

# СПЕЦИФИКАЦИЯ ЗНАНИЙ ДИНАМИКИ НА ОСНОВЕ ТРАНЗИТИВНОЙ МОДЕЛИ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ

В. М. ШПАКОВ<sup>♦</sup>

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

СПИИРАН, 14-я линия ВО, д. 39, Санкт-Петербург, 199178

<vlad@iias.spb.su>

---

УДК 681.3.06

*Шпаков В. М. Спецификация знаний динамики на основе транзитивной модели непрерывных процессов // Труды СПИИРАН. Вып. 3, т. 1. — СПб.: Наука, 2006.*

**Аннотация.** *Обсуждаются достоинства спецификации знаний о динамике непрерывных систем путем формирования структурных динамических схем. Рассматривается подход к разработке исполняемых спецификаций структурных схем динамических систем. Подход основан на программной реализации транзитивного замыкания отношений следования между состояниями процессов, протекающих в основных элементарных динамических звеньях. — Библи. 3 назв.*

UDC 681.3.06

*Shpakov V. M. Dynamic knowledge specification on the base of continuous process transition model // SPIIRAS Proceedings. Issue 3, vol. 1. — SPb.: Nauka, 2006.*

**Abstract.** *Advantages of dynamic knowledge specification with help of structural dynamic scheme are discussed. An approach to development of such schemes executable specifications is considered. The approach is based on software realization of consequence relation transitive closure for processes states, which take place at basic dynamic units. — Bibl. 3 items.*

---

## 1. Введение

Традиционным средством спецификации знаний о динамике процессов и систем является математический аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений. Компьютерная реализация специфицированных с помощью дифференциальных уравнений процессов производится путем использования методов их численного решения. Такая технология хорошо подходит для исследования динамики систем, так как позволяет всегда обеспечить требуемую точность. Однако при моделировании и реализации систем использование указанного подхода часто оказывается малоэффективным. К его недостаткам можно отнести высокую трудоемкость программирования, сложность интерпретации результатов и высокое потребление вычислительных ресурсов.

Другим способом спецификации динамики является использование передаточных функций элементарных динамических звеньев и структурных схем их соединения для представления сложных динамических систем. При этом используются последовательные и параллельные, прямые и обратные соединения элементарных звеньев. Такой подход реализуется в аналоговых ЭВМ (аналоговых компьютерах) [1]. Эти ЭВМ широко использовались в середине прошлого века для проектирования различных, в частности автоматических, динамических систем. В настоящее время область их применения весьма ограничена.

Функционирование аналоговых ЭВМ основано на использовании принципа подобия законов электродинамики и законов других динамик, прежде всего, ме-

---

<sup>♦</sup>Данная работа была частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований за 2005 год (проект № 05-08-18111-а).

ханики и термодинамики, а также аэродинамики и гидродинамики. Аналоговые ЭВМ оперируют непрерывными переменными, значения которых представляются величинами напряжения постоянного тока. Основными элементами этих ЭВМ являются интеграторы, сумматоры и функциональные, в том числе нелинейные, преобразователи, а также контакторные устройства, обеспечивающие возможность соединения элементов, необходимые для реализации требуемых структурных схем. Недостатками аналоговых ЭВМ являются низкая точность и малый диапазон изменения переменных, который в случае транзисторных ЭВМ не превышает 10 вольт. Последнее обстоятельство влечет за собой необходимость масштабирования всех переменных. Низкая точность обусловлена зависимостью напряжения от погрешностей параметров элементов (резисторов и конденсаторов) и его чувствительностью к помехам. Ограничивает область применения этих ЭВМ также отсутствие в них логических средств спецификации процессов.

Достоинством аналоговых ЭВМ является высокое быстродействие, обусловленное реальным параллелизмом. Использование структурных схем упрощает формирование и модификацию модели, а наличие аналогии между процессами в модели и в реальной системе существенно облегчает интерпретацию результатов. Развитием аналоговых ЭВМ явились дифференциальные анализаторы. Эти ЭВМ по принципу действия полностью соответствуют аналоговым, но с целью повышения точности и помехозащищенности аналоговые интеграторы в них заменены цифровыми интеграторами. С целью компенсации недостатков и использования достоинств аналоговые компьютеры были объединены с цифровыми. Такое объединение получило название гибридный компьютер (hybrid computer). Гибридный компьютер представляет собой весьма эффективную вычислительную систему. Широкого распространения они не получили, скорее всего, из-за узкой области применения, ограниченной проектированием непрерывных динамических систем.

В настоящее время благодаря широкому распространению цифровых вычислительных устройств большинство технических, в частности производственных, систем содержат как непрерывные, так и дискретные подсистемы. Поэтому представляется перспективным для моделирования и реализации таких систем использовать как цифровой, так и аналоговый подход к организации вычислений. При этом, благодаря высокой производительности современных компьютеров, аналоговые элементы могут быть эффективно реализованы программным путем. Для этого необходимо разработать подпрограммы эмуляции основных аналоговых вычислительных устройств, средства, обеспечивающие их взаимодействие между собой, и механизмы их включения в логическую структуру программного продукта.

В СПИИРАН проводятся теоретические и экспериментальные исследования программных средств спецификации знаний по динамике и управлению сложно структурированными совокупностями взаимодействующих гибридных процессов. Качество средств спецификации определяется их выразительными возможностями и пригодностью для эффективной программной реализации. В рамках этих исследований рассматривается подход к созданию программных средств спецификации совокупностей непрерывных процессов с помощью структурных схем, составляемых из моделей элементарных процессов. При этом спецификацию и реализацию элементарных процессов предлагается производить на основе использования формализма транзитивных моделей. Далее приводятся некоторые результаты этих исследований.

## 2. Спецификация динамики непрерывных процессов

Транзитивные модели представления конечного и гибридного автоматов в настоящее время используются для решения задач анализа дискретно-событийных и гибридных динамических систем [2]. Эти модели непосредственно определяют отношение следования между входным воздействием и текущим состоянием процесса с одной стороны и новым следующим его состоянием — с другой. При рассмотрении транзитивных моделей используется соглашение о том, что именем переменной со штрихом обозначается состояние процесса, непосредственно следующее за состоянием, обозначенным этим же именем без штриха. В случае свободного одномерного непрерывного процесса отношение следования или транзитивное отношение (transition relation) представляет собой бинарное отношение на множестве вещественных чисел вида  $\tau(y, y')$  или  $y' = \tau(y)$ , где  $y$  — текущее состояние процесса, а  $y'$  — следующее состояние процесса. В общем случае  $y'$  зависит не только от текущего состояния  $y$ , но и от входного воздействия  $x$ , а также от длительности интервала времени  $\Delta t$  между  $y$  и  $y'$ , то есть  $y' = \tau(x, y, \Delta t)$ .

Вычисление транзитивного замыкания отношения следования позволяет непосредственно представить процесс в виде последовательности или траектории состояний. Реализацию процессов таким путем можно получить, если в цикле вычислять отношение следования для состояний процесса. Для этого необходимо для элементарных динамических звеньев разработать процедуры вычисления отношения следования, каждая из которых по входному воздействию, текущему состоянию и параметрам динамического звена будет вычислять состояние процесса через заданный промежуток времени и на каждом шаге цикла производить обновление состояния соответствующего процесса. Остальные же необходимые для реализации структурных динамических схем функции  $f$  (суммирование, умножение, функциональные преобразования) можно выполнять с помощью стандартных средств, имеющихся в алгоритмических языках программирования. При этом, естественно, значения этих функций на каждом шаге цикла (обновленные значения) будут зависеть только от их аргументов, т.е. входных процессов. Для включения процессов в логическую структуру остального приложения все реализующие их динамические (интегро-дифференциальные) операторы и функции необходимо включить в состав условных операторов. В результате, например, алгоритм реализации процессов в одноконтурной замкнутой динамической структуре может быть представлен в следующем виде.

```
Повторять до команды "Останов"  
если "Ситуация" то  
     $y'_0 = f_1(x'_0, y_n);$   
     $y'_1 = \tau_1(y'_0, y_1, \Delta t);$   
     $y'_2 = \tau_2(y'_1, y_2, \Delta t);$   
    .....  
     $y'_n = \tau_n(y'_{n-1}, y_n, \Delta t);$   
конец если;  
конец повторять;
```

В приведенном алгоритме входной процесс обозначен  $x_0, y_i$  — процесс на выходе  $i$ -го звена,  $f_1$  — сумматор,  $\tau_1 - \tau_n$  — транзитивные отношения.

Приведем отношения следования (транзитивные отношения) для основных элементарных динамических звеньев. Основным динамическим звеном, с помощью которого можно построить сколь угодно сложную линейную динамическую систему, является интегратор. При наличии на входе интегратора постоянной величины  $x$  его выход непрерывно увеличивается со скоростью пропорциональной входной величине и коэффициенту передачи интегратора  $k$ . Очевидно, транзитивное отношение для интегратора имеет вид.

$$y' = y + x \cdot k \cdot \Delta t \quad (2)$$

Транзитивные отношения для динамических систем, получаемых путем различных соединений одного или нескольких интеграторов, могут быть получены из рассмотрения соответствующих структурных схем и отношения (2).

При охвате интегратора с передаточной функцией  $k/p$  единичной отрицательной обратной связью (рис. 1) получаем систему с передаточной функцией

$$\frac{y}{x} = \frac{k/p}{1+k/p} = \frac{1}{1+Tp},$$

то есть – апериодическое звено с единичным коэффициентом передачи и постоянной времени  $T=1/k$ , где  $k$  — коэффициент передачи интегратора. В соответствии с алгоритмом (1) производится пошаговое обновление состояния процесса. В момент обновления на входе интегратора имеется разность между входным сигналом и предыдущим состоянием процесса  $dx = x - y$ . В соответствии с (2), тело процедуры обновления состояния процесса, реализующей отношение следования для апериодического звена, будет иметь вид.

$$y := y + (x - y) \cdot \Delta t / T. \quad (3)$$

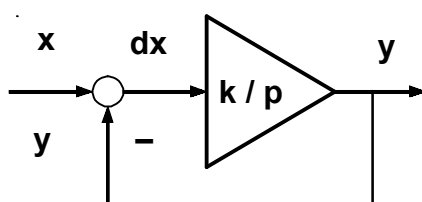


Рис. 1. Структурная схема апериодического звена.

Погрешность реализации процесса на основе транзитивного отношения, естественно, зависит от длительности шага алгоритма. Общая рекомендация сводится к тому, что необходимо обеспечивать  $\Delta t \ll T$ . Опыт моделирования реальных систем, в том числе больших автоматизированных промышленных установок, показывает, что производительность современных персональных компьютеров вполне достаточна для решения задач управления в режиме реального времени с приемлемой для практики точностью. Что касается моделирования для решения задач проектирования, то в режиме модельного времени всегда имеется возможность выбрать величину приращения времени, обеспе-

чивающую требуемую точность. При этом, естественно, длительность моделирования будет определяться производительностью компьютера.

Приведем вывод транзитивного отношения для колебательного звена. Ход рассуждений при этом аналогичен представленному выше. Структурная схема колебательного звена приведена на рис. 2.

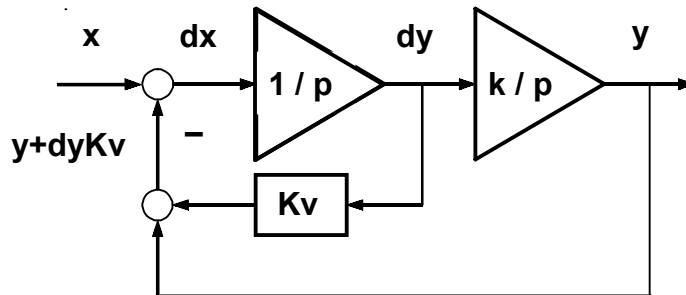


Рис. 2. Структурная схема колебательного звена.

В соответствие со схемой для первого интегратора имеем  $dx = x - (y + dy \cdot K_v)$ . Применяя соотношение (2) к обоим интеграторам, тело процедуры обновления состояния процесса, реализующей транзитивное замыкание отношения следования для колебательного звена, можно представить в следующем виде.

$$\begin{aligned} dy &:= dy + (x - y - dy \cdot k_v) \cdot \Delta t \\ y &:= y + dy \cdot k \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

Покажем, каким параметрам колебательного звена соответствуют параметры  $k$  и  $k_v$  процедуры (4). Применив к обоим контурам схемы (рис. 2), формулу для замыкания системы, получим следующую передаточную функцию замкнутой системы  $\frac{y}{x} = \frac{k}{p^2 + k_v p + k}$ . Сравнив ее с одним из принятых пред-

ставлений передаточной функции колебательного звена  $\frac{y}{x} = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2}$ ,

видим, что  $k = \omega_0^2$ , т.е. равен квадрату собственной частоты, а  $k_v = 2\xi\omega_0$  определяет затухание процесса.

Дифференцирующие динамические звенья получаются путем включения интеграторов в цепь обратной связи. В аналоговых ЭВМ из-за низкой помехозащищенности операционных усилителей практически невозможна была реализация дифференцирующих звеньев таким способом. При рассмотренном методе эмуляции интеграторов такой путь реализации дифференцирующих звеньев вполне возможен. Кроме того, возможно использование процедуры, вычисляющей текущую скорость входного процесса на каждом шаге алгоритма обновления состояния процессов. Для ее реализации необходимо хранить состояние входного процесса на предыдущем шаге. Тело такой процедуры может иметь вид:

$$y_j := (x_j - x_{j-1}) \cdot k / \Delta t.$$

Комбинируя приведенные процедуры можно создавать процедуры, обеспечивающие реализацию более сложных процессов, таких, например, как ПИД законы регулирования.

### 3. Реализация транзитивных моделей

Что касается интерфейса с пользователем, обеспечивающего формирование структурных схем динамических систем, то варианты его реализации могут быть различными. Этот интерфейс должен обеспечивать выбор звена из множества имеющихся в приложении, задание параметров звена и соединение его с другими звеньями. Не представляет труда разработка графического интерфейса, совпадающего по внешнему виду со структурными схемами. В разработанном в СПИИРАН исследовательском прототипе среды моделирования гибридных динамических систем спецификация непрерывных составляющих гибридных процессов производится с помощью редактора, который позволяет выбирать звенья и функции из списка имеющихся и задавать их параметры в текстовом формате. Необходимые соединения между звеньями обеспечиваются за счет использования соответствующих имен переменных в качестве входных (аргументы) и выходных процессов динамических звеньев и функциональных преобразователей.

На рис. 3 приведена часть экранной формы этого редактора, на которой представлены два возможных варианта спецификации колебательного звена. Каждая строка таблицы специфицирует одно отношение или одну функцию. Часто по аналогии с продукционными правилами, которые описывают трансформацию состояний дискретно-событийных процессов, транзитивные отношения называют правилами трансформации непрерывных состояний.

В колонке с именем «Ситуация» находится логическая переменная, которая обеспечивает логическую связь данного отношения (функции) с остальным приложением. Первые четыре строки таблицы редактора специфицируют два интегратора, два сумматора и соединения между ними, соответствующие структурной схеме рис. 2. Имена переменных выбраны такими же самыми, как на рисунке. Пятая строка таблицы редактора специфицирует второе колебательное звено с помощью одного транзитивного отношения (4). Параметры обоих звеньев (собственные частоты и затухания) заданы одинаковыми.

№	Функция	Имя функции	Козфф.	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация	Имя парам.	Значение	Имя парам.	Значение
1	dy	Интеграл	1.00	dx		Истина				
2	Y1	Интеграл	1.0	dy		Истина				
3	"Y + dy*Kv"	Сумма	0.1	Y1	dy	Истина				
4	dx	Сумма	-1.0	X1	"Y + dy*Kv"	Истина				
5	Y2	Колебательная	1.0	X2		Истина	Декремент	0.10	Частота	1.00

Рис. 3. Два варианта спецификации колебательного звена.

На рис. 4 приведены кривые переходных процессов в двух колебательных звеньях, специфицированных и реализованных двумя различными описанными способами. Переходные процессы вызваны ступенчатыми входными воздействиями, одинаковыми по величине, но противоположными по знаку. Верхний на рисунке процесс специфицирован с помощью структурной схемы (первые че-

тыре строки рис. 3), нижний — с помощью одного транзитивного отношения (5-ая строка рис. 3). Не трудно видеть, что динамики обоих процессов идентичны.

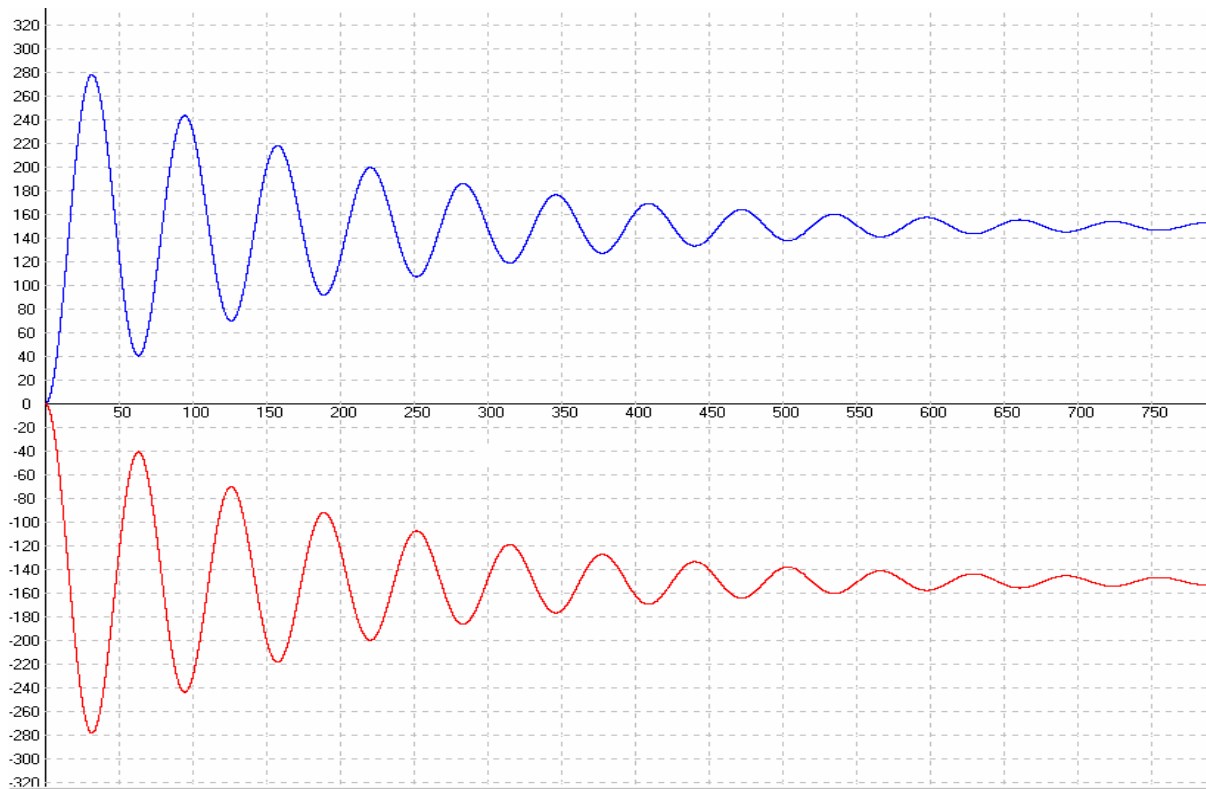


Рис. 4. Переходные процессы в колебательных звеньях.

## 4. Заключение

Как интерфейс пользователя, предназначенный для формирования структурной схемы динамической системы, так и алгоритм обновления состояний процессов могут быть эффективно реализованы с помощью универсальных алгоритмических языков программирования. Полученные программные модули могут служить основой создания компонентов реализации процессов, встраиваемых в различные программные продукты. Поскольку рассмотренные спецификации непрерывных процессов являются исполняемыми, то полученные таким путем приложения предоставляют пользователю возможность самостоятельно программировать модели процессов на языке близком к предметной области, что в ряде случаев позволяет расширить области применения программных средств и длительности их жизненных циклов.

## Литература

1. *Howe R. M.* Analog computer fundamentals // IEEE Contr. Syst. Mag. 2005. Vol. 25, no. 3. P. 29–36.
2. *Alur R., Henzinger T. A., Lafferriere G., Pappas G. J.* Discrete Abstractions of Hybrid Systems // Proceedings of the IEEE. 2000. No. 88. P. 971–984.
3. *Шпаков В. М.* Среда разработки ситуационных исполняемых спецификаций моделей систем управления // Интеллектуальные системы и информационные технологии управления: Материалы конф. ИСИТУ-2000-ISITC. Псков, 18–23 июня 2000. С. 316–319.