

В.М. ШПАКОВ

О РЕАЛИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ИМИТАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Шпаков В.М. О реализации физического подхода к имитационному моделированию динамических систем.

Аннотация. Отмечаются достоинства физического подхода к имитационному моделированию динамических систем и его востребованность на современном этапе развития системотехники, в частности, для моделирования систем управления и самоорганизующихся систем. Кратко изложен ситуационно-событийный формализм спецификации взаимодействующих гибридных процессов и показаны способы его использования для реализации физических имитационных моделей. Возможности применения рассмотренных методов иллюстрируются примерами реализации физических моделей ряда простых динамических систем. — Библ. 9 назв.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, динамика систем, гибридный автомат, транзитивная модель, ситуационно-событийный подход.

Shpakov V.M. About implementation of physics approach to dynamic systems simulation.

Abstract. Advantages of a physics approach to dynamic systems simulation are discussed. A great need for the approach at the modern state of system engineering is pointed out. In particular, such an approach may be useful for simulation of control and self-organizing systems. A situation-event formalism of an interacting hybrid process specification is briefly stated and some ways of its use for physic simulation model implementation are shown. Facilities of the considered methods are illustrated by examples of some simple dynamic system models implementations. — Bibl. 9 items.

Keywords: computer simulation, system dynamic, hybrid automaton, transitive model, situation-event approach.

1. Введение. В настоящее время основным подходом к компьютерному моделированию динамических систем является математический подход. Он состоит в том, что вначале на основании законов соответствующих динамик (механики, термодинамики, электродинамики и др.) разрабатывается математическая модель в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений относительно абстрактных переменных. Модельные эксперименты проводятся на компьютерах с использованием численных методов решения этой системы уравнений. При этом физические параметры системы входят в коэффициенты уравнений, иногда в виде достаточно сложных зависимостей. Такой подход сложился исторически и связан, не в последнюю очередь, с экономией производительности вычислительных средств. Экономия возникает за счет того, что при разработке модели выполняется ряд

промежуточных вычислений, и модель представляется в удобном для численных решений виде.

Недостаток такого подхода проявляется уже при вариациях физических параметров системы, выполняемых в ходе модельных экспериментов, и связан с необходимостью пересчета коэффициентов уравнений. Модификация же исходной модели системы или ее расширение требуют существенной переработки системы уравнений и программы ее решения на компьютере. Необходимость в расширении модели возникает очень часто и объясняется желанием повысить адекватность модели системе. При этом модель даже простой системы может оказаться довольно сложной.

Альтернативой абстрактно-математическому подходу является использование физического подхода к моделированию динамических систем. В этом случае переменными модели являются физические состояния процессов реальной системы, такие как силы, ускорения, скорости, углы, массы, температуры, напряжения и т.п. Изменение состояний производится процедурами, реализующими соответствующие законы динамики с учетом существующих ограничений и отношений между элементами системы. К достоинствам физических моделей следует отнести меньшую трудоемкость разработки модели, ее модификации и расширения, а также относительно более простую верификацию, валидацию, визуализацию модели и интерпретацию результатов моделирования. Физический подход к моделированию может оказаться полезным для разработки физической теории управления, о необходимости которой говорил академик А.А. Красовский. Он утверждал, что «отличие физической теории от абстрактно-математической начинается с математических моделей и критериев систем и процессов управления. В физической теории модели и критерии создаются в физических величинах и терминах» [1]. Физический подход является удобным для моделирования синергетических систем, так как позволяет достаточно просто реализовывать расширение систем и взаимодействия их друг с другом и с внешней средой [2]. Некоторый опыт разработки и использования физических моделей промышленных установок показал, что такие модели воспринимаются технологами и операторами значительно лучше, чем абстрактно-математические модели.

На рынке имеется большое количество компьютерных средств имитационного моделирования, в том числе и средств, предназначенных для создания физических моделей (Modelica, Simulink, SimMechanics, SimElectronics и др.) [3]. Имеющиеся компьютерные средства, обеспечивающие реализацию физического подхода к моделированию

(physics engines), в основном, ориентированы на проведение модельных экспериментов, анализ систем и разработку компьютерных игр [4]. Их использование для создания моделей, встроенных, например, в системы управления, тренажеры или обучающие программы, является затруднительным. Вместе с тем, высокая производительность современных компьютеров обеспечивает возможность создания сравнительно простых способов реализации физических моделей динамических систем с помощью существующих объектно-ориентированных визуальных средств программирования.

В самом общем случае поведение динамической системы определяется совокупностью взаимодействующих гибридных процессов. В статье показана возможность реализации физических моделей на основе использования ситуационно-событийного формализма спецификации транзитивной модели взаимодействующих гибридных процессов [5]. Транзитивная модель по текущим состояниям процессов и параметрам системы определяет состояния процессов через определенный промежуток времени. Ситуационно-событийный формализм позволяет задавать условия трансформации и взаимодействия процессов. Далее приводится краткое описание ситуационно-событийного формализма спецификации процессов и обсуждаются возможности его использования для реализации физических моделей систем. В третьем разделе приводятся спецификации физических моделей нескольких простых динамических систем и некоторые результаты их моделирования.

2. Реализация процессов на основе использования ситуационно-событийного формализма их спецификации. Реальные физические взаимодействующие процессы практически всегда являются гибридными, т.е. имеют дискретные и непрерывные составляющие. Основой формализма является абстрактная модель гибридного автомата [6], в которой дискретные состояния представляются логическими переменными. Множество логических переменных содержит также подмножество предикатов от непрерывных состояний, которые используются для моделирования взаимодействий между непрерывными и дискретно-событийными составляющими процессов. Логические переменные могут определять как дискретные изменения состояний непрерывных составляющих, так и изменения динамики их развития. Таким образом, состояние модели процессов может быть представлено множеством вещественных переменных X для непрерывных составляющих и множеством логических переменных W , содержащим подмножество Q для дискретных состояний и подмножество предикатов G ,

т.е. $W = Q \cup G$. Для спецификации процессов необходимо определить функции перехода следующих типов:

$\sigma : W \rightarrow Q \times \{False, True\}$ — функция трансформации дискретных состояний процессов;

$\delta : W \times X \rightarrow X$ — функция трансформации непрерывных состояний процессов;

$\gamma : X \rightarrow G \times \{False, True\}$ — зависимость значений предикатов от непрерывных состояний процессов.

Выразительные возможности модели и эффективность ее реализации существенным образом зависят от конкретного вида этих функций. Область определения функции перехода σ можно описывать с помощью логических формул, что делает описание достаточно наглядным. В общем случае для спецификации модели могут потребоваться произвольные логические формулы. На наш взгляд, в качестве условия наиболее удобно использовать элементарные конъюнкции логических переменных. Такие конъюнкции интуитивно понятным образом могут интерпретироваться как логико-динамические ситуации [5]. Логико-динамическую ситуацию S_j можно определить следующим образом:

$$S_j = s_{j_1}, \dots, s_{j_i}, \dots, s_{j_n}, \text{ где } s_{j_i} = w_{j_i} \text{ или } s_{j_i} = \neg w_{j_i}, \\ w_{j_i} \in W, n = 1..N_w, N_w = |W|.$$

Обозначая множество ситуаций S , тип функции трансформации дискретных состояний теперь можно определить следующим образом: $\sigma : S \rightarrow Q \times \{False, True\}$. Эта функция может быть задана с помощью совокупности продукционных правил «Условие \rightarrow Действие», в которых в качестве условия используется динамическая ситуация, а в качестве действия — процедура присвоения требуемых значений определенным дискретным состояниям. При этом правило будет иметь следующий вид:

$$S_j \rightarrow r'_{j_1}, \dots, r'_{j_i}, \dots, r'_{j_m}, \text{ где } r'_{j_i} = q'_{j_i} \text{ или } r'_{j_i} = \neg q'_{j_i}, q'_{j_i} \in Q. (1)$$

В (1) использовано соглашение, принятое при спецификации процессов, по которому именами переменных со штрихом обозначаются состояния процессов, непосредственно следующие за состояниями, обозначенными этими же переменными без штриха. Это означает, что вначале возникает ситуация, определенная в условной части правила,

после чего состояния из правой части принимают специфицированные значения.

Функция δ должна для каждого режима определять новые значения состояния процесса, соответствующие его текущему состоянию, динамике системы, а также текущим состояниям некоторых других взаимодействующих с ним процессов. Режим гибридного процесса естественным образом представляется с помощью динамической ситуации. Новые значения состояний процессов было предложено находить путем вычисления их транзитивных отношений. В [7] приведены алгоритмы вычисления транзитивных отношений для элементарных процессов (интегрирование, дифференцирование, сглаживание и др.). Сложные процессы реализуются путем различных соединений элементарных процессов и использования арифметических операций и функциональных преобразователей. При этом функция перехода δ может быть представлена с помощью совокупности правил вида:

$$S_j \rightarrow x'_k = \tau_k(x_k, x_i), \quad (2)$$

где $S_j \in S$ — ситуация, соответствующая режиму, τ_k — соответствующее отношение, $x_k, x_i \in X$ — состояния непрерывных процессов.

Поскольку часто режимы гибридных процессов связаны с нахождением непрерывных переменных в заданных диапазонах, то функцию γ удобно представлять совокупностью правил следующего вида:

$$((x_{j_1} \geq a_k + x_{j_2}) \wedge (x_{j_3} \leq b_k + x_{j_4})) \rightarrow g_k, \quad (3)$$

где $x_{j_1}, x_{j_2}, x_{j_3}, x_{j_4} \in X$, $g_k \in G$, a_k и b_k - константы, соответствующие некоторому диапазону. Более сложные предикаты могут формироваться из простых предикатов с помощью правил (1).

Компьютерная реализация процессов, специфицированных правилами (1,2,3), производится путем использования интерпретатора этих правил. Архитектура и алгоритмы функционирования интерпретатора достаточно просты. Множества переменных состояния процессов (X и W) в интерпретаторе представляются массивами записей, каждая из которых содержит имя переменной и ее значение. Все правила реализуются с помощью условных операторов «if...then...». Обе части оператора содержат записи об использованных в данном правиле переменных. Запись содержит идентификатор массива, имя и индекс переменной, текущее или заданное значение и указатель на это значение. Основу интерпретатора составляет исполняющая процедура, ко-

торая в цикле сканирует списки правил. Алгоритм обработки правил вычисляет значение условной части правила. Если это значение равно True, то запускается алгоритм выполнения исполнительской части правила. В случае правила (1) переменным из исполнительской части правила присваиваются специфицированные логические значения. В случае правила (2) запускается указанная в исполнительской части правила процедура вычисления транзитивного отношения, и найденное новое значение состояния процесса присваивается соответствующей переменной. В случае правила (3) вычисляются значения неравенств, указанных в условной части, и их конъюнкция присваивается предикату, указанному в исполнительской части правила. При использовании интерпретатора спецификации процессов в виде правил (1,2,3) могут непосредственно запускаться на исполнение.

3. Примеры реализации физических моделей. Описанный подход к реализации процессов был использован при разработке в СПИИРАН опытного образца компьютерной среды EnviCon, ориентированной на моделирование совокупностей взаимодействующих гибридных процессов [8]. Среда содержит редакторы для формирования векторов состояния процессов и списков правил трансформации описанного выше вида (1,2,3). Для обработки правил (2) в среде имеется набор процедур реализации арифметических операторов, функциональных зависимостей и транзитивных отношений для элементарных процессов. Использование этих процедур в соответствии с описанным ситуационным подходом позволяет создавать физические модели динамических систем и проводить с ними модельные эксперименты. Среда имеет достаточно наглядный интерфейс формирования и редактирования правил, а также визуализации процессов. Далее приводятся спецификации в среде EnviCon физических моделей простых динамических систем, иллюстрирующие применение описанного подхода.

3.1. Модель движения упругого обруча. Вначале приведем модель движения упругого обруча при падении его на горизонтальную плоскость. Физическими параметрами обруча являются масса (m), радиус (R) и коэффициент упругости (k). Состояниями процесса являются вертикальное ускорение (A_y), скорость (V_y), высота центра масс относительно плоскости (h) и деформация обруча ($R-h$), возникающая при контакте обруча с плоскостью. В модели необходимо реализовать движение обруча в двух ситуациях: свободное падение при ($h > R$) и упругий удар при $\neg(h > R)$. Свободное падение обруча про-

исходит под действием веса (P), а при ударе его движение определяется совместным действием веса и силы упругой реакции обруча (F_y).

В ситуации ($h > R$) ускорение определяется первым законом Ньютона, скорость и высота — интегралами от ускорения и от скорости соответственно. Сила реакции пропорциональна деформации обруча. При этом коэффициенты пропорциональности могут быть различными при увеличении деформации и при восстановлении формы. Соответствующие ситуации определяются предикатами, которые вычисляются с помощью правил (3), а переменные состояния — с помощью правил (2). На рис. 1 представлена копия части редактора среды EnviCon, на которой приведены правила трансформации состояния обруча. Имена переменных в правилах соответствуют именам, указанным выше. Ситуации с именами (*торможение*) и (*разгон*) заданы правилами трансформации ситуаций (1) следующим образом: ($h < R$), ($V < 0$) → (*торможение*), ($h < R$), ($V > 0$) → (*разгон*). Представление модели в таком виде является, по нашему мнению, достаточно наглядным. Правила 2 и 3 вычисляют величину упругой реакции обруча на участках торможения и разгона соответственно. Правило 4 вычисляет сумму сил, а правило 5 — ускорение. Правила 6 и 7 вычисляют скорость и высоту соответственно, а правило 8 - величину деформации.

№	Переменная	Процедура	Коэф.	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация	иная параметр	значение
1	P вес	Умножение	1.00	m масса	g	EverTrue		
2	Fy реакц.	Пропорциональная	60000.00	R - h		торможение		
3	Fy реакц.	Пропорциональная	45000.00	R - h		разгон		
4	Fy реакц+P	Сумма	1.00	Fy реакц.	P вес	EverTrue	2-ой коэф.	-1.00
5	Ay ускорен.	Деление	1.00	Fy реакц+P	m масса	EverTrue		
6	Vy скорость	Интеграл	1.00	Ay ускорен.		EverTrue		
7	h высота	Интеграл	1.00	Vy скорость		EverTrue		
8	R - h	Сумма	1.00	R радиус	h высота	EverTrue	2-ой коэф.	-1.00

Рис. 1. Правила трансформации состояния обруча.

Если возникает необходимость учесть силу сопротивления воздуха ($F_{сопр}$), которая пропорциональна скорости и направлена в противоположную сторону, то достаточно добавить правило $\neg(h < R) \rightarrow F'_{сопр} = -k_c \cdot V$ и правило, обеспечивающее суммирование этой силы с весом.

На рис. 2 приведен график изменения высоты центра масс обруча, падающего с высоты 400 см и имеющего радиус $R = 30$ см.

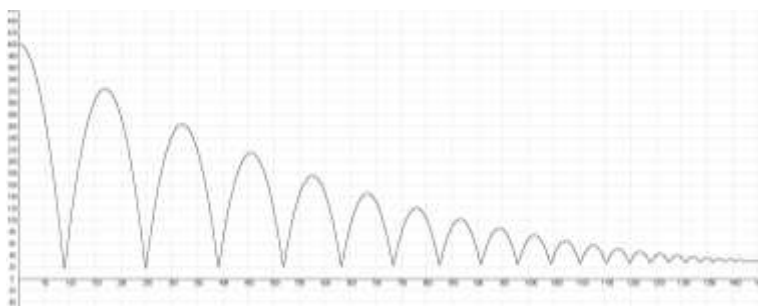


Рис. 2. График движения центра масс обруча.

Из графика видно, что вначале обруч приближается к плоскости на расстояние меньше радиуса, а в конце останавливается на расстоянии радиуса от плоскости. На рис. 3 приведен график изменения силы упругой реакции обруча. Эта сила отлична от нуля только при $(h < R)$. Она возрастает на участке торможения обруча и уменьшается на участке разгона. Разрыв в графике объясняется тем, что моделируемый удар не является абсолютно упругим, и коэффициенты упругости при сжатии и выпрямлении имеют разные значения.

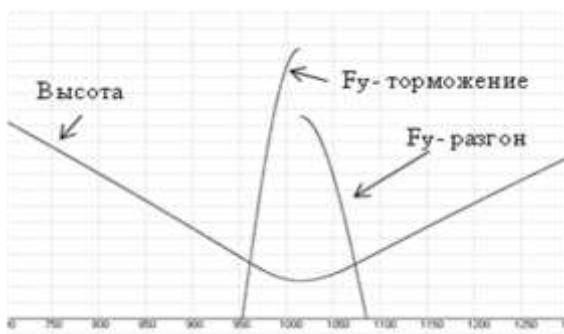


Рис. 3. Изменение силы упругой реакции обруча.

Рассматриваемый ситуационный подход к реализации процессов с помощью трансформационных правил позволяет модифицировать и расширять модели систем простым добавлением и заменой правил [9]. Покажем, как можно расширить модель движения упругого обруча на

случай его падения под некоторым углом к плоскости, т.е. когда имеется горизонтальная составляющая скорости. В этом случае при наличии трения обруч в результате контакта с поверхностью начнет вращаться, а его горизонтальная скорость уменьшится. Аналогично при вертикальном падении вращающегося обруча после контакта появится горизонтальная составляющая скорости, а угловая скорость его вращения уменьшится. В обоих этих случаях кроме вертикальной силы реакции при контакте с поверхностью появляется горизонтальная сила, приложенная к ободу обруча и обусловленная силами трения и упругой деформации. Воздействие этой силы на движение обруча эквивалентно действию такой же силы, приложенной к его центру масс и действию пары сил, приложенных к ободу. Их совместное действие вызывает изменение угловой скорости и горизонтальной составляющей скорости. Величина силы трения зависит от коэффициента трения и вертикальной силы, ее знак противоположен знаку скорости обода относительно поверхности. Сила упругой реакции пропорциональна деформации и коэффициенту упругости. Она может моделироваться аналогично тому, как моделируется сила вертикальной реакции (рис. 1, правила 3 и 4).

Для моделирования надо задать момент инерции обруча и расширить вектор состояния процессов, ввести переменные для представления новых составляющих процесса: горизонтальной координаты (X), горизонтальных ускорений (A_x), скорости (V_x), силы реакции (F_x) и момента пары сил ($M_{\text{мнг}}$). Надо также ввести скорость точки обода относительно плоскости ($V_{\text{мнг}}$), угловое ускорение, угловую скорость и угол. Сила трения возникает в ситуации, когда имеется контакт с поверхностью, т.е. когда расстояние центра масс от поверхности меньше радиуса обруча и когда абсолютное значение скорости обода больше нуля. Логическое значение этой ситуации определяется конъюнкцией двух предикатов. При присвоении ей идентификатора *скольжение* правило для вычисления ее значения будет иметь вид: $(h < R) \wedge (|V_{\text{мнг}}| > 0) \rightarrow \text{скольжение}$. Эта логическая переменная должна использоваться в условной части правила для вычисления F_x .

Правила для спецификации изменений приведенных состояний очевидным образом вытекают из законов механики. Они приведены на рис. 4. Добавление этих 12 правил к имеющимся 8 правилам позволяет моделировать падение обруча при наличии горизонтальной составляющей скорости и вращении обруча.

На рис. 5. приведены графики изменения высоты, горизонтальной и угловой скоростей, полученных при моделировании процесса падения обруча с высоты 400 сантиметров и наличии начальной горизонтальной скорости 300 см/сек. Из графиков видно, что в ситуации, когда имеется контакт обруча с поверхностью ($h < R$), происходит нарастание угловой скорости и уменьшение горизонтальной скорости. Полученная модель может быть использована для моделирования падения обруча на горизонтальную плоскость при произвольных начальных значениях угловой и горизонтальной скорости.

9	УглСкор * R	Умножение	1.00	Угл. скор.	R радиус	EventTrue		
10	Утангенц	Сумма	1.00	Угл скорость	УглСкор * R	EventTrue	2-ой коэф.	-1.00
11	Sign(Утанг)	Реле	1.00	Утангенц		h < R	Верх.гран.	1.00
12	Abs(Утанг)	Абсолютная	1.00	Утангенц		h < R		
13	Фх реакц.	Умножение	-0.15	Sign(Утанг)	Фу реакц * P	Скольжение		
14	Акускорен.	Деление	1.00	Фх реакц.	m масса	EventTrue		
15	Угл скорость	Интеграл	1.00	Акускорен.		EventTrue		
16	X	Интеграл	1.00	Угл скорость		EventTrue		
17	M танг	Умножение	-1.00	Фх реакц.	R радиус	h < R		
18	Угл. ускор.	Деление	1.00	M танг	Момент Инерц.	h < R		
19	Угл. ускор.	Интеграл	1.00	Угл. ускор.		EventTrue		
20	Угол	Интеграл	1.00	Угл. ускор.		EventTrue		

Рис. 4. Правила для моделирования вращения обруча после контакта с поверхностью.



Рис. 5. Изменения высоты, горизонтальной и угловой скоростей.

Приведенная модель соответствует случаю, когда при контакте с поверхностью отсутствует деформация обруча. При наличии деформации сила реакции (F_x) будет определяться суммой силы упругой деформации и силы трения. Сила упругости пропорциональна величине деформации. Для ее учета необходимо добавить два соответствующих правила. Добавлением правил для вычисления тригонометрических зависимостей описанная модель может быть модифицирована для того, чтобы моделировать процесс движения вращающегося обруча при падении его на наклонную плоскость.

3.2. Модель физического маятника. В учебниках рассматривается модель математического маятника. Он представляет собой грузик, подвешенный на тонкой (не имеющей массы) нерастяжимой нити к неподвижному основанию. При отклонении груза от вертикали на него действует тангенциальная составляющая веса. Нормальная составляющая веса компенсируется натяжением нити. Грузик движется по дуге окружности с радиусом, равным длине нити (L). Тангенциальное ускорение $a = -g \cdot \sin(\alpha)$, где α — угол отклонения от вертикали. Угловое ускорение равно a/L . Отсюда можно видеть, что дифференциальное уравнение движения маятника имеет вид:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{g}{L} \cdot \sin(\alpha) = 0.$$

При малых углах $\sin(\alpha) \approx \alpha$, и это уравнение является линейным с постоянными коэффициентами. Его решением являются незатухающие гармонические колебания с амплитудой, равной начальному отклонению и периодом $T = 2\pi \cdot \sqrt{L/g}$. Модель такого маятника реализуется с помощью пяти, приведенных на рис. 6, трансформационных правил. Коэффициент в правиле 3 введен для преобразования радиан в градусы.

№	Переменная	Процедура	Козэф.	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация
1	Sin(Угол)	Синус	1.00	Угол		EverTrue
2	Ускор.	Умножение	-1.0	Ускор. g	Sin(Угол)	EverTrue
3	УглУскор	Деление	57.24	Ускор.	Длина L	EverTrue
4	Угл.Скор.	Интеграл	1.00	УглУскор		EverTrue
5	Угол	Интеграл	1.0	Угл.Скор.		EverTrue

Рис. 6. Правила для моделирования маятника.

Модель позволяет определить зависимость периода колебаний от величины амплитуды. В таблице 1 приведены значения периода колебаний маятника длиной 2 метра для некоторых значений амплитуд. Значение периода для амплитуды 5 градусов совпадает с вычисленным по формуле.

Таблица 1. Зависимость периода колебаний от амплитуды

Амплитуда (град.)	5	30	45	75
Период (сек)	2,83	2,88	2,95	3,17

Полученная модель может быть легко расширена, например, для учета влияния на процесс эластичности нити. Нить растягивается под совместным действием центробежной силы ($F_{цб}$) и нормальной составляющей веса ($P \cdot \cos(\alpha)$). Удлинение нити (ΔL) пропорционально сумме этих сил. Необходимо вычислять текущее значение длины ($L_{текущая}$) и использовать его вместо постоянного исходного значения ($L_{длина}$) в правиле 3 (рис. 5). Для вычисления центробежной силы необходимо вычислить квадрат скорости. В результате 5 правил (рис. 6) должны быть дополнены 10 правилами, приведенными на рис. 7.

6	Скорость	Умножение	0.01747	Угол Скор.	L текущая	EverTrue		
7	V*V	Умножение	1.00	Скорость	Скорость	EverTrue		
8	V*V/L	Деление	1.00	V*V	L текущая	EverTrue		
9	Fцб	Умножение	1.00	V*V/L	п маятник	EverTrue		
10	Pвес	Умножение	1.00	Ускор. g	п маятник	EverTrue		
11	Cos(Угол)	Косинус	1.0	Угол		EverTrue		
12	P*cos(Угол)	Умножение	1.00	Pвес	Cos(Угол)	EverTrue		
13	F нити	Сумма	1.00	Fцб	P*cos(Угол)	EverTrue	2-ой коэфф.	1.00
14	della L	Умножение	0.02	F нити	Длина L	EverTrue		
15	L текущая	Сумма	1.00	Длина L	della L	EverTrue	2-ой коэфф.	1.00

Рис. 7. Правила для учета влияния эластичности нити.

Покажем, как модель может быть расширена для того, чтобы моделировать поведение системы, состоящей из маятника, подвешенного на подвижном основании (тележке) и способном свободно перемещаться в горизонтальной плоскости. Ускорение тележки ($a_{тележки}$) определяется горизонтальной составляющей силы натяжения нити ($F_{тележки}$) и массой тележки ($m_{тележки}$). Скорость ($V_{тележки}$) и перемещение тележки ($X_{тележки}$) определяются интегрированием ускорения и скорости соответственно. Правила, которые надо доба-

вить к спецификации описанной модели для того, чтобы моделировать перемещение подвеса, приведены на рис. 8. Перемещение тележки определяет вторую составляющую угловой скорости колебаний маятника (*УглСкор 2*). Текущее значение угловой скорости (*УглСкорОбщ*) является суммой угловых скоростей, определяемых правилами 4 (рис. 6) и 21 (рис. 8). Это новое значение угловой скорости надо теперь использовать в правиле 5 для вычисления угла и в правиле 6 для вычисления центробежной силы.

16	F тележки	Умножение	1.00	F нити	Sin(Uгол)	EverTrue		
17	a тележки	Деление	1.0	F тележки	m тележки	EverTrue		
18	V тележки	Интеграл	1.0	a тележки		EverTrue		
19	X тележки	Интеграл	1.0	V тележки		EverTrue		
20	Угол / L	Деление	1.0	V тележки	L текущая	EverTrue		
21	Угл.Скор. 2	Умножение	-57.24	Угол / L	Cos(Uгол)	EverTrue		
22	УглСкорОбщ	Сумма	1.0	Угл.Скор.	УглСкор. 2	EverTrue	2-ой коэфф.	1.00

Рис. 8. Правила для моделирования движения подвеса маятника.

Период колебаний такой системы зависит от соотношения масс груза и тележки. Для малых углов его значение определяется формулой:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g} \cdot \frac{m_m}{m_m + m_2}},$$

где m_m — масса тележки, m_2 — масса

груза. В таблице 2 приведены значения периода колебаний маятника длиной 2 метра при начальном отклонении 5 градусов, вычисленные по формуле и полученные при моделировании для 3 соотношений масс.

Таблица 2. Зависимость периода от масс груза и тележки

Масса тележки, кг	1	1	10
Масса груза, кг	10	1	1
Период расчетный, сек	0,854	2,00	2,703
Период модельный, сек	0,856	2,100	2,712

Из таблицы видно, что зависимость периода колебаний от соотношения масс весьма значительная, совпадения расчетных и модельных значений — достаточно близкие.

На рис. 9 представлены графики колебаний маятника длиной 2 метра и весом 1 кг, подвешенного на подвижной тележке массой 1 кг, при начальном отклонении 75 градусов. Из рисунка видно, что колебания тележки в этом случае являются существенно нелинейными.

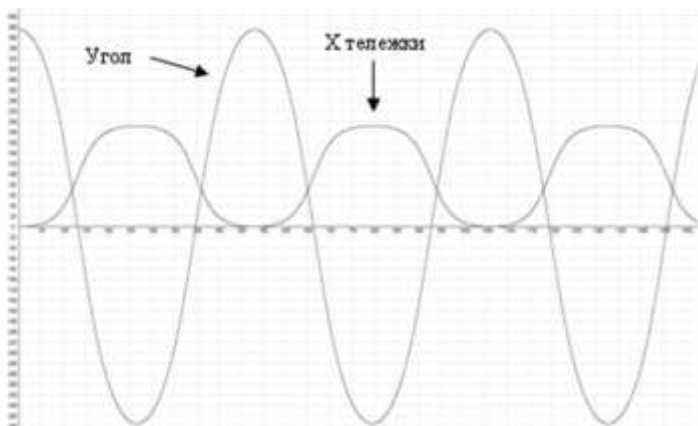


Рис. 9. Графики колебаний маятника и тележки.

Покажем, как можно расширить полученную модель для случая, когда имеются ограничения на перемещение тележки с подвесом маятника. Рассмотрим вариант неупругого столкновения тележки с ограничителем. Введем переменные для представления значений левого (*огр лев*) и правого (*огр прав*) ограничений. Ситуации столкновения с ограничителями определяются предикатами ($X > \text{огр прав}$) и ($X < \text{огр лев}$). При столкновениях возможны два различных случая. Если в момент столкновения к тележке приложена сила, направленная от ограничителя, то происходит мгновенная остановка тележки, ускорение и скорость становятся равными нулю, после чего сразу начинается движение в противоположном направлении. Если же при столкновении к тележке приложена сила, направленная к ограничителю, то тележка останавливается у ограничителя и остается неподвижной до тех пор, пока приложенная к ней сила не поменяет знак. Необходимо реализовать движение тележки в обоих возможных случаях. Первому из описанных случаев соответствует возникновение события. Ему присвоен идентификатор (*Stop*). Второму соответствует ситуация. Ей присвоен идентификатор (*Останов*). Вычисление значений события и ситуации реализуется с помощью правил (1) для левого и правого ограничителя (рис. 10). Для реализации в модели остановок тележки у ограничителей необходимо к правилам (рис. 8) добавить четыре правила (рис. 11), которые присваивают нули ускорению и скорости тележки при возникновении соответствующих событий и ситуаций.

0. If	$X > \text{огр прав}$	$F_{\text{общ}} < 0$		
then	Stop			
1. If	$X < \text{огр лев}$	$F_{\text{общ}} > 0$		
then	Stop			
2. If	$X > \text{огр прав}$	$F_{\text{общ}} > 0$		
then	Останов			
3. If	$X < \text{огр лев}$	$F_{\text{общ}} < 0$		
then	Останов			

Рис. 10. Правила для вычисления ситуаций при остановке тележки.

а тележки	Пропорциональная	1.00	0 const	Stop
а тележки	Пропорциональная	1.00	0 const	Останов
v тележки	Пропорциональная	1.00	0 const	Stop
v тележки	Пропорциональная	1.00	0 const	Останов

Рис. 11. Правила для реализации остановки тележки у ограничителей.

На рис. 12 приведены примеры движения тележки в двух возможных ситуациях.

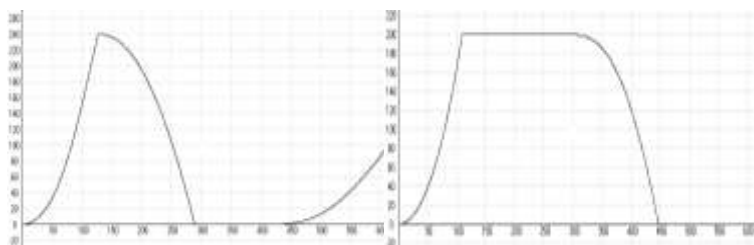


Рис. 12. Графики возможных движений тележки при остановке.

3.3. Переходный процесс в RLC-контуре. Данный пример иллюстрирует использование рассмотренного подхода для реализации процессов, определяемых законами электродинамики. Электрический контур содержит последовательное соединение резистора (R), конденсатора (C), индуктивности (L) и источника постоянного напряжения (U_{ax}). При замыкании контура в нем возникает затухающий колебательный переходный процесс, происходят изменения тока (I) и напряжений на конденсаторе (E), резисторе ($I * R$) и индуктивности

($E_{\text{сумм}}$). Трансформационные правила (2), позволяющие специфицировать и реализовать переходные процессы в таком контуре, приведены на рис. 13. На рис. 14 приведена схема контура и пример переходных процессов.

№	Переменная	Процедура	Кэфф.	аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация	имя параметра	значение
1	E конд.	Интеграл	1.00	I / C		Вкл		
2	I ток	Интеграл	1.00	Eсумм / L		Вкл		
3	I / C	Деление	1.00	I (ток)	C	Вкл		
4	I * R	Умнож.	1.00	I (ток)	R	Вкл		
5	E + I * R	Сумма	1.00	E конд.	I * R	Вкл	2-ой коэфф.	1.00
6	Eсумм / L	Деление	-1.00	E сумм.	L	Вкл		
7	E сумм.	Сумма	1.00	E + I * R	U входное	Вкл	2-ой коэфф.	1.00

Рис. 13. Правила реализации переходных процессов в RLC-контуре.

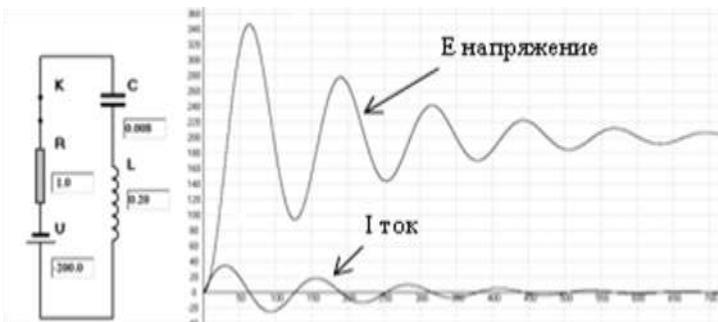


Рис. 14. Графики переходных процессов в RLC-контуре.

Скорость изменения напряжения на конденсаторе пропорциональна силе тока и обратно пропорциональна величине емкости, а скорость изменения силы тока пропорциональна напряжению на индуктивности и обратно пропорциональна величине индуктивности. Эти зависимости реализуются первыми двумя правилами. Остальные пять правил используются для выполнения необходимых промежуточных вычислений. Возникающий в контуре ток затухает до нуля, а напряжение на конденсаторе стремится к величине, равной входному напряжению и противоположной ему по знаку.

5. Заключение. Программирование компьютерных моделей динамических систем, основанное на использовании трансформационных правил (1,2,3), обладает рядом преимуществ по сравнению с ис-

пользованием универсальных языков программирования. Использование правил позволяет сократить время разработки модели. Программа получается более наглядной. Существенно упрощается модификация и расширение модели, упрощается ее валидация. Существенно облегчается процесс передачи знаний программистам от специалистов в предметных и проблемных областях. Можно говорить о возможности разработки компьютерных моделей непосредственно соответствующими специалистами.

Рассмотренный подход применим к разработкам имитационных моделей достаточно больших систем. В СПИИРАН разработаны имитационные модели двух промышленных установок по производству жидкого гелия и воздухоразделительной установки. В этих моделях с помощью правил реализовано большое количество взаимодействующих дискретно-непрерывных технологических процессов. Физические модели динамических систем могут быть эффективно использованы в образовательных процессах благодаря своей наглядности.

Литература

1. *Красовский А.А.* Проблемы физической теории управления // Автоматика и телемеханика. – 1990. – №11.
2. *А.А. Колесников* Проблема нелинейного системного синтеза: концепция единства процессов самоорганизации и управления // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT'10». – М.: Физматлит, 2010. – Т. 2. – С. 68–93.
3. *Carlo Alberto Avvizano* Review of existing simulation tools. // <http://sirslab.dii.unisi.it/I-RAS/wp-content/uploads/2008/05/simulinkreviewx.pdf>.
4. *Adrian Boeing, Thomas Bräunl* Evaluation of real-time physics simulation systems // <http://www.adrianboeing.com/pal/papers/p281-boeing.pdf>.
5. *Шпаков В.М.* Исполняемые спецификации транзитивных моделей технологических процессов. Мехатроника, автоматизация, управление, № 3, 2004. С. 38–45.
6. *Henzinger T.A.* The Theory of Hybrid Automata. // Proceedings of the 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 96). 1996. 278–292 pp.
7. *Шпаков В.М.* Спецификация знаний динамики на основе транзитивной модели непрерывных процессов // Труды СПИИРАН. Вып. 3, т. 1. СПб.: Наука, 2006. 191–197 с.
8. В.М. Шпаков, “Прототип среды моделирования структурированных совокупностей взаимодействующих процессов” // Сборник докладов конференции “Имитационное моделирование. Теория и практика”, Санкт-Петербург, 19 – 21 октября 2005.-Т. II, сс. 292 – 295.
9. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 288 с.

Шпаков Владимир Михайлович — к.т.н., доц.; старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Область научных интересов: имитационное моделирование, автоматическое управление,

искусственный интеллект, логическое программирование, экспертные системы, поддержка принятия решений. Число научных публикаций — 61. vlad@iias.spb.su; ЛИСА СПИИРАН, 14-я линия В.О, д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-8071, факс +7(812)328-4450.

Shpakov Vladimir Michajlovich — PhD in Technical Science, 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: — 60. vlad@iias.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. В публикации представлены результаты исследований, поддержанные грантом РФФИ 08-07-00252-а, рук. В.М. Шпаков.

Рекомендовано лабораторией интегрированных систем автоматизации, заведующий лабораторией Смирнов А.В., д. т. н., проф.
Статья поступила в редакцию 12.11. 2011.

РЕФЕРАТ

Шпаков В.М. О реализации физического подхода к имитационному моделированию динамических систем.

Указываются преимущества физического подхода к моделированию динамических систем по сравнению с абстрактно-математическим подходом. К достоинствам физических моделей можно отнести меньшую трудоемкость разработки модели, относительно более простую верификацию, валидацию, визуализацию процессов и интерпретацию результатов моделирования. Предлагается реализацию физических моделей систем производить на основе использования ситуационного формализма спецификации транзитивной модели протекающих в системах процессов. В статье приводится краткое описание этого формализма. В его основе находится математическая модель гибридного автомата, функции перехода которого задаются с помощью продукционных правил, определяющих трансформацию состояний процессов. Условные части правил являются элементарными конъюнкциями логических переменных и интерпретируются как логико-динамические ситуации. Формализм представляет собой язык высокого уровня, ориентированный на спецификацию взаимодействующих гибридных процессов. Одним из достоинств спецификации процессов с помощью правил является простота и удобство модификации и расширения получаемых моделей.

Реализация процессов производится с помощью интерпретатора трансформационных правил. Архитектура и алгоритм функционирования интерпретатора достаточно просты. Текущие состояния процессов представляются с помощью массивов вещественных и логических переменных, а их эволюция во времени задается списками трансформационных правил. Все правила реализуются с помощью условного оператора (if ..., then ...). Исполняющая процедура интерпретатора в цикле сканирует списки правил и вычисляет логические значения условных частей правил. Если значение равно *Истина*, то выполняется процедура, специфицированная в исполнительной части правила.

Применение описанного подхода иллюстрируется на примерах спецификации моделей трех простых динамических систем: падающего на плоскость упругого обруча, физического маятника и электрического контура, содержащего конденсатор, индуктивность и резистор. Показана простота и наглядность формирования исходных моделей и удобство их модификации и расширения. Модель падения обруча расширяется на случай моделирования его вращения. Вращение возникает после контактного взаимодействия обруча с плоскостью в случае его падения под углом к плоскости. Модель физического маятника расширяется на случаи эластичности нити подвеса маятника и ограниченной подвижности точки его крепления. Рассмотренный подход к реализации имитационных моделей был апробирован при разработке имитационных моделей трех больших промышленных установок: двух установок по производству жидкого гелия (КГУ -04, ОГ-100) и воздухоразделительной установки (АЖК-002).

SUMMARY

Shpakov V.M. **About realization of physical approach to dynamic system simulation.**

Advantages of physical approach to dynamic system simulation in comparison with abstract mathematical approach are pointed out. Advantages of the physical models may be attributed to smaller laboriousness of the models development, their modification and expansion. Besides, the models have relatively more simple verification, validation and interpretation of simulation results. It are proposed implementations of the physical models execution on the basis of using a situation formalism of proceeding in systems processes transitive model specification. A short description of the formalism is produced in the article. A hybrid automaton mathematical model is in the base of the formalism. The model transition functions are defined with the help of production rules which determine process states transformation. Conditional parts of the rules represent elementary conjunctions of logic variables and can be interpreted as logic-dynamical situations. The formalism is a high level language oriented on specification of interacted hybrid processes. One of advantages of processes specification with the help of rules is simplicity and convenience of modification and enlargement of models produced.

The processes implementation is carried out with the help of transformation rules interpreter use. An interpreter architecture and algorithm of functioning are rather simple. Current states of the processes are represented with the help of real and Boolean arrays and their evolutions in time are specified with lists of transformation rules. All rules are implemented with conditional operators (if ..., then ...). An executing procedure of the interpreter is scanning lists of the rules in cycle and is calculation of Boolean values of the rules of conditional parts. If the value is true then a procedure specified in an executing part of the rule is carried out.

Use of the approach described is illustrated by the examples of three simple dynamic system specifications: a springy hoop falling to a plane, physical pendulum and an electrical circuit containing capacitor, inductance and resistor. Simplicity and obviousness of initial models and convenience of their modification and expansion are shown. The model of a falling hoop is expanded to the case of the hoop rotation. The rotation originates after contact interaction of the hoop with the plane when it falls angularly to the plane. The model of a physical pendulum is expanded to the case of elasticity of a pendant thread and a limited mobility of its fastening. The considered approach to simulation model realization was approbated when developing simulation models of three big industrial installations: two installations for liquid helium production (КТУ -04, ОГ-100) and a model of a air-separating installation (АжК-002).