

полезного груза может быть принято передвижное рабочее место с закрепленным в нем космонавтом (рис. 2).

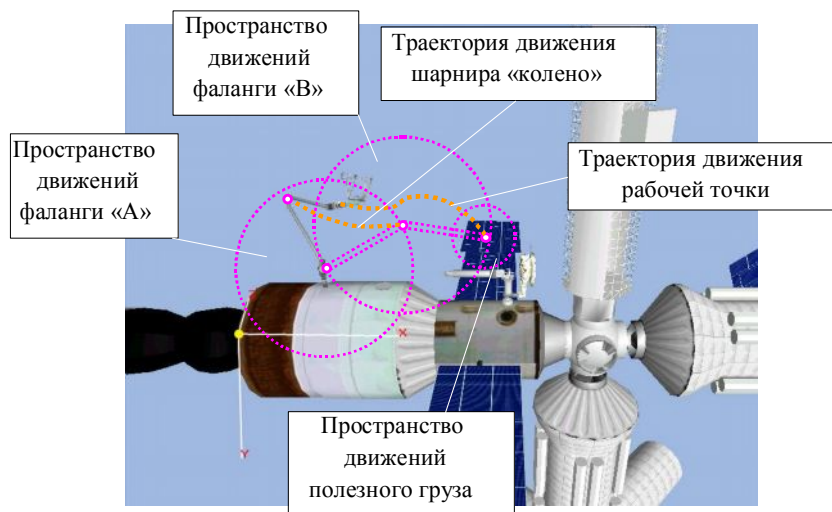


Рис. 2. Схема геометрического моделирования рабочего пространства манипулятора ERA в процессе перемещения полезного груза

Теоретическая траектория перемещения рабочей точки манипулятора в конечную точку-цель может представлять собой прямую, однако добиться такой траектории даже в автоматическом (программном) режиме управления невозможно, поскольку одновременное управление работой более чем двух шарниров физически и психологически невозможно. Вследствие этого траектории движения контрольных точек манипулятора есть некоторые кривые, лежащие на поверхностях соответствующих соприкасающихся траекторных сфер.

Динамическая реалистичность виртуальных моделей, наряду с фотореалистичностью, является важнейшим свойством, обеспечивающим эффективность подготовки персонала при решении задач целеуказания на тренажерно-моделирующих стендах. Дальнейшее повышение «глубины погружения» человека в виртуальное пространство может быть достигнуто только при помощи индивидуальных средств виртуальной реальности и стабилоплатформ, имитирующих ускорения и позиционирование в шестипараметрической системе координат.

**В.Б. Резников, В.Ф. Гузик, Е.В. Ляпунцова**

#### **ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

В настоящее время моделирование приобретает все большую актуальность. Особенно это вызвано не только обязательными условиями поддержки развития науки, но и возросшей потребностью к решению задач моделирования в промышленности для ускорения и снижения стоимости разработки новых технических систем (объектов). Однако за последнее время значительно возросла интеграция технических систем, что, соответственно, привело к резкому росту требований к

средствам моделирования, необходимым для решения задач исследования и разработки таких сложных технических систем. При этом основными проблемами компьютерного моделирования сложных систем являются:

- сложность формализованного описания этих систем;
- трудоемкость построения математических моделей, описывающих их поведение;
- необходимость решения математических моделей за минимально возможный промежуток времени, но с высокой точностью;
- реалистичная визуализация результатов моделирования, близких к натуральному восприятию.

Существующие системы моделирования обладают очень широкими возможностями в части набора математических методов решения, однако имеют ряд существенных ограничений, не позволяющих эффективно решать указанные проблемы. В связи с этим приобретает всё большую значимость задача разработки принципов и методов построения систем моделирования сложных технических объектов, удовлетворяющих требованиям к современному инструментарию исследователя. Эти требования могут быть сформулированы следующим образом:

- 1) моделирующее средство должно обладать высокой производительностью и, соответственно, масштабируемостью;
- 2) должны быть поддержаны многокомпонентные мультидисциплинарные объекты моделирования, т.е. состоящие из большого количества компонент, принадлежащих различным физическим доменам;
- 3) система моделирования должна иметь простой интерфейс программирования, не требующий дополнительной квалификации в области программирования вычислительных средств;
- 4) необходимо наличие в системе моделирования поддержки коллективной работы территориально распределенных пользователей;
- 5) результаты моделирования должны представляться как традиционным способом, в виде графиков функций и диаграмм, так и в виде реалистичных моделей.

Как видно из требований, удобство и простота работы с системой моделирования является не менее важным свойством современной системы, чем её высокая производительность. Это требование связано с тем, что модели сложных технических объектов состоят из компонент различной физической природы. Поэтому для их создания привлекаются ученые-специалисты из различных областей науки (физики, химии, биологии), не обладающие навыками программирования ЭВМ. К тому же, поскольку расчет сложных моделей требует применения параллельных вычислительных систем, это устанавливает дополнительно ещё более высокие требования к квалификации пользователей системы моделирования.

Рассмотренные проблемы разработки высокопроизводительной системы моделирования, удовлетворяющей представленным требованиям, предлагается решить путем использования специального способа представления моделируемых объектов – в виде многоуровневых структурных моделей, который позволяет решать вышеперечисленные проблемы по отдельности.

Идея создания многоуровневых структурных моделей была впервые сформулирована В.Н. Нуждиным применительно к области автоматизации моделирования электромеханических устройств [1]. В данной работе эта идея была расширена и распространена на мультидисциплинарные многокомпонентные модели технических систем. Основные принципы предлагаемой идеи использования многоуровневых структурных моделей для решения задачи моделирования сложных систем заключаются в следующем:

- качество процесса моделирования поднимается за счет использования современных технологий вычислительной техники и математического обеспечения ЭВМ;
- расширяется понятие модели, которое охватывает все аспекты проведения процесса моделирования от программирования задачи до получения результатов;
- модель представляется в виде иерархии вложенных уровней, каждый из которых описывает отдельный этап процесса моделирования и оперирует элементами более низкого уровня;
- при помощи этих уровней устанавливается взаимосвязь между структурой описания модели и структурой вычислителя, на котором это описание рассчитывается;
- процесс формирования каждого уровня модели максимально автоматизируется.

Таким образом, в качестве основы описания моделируемых объектов был выбран способ представления систем в виде структур элементов, описанных системами математических уравнений. В целом, согласно основным задачам, выполняемым системами моделирования, структурные модели представляются в виде пяти иерархических уровней: математического, функционального, алгоритмического, вычислительного и описательного. Рассмотрим назначение каждого уровня в отдельности.

Математический уровень представления структурной модели описывает только элементарную модель в виде дифференциально-алгебраической или алгебраической системы уравнений, кроме того, могут присутствовать логические уравнения и внешние специальные функции пользователя. Математического уровня для описания сложной системы недостаточно, он определяет только поведение во времени элементарных структурных компонент системы. И он не может непосредственно использоваться для организации вычислительного процесса, так как необходим предварительный выбор метода численного решения уравнений и условий применения этого метода.

Функциональный уровень представляет собой описание модели в виде схемы соединения элементов, выделяемых по функциональному назначению в общей схеме исследуемой системы. На данном уровне пользователь конструирует структурную модель физической системы, которая определяет взаимодействие элементарных компонент между собой в определенный промежуток модельного времени.

Алгоритмический уровень представления структурной модели реализует представление модели объекта в виде блок-схемы алгоритма, описывающего сложное поведение системы. Данный алгоритм определяет порядок структурного изменения функциональных схем или порядок изменения параметров моделей для проведения серии вычислительных экспериментов. Алгоритмический уровень необходим для описания поведения сложных систем с динамической структурой.

Вычислительный уровень представления структурных моделей – определяет необходимые данные для организации вычислений исходной совокупности математических моделей соответственно описанию, представленному на функциональном и алгоритмическом уровнях. Данный уровень определяет метод численного решения математических моделей, условия расчета схемы (определяемые на алгоритмическом уровне). Также на данном уровне определяется способ разбиения системы на отдельные части для распределенного решения и набор операторов (программного кода), реализуемых на базовой вычислительной системе моделирующего комплекса.

Описательный уровень представления структурной модели служит для облегчения восприятия модели пользователем. На данном уровне модель представляет собой визуальный компонент на наборном поле интерфейса системы моделирования. Компоненту соответствует набор данных, характеризующих его параметры и математическую модель. Сложная модель обладает огромным количеством параметров, число которых затрудняет анализ её поведения при помощи традиционных графиков и таблиц функции. Решить эту проблему помогает технология виртуальной реальности. При этом описательный уровень структурной модели расширяется за счет набора данных результатов моделирования и реалистичных объемных моделей, отображающих поведение компонента в динамике как виртуального физического устройства. Это позволяет в значительной степени облегчить качественную оценку поведения сложных систем высокой размерности.

Иерархию уровней можно представить на следующей схеме, показанной на рис. 1 [2].

Данная схема отражает инкапсуляцию (вложенность) уровней – функциональный уровень оперирует моделями, представленными на математическом уровне. В свою очередь модели алгоритмического уровня оперируют функциональными моделями. На вычислительном уровне используются все три типа представления моделей, лежащие ниже по иерархии: математического, функционального или алгоритмического уровня. Описательный уровень аналогичным образом затрагивает все остальные уровни.

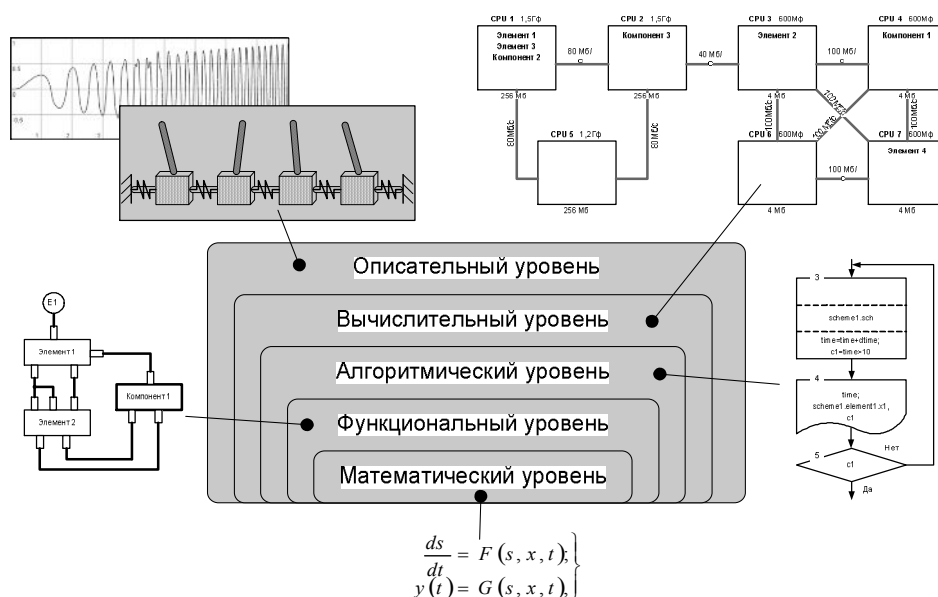


Рис. 1. Иерархия уровней базиса структурных моделей

Реализация нижнего уровня предполагает, что описание отдельных элементов компонент или их частей задается в виде систем дифференциально-алгебраических уравнений. Совокупность моделей объединяется в иерархический класс, реализуемый в виде библиотеки структурных моделей. Данная библиотека хранит элементарные компоненты моделируемых систем.

Алгоритмический уровень определяется совокупностью устойчивых состояний системы и набора условий перехода из одного состояния в другое. Таким образом, реализуется алгоритм расчета системы в виде графа состояний. Каждое

устойчивое состояние характеризуется собственным функциональным описанием. На функциональном уровне пользователь, используя библиотеку структурных моделей, создает в визуальном редакторе структурную схему моделируемой системы.

Моделирующий комплекс, функционирующий на основе рассмотренного многоуровневого базиса структурных моделей, осуществляет автоматическое формирование математического описания моделируемой системы для каждого устойчивого состояния [3]. При этом функциональному описанию системы соответствует визуальное представление моделируемой системы, формируемое в специальном визуальном редакторе. В процессе моделирования или в отложенном режиме данное визуальное описание отображает функционирование системы. Необходимо отметить, что формирование структурных схем может производиться автоматически, путем использования специального языка построения структурных схем. Данное свойство позволяет автоматизировать процесс построения регулярных структур моделируемых схем.

Реализация обработки описанных выше уровней базиса структурных моделей обеспечивает построение общей математической модели исследуемого инженерного объекта. Однако важнейшим качеством процесса моделирования является эффективность (быстрота и точность) решения математической модели. Поэтому специфика моделирования сложных технических объектов предполагает использование неоднородных многопроцессорных и многомашинных вычислительных систем в качестве вычислительной базы моделирующих комплексов. Область используемых вычислительных систем столь широка, что не позволяет ориентировать систему моделирования на все возможные архитектуры. В связи с этим было решено ввести к уже рассмотренным уровням, еще один дополнительный уровень представления структурных моделей, который содержит всю информацию об архитектуре базового вычислителя. Кроме того, этот уровень определяет способ распределения структурной модели по вычислительным узлам и генерации необходимого программного кода для вычислений математических моделей. Необходимо отметить, что структурная схема уже представляет собой распределение данных и процедур их обработки.

Данный уровень представления определяет непосредственную связь структурной схемы моделируемого технического объекта с вычислителем, решающим математическую модель данного объекта. Основное назначение уровня – повысить эффективность решения модели. Решение задачи распределения может осуществляться как в динамическом, так и в статическом режиме для отдельных фрагментов исходной функциональной схемы моделируемой системы. Таким образом, реализованный подход позволяет эффективно реализовать поддержку любых конфигураций вычислительных архитектур, поддерживаемых системой, а именно локальных сетевых кластеров на базе персональных компьютеров с наличием дополнительных многопроцессорных акселераторов на базе сигнальных процессоров.

На описательном уровне структурные модели редактируются при помощи уже визуального конструктора моделей (в котором задается графическое описание элементарных моделей) и конструктора виртуальных моделей. Конструктор обеспечивает решение задачи визуализации результатов моделирования, позволяя создавать виртуальные модели, реалистично отображающие моделируемые технические объекты. Динамика объектов обеспечивается путем подключения потоков данных к степеням свободы геометрических частей объекта.

Сложные модели обладают большим количеством переменных, в этом случае визуальные реалистичные модели позволяют легко проводить качественный анализ всей системы в целом.

Таким образом, многоуровневый базис структурных моделей позволяет описывать физические системы с детерминированными сосредоточенными параметрами, имеющие гибридный характер поведения. Такие системы описываются иерархическими структурными схемами элементарных объектов. Элементарные объекты представляют собой обособленные компоненты, решающие отдельную целевую задачу на фиксированном промежутке модельного времени, и, в свою очередь, описываются системами дифференциально-алгебраических уравнений. Такой способ позволяет описывать непрерывный, изменяющийся со временем, характер поведения объектов. Дискретный характер поведения описывается при помощи графа расчета моделируемой системы, узлы которого представляют собой устойчивые состояния системы, а ребра – переходы из одного состояния в другое. Узлы графа помечены вариантами статических структурных схем, а его ребра – условиями перехода. Кроме того, существует возможность замены каждой отдельной компоненты структурной схемы по заранее определенному условию. В качестве условий могут быть установление факта достижения определенного момента модельного времени, истинность логического выражения или достижение предела функции.

В заключение отметим основные достоинства разработанного описания технических объектов:

- такое описание обладает иерархичностью и масштабируемостью – это позволяет редуцировать структурную сложность объектов моделирования и реализовать распределенный расчет системы;
- описание моделей в виде систем уравнений обладает универсальностью – позволяет описывать мультидисциплинарные объекты;
- структурное и математическое описание обладают высокой наглядностью, что является важным для восприятия сложных моделей;
- алгоритмический уровень позволяет осуществлять не только моделирование дискретно-непрерывных систем, но и описывать поведение объектов с динамической структурой;
- выбранный способ описания наиболее удобен для формализации и автоматизации процесса составления описания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Нуждин В.Н.* Автоматизация проектирования и исследования электроприводов. Ч.2 Автоматизация моделирования. – Иваново: ИвГУ, 1980. – 95 с.
2. *Золотовский В.Е., Резников В.Б.* Многоуровневый базис представления моделей сложных технических систем // Известия СКНЦ ВШ. Технические науки. 2005. С. 53–56.
3. *Золотовский В.Е., Резников В.Б.* Система моделирования со структурными принципами программирования // Изв. вузов. Приборостроение. Тематический выпуск: «Проектирование аппаратных и программных средств управляющих и информационных систем». Т. 46. 2003. №2. С. 64–67.

**В.П. Свечкарев, И.А. Натальченко**

#### МОБИЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА

Распределенность и интегрированность стали характерными чертами современных информационных систем (ИС). При этом сохраняется тенденция на формирование ИС как средства поддержки динамической информационной модели исследуемой предметной области в интересах конкретного пользователя [1].