

двух этапов: структурной адаптации и параметрической адаптации. Эти процедуры могут выполняться как отдельно, так и одновременно, и проводятся с использованием экспериментальных данных обучающей выборки. Структурная адаптация подразумевает генерацию базы нечетких правил вида “if – then”. Критерием качества сформированной базы правил выступает величина покрытия правилами всех примеров из обучающей выборки.

На этапе параметрической адаптации производится настройка параметров функций принадлежности нечеткой системы. Для этого, как правило, минимизируется квадратичная сумма разностей между фактическим  $y_i$  и спрогнозированным  $d_i$  значением переменной вывода нечеткой системы:  $\Psi(\mathbf{C}) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (y_i - d_i)^2$ , где  $\mathbf{C}$  – вектор параметров функций принадлежности,  $k$  – объем обучающей выборки.

Таким образом, моделируемая система представляется в виде совокупности элементов и подсистем, связанных между собой нечеткими связями. Последовательное осуществление нечеткого логического вывода приводит к реакции выходных сигналов на изменение входных сигналов и внешних условий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борисов В.В., Бычков И.А., Дементьев А.В. и др. Компьютерная поддержка сложных организационно-технических систем. –М.: Горячая линия – Телеком, 2002. –154с.
2. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH.- СПб.: БХВ-Петербург, 2003. –736с.
3. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
4. Сенюлов М.А., Тенев В.А. Интеллектуальные алгоритмы интерпретации геофизических исследований скважин. –СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. –128с.

**В.Б.Резников**

#### **АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СЛОЖНЫХ МАКРОМОДЕЛЕЙ МЕТОДАМИ СИГНАЛЬНЫХ ГРАФОВ**

Одной из наиболее важных частей методики автоматизации построения математического описания сложных систем является методика генерации функционального описания моделируемого объекта в виде совокупности компонентных уравнений по визуальным схемам, составляемых на основе направленных сигнальных графов.

Основные характеристики сложных систем:

- система обладает большим количеством компонент, имеющих различную физическую природу;
- взаимодействие компонент системы описывается сложной структурой связей;
- поведение системы описывается большим набором функций;
- поведение компонент может меняться с течением времени;
- присутствует динамика в структуре системы.

Можно считать, что чем большим количеством данных характеристик обладает моделируемая система, тем выше её сложность. Сложность систем порождает проблемы не только в численном расчете моделей таких систем, но и в составле-

нии их формализованного описания. Для решения этой задачи была разработана концепция представления моделей сложных систем в виде многоуровневых иерархических макромоделей.

Согласно данной концепции базисом описания сложного технического объекта является структурная макро модель, представляемая иерархической схемой взаимосвязанных элементарных (базовых) моделей или структурных моделей более низкого уровня, выделяемых по функциональному назначению. Эффективность решения задачи моделирования сложных систем обеспечивается за счет многоуровневого представления моделируемой системы. Каждый уровень реализует решение отдельной задачи проведения вычислительного эксперимента. В зависимости от специфики задачи в структурной модели выделяются пять вложенных уровней представления: математический, функциональный, алгоритмический, вычислительный и описательный [1].

Основная трудность решения задачи составления формального описания связана с тем, что сложные системы состоят из компонент различной физической природы и соответственно описываются разными функциональными отношениями. Эта особенность также влияет на сложность построения общего математического описания системы. В этом случае необходима разработка унифицированного описания, не зависящего от физической природы компонент системы. Решением является использование математической нотации, как наиболее общего вида описания компонент системы, а также использование технологий обеспечивающих построение схем взаимодействия элементов системы. Структурная сложность системы понижается путем использования иерархического описания, поэтому для представления системы используется структурное описание взаимодействия её компонент.

Вследствие большой размерности сложных систем выполнение построения общей математической модели вручную невозможно. В этой связи проблему формирования математического описания необходимо решать средствами системы моделирования. Решение этой проблемы с учетом указанного способа формализованного описания сложных систем обеспечивается путем использования методики автоматизации построения математического описания сложных систем, разработанного на основе методов графов и средств символьной обработки.

Предлагаемая методика автоматического построения компонентных уравнений заключается в следующих положениях:

1) элементарная модель описывается структурной схемой на основе базиса визуальных элементов, соответствующего предметной области модели. Данная схема формируется в соответствии с функциональным базисом структурных моделей, с использованием портов и вложенных компонент;

2) каждому элементу базиса соответствует фрагмент графа, описывающего данный элемент в терминах направленных сигнальных графом, набор параметров и соответствующие компонентные уравнения;

3) пользователь описывает модель визуальным образом, система моделирования формирует соответствующий граф описания модели на базе схемы связи элементов;

4) полученный граф обрабатывается согласно алгоритму автоматического формирования компонентных уравнений, результатом работы которого является математическое описание исходной элементарной модели согласно математическому базису структурных моделей.

В основе рассматриваемой методики генерации компонентных уравнений лежит описание моделей при помощи направленных сигнальных графов. Выбор направленных сигнальных графов для описания структурных элементов обуслав-

ливается тем, что они одновременно отражают как топологические свойства системы, так и последовательность вычислений физических величин в системе, что значительно облегчает автоматизацию процесса получения математического описания на основе структурных схем.

Согласно данной методике, был разработан алгоритм автоматического построения математического описания структурных элементов, в основе которого лежит алгоритм математического описания бонд-графов, используемый в системе моделирования 20Sim [2]. Основные отличия предлагаемого алгоритма заключаются в упрощении процедуры связывания элементов и в автоматизации построения причинных связей. Упрощение процедуры связывания позволяет значительно снизить топологическую сложность результирующего графа, что уменьшает затраты памяти, используемой для хранения графа, а также ускоряет процесс минимизации графа, поскольку отбрасываются заведомо избыточные связи. Визуальные элементы предлагается соединять посредством портов «0-связи», а не дополнительными ребрами как в алгоритме 20Sim [2]. Также в системе 20Sim процедура построения причинных связей осуществляется вручную, что естественно затрудняет обработку больших топологических схем. Для исправления этого недостатка была разработана процедура автоматического построения причинных связей на основе путей распространения энергии в сигнальном графе.

Исходными данными алгоритма является визуальная схема описания структурной макромодели. Результатом работы является система компонентных уравнений, сформированная согласно математическому базису структурных моделей и оформленная в элементарную модель на математическом уровне иерархии.

Необходимо добавить, что на заключительном этапе формирования структурной макромодели в процессе сортировке компонентных уравнений могут возникнуть неразрешимые ситуации, так называемые «алгебраические циклы», когда полное определение правых частей невозможно реализовать путем сортировки. В этом случае все уравнения, образующие алгебраические циклы, преобразуются в разностную форму для последующего итерационного решения.

В заключение отметим, что использование направленных сигнальных графов при составлении математического описания сложных технических объектов позволяет не только автоматизировать этот процесс, но и реализовать визуальный способ представления сложных иерархических моделей. Это в значительной степени облегчает создание формального описания технических объектов высокой размерности. Дальнейшие работы будут вестись в направлении формализации описания объектов с динамической структурой и решения проблемы «алгебраических циклов».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Золотовский В.Е., Резников В.Б.* Многоуровневый базис представления моделей сложных технических систем// «Известия СКНЦВШ. Технические науки». –2005. – Приложение №1. – С. 53-56
2. *Borutzky W.* Bond graphs – a methodology for modeling multidisciplinary dynamic systems. SCS, 2004. – 440 p.