

ИНТЕЛЛЕКТНЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ

С. Н. ВАСИЛЬЕВ, Г. А. ОПАРИН, А. Г. ФЕОКТИСТОВ
Институт динамики систем и теории управления СО РАН, Иркутск, Россия

The paper is devoted to basic methodological aspects of intelligent process engineering of a computer research of dynamics and control system design of complicated driven plants because of knowledges packages and framework for their effective creation and use.

Введение

В последние два десятилетия большую актуальность приобрели вопросы автоматизации расчетных работ в отдельных приложениях динамики систем и теории управления, в частности, в области исследования динамики и проектирования систем управления сложными движущимися объектами (СУ СДО) типа летательных аппаратов различного назначения [6, 7, 14].

Термин проектирование здесь и далее понимается в классическом (см., например, [1]) для специалиста по управлению смысле и подразумевает решение задачи структурно-параметрического синтеза систем управления, когда цель проектирования определяется в виде совокупности требований к динамическим показателям функционирования СУ СДО (точность в различных режимах, быстродействие, запасы устойчивости и др. динамические показатели). По сути дела, речь идет о формировании динамического облика СУ СДО и связанного с этой задачей комплекса научно-исследовательских работ, выполняемых на уровне математических моделей, аналитических и численных методов их исследования. В этом контексте определяющим для специалиста по управлению является понимание всех деталей математических моделей СУ СДО и способность выполнять операции их построения, идентификации, преобразования, упрощения, комплексирования, анализа и синтеза с целью достижения предъявляемых к СУ СДО требований. Уникальность динамического облика СУ СДО проявляется в комплексном сочетании таких факторов, как гибридность математической модели, упругость конструкции СУ СДО со слабым демпфированием, высокая размерность вектора состояния и жесткость уравнений динамики, наличие существенно нелинейных элементов, реализация алгоритмов управления на БЦВМ, прецизионность контура стабилизации, большое число моделей различной степени детализации, построенных на различных принципах абстракции и декомпозиции.

Говоря о сложных системах, нас, с точки зрения рассматриваемых в статье вопросов, будет интересовать определение сложности на модельном уровне. В первую очередь мы имеем ввиду составной характер математической модели, означающий представление сложной модели в виде совокупности взаимодействующих блоков (подсистем, модулей, элементов), а так же большое количество таких блоков и связей между ними (до нескольких десятков блоков и нескольких сотен связей). Существуют и другие показатели сложности модели, затрудняющие ее исследование, однако эти показатели не являются определяющими для рассматриваемых в статье вопросов.

Итак, основу расчетных работ при заданной цели исследования составляют три тесно связанных типа понятий — это математическая модель СУ СДО, метод исследования этой модели и методики достижения цели исследования с использованием моделей и методов их решения. В данной статье рассматриваются наиболее часто используемые на практике алгоритмические модели, когда описывающие функционирование СУ СДО сложные системы дифференциальных, разностных и алгебраических уравнений оформляются в виде множества взаимосвязанных процедур и организованный на этой основе вычислительный процесс соответствует в определенном смысле поведению моделируемой системы. В этом контексте совокупность понятий “модель+метод+методика” несет ярко выраженную алгоритмическую окраску и составляет базу алгоритмических знаний расчетных работ.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 95-07-19045, 01-07-90220.

© С. Н. Васильев, Г. А. Опарин, А. Г. Феоктистов, 2001.

Традиционно процесс исследования динамики и проектирования СУ СДО представляет собой организованную в соответствии с технологией системного анализа последовательность многовариантных расчетов — вычислительных экспериментов, на каждом шаге которой в соответствии со стратегией и тактикой исследования и поиска приемлемых решений варьируются структура и значения параметров модели, методов и методик, выполняются запланированные расчетные работы, производится оценка результатов и принимается решение о дальнейшем направлении исследований.

Конструирование плана вычислительного эксперимента, а так же дальнейшая реализация этого плана средствами базового языка программирования — вот та рутинная деятельность, которая многократно выполняется в рамках этой технологии специалистами по управлению, отвлекает их внимание от решения проблемных задач и является в данной работе основным объектом автоматизации и инструментальной поддержки.

Статья посвящена вопросам разработки интеллектуальной технологии и системной среды машинного исследования динамики и проектирования СУ СДО на основе комплексного использования средств и методов программной инженерии инженерии знаний. Такая автоматизированная интеллектуальная технология, в которой фундаментальную роль играет алгоритмическое знание и методы доказательного [9] программирования на основе регулярного применения логических уравнений в качестве основного формализма представления модели проблемной области, именуется далее как САТУРН-технология. В статье рассматриваются увязанные в единое целое такие методологические аспекты специализированной целевой САТУРН-технологии, как модульность и представление знаний о математических моделях СУ СДО, методах и методиках их анализа и проектирования; формулирование постановок исследовательских задач; планирование схем решения задач, их конкретизация и исполнение; визуализация данных и знаний, управление проектными данными, распределенные вычисления. Определяется базирующийся на знаниях и методах доказательного программирования новый тип прикладных программных систем — пакет знаний и обсуждаются вопросы автоматизации и инструментальной поддержки САТУРН-технологии.

1. Свойство модульности

Прежде, чем переходить к обсуждению особенностей наиболее важных технологических этапов САТУРН-технологии, необходимо отметить одно из центральных структурных свойств сложных моделей, методов и методик, как модульность. Известен широкий спектр самых различных взглядов на это понятие как в программировании, так и в других областях знаний. Тем не менее, конструктивное определение модульности остается центральной проблемой при создании любой модульной системы. В контексте наших рассуждений принцип модульности, при котором сложная система представляется в виде совокупности взаимодействующих элементов, является важнейшей методологической основой для построения математических моделей динамики сложных систем самого различного назначения, в том числе и СУ СДО. Вполне естественно распространение этого принципа на построение алгоритмов и методик исследования моделей, формируя упомянутые алгоритмы и методики соответственно из некоторых множеств стандартных фрагментов и правил.

Допустимые в САТУРН-технологии типы модулей подробно рассматриваются в следующем разделе. Сейчас же важно отметить, что на концептуальном уровне модульный подход позволяет создавать разнообразные сложные модели, алгоритмы и методики их исследования на основе сравнительно небольшого множества стандартных блоков. На программном уровне использование принципа модульности позволяет заменить программирование конструированием из готовых, заранее разработанных, автономно оттранслированных и отлаженных модулей, а также позволяет реализовать автоматическую сборку из модулей схемы решения исследовательской задачи и, в конечном счете, расчетной программы.

2. Представление знаний о математических моделях, методах и методиках их исследования

Методологической основой углубленной автоматизации расчетных работ в области исследования динамики и проектирования СУ СДО является использование подхода, базирующегося на знаниях. В связи с этим вопросы представления, накопления, отладки, модификации и использования знаний занимают центральное место в рассматриваемой САТУРН-технологии.

Структурный анализ показывает, что алгоритмическое знание о математических моделях, методах и методиках их исследования имеют сложную иерархическую модульную структуру, в которой выделяются

три концептуально обособленных слоя: вычислительных, схемных и продукционных знаний. Каждый слой оперирует своим набором понятий. Иерархия слоев устроена так, что понятия продукционного слоя раскрываются через (имеют ссылки на) понятия схемного слоя, которые, в свою очередь, раскрываются через понятия вычислительного слоя. Дадим более детальное представление о каждом из трех упомянутых слоев знаний.

2.1. Вычислительные знания

Важный этап САТУРН-технологии — преобразование математической модели и методов ее исследования в компьютеро-ориентированную форму. Анализ публикаций по автоматизированному проектированию систем управления (см., например, [1, 2, 24]) свидетельствует о том, что в этой области имеется устойчивая тенденция к накоплению вычислительного знания о машинных методах теории регулирования и управления в виде снабженных спецификациями подпрограмм (п/п) на широко используемых языках программирования Фортран, Паскаль, Си. Как правило, совокупности таких подпрограмм организуются в библиотеки с помощью штатных средств операционной системы вычислительной установки. Спецификация п/п представляет совокупность расположенных в документации сведений о назначении п/п, формате ее вызова, типе и семантике входных, выходных, транзитных и рабочих параметрах, способе передачи параметров, описаний нестандартных и аварийных ситуаций, описаний тестовых задач и результатов их прогона, рекомендаций по выбору управляющих параметров численных алгоритмов, описаний типовых методик использования п/п и других сведений. Примером качественного оформления библиотеки п/п является библиотека алгоритмов по линейной алгебре [24].

Библиотеки п/п также активно используются для представления знаний о блочных математических моделях сложных управляемых систем, описываемых совокупностью дифференциальных, разностных и алгебраических уравнениях (см., например, [8]). При этом отдельная п/п реализует алгоритм вычисления множества выходных переменных блока модели по заданным входным переменным.

Решение задач анализа динамики и проектирования СУ СДО в рамках рассмотренного способа представления знаний о математических моделях и методах их исследования организуется на программном уровне в виде пошагового выполнения п/п, работающих над множеством структурированных данных, являющихся фактическими параметрами этих п/п. Управление вызовами п/п естественно зависит от выбранного варианта математической модели СУ СДО и метода исследования этой модели.

Итак, ключевой момент САТУРН-технологии — это представление слоя вычислительных знаний, являющегося основанием всей пирамиды знаний, в виде библиотек снабженных спецификациями, автономно транслируемых и отлаживаемых модулей-подпрограмм. На фундаменте слоя вычислительных знаний “воздвигаются этажи” схемных и продукционных знаний о проблемной области (ПО).

2.2. Схемные знания

Схемные знания отражают весь интересующий исследователя набор понятий, необходимых для описания структурных особенностей и характеристик блоков математических моделей и методов их исследования. При этом схема ПО свободна от деталей, касающихся формы машинного представления информации, особенностей функциональных отношений, выраженных формулами, уравнениями, алгоритмами и сосредоточенных в слое вычислительных знаний. Схема ПО содержит лишь ссылки на понятия вычислительного уровня знаний.

Слой схемных знаний — это система согласованных объектов, в качестве которых выступают операции и параметры, как наиболее простые, адекватные и выразительные средства для описания модульной структуры (функциональных блоков и связей между ними) математической модели и алгоритмов ее исследования. Параметрами ПО являются выделенные уникальные, возможно структурированные, переменные математической модели и алгоритмов ее исследования, посредством которых реализуются связи между блоками. Параметры характеризуются свойствами (пропозициональными признаками) и существующими в ПО логическими уравнениями относительно этих свойств. Под операцией понимается абстрактная процедура, реализующая отношение вычислимости между двумя подмножествами параметров ПО, которое отражает возможность вычисления по определенному алгоритму значений параметров первого подмножества (выход операции), когда известны значения параметров второго подмножества (вход операции) при условии удовлетворения логическим уравнениям общего вида относительно свойств параметров. Объекты (параметры и операции) делятся на примитивные (базисные) и сложные (составные). Связи между схемным и алгоритмическим слоями знаний являются чрезвычайно простыми и естественными: базисным операциям ПО соответствуют подпрограммы, а базисные параметры ПО являются фактическими параметрами операторов вызова этих подпрограмм.

Построение схемы ПО в виде множеств базисных операций и параметров, в терминах которых возможна постановка любой требуемой исследовательской задачи и представление алгоритма ее решения, составляют главную цель структурного анализа математической модели СУ СДО и методов ее исследования. Повышение лаконичности и адекватности описания ПО и формулировок задач достигается путем создания с помощью набора определенных правил составных операций и параметров из базисных и ранее определенных составных, а так же определения динамических параметров. Перечень правил конструирования составных объектов включает правила композиции, выбора, итерации, агрегирования, обобщения. Динамический параметр объединяет свойства параметра и операции в единое целое. Как и обычный параметр он может включаться во входы и выходы операций, его значения могут задаваться или вычисляться. Особенность динамического параметра состоит лишь в том, что областью его значений является множество имен ранее определенных операций. Представление математических моделей в виде динамических параметров с целью передачи их в качестве входных параметров операциям исследования моделей является типичным вариантом использования динамических параметров в САТУРН-технологии.

2.3. Продукционные знания

Методики анализа и проектирования СУ СДО, представляющие совокупность правил, приемов, эвристик, рекомендаций, советов — всего того, что составляет неотъемлемую часть “вычислительной кухни” расчетных работ и как правило остается в “ящике стола” исследователя и недоступно широкой аудитории, — составляют важную компоненту знаний, существенно повышающих качество принимаемых решений и производительность труда исследователя-проектировщика. Рассмотренные ранее типы отношений между объектами схемы ПО являются недостаточными для представления знаний, в которых большую роль играет опыт исследователя. В этом случае возникает необходимость установления связей, которые имеют вид $P: L \rightarrow O$. Связи такого вида называются продукциями (Р-имя продукции) и интерпретируются следующим образом: операция L описывает логическое условие, необходимое для выполнения операции O. Вместо описаний операций L и O естественно используются ссылки на соответствующие объекты схемы ПО. Более подробно такого сорта связи рассмотрены в [23].

На языке продукций удобно описывать цель проектирования в виде совокупности требований к динамическим показателям функционирования СУ СДО (ограничения по точности и быстродействию в различных режимах, запасам устойчивости и др. динамическим показателям) и то действие, которое нужно выполнить, когда эта цель не достигается. С учетом этого замечания можно сказать, что продукционные знания реализуют в определенном смысле технологию решения задач анализа и проектирования СУ СДО, которая описывает общую схему исследования модели динамического объекта, позволяет в зависимости от свойств этой модели осуществить выбор наиболее приемлемых методов и алгоритмов исследования, а также численных значений управляющих параметров этих алгоритмов. Для нашей области приложения важно, что системы продукций в высокой степени удовлетворяют принципу модульности и обеспечивают особую динамичность процессов построения и модификации технологических схем.

2.4. Процессоры знаний

САТУРН-технология обеспечивает возможность группирования объектов ПО (операций, параметров, продукций) в единицы знания, называемые процессорами. Процессоры — это структурно-обособленные, сложноорганизованные совокупности знаний, соответствующие, например, подсистемам математической модели или семейству близких по параметрам и операциям методам исследования. Процессоры обладают набором встроенных объектов, которые можно использовать при постановке исследовательских задач, их трансляции, исполнении, подготовке вариантов исходных данных, взаимодействию с базой проектных данных и других действий на этапах применения накопленных знаний. Техника применения знаний в процессоре базируется на методах доказательного программирования.

3. Постановки задач

Речь идет о том, что сконцентрированные в процессоре знания позволяют полностью отказаться от программирования на базовом языке, автоматически создавать расчетные программы для решения задач, постановки которых имеют вид:

ВЫЧИСЛИТЬ $\langle Y \rangle$ ИЗ $\langle X \rangle$ ИСПОЛНИВ $\langle F \rangle$

где X, Y — множества входных и выходных параметров задачи соответственно, F — последовательность операций для получения Y из X . Здесь элементы из Y, X и F принадлежат множеству базисных объ-

ектов ПО. Последовательность F может включать кроме операций ПО управляющие конструкции для организации ветвления и итерации.

Такая постановка задачи (ПЗ) называется полной. Согласно этой постановке осуществляется собственно решение задачи. В этом смысле полная ПЗ совпадает со схемой решения задачи (СРЗ). Однако, глубинная идея используемого на знаниях подхода состоит в том, что схемные и продукционные знания позволяют решать исследовательские задачи на основе менее строгих постановок, элементы которых допускают разного вида неопределенности. В самом общем случае такие ПЗ имеют вид:

ВЫЧИСЛИТЬ $\langle Y? \rangle$ ИЗ $\langle X? \rangle$ ИСПОЛНИВ $\langle F? \rangle$ ПРИ УСЛОВИИ $\langle Q? \rangle$

Символ $?$ означает неопределенность в помеченном этим символом элементе ПЗ или его полное отсутствие. Такая постановка задачи называется сокращенной. Здесь в качестве Y , X , F допускается уже использование объектов любого уровня сложности (а не только базисного). Q — это ограничения на СРЗ, позволяющие выделить требуемое решение в случае не единственности разрешающей схемы. В зависимости от расположения неопределенностей в ПЗ, различают процедурные (исполнить $\langle F? \rangle$), непроцедурные (вычислить $\langle Y? \rangle$ из $\langle X? \rangle$) и комбинированные (присутствуют все элементы ПЗ) постановки задач.

Для решения задач с сокращенными постановками неопределенность в ПЗ должна быть снята на стадиях обработки ПЗ, может быть даже на этапе непосредственного решения задачи — счете.

4. Планирование схем решения задач

Необходимая обработка сокращенной ПЗ заключается в последовательном ее приближении к СРЗ. Такой процесс приближения называется планированием. Планирование — это один из важнейших этапов САТУРН-технологии. Необходимая для планирования информация извлекается из описания схемного и продукционного слоев знаний и представляется в виде систем булевых уравнений специального вида [16, 17], решение которой определяет требуемую СРЗ. Впервые на использование логических уравнений в качестве моделей программных комплексов для решения проблем планирования обращено внимание в работе [4].

В зависимости от информативности постановки задачи (числа и типа неопределенностей в ней) применяются различные алгоритмы планирования или их композиции. Этим достигается практически значимая скорость построения СРЗ. Планирование называется статическим, если оно выполняется до этапа счета, динамическим, если оно производится на этапе счета, и статикодинамическим, если оно содержит статические и динамические этапы. Статическая компонента планировщика работает со схемными знаниями, динамическая — с продукционными. В процессе планирования допускается диалог пользователя с компьютером с целью уточнения определенных деталей постановок задач. Планирование осуществляется по многоступенчатой схеме в полном соответствии с определенной в описании схемы ПО иерархией составных объектов. Если задача неразрешима ни на каком уровне абстракции, или задача разрешима, но в число объектов, составляющих эту задачу на данном уровне входят не уточненные, то производится разборка агрегированных объектов или специализация обобщенных объектов этого уровня иерархии и процесс планирования повторяется для нового уровня абстракции описания ПО и постановки задачи. Обзор возможностей всех видов планирования САТУРН-технологии приводится в [23].

В процессе автоматического планирования может выявиться неразрешимость поставленной задачи в контексте доступных процессору знаний. Вообще для отыскания условий разрешимости задачи, как условий доказуемости теоремы о существовании СРЗ, оказывается эффективно применим аппарат логических уравнений. В [3, 5] развит аппарат решений таких уравнений в исчислении предикатов для автоматического синтеза теорем динамики систем и теории управления. В нашем случае для “проталкивания зависшей задачи” используется аналогичный инструмент гипотезирования, т.е. отыскания решений логического уравнения в форме обзора гипотез, когда каждое решение логического уравнения (гипотеза) интерпретируется как спецификация недостающих средств решения задачи [5]. В диалоге, инициируемом компьютером, он передается для осмысления пользователю на предмет возможности ввода его значения. Использование такого механизма диагностики “зависания” и диалогового “проталкивания” — одно из отличий нашего подхода от известных решателей ПРИЗ и НУТ (Э. Тыугу). Элементы использования логических уравнений (дополняющих традиционную методологическую базу автоматического доказательства теорем в языке программных (хорновских) дизъюнктов) можно найти сегодня в системе логического программирования PROLOG-3 [25].

5. Оптимизация схем решения задач

Методологической основой построения эффективных СРЗ исследования динамики и проектирования СУ СДО в рамках САТУРН-технологии является конкретизирующее программирование [9, 20], поддерживающее, как и в случае модульного программирования, принцип многократного применения программного продукта. Содержанием конкретизирующего программирования является настройка готовой программы на некоторый суженный класс ее конкретных применений с целью повышения качества характеристик этой программы. Такая задача регулярно возникает как на уровне специализации содержимого библиотеки модулей, так и на уровне специализации ПЗ, СРЗ, схемы ПО и системы продукции. Например, процесс планирования на практике зачастую приводит к сложным многовариантным СРЗ (полиалгоритмам) или к схемам, решающим целый класс задач, сильно пересекающихся по параметрам и операциям. Путем конкретизации СРЗ преобразовывается в некоторую специализированную версию с целью улучшения исходной схемы по определенному критерию качества (время, память, надежность) при сохранении смысла СРЗ внутри заданного контекста. Применение механизма конкретизации в САТУРН-технологии позволяет эффективно использовать основные ресурсы компьютера путем создания расчетных программ индивидуального применения.

6. Исполнение схем решения задач

Эффективное исполнение СРЗ базируется на использовании принципа комбинированных вычислений [21], позволяющего гибко сочетать положительные стороны интерпретационного и компиляционного подходов. Известно, что непосредственная интерпретация последовательности операций хорошо сочетается с диалоговым режимом работы. Накладные расходы на интерпретацию полностью окупаются в случае отладки схем решения и оперативного проведения быстрых многовариантных расчетов в интерактивном режиме. Для СРЗ, требующих большого времени счета и высокой эффективности организации вычислений, необходим другой способ исполнения СРЗ, основанный на генерации так называемых рабочих программ на базовом языке. После компиляции с базового языка и редактирования связей такую п/п можно включить в библиотеку, производя соответствующие расширения возможностей пакета. Накладные расходы на генерацию в этом случае окупаются повышенной эффективностью рабочей программы.

К недостаткам подхода на основе принципов компиляции относится отсутствие возможности оперативного влияния и контроля со стороны пользователя в процессе исполнения рабочей программы. Частично избавиться от такого недостатка, не теряя при этом преимуществ подхода на основе принципа компиляции, позволяет специальная организация процесса решения задач на основе комбинированного принципа. Комбинированный принцип заключается в разбиении СРЗ на динамические и статические участки. Статические участки компилируются и включаются в СРЗ в виде вызовов новых операций, динамические участки остаются без изменений. Полученная таким образом СРЗ далее выполняется в режиме интерпретации.

7. Визуализация данных и знаний

Методологической основой эффективного взаимодействия исследователя с компьютером в САТУРН-технологии при накоплении знаний и проведении вычислительных экспериментов является использование методов графической визуализации. Визуальный графический язык [19] позволяет фиксировать продукт мыслительной деятельности непосредственно в том виде, как он складывается традиционно в сознании научного работника или исследователя-проектировщика.

В условиях визуального графического подхода процессы описания ПО, постановки исследовательских задач, планирования СРЗ и мониторинга решения задачи сводятся к процессу рисования композиций пиктограмм, являющихся графической формой отношений, связывающих понятия ПО. Графические представления впоследствии либо интерпретируются, либо переводятся в текстовую форму для их дальнейшего анализа и трансляции.

8. Управление проектными данными

Особую методологическую роль в САТУРН-технологии занимает специализированная объектно-ориентированная модель данных [10, 12], которая позволяет адекватно описать все виды возникающей в полном

технологическом цикле исследований информации и обеспечивает достаточную эффективность при проведении многовариантных проектных расчетов СУ СДО. Парадигма объекта в САТУРН-технологии является наиболее естественной организацией данных, позволяющей хранить, выбирать и модифицировать информацию в терминах ПО. Управление проектными данными САТУРН-технологии включает такие основные функции, как поддержка иерархических описаний, манипулирование составными объектами, обработка множественных представлений, интерфейс с языками программирования и прикладными программами, поддержка целостности данных и целый ряд других функций.

9. Организация распределенных вычислений

Постоянный рост сложности математических моделей СУ СДО, необходимость проведения крупномасштабных расчетов, нетиражируемость отдельных прикладных модулей приводит к необходимости использования суммарных вычислительных ресурсов территориально удаленных (подключенных к сети Интернет) компьютеров в рамках одной прикладной ресурсоемкой вычислительной задачи (см., например, [13]).

Зарегистрированные в рамках САТУРН-технологии прикладные вычислительные модули могут располагаться на разных компьютерах сети. В этом случае знания о модуле (спецификация п/п) должны быть расширены сведениями об e-mail или ftp владельца модуля, местоположении на диске, командной строке для его вызова, а также сведениями о вычислительном ресурсе (типе процессора, объеме доступной оперативной памяти и др.). База знаний устанавливается на одном из компьютеров сети. На этом компьютере, который назовем главным (остальные будут называться подчиненными), выполняется постановка исследовательской задачи, синтезируется в общем случае параллельный план решения и осуществляется управление процессом ее решения. Занесение информации в базу знаний и исполнение прикладных модулей обеспечивается с помощью четырех интеллектуальных агентов: агенты отправки и приема знаний, агенты инициализации и исполнения модуля. Агенты отправки знаний устанавливаются на подчиненных компьютерах и обеспечивают формирование и отправку (по директиве пользователя) на главный компьютер сообщения с подготовленным блоком знаний. Агент приема знаний главного компьютера обрабатывает (в порядке поступления) сообщения, заносит полученный блок знаний в базу знаний и формирует отправителю сообщение (подтверждение) с кодом ответа завершения своей работы. Агент инициализации модуля главного компьютера в соответствии с планом решения задачи формирует сообщения с исходными данными на исполнение требуемых модулей и принимает сообщения с результатами расчета. Агент исполнения модулей подчиненного компьютера обрабатывает (в порядке поступления) полученные сообщения, приводит (при необходимости) исходные данные к требуемому формату, осуществляет запуск и контролирует исполнение модуля, формирует отправителю сообщение с выходными данными и кодом завершения работы модуля.

Важно, что САТУРН-технология полностью скрывает от исследователя-проектировщика наличие сетевых коммуникаций, которые не оказывают существенного влияния на производительность распределенной вычислительной системы в целом при условии, что время исполнения модулей существенно больше времени передачи сообщений.

10. Пакет знаний — новое средство автоматизации расчетных работ

Широко известной и применяемой формой инструментария машинного исследования СУ СДО являются пакеты прикладных программ. Успехи в области искусственного интеллекта, связанные с исследованием в области баз знаний, экспертных систем и доказательного программирования оказали определенное влияние на архитектуру и принципы построения пакетов программ. Возник ряд новых форм организации пакетов (например, интеллектуальные пакеты программ, расчетно-логические системы и др.), среди которых мы выделяем форму, называемую пакетом знаний. Пакеты знаний — это интегрированные программные комплексы, объединяющие в себе возможности традиционных пакетов программ и экспертных систем. Термин Пакет Знаний появился в результате слияния понятий ПАКЕТ программ и база ЗНАНИЙ и впервые употреблен в [15]. В пакете знаний воплощается все многообразие рассмотренных выше общесистемных методов и средств САТУРН-технологии компьютерного анализа и проектирования СУ СДО. Пакеты знаний имеют следующие особенности, отличающие их от других типов баз знаний:

- 1) фундаментальную роль в описании ПО играют вычислительные знания, представленные снабженными спецификациями модулями — подпрограммами на языках Фортран, Паскаль, Си;
- 2) прикладные модули, представляющие вычислительные знания, располагаются на отдельных компьютерах сети;
- 3) ответ на запрос связан с процессом трудоемкого вычисления (не поиска) информации с предварительным планированием СРЗ на концептуальной модели ПО, сборкой и конкретизацией расчетных программ;
- 4) схемные и продукционные знания являются в определенном смысле вспомогательными и в основном поддерживают комфортность общения исследователя с компьютером.

11. Инструментальные средства автоматизации САТУРН-технологии

В предыдущих разделах рассмотрены наиболее важные этапы САТУРН-технологии исследования динамики и проектирования СУ СДО. Список требований, предъявляемых к общесистемным средствам организации вычислительных экспериментов на самом деле существенно шире и многие требования в этом списке носят противоречивый характер (см., например, [22]). Все это говорит о высокой сложности и трудоемкости разработки современных систем автоматизации проектных расчетов в виде пакетов знаний, последующего их применения и развития для проведения вычислительных экспериментов даже для высококвалифицированных системных программистов. Трудности разработки таких систем во многих случаях становятся непреодолимыми для специалистов в проблемной области. Отсюда следует, что актуальность автоматизации таких работ является чрезвычайно высокой.

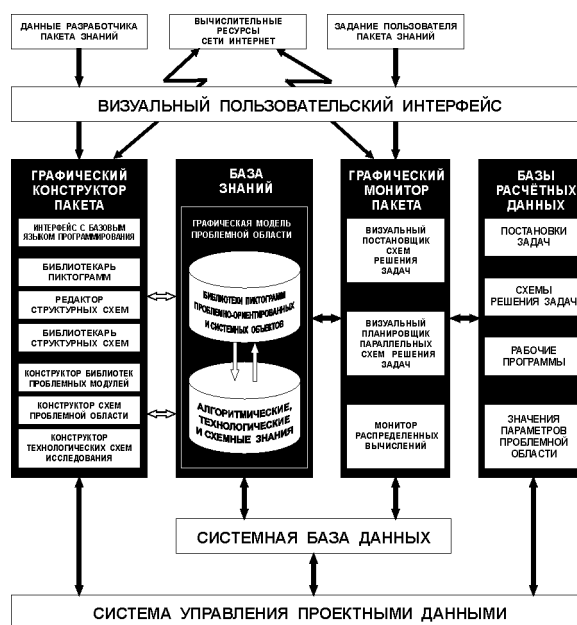


Рис. 1. Обобщенная архитектура САТУРН-среды.

Для автоматизации разработки, отладки, эксплуатации, модификации и комплексирования распределенных пакетов знаний разработан ряд инструментально-технологических сред, объединенных общим названием “САТУРН” и единым языком SATL [11], но ориентированных на разные типы операционных систем и базовых языков программирования [18, 19, 21]. САТУРН — это диалоговая интегрированная системная среда, в рамках которой инструментально поддерживаются все этапы САТУРН-технологии по накоплению, использованию знаний о математических моделях СУ СДО, методах, алгоритмах, программах и методиках их анализа и проектирования. САТУРН-среда позволяет научным работникам, инженерам-проектировщикам СУ СДО — специалистам в области управления движением — самостоятельно, без участия высококвалифицированных системных программистов, накапливать в памяти компьютера большие объемы алгоритмических знаний и эффективно использовать их для решения возникающих задач. Обобщенная архитектура САТУРН-среды представлена на рис. 1. Используемые на рис. 1 понятия в

том или ином виде определены в предшествующем изложении так, что рис. 1 не требует дополнительных пояснений.

В заключение хотелось бы отметить, что рассмотренная в статье концепция САТУРН-технологии и соответствующей системной среды является результатом обобщения 20-летних исследований в области создания и применения инструментальных средств автоматизации расчетных работ для исследования динамики и проектирования систем управления внеатмосферными астрономическими комплексами, систем ориентации и стабилизации космических аппаратов, а так же систем управления ракет с бортовыми вычислительными машинами. Применение новых классов логических уравнений в качестве основного интеллектуального ядра этой технологии определяет направление, в котором видится ее основное развитие и совершенствование в будущем.

Список литературы

- [1] Автоматизированное проектирование систем управления. М.: Машиностроение, 1989.
- [2] БАРКОВСКИЙ В. В., ЗАХАРОВ В. Н., ШАТАЛОВ А. С. Методы синтеза систем управления. М.: Машиностроение, 1969.
- [3] ВАСИЛЬЕВ С. Н. Вывод теорем на основе логических уравнений и типизация переменных. Функции Ляпунова и их применение. Новосибирск: Наука, 1987. С. 60–84.
- [4] ВАСИЛЬЕВ С. Н. Методы и программные средства синтеза математических теорем. Инструментальные системы и моделирование. Новосибирск: Наука, 1988. С. 4–27.
- [5] ВАСИЛЬЕВ С. Н. Метод синтеза условий выводимости хорновских и других формул // Сибирский математический журнал. 1997. Т. 38, №5. С. 1034–1046.
- [6] ДАНИЛОВ А. М., ДУЛЬКИН А. З., ЗЕМЛЯКОВ А. С., МАТРОСОВ В. М., СТРЕЖНЕВ В. А. Динамика и управление внеатмосферными астрономическими обсерваториями // Управление в пространстве. М.: Наука, 1976. Т. 1. С. 153–171.
- [7] Динамика систем управления ракет с бортовыми цифровыми вычислительными машинами. М.: Машиностроение, 1972.
- [8] ДОРРИ М. Х., КЛИМАЧЕВ С. Н. Использование языка ФОРТРАН для моделирования непрерывных систем на ЭВМ. Программирование. 1982. №1. С. 51–62.
- [9] ЕРШОВ А. П. Научные основы доказательного программирования: Научн. сообщ. // Вестн. АН СССР. 1984. №10. С. 9–19.
- [10] ЖУРАВЛЕВ А. Е., ОПАРИН Г. А. Представление знаний о проблемной области в инструментально-технологическом комплексе САТУРН/ПЗ. Концептуальная схема и выбор модели данных. Компьютерная логика, алгебра и интеллектуальное управление. Иркутск: ИрВЦ СО РАН, 1994. Т. 1. С. 76–78.
- [11] ЖУРАВЛЕВ А. Е., ОПАРИН Г. А. SATL — язык для представления и использования пакетных знаний. Программные продукты и системы. 1996. №3. С. 26–35.
- [12] ЖУРАВЛЕВ А. Е., ОПАРИН Г. А. Управление данными в инструментальной САТУРН-среде для накопления и использования пакетных знаний. Программные продукты и системы. 1997. №3. С. 21–27.
- [13] КОВАЛЕНКО В., КОРЯГИН Д. Вычислительная инфраструктура будущего. Открытые системы. 1999. №11–12. С. 45–53.
- [14] МАТРОСОВ В. М., КОЗЛОВ Р. И., СОМОВ Е. И., БУТЫРИН С. А., ОПАРИН Г. А., СИМОНОВ С. А. Методы и программное обеспечение для автоматизации проектирования систем управления ориентацией космическими аппаратами. Вопросы динамики и управления космическими объектами. Новосибирск: Наука, 1992. С. 163–178.
- [15] ОПАРИН Г. А. Разработка и применение инструментальных средств для автоматизации конструирования и поддержки функционирования пакетов прикладных программ в области исследования динамики сложных управляемых систем: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1988.

- [16] Опарин Г. А. Численное решение больших разреженных систем булевых уравнений. Новые информационные технологии в исследовании дискретных структур. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. С. 137–144.
- [17] Опарин Г. А., Новопашин А. П. Логическое моделирование сложных вычислительных систем. Проблемы управления и моделирование в сложных системах. Самара: ИПУСС РАН, 1999. С. 77–82.
- [18] Опарин Г. А., Феоктистов А. Г., Богданова В. Г. Системная САТУРН-среда пакетов знаний. Тр. II Международного симпозиума “Интеллектуальные системы” (ИНТЕЛС’96). М.: Изд-во РУДН-ПАИМС, 1996. Т. 2. С. 99–104.
- [19] Опарин Г. А., Феоктистов А. Г., Богданова В. Г. Графическая системная САТУРН-среда пакетов знаний. Тр. третьего международного симпозиума “Интеллектуальные системы” (ИНТЕЛС’98). М.:000 ТВК, 1998. С. 224–227.
- [20] Опарин Г. А., Феоктистов А. Г., Феоктистов Д. Г. Комбинированный режим исполнения абстрактных программ в инструментально-технологическом комплексе САТУРН. Автоматика и вычислительная техника. 1996. №6. С. 77–84.
- [21] Опарин Г. А., Феоктистов А. Г., Феоктистов Д. Г., Журавлев А. Е. Инструментальные средства построения и эксплуатации пакетов знаний. Управляющие системы и машины. 1997. №1–3. С. 138–143.
- [22] Опарин Г. А., Феоктистов Д. Г. Организация знаний при математическом моделировании и исследовании динамики систем управления движущимися объектами. Управление движением и навигация летательных аппаратов. Самара: Самарский аэрокосмический университет, 1994. С. 56–60.
- [23] Опарин Г. А., Феоктистов Д. Г. Планирование схем решения задач в инструментальном комплексе САТУРН/ПЗ. Компьютерная логика, алгебра и интеллектуальное управление. Иркутск: ИрВЦ СО РАН, 1994. Т. 1. С. 3–13.
- [24] Уилкинсон, Райнш. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра. М.: Машиностроение, 1976.
- [25] COLMERAUER A. An introduction to Prolog III. Communication of the ACM. 33, No. 7. P. 1990.