

В.М. ШПАКОВ
**ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ**

Шпаков В.М. Оценка вероятности возникновения логико-динамических ситуаций.

Аннотация. Приводится определение логико-динамической ситуации, используемое при спецификации функционирования гибридных динамических систем, в том числе гибридных систем управления. Обсуждается влияние случайных воздействий на поведение систем. Рассматриваются методы оценки вероятностей возникновения ситуаций, основанные на оценках статистических характеристик случайных процессов. Показаны способы использования этих оценок вероятностей для целей управления и поддержки принятия решений. Приводятся результаты экспериментального исследования рассматриваемых методов.

Ключевые слова: гибридные процессы, случайные процессы, компьютерное моделирование, автоматическое управление, логическое программирование.

Shpakov V.M. Assessment of the probability of logic-dynamic situation occurrence.

Abstract. There is presented the definition of logic-dynamic situation that is used in specifying the operation of hybrid dynamic systems, including hybrid control systems. The influence of random effects on the behavior of systems is discussed. The methods of estimating the probabilities of occurrence of situations based on estimates of the statistical characteristics of random processes are considered. There show how to use estimates of the probabilities for the control and decision support. The results of experimental research of methods under consideration are given.

Keywords: hybrid processes, random processes, computer simulation, automatic control, logic programming.

1. Введение. Понятие логико-динамической ситуации используется при спецификации гибридных динамических систем, то есть систем, функционирование которых определяется совокупностью взаимодействующих гибридных процессов. Наглядными представителями таких систем являются автоматизированные промышленные установки, такие, например как, воздухоразделительные установки, ожижители газов. Такие установки содержат значительное число устройств, принимающих ограниченное число дискретных состояний, и имеют ряд параметров, значения которых изменяются непрерывно. Для управления установками используются как дискретные команды, так и непрерывные управляющие воздействия. Текущая логико-динамическая ситуация может определяться значениями команд, состояниями дискретных устройств, предикатами, зависящими от нахождения параметров в заданных диапазонах. Логико-динамические ситуации могут

эффективно использоваться для спецификации процессов управления. При возникновении специфицированной ситуации система управления формирует управляющее воздействие, направленное на изменение состояния одного или нескольких дискретных устройств или / и на изменение режимов работы некоторых непрерывных устройств. В результате происходит изменение текущей ситуации.

Существуют динамические системы, в которых процессы изменения некоторых параметров имеют случайные составляющие. Примером может служить система посадки самолета на палубу движущегося авианосца. На местоположение (координаты) самолета влияют случайные возмущения, вызванные турбулентностью атмосферы, координаты палубы судна зависят от волнения моря. Как следствие процесс изменения взаимного положения самолета и палубы имеет существенную случайную составляющую. Вероятность того, что отклонение реальной траектории самолета от требуемой не превышает допустимой величины, может быть включена в описание текущей ситуации. Последняя может быть использована для принятия решения о выполнении посадки или о заходе на следующую попытку. Переход дискретных элементов системы в некоторые, как правило, штатные состояния (отказы оборудования), может характеризоваться определенными вероятностями. Эти два фактора позволяют говорить о вероятности возникновения некоторых ситуаций. Штатный процесс управления связан с процессом трансформации ситуаций. Возникновение определенной ситуации требует реализации заданного управляющего воздействия. Однако, для некоторых, например аварийных, ситуаций определенные действия должны предприниматься уже при определенных вероятностях их возникновения. Для реализации такого управления необходимо оценивать статистические характеристики действующих в системе случайных процессов и на их основе производить оценки вероятностей возникновения логико-динамических ситуаций.

В [1] рассмотрен подход к спецификации взаимодействующих детерминированных гибридных процессов. В основе подхода лежит модель гибридного автомата [2], функции перехода которого специфицируются с помощью правил трансформации дискретных и непрерывных состояний процессов и реализуются соответствующими процедурами интерпретатора этих правил. В [3] рассмотрены основанные на трансформационных правилах методы оценки статистических характеристик случайных эргодических процессов. В настоящей статье развиваются методы использования оценок

характеристик случайных процессов для оценки вероятностей возникновения определенных ситуаций и использования этих оценок для предотвращения аварийных и нежелательных нештатных ситуаций. Далее во введении приводится определение логико-динамической ситуации и структура трансформационных правил, используемых для управления взаимодействующими гибридными процессами. Во втором разделе рассмотрены методы оценки вероятностей возникновения ситуаций, приводятся примеры использования этих оценок для решения задач управления процессами и системами.

1.1 Логико-динамический подход к спецификации процессов.

Текущее состояние взаимодействующих процессов различной динамики задается множеством вещественных переменных X , представляющих непрерывные составляющие, и множеством символьных переменных W , представляющих дискретные составляющие процессов. Среди этих переменных выделяются подмножества независимых внешних символьных воздействий (команд) V и непрерывных вещественных воздействий X_i . В составе множества W выделяются также подмножество Q , содержащее переменные для представления состояний дискретно-событийных процессов и режимов гибридных процессов, и подмножество предикатов диапазонов от непрерывных состояний G . Предикаты могут определять состояния дискретных и режимы гибридных процессов. В результате для представления процессов имеем следующие множества переменных:

$$\begin{aligned} W &= V \cup Q \cup G, \\ X &= X_i \cup X_s, \end{aligned} \tag{1}$$

где X_s — множество непрерывные переменные состояния.

Для спецификации процессов необходимо определить функции переходов следующих типов:

- $\sigma : W \rightarrow Q$ — функция трансформации состояний дискретно-событийных процессов и режимов гибридных процессов;
- $\delta : W \times X \rightarrow X_s$ — функция трансформации непрерывных состояний для возможных режимов гибридных процессов;
- $\gamma : X \rightarrow G \times \{ False, True \}$ — зависимость значений предикатов диапазонов от непрерывных состояний процессов.

Спецификация процессов сводится к заданию конкретных способов определения и вычисления, указанных выше функций перехода. Эти способы существенным образом влияют на качество спецификации, которое определяется выразительностью, надежностью и удобством реализации процессов.

В общем случае дискретные состояния и режимы процессов могут быть представлены символьными переменными. Любую символьную переменную всегда можно представить с помощью формулы нескольких логических переменных. Использование логических переменных и формул позволяет, на наш взгляд, повысить выразительность спецификаций и эффективность получаемых на её основе исполняющих процедур. Будем все элементы множества W представлять логическими переменными.

Функция γ является логической по определению, ее реализация связана с вычислением неравенств следующего вида.

$$(x_{j_1} \geq (a_k + x_{j_2})) \wedge (x_{j_3} \leq (b_k + x_{j_4})) \rightarrow g_k, \quad (2)$$

где $x_{j_1}, \dots, x_{j_4} \in X, g \in G, a_k$ и b_k - границы диапазона.

Функцию перехода σ задают с помощью совокупности продукционных правил вида «Условие \rightarrow Действие» [4]. В качестве условия было предложено использовать элементарные конъюнкции логических переменных, а в качестве действия — присвоение требуемых значений определенным дискретным состояниям и режимам процессов. Такие конъюнкции интуитивно понятным образом могут интерпретироваться как динамические ситуации. В общем случае для спецификации процесса могут потребоваться произвольные логические формулы. Поэтому правила между собой должны быть соединены логической связкой \vee (или). Это значит, что одно и то же действие может быть произведено при выполнении различных условий, т.е. условия могут образовывать дизъюнкции. Поскольку дизъюнкция элементарных конъюнкций представляет собой дизъюнктивную нормальную форму (ДНФ), это позволяет утверждать, что таким способом можно в качестве условия действия представить любую логическую формулу. Динамическую ситуацию можно определить с помощью следующих двух утверждений:

1. любая логическая переменная (воздействие, состояние, режим, предикат) или её отрицание является логико-динамической ситуацией;

2. если S_i и S_j — динамические ситуации, то $S_i \wedge S_j$ также является динамической ситуацией.

С учетом сказанного логико-динамическая ситуация может быть представлена в следующем виде:

$$S_j = s_{j_1}, \dots, s_{j_i}, \dots, s_{j_m}, \text{ где} \quad (3)$$

$$s_{j_i} \in W \times \{False, True\}, m \in \{1, \dots, |W|\},$$

а функция σ может быть задана с помощью совокупности следующих правил:

$$S_j \rightarrow q'_{j_1}, \dots, q'_{j_i}, \dots, q'_{j_m}, \text{ где } q'_{j_i} \in Q \times \{False, True\}, m \in \{1, \dots, |Q|\}. \quad (4)$$

Штрихи в данном случае обозначают сдвиг во времени между возникновением ситуации и изменением значений состояний процессов. Наглядным примером логико-динамической ситуации может служить состояние оборудования большой промышленной установки совместно с предикатами от состояний ее параметров (температур, давлений, уровней и др.).

Для задания функции перехода δ необходимо определить алгоритмы вычисления транзитивных отношений между непрерывными состояниями для каждого режима. Было предложено это делать на основе использования передаточных функций элементарных динамических звеньев, функциональных преобразователей и структурных схем их соединения [5]. В этом случае спецификация непрерывных составляющих процессов может быть проведена с помощью алгоритмов вычисления транзитивных отношений для элементарных динамических звеньев. К таким звеньям относятся интеграторы, аperiodические, колебательные и дифференцирующие звенья, а также звенья чистого запаздывания. Для задания зависимости непрерывных состояний от логики развития гибридного процесса алгоритмы вычисления этих отношений включаются в исполнительные части правил, условными частями которых являются определенные ситуации, содержащие требуемые значения соответствующих режимов. В принятых обозначениях эти правила имеют вид:

$$S_j \rightarrow x'_k = \tau_k(x_k, x), x_k \in X_s, x \in X, \quad (5)$$

где S_j — ситуация, определяющая режим, τ_k и x_k — соответствующее отношение и состояние, x — произвольная вещественная переменная процесса.

Таким образом, спецификация процессов состоит в определении множеств логических и вещественных переменных (1), и формирования совокупности трансформационных правил (2,4,5).

Реализация процессов осуществляется с помощью интерпретатора правил. Основой интерпретатора является исполняющая процедура. Алгоритм такой процедуры достаточно прост. Он в бесконечном цикле сканирует списки правил (2,4,5). Все правила реализуются с помощью условного оператора (if ... then ...). Алгоритм вычисляет значение условной части правила. В случае правила (2) он присваивает найденное значение предикату из исполнительской части правила. Действия из исполнительских частей правил (3,4) выполняются, только если условная часть имеет значение *True*. В этом случае говорят, что правило срабатывает. При этом состояниям из исполнительской части правил (4) присваиваются специфицированные значения и запускаются процедуры вычисления транзитивных отношений, указанные в исполнительских частях правил (5). Реализация процессов лежит в основе разработки моделей динамических систем и контролеров систем управления.

2. Оценка вероятности возникновения ситуации. Пусть ситуация S наряду с конъюнкцией некоторых других логических переменных $S_1 = True$ определяется предикатом $g_i \in G$ от состояния некоторой непрерывной составляющей процесса $x_i \in X$, то есть $S = S_1, g_i$; и $g_i = (x_i > x_{i\text{don}})$, где $x_{i\text{don}}$ — допустимое значение. Тогда в случае превышения состоянием x_i допустимого значения, предикат g_i и переменная S принимают значение *True*, то есть возникает ситуация S . Теперь если процесс x_i является случайным, то событие, связанное с возникновением ситуации S , будет иметь некоторую вероятность $Pr(S)$, зависящую от статистических характеристик случайного процесса x_i и допустимого значения состояния $x_{i\text{don}}$. В данном случае вероятность возникновения ситуации S при наличии ситуации S_1 равна вероятности того, что предикат g_i примет значение *True*, то есть $Pr(S) = Pr(g_i)$. Если в спецификацию ситуации входит n предикатов от состояний случайных процессов или их отрицаний, то вероятность возникновения такой ситуации будет равна произведению вероятностей того, что каждый из этих предикатов g_i

примет специфицированное значение g_i^* , то есть

$Pr(S) = \prod_{i=1}^n Pr(g_i = g_i^*)$. Таким образом, для оценки вероятности

возникновения ситуации необходимо найти оценки вероятностей того, что входящие в описание ситуации предикаты от случайных процессов принимают специфицированные значения. Для нормального закона распределения состояний случайного процесса вероятность того, что состояние процесса примет значение из симметричного относительно математического ожидания диапазона определяется функцией Лапласа [6] $Pr((\bar{x} - a) < x < (\bar{x} + a)) = \Phi\left(\frac{a - \bar{x}}{\sigma}\right)$, где x — состояние процесса, $((\bar{x} - a) \dots (\bar{x} + a))$ — диапазон значений состояний процесса, \bar{x} — математическое ожидание состояния процесса, σ — среднеквадратическое отклонение состояния, Φ — функция Лапласа. Тогда в силу симметричности нормального распределения вероятность того, что состояние примет значение справа или слева от границ диапазона будет определяться формулой:

$$Pr(x > (\bar{x} + a)) = Pr(x < (\bar{x} - a)) = 0,5(1 - \Phi\left(\frac{a - \bar{x}}{\sigma}\right)). \quad (6)$$

Отсюда видно, что для оценки вероятности выхода параметра за границы диапазона необходимо иметь оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения состояний процесса. Оценка математического ожидания находится путем осреднения состояний процесса по времени, а оценка среднеквадратического отклонения является квадратным корнем из оценки дисперсии состояний процесса. Последняя находится путем осреднения по времени произведений текущих состояний процесса. Следует отметить, что оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения являются случайными процессами, величина дисперсии которых определяется параметрами осреднения. Поэтому и оценка вероятности также представляет собой случайный процесс.

Были проведены экспериментальные исследования применимости логико-динамического подхода для оценки вероятности выхода параметра за пределы диапазона. Исследования проводились с помощью созданного в СПИИРАН прототипа компьютерной среды разработки исполняемых спецификаций гибридных процессов EnvViCon [7]. Среда основана на реализации описанного во введении

логики-динамического формализма спецификации процессов. Она содержит процедуры, реализующие интегро-дифференциальные преобразования, элементарные динамические звенья и элементарные функции; арифметические операции и типовые нелинейности. Для реализации и оценки случайных процессов в список процедур среды были добавлены процедуры обращения к датчикам случайных чисел, распределенных по нормальному и равномерному законам с изменяемыми значениями математического ожидания и среднеквадратического отклонения, что позволяет реализовывать как стационарные, так и квазистационарные случайные процессы. Для выполнения осреднения была добавлена процедура вычисления скользящего среднего, а для оценки вероятности выхода параметра за границы диапазона — процедура вычисления функции Лапласа. Параметрами этой функции являются математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение, а аргументом — граница диапазона.

С целью тестирования предлагаемого подхода и разработанных процедур было проведено моделирование случайного процесса с нормальным распределением состояний, нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением $\sigma=5$. Целью моделирования было определение оценки вероятности выхода состояния процесса за верхнюю границу диапазона равного 3σ . Известно, что теоретически эта вероятность равна 0,00135. На рис. 1 приведена часть редактора среды EnviCon, содержащая необходимые для данного моделирования трансформационные правила типа (5).

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация	Имя параметра	Значение
1	X	Норм. не стац.	1.00	Мат. ожидание	Ср. квадрат.	Ever True		
2	X * X	Умножение	1.00	X	X	Ever True		
3	Дисперсия	Апериодическая	1.00	X * X		Ever True	Пост. времени	10.00
4	Ср. кв. измер.	Степень	1.00	Дисперсия		Ever True	Показатель	0.50
5	$\text{Pr}(X > X_{\max})$	Вероятность	1.00	Мат. ожидание	Ср. кв. измер.	Ever True	Значения выше	15.00
6	$\text{Pr}(X > X_{\max})_{\text{огл}}$	Апериодическая	1.00	$\text{Pr}(X > X_{\max})$		Ever True	Пост. времени	10.00

Рис. 1. Правила формирования оценки вероятности $\text{Pr}(x > x_{\max})$.

Первое правило обращается к датчику случайных чисел и формирует состояния процесса с нормальным распределением, и с заданными математическим ожиданием 0 и среднеквадратическим отклонением 5. Второе правило находит произведения состояний.

Третье правило производит осреднение произведений и находит оценку дисперсии процесса. Четвертое правило вычисляет оценку среднеквадратического отклонения. Пятое правило находит оценку вероятности того, что состояние процесса с нулевым математическим ожиданием и оцененным значением среднеквадратического отклонения будет иметь значение более $3\sigma=15$. Шестое правило производит осреднение полученной оценки вероятности с помощью аperiodического звена с постоянной времени равной 10 секундам. На рис 2 представлены графики процессов оценки вероятности. Из графиков видно, что оценка вероятности представляет собой случайный процесс, который имеет смысл подвергать операции сглаживания. При текстовой визуализации сглаженной оценки вероятности было установлено, что оцененное значение близко к теоретическому значению 0,00135, изменения происходят только в шестом знаке после запятой.

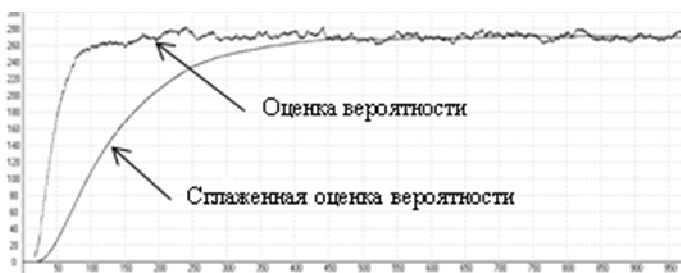


Рис. 2. Графики процессов оценки вероятности.

Второй вопрос состоит в том, как использовать оценки вероятностей выхода параметров за пределы заданного диапазона для управления процессами и системами. В случае воздействия на систему квазистационарных случайных процессов эти оценки могут меняться в значительных пределах. Как было показано, оценка вероятности представляется состоянием непрерывного процесса. В качестве таковой она может быть использована для формирования предикатов диапазонов с помощью правил (2), а полученные предикаты могут быть включены в описания ситуаций, которые используются в условных частях правил (4) для формирования дискретных команд и спецификации новых ситуаций и в правилах (5) — для формирования непрерывных управляющих воздействий. Следует отметить, что допустимая величина вероятности выхода параметра за пределы

диапазона может быть различной в разных ситуациях, а в некоторых ситуациях оценка вероятности вообще не нужна. Так, например, при перекачке жидкого кислорода допустимая вероятность превышения температурой деталей компрессора заданного значения меньше, чем при перекачке жидкого водорода. А при перекачке инертных газов эта температура может вообще не контролироваться. Поэтому правила оценки вероятностей имеет смысл привязывать к определенным ситуациям.

С целью проверки работоспособности рассматриваемых методов было проведено моделирование квазистационарного случайного процесса X с нормальным распределением состояний и медленно увеличивающимися математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением. Были заданы максимальное значение состояния X_{max} и допустимая вероятность превышения состоянием этого значения $Pr(X > X_{max})_{доп}$. В ходе моделирования с помощью правил (5) производились оценки математического ожидания и среднеквадратического значения состояний процесса, и на их основе вычислялась вероятность $Pr(X > X_{max})$. Эти оценки производились при условии истинности ситуации S_1 . На рис. 3 приведены использованные при моделировании правила.

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация	Имя параметра	значение
1	X	Норм. не стац.	1.00	Мат. ожидание	Ср. квадр.	Ситуация S1		
2	Мат. ожидание	Интеграл	1.00	Скорость м.о.		Ситуация S1		
3	Ср. квадр.	Интеграл	1.00	Скорость ср. кв.		Ситуация S1		
4	X центрир.	Сумма	1.00	X	Мат. ожидание	Ситуация S1	2-ой коэффициент	-1.00
5	$X_c * X_c$	Умножение	1.00	X центрир.	X центрир.	Ситуация S1		
6	Дисперсия	Апериодическая	1.00	$X_c * X_c$		Ситуация S1	Пост. времени	1.00
7	Ср. кв. измер.	Степень	1.00	Дисперсия		Ситуация S1	Показатель	0.50
8	М.О. измер.	Апериодическая	1.00	X		Ситуация S1	Пост. времени	1.00
9	$Pr(X > X_{max})$	Вероятность	1.00	М.О. измер.	Ср. кв. измер.	Ситуация S1	Значения выше	65.00
10	Y (выж)	Пропорциональная	0.01	U_{const}		Ситуация S12		

Рис. 3. Правила для моделирования квазистационарного процесса X и оценки вероятности истинности предиката $X > X_{max}$.

Первое правило формирует случайный процесс с характеристиками, задаваемыми переменными *Мат. ожидание* и *Ср. квадр.* Второе и третье правила обеспечивают медленное увеличение указанных переменных. Четвертое правило производит центрирование процесса. Следующие пять правил производят оценку вероятности

аналогично примеру, рассмотренному выше. Далее используется правило (2) для спецификации предиката от вероятности $\Pr(X > X_{\max}) > \Pr(X > X_{\max})_{\text{доп}}$. Вид этого правила приведен на рис. 4.

№	Предикаты	IF	Перем. >=	Константы	Пере
1	$\Pr(x) > \Pr(x)_{\text{доп}}$	IF	$\Pr(X > X_{\max})$	$\Pr(X > X_{\max})_{\text{доп}}$	+ 0.00 &

Рис. 4. Правило задания предиката от вероятности.

Предикат от вероятности используется в правилах (4) для трансформации логических переменных (рис. 5). Первое правило специфицирует новую ситуации S_{12} , состоящую в том, что в ситуации S_1 предикат от вероятности принимает значение *True*. Переменная, представляющая эту новую ситуацию, используется в следующем правиле для формирования дискретной команды *Останов*. Эта же переменная S_{12} использована в правиле 10 (рис. 3) для формирования непрерывного управляющего воздействия $Y(\text{вых})$.

Исходн.	Сорт. "if"	Сорт. "then"
0. If	Ситуация S1	$\Pr(x) > \Pr(x)_{\text{доп}}$
then	Ситуация S12	
1. If	Ситуация S12	
then	Останов	

Рис. 5. Правила трансформации ситуаций.

На рис. 6 приведены процессы изменения вероятности и формирования непрерывного управляющего воздействия. Пока реализация случайного процесса такова, что $(X \ll X_{\max})$, то вероятность $\Pr(X > X_{\max})$ практически равна нулю. По мере роста оценок математического ожидания и среднеквадратического отклонения начинает расти вероятность. В момент, когда величина вероятности становится равной допустимому значению, возникает ситуация S_{12} , срабатывает правило 10 (рис. 3) и выходному

управляющему воздействию присваивается специфицированное значение. На практике при срабатывании правила 10 может формироваться не управляющее воздействие, а сообщение оператору о вероятности возникновения нештатной ситуации.

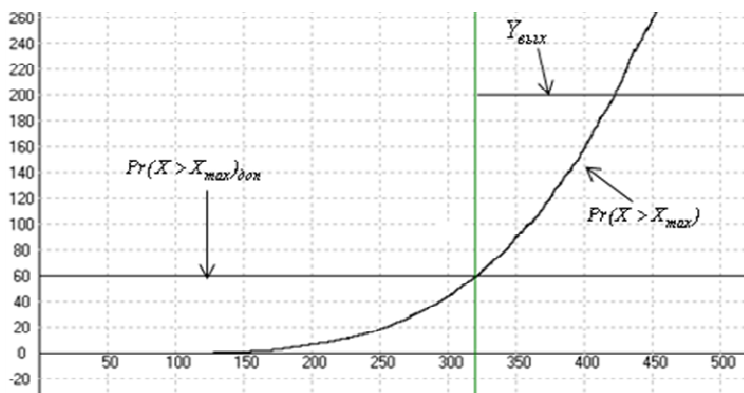


Рис. 6. Процесс изменения оценки вероятности $\Pr(X > X_{\max})$ и формирования управляющего воздействия $Y_{\text{бых}}$.

Таким образом, вероятности событий, связанных с возникновением определенных ситуаций, представляются непрерывными вещественными переменными. Эти переменные могут быть использованы в качестве аргументов арифметических операций для вычисления с помощью правил (5) вероятностей составных событий. Так если некоторая ситуация представляет собой конъюнкцию двух других ситуаций, то вероятность ее возникновения равна произведению вероятностей этих событий. Если одна и та же ситуация (например, аварийный останов установки) является следствием нескольких различных ситуаций, то есть эти ситуации связаны между собой логической связкой *или*, то вероятность возникновения такой ситуации вычисляется как сумма вероятностей возникновения связанных с ней ситуаций.

3. Заключение. Рассмотрены структуры трансформационных правил, которые в рамках транзитивного логико-динамического подхода к спецификации процессов позволяют находить оценки вероятностей возникновения ситуаций. Показано, как эти оценки могут быть использованы для формирования новых зависящих от них ситуаций и как последние могут быть использованы для управления

процессами и динамическими системами. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность рассмотренных методов и показали то, что полученные точности оценок вероятностей являются приемлемыми для решения инженерных задач управления.

Литература

1. *Шпаков В.М.* Исполняемые спецификации транзитивных моделей технологических процессов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 3. С. 38–45.
2. *Henzinger T.A.* The Theory of Hybrid Automata. // Proceedings of the 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 96). 1996. P. 278–292.
3. *Шпаков В.М.* Транзитивный подход к реализации и оценке случайных процессов // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 30. (в печати)
4. *Oscar N.Garcia and Yi-Tzuu Chien*, Knowledge-Based Systems: Fundamentals and Tools, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 1991. 495 p.
5. *Howe R.M.* Analog computer fundamentals // IEEE Contr. Syst. Mag. 2005. Vol. 25, no. 3. P. 29–36.
6. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Прикладные задачи теории вероятностей. М.: Радио и связь, 1983. 416 с.
7. *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.

Шпаков Владимир Михайлович — к.т.н., доц.; старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации СПИИРАН. Область научных интересов: автоматическое управление, искусственный интеллект, логическое программирование, экспертные системы, поддержка принятия решений. Число научных публикаций — 59. 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 — Ph.D., Assoc. Prof.; senior researcher, laboratory of integrated systems for automation, SPIIRAS. Research interests: automatic control, artificial intelligence, logic programming, expert systems, decision making support. The number of publications: — 58. 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 12-01-00015-а, рук. В.М. Шпаков.

Рекомендовано лабораторией интегрированных систем автоматизации, заведующий лабораторией Смирнов А.В., д.т.н., проф.

Статья поступила в редакцию 23.10.2013.

РЕФЕРАТ

Шпаков В.М. **Оценка вероятности возникновения логико-динамических ситуаций.**

Задача реализации совокупности взаимодействующих процессов различной динамики достаточно эффективно решается с помощью использования логико-динамического транзитивного формализма спецификации гибридных процессов. В основе этого формализма находится математическая модель гибридного автомата, функции перехода которого определяются с помощью трансформационных (продукционных) правил, определяющих транзитивное отношение между текущими и следующими состояниями дискретно-событийных и непрерывных процессов. Условные части трансформационных правил задаются с помощью логико-динамических ситуаций. Такая ситуация представляет собой элементарную конъюнкцию логических переменных. Показано, что с помощью совокупности правил может быть специфицирована в качестве условия произвольная логическая функция. Среди логических переменных выделяются дискретные состояния и режимы гибридных процессов, и предикаты от непрерывных составляющих процессов. Если среди совокупности процессов имеются случайные процессы, то предикаты от них могут быть оценены с помощью вероятности одного или другого значения предиката. Если предикаты от случайных процессов входят в состав описания ситуации, то такая ситуация может характеризоваться вероятностью своего возникновения.

В статье рассматривается методика формирования оценки вероятности возникновения логико-динамических ситуаций в случае, если в совокупности процессов присутствуют непрерывные эргодические случайные процессы с нормальным распределением состояний. Приводятся структуры трансформационных правил, позволяющих находить оценки статистических характеристик случайных процессов и на их основе вычислять оценки вероятностей того, что состояния процессов находятся в заданном диапазоне, а соответствующие предикаты имеют специфицированные значения. На основании этих оценок с помощью методов теории вероятностей вычисляются оценки вероятностей событий, связанных с возникновениями специфицированных ситуаций, в том числе и совокупностей логически связанных друг с другом ситуаций.

Для использования найденных оценок вероятностей в задачах управления или поддержки принятия решений необходимо специфицировать соответствующие предикаты от них. Эти предикаты могут быть включены в описания новых ситуаций, которые будут принимать значение *True* при выходе оценок за пределы заданного диапазона. Эти ситуации могут быть использованы в правила для формирования дискретных или непрерывных управляющих воздействий. Введение правил для оценки вероятностей ситуаций позволяет расширить возможности формализации знаний экспертов при спецификации процессов управления и принятия решений.

SUMMARY

Shpakov V.M. **Assessment of the probability of logic-dynamic situation occurrence.**

The task of implementing a set of interacting processes of different dynamics effectively solved by the use of logic-dynamic transitive formalism of hybrid processes specification. At the heart of this formalism is a mathematical model of hybrid automata, the transition functions of which are defined by transformation (production) rules defining a transitive relation between the current and the next states of a discrete-event and continuous processes. Conditional parts of transformation rules are specified using the logic-dynamic situations. This situation is an elementary conjunction of logical variables. It is shown that using a set of rules any logic function may be specified as a condition. Among the logical variables discrete states and modes of hybrid processes and predicates of continuous component of processes are distinguished. If among a set of processes there are random processes, the predicates of them can be estimated by the probabilities of one or the other meaning of the predicate. If the predicates of random processes are a part of the situation description, the situation can be characterized by the probability of its occurrence.

The technique of forming estimates of the probability of logic-dynamic situations occurrence is considered in the case, when a set of processes contains continuous ergodic stochastic processes with a normal distribution of states. The structures of the transformational rules which enable to assess the statistical characteristics of random processes are presented and, based on calculated estimates to assess the probabilities that the states of the processes are within a specified range, and the corresponding predicates have specified values. Based on these estimates, using the methods of the theory of probability estimates of probabilities of events associated with the occurrence of specified situations, including collections of logically related to each other situations, are calculated.

To use the found estimates of probabilities in order to control or decision support it is necessary to specify the appropriate predicates on these estimates. These predicates can be included in the descriptions of new situations that will be set to true when the estimates overstep the ranges assigned. And these new situation can be used in the rules for the formation of discrete or continuous control actions.

The introduction of rules to assess the probability of situations occurrence enables to extend the capabilities of formalizing expert knowledge in specifying the control and decision-making processes.