управляющее воздействие;  $A_1, B_1, C_1, d_1$  — матрицы размерности  $n \times n$ ;  $d_1$  — вектор размерности  $n$ ;  $v_1$  — вектор возмущающих факторов размерности  $n$ ;  $F_1, G_1$  — матрицы наблюдения размерности

$3 \times n$ ;  $L_y(y)$ ,  $L_u(u)$  — линейные дифференциальные операторы, описывающие характеристики системы управления и рулевых приводов.

Данная система является системой линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Слабая зависимость коэффициентов матриц  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ ,  $d_1$ ,  $F_1$ ,  $G_1$  от времени позволяет “замораживать” коэффициенты этих матриц в каждый требуемый момент времени  $\tau$  и применять к системе (1) хорошо разработанный аппарат линейных систем с постоянными коэффициентами.

Матрицы, входящие в эту систему, совместно с параметрами системы управления и рулевых приводов являются исходными данными для анализа устойчивости частотными методами (Найквиста, Михайлова), для расчета определителей  $\Delta_i$  в методе Рауса–Гурвица, расчета корней характеристического уравнения и моделирования возмущенного движения объекта. Для удобства использования этих методов в данном программно-математическом комплексе система (1) преобразуется к форме Коши:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + V; \\ y = Cx; \\ L_u(u) = L_y(y), \end{cases} \quad (2)$$

где  $x = \begin{vmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \end{vmatrix}$  — вектор состояния объекта размерности  $2n$ ;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  — матрицы размерности  $2n \times 2n$ ,  $2n \times 1$ ,  $2n \times 1$  и  $3 \times 2n$  соответственно.

Система (2) позволяет получить передаточные функции объекта регулирования от входа  $u$  к любому из выходов  $y_i$ :

$$W_{\text{оп}}^i(s) = \frac{N_{\text{оп}}^i(s)}{D_{\text{оп}}(s)} = C_i \|sE - A\|^{-1} B, \quad (3)$$

где  $C_i$  —  $i$ -я строка матрицы  $C$ ;  $E$  — единичная матрица размерности  $2n \times 2n$ .

Для непосредственного расчета коэффициентов числителей и знаменателей передаточных функций в программно-математическом комплексе используются формулы:

$$\begin{aligned} D_{\text{оп}}(s) &= \det \|sE - A\|; \\ N_{\text{оп}}^i(s) &= \det \|sE - (A - BC_i)\| - D_{\text{оп}}(s). \end{aligned} \quad (4)$$

По полученным передаточным функциям рассчитываются суммарные частотные характеристики объекта регулирования с автоматом стабилизации и рулевым приводом в соответствии с имеющейся в базе моделью системы управления, а также исследуется устойчивость движения.

**Дополнительные операции.** Кроме предполетного анализа динамики движения, в программном комплексе реализована возможность

хранения, обработки и анализа поступающей с борта объекта регулирования телеметрической информации. В программе предусмотрены также функции “очистки” сигналов от сбойных участков, на которых из-за помех на линии связи отсутствует полезная информация; фильтрации высокочастотных (шумовых) составляющих сигнала и проведения спектрального анализа сигналов; вычисления производной и интеграла от исходного сигнала, а также вычисление различных математических формул от нескольких параметров, позволяющих получить оценку неизмеряемых параметров; непосредственного вывода на печать таблиц с исходными данными и рассчитанными коэффициентами, а также графиков зависимостей различных параметров, частотных характеристик, областей устойчивости.

Кроме того, возможно создание готовых отчетных документов Microsoft® Word на основе разрабатываемых пользователем шаблонов с возможностью их последующего дополнения и изменения в соответствии с текущими нуждами.

**Вывод.** Разработанный программно-математический комплекс может являться составной частью комплексной системы автоматизации всего жизненного цикла ракет-носителей, основанной на CALS-технологиях (*Computer Aided Logistic Systems*) — технологиях комплексной компьютеризации сфер промышленного производства. Цель CALS-технологий – унификация и стандартизация спецификаций промышленной продукции на всех этапах ее жизненного цикла, включая хранение, обработку и передачу информации в компьютерных средах, оперативный доступ к данным [2].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черемных С. В., Ириков В. А., Мазурик В. П. Диалоговые процедуры анализа динамических свойств космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.
2. Колесников К. С. Динамика ракет. – М.: Машиностроение, 2003. – 520 с.

Статья поступила в редакцию 26.12.2006