

В.М. ШПАКОВ  
**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРАНСФОРМАЦИОННЫХ ПРАВИЛ  
ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНЫХ  
ПРОЦЕССОВ**

---

*Шпаков В.М. Об использовании трансформационных правил для компьютерной реализации непрерывных процессов.*

**Аннотация.** Рассматриваются возможности использования основанного на трансформационных правилах транзитивного подхода для спецификации и компьютерной реализации непрерывных процессов. На примерах показаны приемы преобразования исходных спецификаций процессов в спецификации в виде совокупности трансформационных правил. В качестве исходных рассмотрены спецификации в виде физической модели, структурной схемы динамических звеньев, в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. Приведенные примеры демонстрируют простоту, наглядность и универсальность рассматриваемого подхода. Кратко обсуждаются вопросы реализации процессов, специфицированных с помощью правил. Полученные модельные реализации процессов оцениваются с помощью аналитических методов, а также сравниваются с численными решениями, найденными с помощью Matlab и MathCad.

**Ключевые слова:** представление знаний, компьютерное моделирование, дифференциальные уравнения, автоматическое управление.

*Shpakov V.M. About use of transformational rules for computer implementation of continuous processes.*

**Abstract.** The possibility to use based on the transformational rules transitive approach for the specification and the computer implementation of continuous processes is considered. The examples show techniques of the processes initial specifications conversion in the specifications as sets of transformation rules. As starting specifications in the form of a physical model, the block diagram of dynamic links, in the form of ordinary differential equations are considered. These examples demonstrate the simplicity, clarity and versatility of this approach. Some problems of implementation of the processes specified by using rules are briefly discussed. The resulting model implementations of processes are evaluated using analytical methods and compared with the numerical solutions found using Matlab and MathCad.

**Keywords:** knowledge representation, computer simulation, differential equations, automatic control.

---

**1. Введение.** Потребность в компьютерной реализации непрерывных процессов существует при имитационном моделировании динамических систем, а также при разработке программного обеспечения современных систем управления, например, для реализации эталонных процессов и процессов управления. Если в первом случае возможна реализация процессов, как в реальном, так и в модельном масштабе времени, то во втором случае — только в реальном времени. Имитационные модели

технологического оборудования широко используются для отладки и обслуживания систем управления технологическими процессами.

Традиционно спецификация непрерывных процессов производится с помощью дифференциальных уравнений, на основе которых создается математическая модель процессов. Разработано много дифференциальных уравнений, специфицирующих определенные процессы, имеющие значение для науки и техники. Другой метод спецификации процессов основан на использовании передаточных функций и составлении структурных схем, определяющих взаимодействие друг с другом элементарных динамических звеньев, функциональных преобразователей и типовых нелинейностей. Этот метод широко используется для анализа и проектирования систем автоматического управления. Реализация процессов, специфицированных указанными методами, производится с помощью методов численного решения дифференциальных уравнений.

Специфицировать процессы можно также с помощью физической модели динамической системы. Такая модель представляет собой совокупность функциональных и интегро-дифференциальных отношений между состояниями процессов, а также имеющихся пространственно-временных и технологических ограничений.

Реализацию процессов, заданных любым из указанных способов можно производить с помощью транзитивного подхода к представлению процессов. На основе этого подхода разработана методика спецификации гибридных процессов [1, 2]. Она представляет собой гибридный автомат, функции перехода которого заданы с помощью трансформационных (продукционных) правил. Эти правила на основании текущих значений состояний процессов и специфицированных функциональных и интегро-дифференциальных отношений определяют состояния процессов через определенный промежуток времени. Непрерывные процессы являются частными случаями гибридных процессов, они также могут быть специфицированы с помощью трансформационных правил. Реализация процессов, специфицированных с помощью правил, производится интерпретатором, исполняющая процедура которого сканирует в цикле списки правил и вычисляет текущие значения логических и вещественных переменных, представляющих состояния процессов. Спецификация процессов с помощью правил обладает, на наш взгляд, рядом достоинств. Язык спецификации ориентирован на специалистов в предметной области, является достаточно

выразительным, допускает простую модификацию спецификаций и их эффективную реализацию. Спецификации процессов, заданные физическими моделями систем, выполненные с помощью структурных схем или дифференциальных уравнений, могут достаточно просто быть преобразованы в спецификации в виде трансформационных правил, а процессы реализованы с помощью интерпретатора. Цель данной статьи состоит в демонстрации на примерах приемов преобразования указанных исходных спецификаций в спецификации в виде трансформационных правил и реализации процессов на их основе.

Далее кратко излагаются необходимые для понимания основные положения транзитивного подхода к реализации гибридных процессов. Текущее состояние совокупности гибридных процессов задается множеством вещественных переменных  $X$ , представляющих непрерывные составляющие, и множеством логических переменных  $W$ , представляющих дискретные составляющие процессов и предикаты от непрерывных состояний. В данной статье нас будут интересовать только непрерывные составляющие процессов. Для их спецификации необходимо задать функцию перехода следующего типа:  $W \times X \rightarrow X$ . Эта функция определяется трансформационными правилами, условная часть которых содержит логическую переменную, представляющую ситуацию или режим, а исполнительная часть — транзитивное отношение между текущим и следующим состояниями процесса. В случае свободного одномерного непрерывного процесса отношение следования или транзитивное отношение 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. Транзитивное отношение  $\tau$  определяется параметрами динамического звена и длительностью интервала времени  $\Delta t$  между  $y$  и  $y'$ . В случае вынужденного процесса оно также зависит от внешнего воздействия  $x$ . Для спецификации зависимости непрерывных состояний от логики развития гибридного процесса, процедуры вычисления этих отношений включаются в исполнительные части правил, условными частями которых являются требуемые значения соответствующих режимов. Эти правила имеют вид:

$$S_j \rightarrow x'_k = \tau_k(x_k, x), \quad x_k, x \in X, \quad (1)$$

где  $S_j$  — условие, определяющее режим,  $\tau_k$  и  $x_k$  —

соответствующие отношение и состояние,  $x$  — состояние возмущающего процесса. При спецификации непрерывных процессов в качестве условия используется логическая константа, имеющая значение *True*.

В СПИИРАН разработан исследовательский прототип интерпретатора трансформационных правил [3]. Он содержит редакторы для формирования векторов состояния процессов и списков правил трансформации этих состояний. Для обработки правил (1) в интерпретаторе имеется набор процедур реализации арифметических операторов, элементарных функций и транзитивных отношений для элементарных процессов. В частности имеется процедура для реализации интеграторов, использующая метод Эйлера. Рассматриваемые в следующих разделах процессы были реализованы с помощью этого интерпретатора.

С помощью интерпретатора возможна реализация процессов, как в модельном, так и в реальном масштабе времени. В случае модельного времени величина приращения времени задается пользователем. Она определяет точность реализации процесса. При этом реальное время реализации зависит от количества правил и быстродействия интерпретатора. В случае реального времени в конце каждого оборота цикла сканирования правил измеряется его длительность и это значение используется в правилах для вычисления новых значений состояний процессов. При этом от количества правил и быстродействия интерпретатора зависит точность реализации процессов.

Точность определяется погрешностью используемого численного метода интегрирования и длительностью интервала продвижения времени. В случае реального времени использование сложных методов численного интегрирования приводит к увеличению интервала, что уменьшает точность. Современные компьютеры обладают высокой производительностью. Обработка сотен правил на персональном компьютере производится за единицы микросекунд, что позволяет обеспечить приемлемую точность реализации многих процессов в реальном масштабе времени. На точность реализации некоторое влияние оказывает последовательность правил в списке. Правила обрабатываются по порядку с начала списка. Для повышения точности надо, чтобы правила вычисления подынтегральных функций предшествовали правилам, вычисляющим интегралы. Для качественной оценки влияния на точность интегрирования последовательности правил было проведено моделирование процесса  $y(t) = 80 \int t dt = 40 \cdot t^2$  при очень большом шаге

интегрирования ( $dt=0,1$  сек) и различной последовательности правил вычисления подынтегральной функции и интеграла. Для сравнения этот же процесс был реализован при шаге  $dt=1$  мкс. Этот процесс можно принять в качестве эталонного. Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

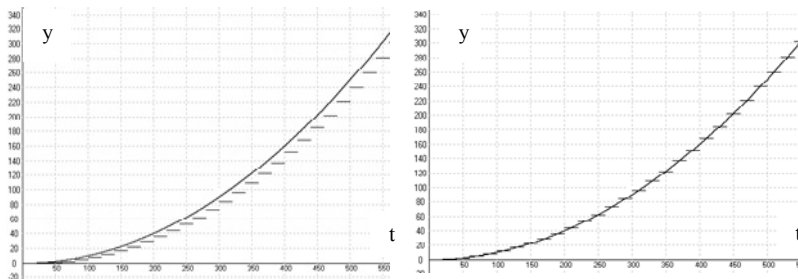


Рис. 1. К оценке погрешности интегрирования

Эталонный процесс изображен сплошной линией, а исследуемый — в виде последовательности ступенек длиной 0,1 секунды. В левой части рисунка приведен процесс, реализованный списком правил, при котором интеграл вычисляется раньше, чем подынтегральная функция. В правой части рисунка представлен график процесса, реализованного правилами, в которых вычисление подынтегральной функции предшествовало вычислению интеграла. В первом случае погрешность складывается из высоты ступеньки и некоторой накопленной погрешности. Во втором случае ступенька расположена примерно симметрично относительно эталонного процесса. Величина ступеньки в обоих случаях пропорциональна текущей скорости процесса и величине интервала. Можно сделать вывод о том, что во втором случае погрешность как минимум в два раза меньше, чем в первом случае.

**2. Реализация процессов, заданных физической моделью.** В качестве примера рассмотрим реализацию процессов, возникающих при центральном ударном взаимодействии двух абсолютно упругих шаров (пример 23.2 [4]). Пусть шары имеют одинаковые радиусы  $R_1=R_2=0,1$  и одинаковые коэффициенты упругости  $k_1=k_2=k=10000$ . Масса первого шара равна  $m_1=3$ , а масса второго —  $m_2=1$ . Центр тяжести первого шара находится в начале оси абсцисс ( $x_1(0)=0$ ) и имеет скорость  $V_1(0)=10$  в положительном направлении оси абсцисс. Центр тяжести второго шара находится в точке с абсциссой

$x_2(0)=R_1+R_2=0,2$  и имеет скорость  $V_2(0)=-10$ . Из сказанного следует, что шары находятся в начале процесса взаимодействия. В результате взаимодействия возникают две силы  $F_1$  и  $F_2$ , равные по величине и противоположные по направлению. Под действием этих сил первый шар начинает замедляться, а второй — ускоряться. Величина каждой из сил пропорциональна суммарной деформации шаров, т.е.  $F_1=-F_2=-k \cdot ((R_1+R_2)-(x_2-x_1))$ . Силы определяют ускорения шаров ( $a_1$  и  $a_2$ ), а скорости и координаты определяются интегралами от ускорения и скорости, соответственно. Приведенное описание можно назвать физической моделью рассматриваемых процессов. На его основании нетрудно создать спецификацию процессов в виде совокупности трансформационных правил. Такая спецификация приведена на рисунке 2.

Nº	Переменная	Процедура	Козфф.	Аргумент	Аргумент
1	a1	Деление	1.00	F1	m1
2	V1	Интеграл	1.00	a1	
3	-X1	Интеграл	-1.00	V1	
4	a2	Деление	1.00	F2	m2
5	V2	Интеграл	1.00	a2	
6	X2	Интеграл	1.00	V2	
7	-Distance	Сумма	-1.00	X2	-X1
8	R1 + R2	Сумма	1.00	R1	R2
9	Delta	Сумма	1.00	R1 + R2	-Distance
10	F1	Пропорциональная	-10000.00	Delta	
11	F2	Пропорциональная	-1.00	F1	

Рис. 2. Правила, специфицирующие процессы при ударном взаимодействии двух шаров

Правила представлены в формате редактора правил разработанного интерпретатора. Первое правило вычисляет текущее значение ускорения первого шара, второе и третье — его скорость и координату, соответственно. 4, 5, 6 правила делают то же самое для второго шара. Седьмое правило вычисляет текущее расстояние (*Distance*) между центрами масс шаров, а девятое — текущую суммарную деформацию (*Delta*). Десятое правило вычисляет текущее значение силы  $F_1$ , действующей на первый шар. Коэффициент в этом правиле равен коэффициенту упругости материала шаров. Сила  $F_2$ , действующая на второй шар, равна по величине и противоположна по направлению первой силе. Запуская эти правила на обработку интерпретатором, получаем процессы изменения всех переменных: координат, скоростей, ускорений и сил.

На рисунке 3 приведены графики изменения скоростей шаров и возникающих сил. Масштаб визуализации скоростей равен 10.

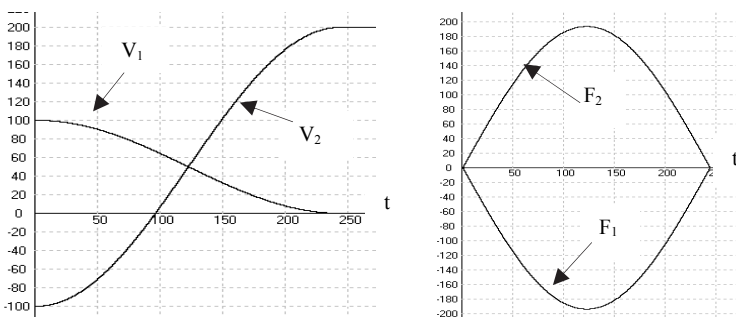


Рис. 3. Графики процессов изменения скоростей шаров и возникающих сил

При выбранных значениях начальных скоростей и масс шаров скорость первого шара уменьшается до нуля, а скорость второго шара меняет знак и по модулю увеличивается вдвое. Обе скорости в дальнейшем остаются постоянными. Возникающие силы равны по величине и противоположны по знаку. Количество движения до взаимодействия  $m_1 \cdot V_1(0) + m_2 \cdot V_2(0)$  и после  $m_1 \cdot V_1(0,02) + m_2 \cdot V_2(0,02)$  равны -20. С полученной моделью можно проводить эксперименты, изменяя массы шаров, начальные скорости и коэффициент упругости. В экспериментах всегда выполняются законы сохранения количества движения и сохранения энергии.

Использование физической модели упрощает реализацию процессов, так как исключает необходимость разработки математической модели. При этом также существенно упрощаются модификация и расширение модели процессов. Наглядность в данном случае повышается за счет того, что вместо абстрактных математических координат используются реальные физические переменные.

**3. Реализация процессов, специфицированных с помощью структурных схем элементарных динамических звеньев.** Рассмотрим особенности формирования трансформационных правил и реализации процессов, заданных структурной схемой, приведенной на рисунке 4. Схема представляет собой последовательное соединение двух динамических звеньев. Первое состоит из двух интеграторов, охваченных общей отрицательной обратной связью и отрицательной обратной связью по скорости. Это звено специфицирует затухающий колебательный процесс. Вторым звеном является охваченный

отрицательной обратной связью интегратор. Оно определяет затухающий аperiodический процесс.

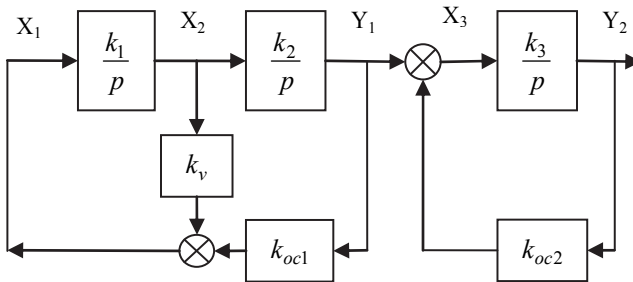


Рис. 4. Структурная схема процессов

Как видно из схемы реализация специфицируемых ею процессов может быть произведена путем соединения интегрирующих, суммирующих и пропорциональных элементов. При спецификации процессов с помощью правил каждый элемент схемы представляется правилом, реализующим соответствующую процедуру. Соединение процедур производится за счет того, что выходная переменная одной процедуры используется в качестве аргумента другой. На рис. 5 приведены правила, соответствующие схеме рис. 4. Имена переменных в правилах совпадают с именами, использованными на схеме.

Первое правило формирует процесс обратной связи по скорости с  $k_v = 0,02$ . Второе — процесс основной обратной связи с  $k_{oc1} = 1$ . Третье правило осуществляет суммирование обеих обратных связей и инвертирование суммарного значения, тем самым вычисляет значение  $x_1$  на входе первого интегратора. Четвертое правило производит интегрирование с  $k_1 = 50$  и определяет значение  $x_2$  на входе второго интегратора. Пятое правило осуществляет интегрирование с  $k_2 = 40$  и вычисляет значение  $y_1$  состояния процесса на выходе первого звена. Следующие три правила аналогичным образом специфицируют аperiodическое звено с  $k_3 = 10$  и  $k_{oc2} = 0,1$ . При этом выходной сигнал первого звена  $y_1$  используется в седьмом правиле для формирования процесса  $x_3$  на входе третьего интегратора. Последнее правило вычисляет состояние  $y$  процесса на выходе схемы.



№	Переменная	Процедура	Кэф.ф.	Аргумент 1	Аргумент 2
1	$K_v \cdot X_2$	Пропорциональная	0.02	$X_2$	
2	$K_{oc1} \cdot Y_1$	Пропорциональная	1.00	$Y_1$	
3	$X_1$	Сумма	-1.00	$K_v \cdot X_2$	$K_{oc1} \cdot Y_1$
4	$X_2$	Интеграл	50.00	$X_1$	
5	$Y_1$	Интеграл	40.00	$X_2$	
6	$K_{oc2} \cdot Y$	Пропорциональная	-0.10	$Y$	
7	$X_3$	Сумма	1.00	$Y_1$	$K_{oc2} \cdot Y$
8	$Y$	Интеграл	10.00	$X_3$	

Рис. 5. Совокупность правил для реализации процессов, специфицированных структурной схемой

В данном случае процессы, определяемые схемой, описываются обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, аналитические решения которых находятся достаточно просто. Применяя формулу для замыкания системы отрицательной обратной связью к обоим контурам первого звена, находим его передаточную функцию в следующем виде:

$$\Phi_1(p) = \frac{k_1 \cdot k_2}{p^2 + k_1 \cdot k_v \cdot p + k_1 \cdot k_2 \cdot k_{oc1}}.$$

Вид переходного процесса в данном звене определяется корнями знаменателя приведенной передаточной функции  $\lambda_{1,2} = -0,5 \cdot k_1 \cdot k_v \pm \sqrt{(0,5 \cdot k_1 \cdot k_v)^2 - k_1 \cdot k_2 \cdot k_{oc1}}$  или для выбранных значений коэффициентов  $\lambda_{1,2} = -0,5 \pm \sqrt{-1999,75} = -0,5 \pm j \cdot 44,72$ . Соответствующий найденным значениям корней переходный процесс представляет собой колебательный процесс с круговой частотой  $\omega_1 = 44,72$  (период колебаний  $T = 0,14$  с) и амплитудой, изменяющейся по экспоненте с показателем  $\alpha = -0,5 \cdot t$ . На рисунке 6 представлен процесс изменения  $y_1$ , реализованный с помощью правил (рис. 5) для начального значения  $y_1(0) = 250$  и нулевых начальных значений остальных переменных. Измерение параметров этого процесса показало, что они хорошо совпадают с расчетными значениями.

Применяя формулу для замыкания системы ко второму звену, получаем его передаточную функцию  $\Phi_2(p) = \frac{k}{1 + T \cdot p}$ , где

$k = \frac{1}{k_{oc2}} = 10$  и  $T = \frac{1}{k_3 \cdot k_{oc2}} = 1$ . Амплитудная частотная характеристика

этого звена имеет следующий вид:  $\Phi_2(\omega) = \left| \frac{k}{1 + T \cdot j\omega} \right| = \frac{k}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}}$ .

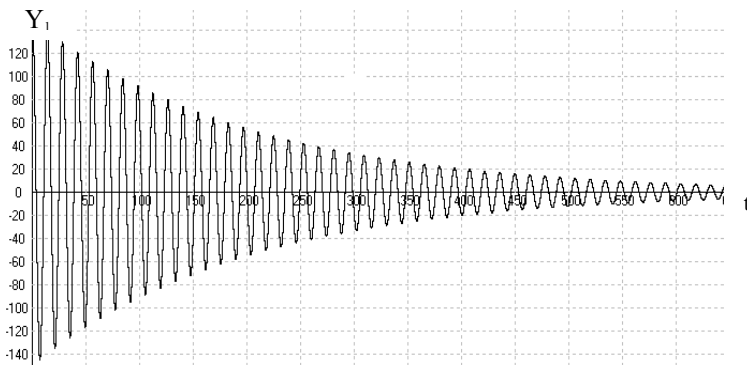


Рис. 6. График процесса  $y_1(t)$  на выходе колебательного звена

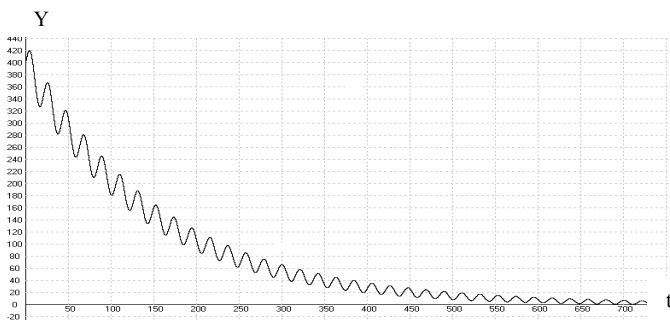


Рис. 7. График процесса  $y(t)$  на выходе схемы на рисунке 4

Для выбранных значений параметров и найденного значения частоты входного процесса  $\Phi_2(\omega_1) = 0,2236$ . Это значение является коэффициентом пропорциональности между амплитудами колебательных процессов на входе и выходе этого звена. На рисунке 7 приведен процесс на выходе схемы (рис. 4) для начальных значений  $y_1 = 150$  и  $y = 400$ . Процесс представляет собой затухающие колебания, происходящие относительно экспоненты:

$y=150 \cdot 0,2236 \cdot e^{-0,5t} \cdot \sin \omega t + 400 \cdot e^{-t}$ , что соответствует приведенным ранее рассмотрениям.

**4. Реализация процессов, специфицированных дифференциальными уравнениями.** Рассмотрим вначале простейшее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = y. \quad (2)$$

Процессы, специфицированные этим уравнением, могут быть реализованы с помощью двух интеграторов. Соответствующие правила приведены на рисунке 8.

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1
1	dy/dt	Интеграл	1.00	y
2	y	Интеграл	1.00	dy/dt

Рис. 8. Правила для реализации процессов, заданных уравнением (2)

Первое правило осуществляет интегрирование основной переменной и определяет ее первую производную. Второе правило интегрирует эту производную и находит основную переменную. Общее решение рассматриваемого уравнения имеет вид:  $y(t) = C_1 e^t + C_2 e^{-t}$ . Его можно использовать для реализации процессов, состояния которых изменяются по экспоненциальным законам. Значения констант определяются начальными условиями:  $y(0) = C_1 + C_2$ ,  $y'(0) = C_1 - C_2$ . Меняя начальные условия можно получать различные экспоненциальные зависимости. Так для получения процесса  $y(t) = e^t$  надо, чтобы  $C_1 = 1$  и  $C_2 = 0$ , а для этого необходимо установить  $y(0) = 1$  и  $y'(0) = 1$ . Для реализации процесса  $y(t) = 200 e^{-t}$  надо, чтобы  $C_1 = 0$  и  $C_2 = 200$ . Такой процесс будем иметь при  $y(0) = 200$  и  $y'(0) = -200$ . Полученные графики этих процессов представлены на рисунке 9. Параметры кривых полностью соответствуют приведенным решениям уравнения.

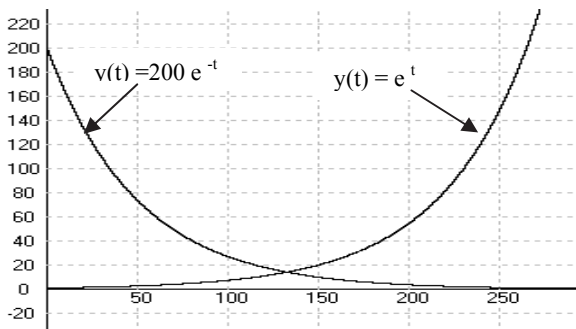


Рис. 9. Графики процессов, реализованных правилами (рис. 8)

К настоящему времени разработано и исследовано значительное количество обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в различных динамических системах, представляющих интерес для науки и техники. Компьютерная реализация этих процессов также, очевидно, может представлять интерес. Она достаточно просто может быть произведена с помощью трансформационных правил. Формирование таких правил рассмотрим на примере реализации процессов, специфицированных уравнением Ван-дер-Поля. Это нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение 2-го порядка, описывающее свободные автоколебания нелинейной колебательной системы (осциллятора Ван-дер-Поля). Оно находит применение в физике, биологии, в сейсмологии, имеет следующий вид:

$$\frac{d^2y}{dt^2} - \mu(1 - y^2) \cdot \frac{dy}{dt} + y = 0, \quad (3)$$

где  $y$  — координата точки, зависящая от времени,  $\mu$  — некий коэффициент, характеризующий нелинейность и степень затухания колебаний. Для реализации процессов, заданных с помощью дифференциального уравнения, необходимо из уравнения найти выражение для старшей производной, сформировать правила, вычисляющие текущее значение этой производной, затем последовательно использовать правила, реализующие процедуру интегрирования, для вычисления текущих значений всех более низких производных и самой функции. В случае рассматриваемого уравнения

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \mu \cdot (1 - y^2) \cdot \frac{dy}{dt} - y.$$

На рисунке 10 приведены правила, позволяющие реализовать процесс, описываемый уравнением (3)

при  $\mu=1$ . Имена переменных в правилах совпадают с идентификаторами, использованными в уравнении.

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1	Аргумент 2
1	$-y^2$	Умножение	-1.00	$y$	$y$
2	$(1 \cdot y^2)$	Сумма	1.00	Const 1	$-y^2$
3	$(1 \cdot y^2) \cdot dy/dt$	Умножение	1.00	$(1 \cdot y^2)$	$dy/dt$
4	$dy^2/dt^2$	Сумма	1.00	$(1 \cdot y^2) \cdot dy/dt$	$-y$
5	$dy/dt$	Интеграл	1.00	$dy^2/dt^2$	
6	$y$	Интеграл	1.00	$dy/dt$	
7	$-y$	Пропорциональная	-1.00	$y$	

Рис. 10. Правила для реализации процессов, заданных уравнением (3)

Первое правило вычисляет текущее инвертированное значение квадрата функции (основной переменной), второе и третье — формируют первый член выражения для второй производной, а четвертое полностью вычисляет это выражение. Следующее правило интегрирует это выражение и находит значение первой производной. Шестое правило вычисляет интеграл от первой производной, то есть находит значение функции. На рисунке 11 представлены графики процессов, реализованных с помощью трансформационных правил (рис. 10) для  $y(0)=2$  и нулевых начальных значений производных, тех же начальных условий и того же значения параметра, полученным с помощью Mathcad и приведенным на рис 3 в работе [5].

Аналогичным образом с помощью трансформационных правил можно реализовать процессы, специфицированные системами обыкновенных дифференциальных уравнений. Покажем это на примере реализации процессов, заданных системой Лоренца, представляющей собой систему трех уравнений первого порядка:

$$\frac{dx}{dt} = \sigma \cdot (y - x), \quad \frac{dy}{dt} = \rho \cdot x - y - x \cdot z, \quad \frac{dz}{dt} = x \cdot y - \beta \cdot z.$$

Здесь  $x$ ,  $y$  и  $z$  — переменные системы,  $t$  — время, а  $\sigma$ ,  $\rho$ ,  $\beta$  — параметры системы. Эта система уравнений была разработана Эдвардом Лоренцом в 1963 году и использовалась им в качестве математической модели процессов атмосферной конвекции. Позже подобные системы были получены при исследовании электрических цепей, электродвигателей, лазеров и химических реакций. При разработке трансформационных правил, соответствующих системе

уравнений, вначале формируются правила для вычисления переменных, представляющих правые части уравнений. Затем эти переменные используются в качестве подынтегральных функций для реализации переменных системы.

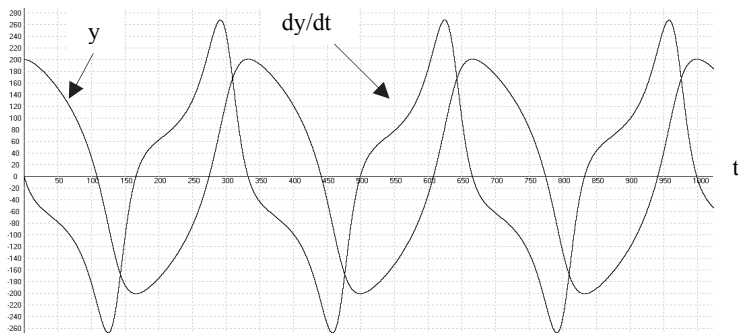


Рис. 11. Графики процессов, специфицированных уравнением (3)

На рисунке 12 приведены правила реализации процессов системы Лоренца для следующих значений параметров:  $\sigma=10$ ,  $\rho=28$ ,  $\beta=2,666667$ .

№	Перемен	Процедура	Козф.	Аргумент	Аргумент	Ситуаци	имя пара	значение
1	$x * z$	Умножение	1.00	x	z	EverTrue		
2	$\{y + x * z\}$	Сумма	-1.00	y	$x * z$	EverTrue	2-ой коэф	1.00
3	$x * y$	Умножение	1.00	x	y	EverTrue		
4	$dx / dt$	Сумма	10.00	y	x	EverTrue	2-ой коэф	-1.00
5	$dy / dt$	Сумма	1.00	$\{y + x * z\}$	x	EverTrue	2-ой коэф	28.00
6	$dz / dt$	Сумма	1.00	$x * y$	z	EverTrue	2-ой коэф	-2.666667
7	x	Интеграл	1.00	$dx / dt$		EverTrue		
8	y	Интеграл	1.00	$dy / dt$		EverTrue		
9	z	Интеграл	1.00	$dz / dt$		EverTrue		

Рис. 12. Правила для реализации процессов, заданных системой уравнений Лоренца

Первые три правила выполняют вспомогательные арифметические операции с переменными системы. Следующие три правила вычисляют производные от переменных системы, соответствующие трем правым частям уравнений, а три последних правила их интегрируют и вычисляют переменные системы. При запуске этих правил на обработку интерпретатором реализуются процессы изменения всех переменных системы. Визуализация изменения  $x$  представлена на рисунке 13.

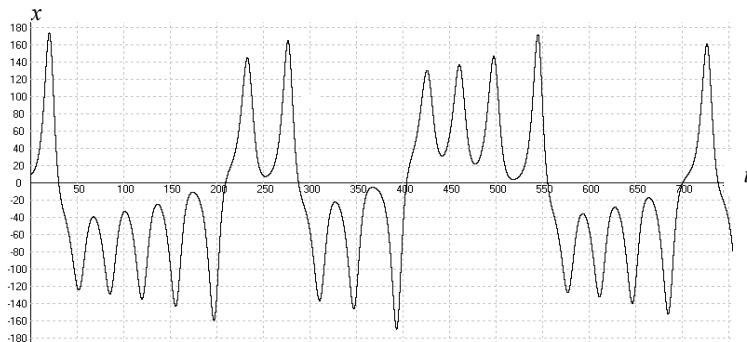


Рис. 13. График процесса  $x(t)$  системы уравнений Лоренца

Масштабный коэффициент визуализации по оси ординат равен 10. При запуске на реализацию процесса были установлены следующие начальные значения переменных:  $x=1$ ,  $y=1$ ,  $z=10$ . Полученный график процесса совпадает с графиком решения данной системы уравнений, полученного с помощью Matlab при тех же начальных условиях и приведенного на рисунке 4.9 в работе [6].

**5. Заключение.** Рассмотрена спецификация непрерывных процессов с помощью совокупностей трансформационных правил. На примерах показано, что данный подход может быть эффективно использован в случаях, когда исходные знания о развитии процессов представлены в виде физических моделей, структурных схем элементарных динамических звеньев или в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. При этом показано, что рассматриваемая спецификация обладает наглядностью, является достаточно простой и универсальной. Простота и наглядность наиболее четко проявляются при использовании физической модели. Такие свойства спецификации как простота и наглядность обеспечивают эффективность процессов отладки и модификации компьютерных программ реализации процессов. Универсальность спецификации делает возможным ее применение в случаях, когда знания о динамике частей системы представлены в различных формах.

Что касается реализации процессов, то разработка редактора и интерпретатора правил является тривиальной программистской задачей. Их создание требует небольших затрат времени программиста средней квалификации. Текстовая и графическая визуализации процессов также являются тривиальными задачами. Если имеется необходимость в анимации поведения динамической системы, то в каждом конкретном случае необходима разработка уникальной

подпрограммы. По-видимому, требуется более детальное рассмотрение вопросов оценки погрешностей реализации процессов данным способом.

### Литература

1. Шпаков В.М. Ситуационные спецификации имитационных моделей гибридных реактивных систем // Труды СПИИРАН. 2002. Вып. 1, том 2. С. 212-222.
2. Шпаков В.М., Исполняемые спецификации транзитивных моделей технологических процессов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 3. С. 38-45.
3. Шпаков В.М. Прототип среды моделирования структурированных совокупностей взаимодействующих процессов // Сборник докладов конференции “Имитационное моделирование. Теория и практика”, Санкт-Петербург, 19 – 21 октября 2005. Т. II. С. 292–295.
4. Старжинский В.М. Теоретическая механика // М.; Наука, 1980. 404 с.
5. Левицкий А.А. Основы численных методов. URL: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/levitsky/index.asp>.
6. Scheinerman E. R. Invitation to dynamical systems // Prentice Hall. 1995. 373 p.

### References

1. Shpakov V.M. [Situational specifications of simulation models of hybrid reactive systems]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceeding*. 2002. no. 1. Issue 2. pp. 212-222.
2. Shpakov V.M. [Executable specifications of transitive models of technological processes]. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie- Mechatronics, Automation, Control*. 2004. no. 3. pp. 38-45.
3. Shpakov V.M. [Prototype of simulation environment structured set of interacting processes]. *Sbornik докладov konferencii “Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika”*, *Sankt-Peterburg, 19 – 21 oktjabrja 2005* [Simulation. Theory and practice: Collected papers]. 2005. vol. 2. pp. 292–295.
4. Starzhinskij V.M. *Teoreticheskaja mehanika* [Theoretical mechanics]. М.; Nauka, 1980. 404 p
5. Levickij A.A. *Osnovy chislennyh metodov* [Fundamentals of numerical methods]. Accessed at: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/levitsky/index.asp>.
6. Scheinerman E. R. Invitation to dynamical systems. Prentice Hall. 1995. 373 p.

**Шпаков Владимир Михайлович** — к-т техн. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: автоматическое управление, искусственный интеллект, логическое программирование, экспертные системы, поддержка принятия решений. Число научных публикаций — 69. [vlad@ias.spb.su](mailto:vlad@ias.spb.su); СПИИРАН, 14-я линия В.О, д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; п.т. +7(812)328-8071, факс +7(812)328-4450.

**Shpakov Vladimir Michajlovich** — Ph.D., associate professor, senior researcher, laboratory of integrated systems for automation, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: automatic control, artificial intelligence, logic programming, expert systems, decision making support. The number of publications: — 69. [vlad@ias.spb.su](mailto:vlad@ias.spb.su); SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-8071, fax +7(812)328-4450.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-01-00015-а).

**Acknowledgements.** This research is supported by RFBR (grant #12-01-00015-а).



## РЕФЕРАТ

### **Шпаков В.М. Об использовании трансформационных правил для компьютерной реализации непрерывных процессов.**

Отмечается, что существует потребность в реализации непрерывных процессов как в модельном, так и в реальном масштабах времени. Статья посвящена рассмотрению метода спецификации и компьютерной реализации непрерывных процессов, основанного на применении транзитивного подхода к формализации знаний о развитии процессов. В основе подхода находится математическая модель гибридного автомата, функции перехода которого задаются с помощью трансформационных (продукционных) правил, определяющих транзитивное отношение между текущими и следующими состояниями процессов. Рассматриваемый метод ориентирован на специалистов в исследуемой предметной области, является достаточно простым и наглядным, допускает эффективную компьютерную реализацию процессов.

Основным содержанием статьи является рассмотрение особенностей формирования трансформационных правил в случаях, когда исходные знания о динамике процессов представлены в различных формах. На примере спецификации процессов, возникающих при ударном взаимодействии двух упругих шаров, показана возможность реализации физической модели процессов. Правила в этом случае формируются на основании физических законов и геометрических отношений. Получены графики процессов изменения скоростей шаров и сил взаимодействия. Для полученных процессов выполняются законы сохранения.

Способы формирования правил в случае, когда динамика задана структурной схемой соединения динамических звеньев, показана на примере спецификации последовательного соединения колебательного и апериодического звеньев. При этом правила специфицируют последовательное соединение интеграторов и соответствующие отрицательные обратные связи. Представлены процессы на выходе колебательного звена и на выходе схемы. Параметры полученных процессов соответствуют оценкам, найденным аналитическими средствами.

Три последних примера иллюстрируют способы составления правил реализации процессов для случаев, когда исходные знания представлены в виде дифференциальных уравнений. Рассмотрено уравнение Ван-дер-Поля. Уравнение разрешается относительно старшей производной. Сначала формируются правила, вычисляющие эту производную. Затем с помощью интеграторов реализуются остальные производные и сама функция. Реализованы процессы изменения функции и ее первой производной. Графики совпадают с численным решением этого уравнения, полученным с помощью MathCad. Аналогичным образом составляются правила и в случае системы дифференциальных уравнений. В качестве примера рассмотрена система уравнений Лоренца. Реализованный процесс также совпадает с численным решением системы уравнений, найденным с помощью Matlab.

## SUMMARY

### *Shpakov V.M.* **About use of transformational rules for computer implementation of continuous processes.**

It is noted that there exists a need for the implementation of continuous processes in the model and in real time. The article discusses the method of continuous processes specification and the computer implementation based on the use of the transitive approach to the formalization of knowledge about the processes development. The approach is based on the mathematical model of hybrid automata, whose transition functions are specified by the transformation (production) rules that define a transitive relation between the current and the following process states. The method in question is aimed at professionals in the area of concern. It is quite simple and intuitive, allows an efficient computer processes implementation.

The main content of the article is to produce the methodology of the transformation rules formation in cases where the initial knowledge about the dynamics of the processes is presented in various forms. On an example of specification of processes occurring during the shock interaction of two elastic spheres, the possibility of the implementation of a physical model of processes is shown. The rules in this case are formed on the basis of physical laws and geometric relationships. Diagrams of the processes of balls speed and interaction forces changes are gotten. Conservation laws hold for the resulting processes.

Method of the rules forming in a case where the dynamic is given by means of a block diagram of the dynamic unit combination is shown by the example of the oscillatory and aperiodic units serial connection specification. In this the rules specify the serial connection of integrators and their corresponding negative feedbacks. Processes at the output of the oscillatory unit and at the circuit output are presented. Parameters of derived processes are consistent with estimates found by analytic means.

The third example shows the procedure for drawing up rules for implementation of processes for the case where the initial knowledge is presented as a differential equation. An equation of Van-der-Pol is considered. Equation must be solved with regard to the highest derivative. First, rules to calculate this derivative are formed. Then with help of integrators the remaining derivatives and the function itself are realized. Diagrams of the processes of function and its first derivative change are received. The diagrams coincide with the numerical solution of this equation using MathCad. Similarly, the rules are drawn up in case of a system of differential equations. As an example, a system of Lorenz equations is considered. The resulting process is also consistent with the numerical solution. The versatility of the specification makes it possible to use it in cases where the knowledge about the dynamics of the system parts presented in different forms.