

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ
РАСШИРЕНИЙ СЕТЕЙ ПЕТРИ****А. А. Суконщиков, П. В. Скородумов (Вологда)**

Сложные динамические системы сегодня получили широчайшее распространение на практике. Они находят применение практически во всех областях. В связи с этим растет необходимость их изучения и создания для этого специальных программных средств. Наиболее удобными для исследования любых систем являются универсальные программные пакеты, построенные с использованием методов имитационного моделирования. Разработка графических оболочек для моделирования поведения сложных динамических систем, а также их практическое воплощение требуют развития теории этих систем.

Для определения класса сложных иерархических событийно-управляемых динамических систем переменной структуры и состава чаще всего употребляется термин «гибридные системы». Под сложностью здесь понимается – сложность поведения, сложность структуры, переменный, зависящий от времени состав моделируемых объектов.

Сложность поведения модели, прежде всего, связана с наличием нескольких режимов работы, описываемых различными системами уравнений, смена которых обусловлена наступлением событий.

Сложность структуры в сочетании со сложностью поведения также требует решения новых научных задач. Современные методы проектирования основаны на блочном, агрегатном подходе, в котором новая модель собирается в основном из унифицированных компонентов и немногочисленных уникальных блоков. Сложные модели, состоящие из компонентов различной физической природы и оснащенные цифровыми системами управления, требуют одновременного использования блоков различного типа. Автоматическое построение совокупной системы управления, форма которой зависит от времени, и выбор подходящего для нее численного метода становится актуальной теоретической и технической задачей.

Широкое распространение среди методов исследования сложных динамических систем получили сегодня методы имитационного моделирования.

В имитационной модели сохранены и легко узнаваемы такие черты моделируемого объекта, как структура, связи между компонентами, способ передачи информации. С такими моделями обычно связывают и требование иллюстрации их поведения с помощью принятых в данной прикладной области графических образов.

Имитационное моделирование дает возможность проводить вычислительные эксперименты с еще только проектируемыми системами, натурные эксперименты с которыми не целесообразны по соображениям безопасности и дороговизны. В то же время, благодаря своей близости по форме к физическому моделированию, этот метод исследования доступен более широкому кругу пользователей.

Пакеты визуального моделирования позволяют пользователю вводить описание моделируемой системы преимущественно в графической форме, а также представлять результаты в виде диаграмм, графиков, таблиц, что упрощает их понимание исследователем. Одним из главных достоинств систем визуального моделирования является то, что они позволяют пользователю не заботиться о программной реализации модели, как о последовательности исполняемых операторов. Пакеты визуального моделирования создают на компьютере некоторую чрезвычайно удобную среду, в которой можно создавать виртуальные, параллельно функционирующие системы и проводить эксперименты с ними. Пользователь может видеть и оценивать результаты моделирования по ходу эксперимента и, при необходимости, активно в него вмешиваться.

Технологии объектно-ориентированного моделирования позволяют резко расширить границы применимости уже созданных и подтвердивших свою работоспособность моделей, а также расширить область их дальнейшего использования.

Структура современных моделей часто соответствует структуре изучаемого объекта. В основе таких моделей лежит элемент со скрытой от внешнего наблюдателя внутренней структурой. Структурно сложная модель состоит из множества блоков, взаимодействующих между собой через функциональные связи между видимыми извне переменными. Структура такой системы обычно является иерархической. Как правило, элементы сложной системы характеризуются различными физическими принципами действия, что не заметно в итоговой математической модели, но чрезвычайно важно на этапе построения модели.

Одной из черт сложного поведения является наличие у системы нескольких различных, последовательно сменяющих друг друга во времени поведений. Обычно их называют режимами функционирования. Такой тип сложного поведения можно реализовать, если описать всю совокупность допустимых частных поведений и указать правила переключения с одного на другое.

Каждое конкретное поведение можно отождествлять со значением некоторой дискретной переменной, а мгновенные переключения текущего поведения – с дискретными событиями. Для передачи информации о дискретных событиях в другие блоки используют специальные переменные – сигналы. Набор дискретных состояний вместе с условиями переходов из одного состояния в другое образует обычное дискретное поведение. В моменты переходов могут происходить мгновенные скачкообразные изменения значений переменных. Поскольку в каждом из дискретных состояний элементарный блок ведет себя как некоторая непрерывная система, то поведение блока в целом является дискретно-непрерывным, гибридным.

При объединении структурно-сложной системы с гибридной получается гибридная система со сложной структурой. Главная черта таких систем – параллельное функционирование нескольких гибридных систем иерархической структуры. Сложность их поведения наиболее полно раскрывается в дискретно-непрерывных системах.

В общем случае дискретно-непрерывные системы – это параллельные и распределенные динамические системы, состоящие из большого числа элементов различной природы. Поведение таких элементов описывается непрерывными процессами с конечной длительностью и дискретными процессами, время реакции на события в которых является несущественным для анализа системы. Описание дискретно-непрерывных систем в рамках классической теории динамических систем затрудняется возникновением событий, мгновенно изменяющих глобальное поведение системы и ее структуру. При этом одно событие может порождать другие, а сам дискретный процесс, результатом которого является выбор нового поведения, описывается нетривиальным дискретным алгоритмом, который в общем случае характеризуется графом мгновенных переходов.

В настоящее время для моделирования сложных систем широкое распространение получили различные расширения сетей Петри. Их используют в качестве аппаратов исследования систем различной природы, структуры и механизмов поведения.

В теории сетей Петри (СП) для моделирования сложных динамических систем существуют два расширения, позволяющие упростить работу с системами, обладающими сложным поведением и структурой. Этими расширениями являются дискретно-непрерывные (ДНСП) и вложенные сети Петри (ВСП).

ДНСП представляет собой систему из позиций двух видов, переходов трех видов и соответственно трех функций следования и предшествования:

$$ДН = \{P^1, P^2, T^1, T^2, T^3, E\}, \quad (1)$$

где $P^1 = \{p^1_1, p^1_2, \dots, p^1_n\}$ – конечное множество позиций 1-го вида; $P^2 = \{p^2_1, p^2_2, \dots, p^2_m\}$ – конечное множество позиций 2-го вида; $T^1 = \{t^1_1, t^1_2, \dots, t^1_l\}$ – конечное множество переходов 1-го вида; $T^2 = \{t^2_1, t^2_2, \dots, t^2_k\}$ – конечное множество переходов 2-го вида; $T^3 = \{t^3_1, t^3_2, \dots, t^3_r\}$ – конечное множество переходов 3-го вида; E – отношение инцидентности позиций и переходов.

Состояние ДН-сети определяется её маркировкой и правилами возбуждения переходов. Графическим средством представления ДН-сети служит двудольный ориентированный граф с двумя типами вершин: вершины-позиции и вершины-переходы.

Статические свойства ДН-сети формирует её графическая часть в k -ом структурном состоянии, а динамические – начальное состояние (маркирование), правила возбуждения переходов и типы операторов, которыми помечены непрерывные и дискретные переходы.

Динамику ДН-сети в событийном пространстве состояний можно описать следующим рекуррентным уравнением:

$$M_k = M_{k-1} + A^T U_k; k=1,2,\dots, \quad (2)$$

где M_k – состояние, которое следует после состояния M_{k-1} в результате k -го воздействия; A^T – матрица, полученная транспонированием матрицы инцидентности позиций и переходов; U_k – управляющий вектор, компоненты которого $u_{jk} = \{0, 1\}$.

Во вложенных сетях Петри фишки, помечающие позиции, рассматриваются как объекты, имеющие самостоятельное поведение, которое описывается также некоторыми сетями Петри. Название «вложенные сети» указывает на то, что элементы сетей в них сами являются сетями, подобно тому, как в системе вложенных множеств элементами некоторого множества могут быть множества.

Вложенная сеть Петри состоит из системной (корневой) сети и множества элементарных сетей, представляющих фишки системной сети. Поведение вложенной сети Петри включает четыре типа шагов.

Шаг переноса – это срабатывание перехода системной сети в соответствии с обычными правилами для сетей Петри высокого уровня, при этом элементарные сети рассматриваются как фишки, не имеющие собственной структуры.

Элементарно-автономный шаг меняет только внутреннее состояние (маркировку) элементарной сети, не меняя ее местонахождения в системной сети.

Шаг горизонтальной синхронизации есть одновременное срабатывание двух переходов в двух элементарных сетях, находящихся в одной позиции системной сети (эти переходы должны быть помечены специальными метками горизонтальной синхронизации).

И, наконец, шаг вертикальной синхронизации используется для синхронизации перехода в системной сети с некоторыми переходами элементарных сетей. Вертикальная синхронизация означает одновременное срабатывание перехода системной сети и переходов (помеченных дополнительной меткой) в задействованных в этом срабатывании элементарных сетях.

Вложенные сети Петри обладают рядом преимуществ, которые делают их удобным инструментом для моделирования и анализа алгоритмов управления сложными динамическими системами: иерархическая и модульная структура, присутствие элементарных сетей с собственным строением и поведением, наличие механизмов горизонтальной и вертикальной синхронизации, динамическое распараллеливание общей задачи.

Авторами статьи предлагается объединить два описанных расширения сетей Петри в новое расширение. Появление такого расширения позволит по-новому взглянуть на анализ сложных динамических систем.

ДНСП позволят наглядно представить механизм поведения исследуемой системы и взаимодействия составляющих ее частей. ВСП позволят сделать структуру исследуемой системы более простой для анализа. Новый аппарат сделает механизм описания поведения сложных динамических систем более удобным. Полученная в результате применения нового расширения СП модель системы будет обладать такими свойствами, как модульность, наглядность, гибкость.

Построение на базе нового расширения СП визуальной среды моделирования сложных динамических систем упростит работу по их исследованию и анализу. Методы имитационного моделирования позволят сделать эту среду удобной для широкого круга пользователей. От конечного пользователя не будут требоваться глубокие знания в области программирования и устройства работы компьютера, при этом он получит возможность не только работать с существующими унифицированными блоками, но и создавать собственные библиотеки блоков с возможностью их дальнейшего использования.

На данный момент разработана первая часть графической оболочки, позволяющая моделировать сложные динамические системы. В ее основе лежит дискретно-непрерывное расширение сетей Петри. Программа позволяет в наглядном графическом режиме строить модели систем на основе блоков ДНСП, задавать начальные условия и проводить пошаговое моделирование поведения системы. Исследователь может наблюдать изменение маркировки в системе и изменять интересующие параметры в процессе моделирования. Программа имеет базовую библиотеку стандартных блоков для конструирования структуры модели, а также позволяет создавать свои собственные.

Ведутся работы над объединением двух расширений сетей Петри и дополнением существующей графической оболочки новыми объектами и методами. Предполагается продолжение работы над усовершенствованием и дополнением методов вывода результатов выполнения программы.