

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ****В. М. Шпаков (Санкт-Петербург)**

Дискретно непрерывные технологические процессы реализуются с помощью различных производственных установок в таких отраслях промышленности, как химическая, пищевая, газовая, металлургическая и других. Установки бывают как полностью или частично автоматизированными, так и с ручным управлением. Целью моделирования может быть проектирование структуры и выбор параметров установки и её системы управления. Модель установки может быть использована для обучения студентов и тренировки операторов.

Установки, как правило, содержат значительное количество устройств с дискретно и непрерывно изменяющимися состояниями. Например, воздухоразделительная установка содержит две ректификационные колонны, компрессор, детандер, насос, теплообменники и значительное количество запирающих и регулирующих вентилей. Управление процессом состоит в пуске и остановке машин, изменении состояний вентилей. Состояния машин и запирающих вентилей имеют два значения. Процессы их изменения являются дискретно событийными. Состояние техпроцесса определяется большим числом таких непрерывно изменяющихся параметров, как температуры, давления, уровни и концентрации. Изменения состояния дискретных элементов системы могут вызывать как изменения динамики непрерывных составляющих техпроцесса, так и мгновенные дискретные изменения их состояний. Кроме того, в автоматизированных системах выход непрерывных состояний за установленные пределы может вызывать изменения дискретных состояний. Если рассматривать непрерывный и дискретно событийный процессы как частные случаи гибридного процесса, то можно утверждать, что техпроцесс представляет собой *совокупность* взаимодействующих гибридных процессов.

С учетом сказанного в качестве математической модели техпроцесса может быть использован формализм гибридного автомата, расширенный за счет введения внешних дискретных и непрерывных воздействий. Текущее состояние совокупности гибридных процессов может быть задано множеством вещественных переменных  $X$ , представляющих непрерывные составляющие, и множеством символьных переменных  $W$ , представляющих дискретные составляющие процессов. Среди этих переменных необходимо выделить подмножества внешних независимых воздействий: дискретных ( $V$ ) и непрерывных ( $X_i$ ). В составе множества  $W$  необходимо также выделить подмножество  $Q$ , содержащее переменные для представления состояний дискретно-событийных процессов и режимов гибридных процессов, и подмножество предикатов от непрерывных состояний ( $G$ ). Предикаты могут определять состояния дискретных и режимы гибридных процессов. В результате для представления модели техпроцесса будем иметь  $W = V \cup Q \cup G$  и  $X = X_i \cup X_s$ , где  $X_s$  – непрерывные переменные состояния.

В общем случае дискретные воздействия, состояния и режимы процессов модели могут быть представлены символьными переменными. Те из них, которые имеют двухэлементные множества значений (открыт – закрыт, включен – выключен), могут быть представлены логическими переменными. Использование логических переменных позволяет существенно упростить исполняющую процедуру. Символьную переменную с более чем двумя значениями 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 их основе исполнительных процедур. При моделировании нами больших промышленных установок все элементы множества  $W$  представлялись логическими переменными.

Для спецификации процессов необходимо задать функции переходов следующих типов:

$\sigma : W \rightarrow Q \times \{False, True\}$  – 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 от непрерывных состояний процессов.

С учетом этого модель техпроцесса может быть представлена в виде следующего кортежа:  $(V, Q, G, \sigma, \gamma, X, \delta, q_0, Init)$ , где  $q_0, Init$  – множества дискретных и непрерывных начальных состояний, соответственно. Конкретные способы задания и реализации функций перехода существенным образом влияют на качество спецификации процессов, которое определяется выразительностью, надежностью и удобством реализации. Ниже рассматриваются способы задания этих функций, которые были использованы при разработке моделей ряда промышленных установок и показали хорошую эффективность.

Функция  $\gamma$  является логической, ее реализация связана с вычислением неравенств от непрерывных состояний и заданных констант.

При использовании логических переменных формирование функции перехода  $\sigma$  можно производить с помощью логических связей между переменными, т.е. описывать область определения функции с помощью логических формул, что делает описание более наглядным. Функция перехода  $\sigma$  задается с помощью совокупности продукционных правил вида «Условие  $\rightarrow$  Действие», в которых в качестве условия может быть использована логическая формула, а в качестве действия – присвоение требуемых значений определенным состояниям и режимам процессов. 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 динамические ситуации. Элементарная конъюнкция всех логических переменных спецификации процесса определяет глобальную динамическую ситуацию. Элементарные конъюнкции, составленные из элементов подмножеств  $W$ , можно назвать локальными динамическими ситуациями. Вводя обозначение  $S_j$  для некоторой динамической ситуации, будем иметь:

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

Обозначая множество значимых локальных ситуаций  $S$ , тип функции трансформации динамических ситуаций можно определить как  $\sigma : S \rightarrow Q \times \{False, True\}$ . Такая функция может быть специфицирована совокупностью правил типа “if...then”, левая часть (условие) которых является локальной ситуацией, а правая (действие) – совокупностью (списком) переменных состояния. При этом правила между собой 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 дизъюнкцию ситуаций. Поскольку дизъюнкция элементарных конъюнкций представляет собой дизъюнктивную нормальную форму (ДНФ), то можно утверждать, что таким способом можно в качестве условия действия представить любую логическую формулу.

Реализация функции  $\sigma$  производится исполняющей процедурой, которая в цикле сканирует правила, вычисляет значения условных частей правил и в зависимости от этих значений выполняет присваивание специфицированных значений переменным из исполнительской части правил. Очевидно, что при использовании таких правил в спецификациях процессов возможно появление противоречивых правил, которые одной и той же переменной присваивают различные значения. Это снижает надежность спецификаций в смысле их защищенности от ошибок. Возможно использование нескольких других структур правил, различающихся по выразительности и надежности [1]. На наш взгляд, предпочтительнее использование правил, которые при срабатывании присваивают переменным только значение True.. Исполняющая процедура, обрабатывающая такие правила, перед началом цикла сканирования правил всем логическим переменным вспомогательного вектора состояния присваивает значения False. Затем в ходе сканирования срабатывающие правила меняют значения некоторых переменных на True. В конце цикла значения вспомогательных переменных присваиваются соответствующим переменным вектора состояния. Таким образом, если на данном шаге алгоритма обновления состояния нет ни одного правила, присваивающего некоторой переменной значение True, то она будет иметь значение False. То есть отсутствие в данном случае будет трактоваться как отрицание. Очевидно, что при этом невозможно появление конфликтующих правил, что, безусловно, повышает надежность спецификаций. Невозможность с помощью правил этого типа явного присваивания переменным значения False несколько снижает выразительные возможности баз таких правил и несколько усложняет спецификацию процессов, основанную на их использовании. Для иллюстрации различий при использовании двух указанных типов правил рассмотрим спецификации процесса управления впускным клапаном для стабилизации уровня жидкости. Клапан должен закрываться при достижении уровнем максимального значения и открываться при достижении минимального значения. Если в исполнительской части правила использовать отрицание, то спецификацию можно представить в виде следующих двух очевидных правил:

$(\text{Уровень} \langle \min \rangle) \rightarrow (\text{Клапан открыт}) ;$

$(\text{Уровень} \langle \max \rangle) \rightarrow \neg(\text{Клапан открыт}) .$

Если не использовать отрицание в исполнительской части правил, а использовать его «по умолчанию» (отсутствие как отрицание), то спецификация будет несколько сложнее:

$(\text{Уровень} \langle \min \rangle) \rightarrow (\text{Клапан открыт}) ;$

$(\text{Клапан открыт}) \wedge (\text{Уровень} \langle \max \rangle) \rightarrow (\text{Клапан открыт}) .$

При низком уровне срабатывает первое правило, которое открывает клапан. При достижении минимального уровня первое правило перестает срабатывать, но начинает срабатывать второе правило, которое держит клапан открытым. При достижении максимального значения ни одно из правил не срабатывает и клапан закрывается «по умолчанию».

Для реализации функции перехода  $\delta$  необходимо создавать исполняемые спецификации непрерывных составляющих процесса для каждого режима. Это, на наш взгляд, наиболее удобно делать на основе использования передаточных функций элементарных динамических звеньев и структурных схем их соединения. Спецификацию элементарных процессов удобно производить на основе использования транзитивных моделей представления процессов [2]. Эти модели позволяют непосредственно опреде-

лять отношение следования между входным воздействием и текущим состоянием процесса с одной стороны и новым следующим его состоянием – с другой. При рассмотрении транзитивных моделей используется соглашение о том, что именем переменной со штрихом обозначается состояние процесса, непосредственно следующее за состоянием, обозначенным этим же именем без штриха. В случае свободного одномерного непрерывного процесса отношение следования или транзитивное отношение (transition relation) представляет собой бинарное отношение на множестве вещественных чисел вида  $\tau(y, y')$  или  $y' = \tau(y)$ , где  $y$  – текущее состояние процесса, а  $y'$  – следующее состояние процесса. Транзитивное отношение  $\tau$  определяется параметрами элементарного динамического звена и длительностью интервала времени  $\Delta t$  между  $y$  и  $y'$ . Оно также зависит от входного воздействия  $x$ . Для реализации зависимости непрерывных состояний от логики развития гибридного процесса процедуры вычисления этих состояний необходимо включить в исполнительные части правил, условными частями которых должны быть требуемые значения соответствующих режимов. Эти правила имеют вид  $S_j \rightarrow y'_k = \tau_k(y_k, x_i)$ , где  $S_j$  – ситуация, определяющая режим,  $\tau_k$  и  $y_k$  – соответствующие отношение и состояние,  $x_i$  – входное воздействие. Формирование структурных динамических схем производится путем использования одних состояний в качестве входных воздействий при вычислении других состояний, а также использовании сумматоров и других функциональных преобразователей. Эти правила включаются в общий цикл обновления состояний процессов. Обновление состояния процесса в цикле представляет собой реализацию транзитивного замыкания отношения следования и позволяет представить процесс как траекторию состояний.

Основным динамическим звеном, с помощью которого можно построить сколь угодно сложную линейную динамическую систему, является интегратор. При наличии на входе интегратора постоянной величины  $x$  (текущее значение входа) его выход непрерывно изменяется со скоростью пропорциональной входной величине и коэффициенту передачи интегратора  $k$ . Очевидно, транзитивное отношение для интегратора имеет вид:

$$y' = y + x \cdot k \cdot \Delta t \quad (1)$$

Транзитивные отношения для динамических систем, получаемых путем различных соединений одного или нескольких интеграторов, могут быть получены из рассмотрения соответствующих структурных схем и отношения (1). Например, при охвате интегратора единичной отрицательной обратной связью получаем апериодическое звено с единичным коэффициентом передачи и постоянной времени  $T = 1/k$ , где  $k$  – коэффициент передачи интегратора. В цикле производится пошаговое обновление состояния процесса. В момент обновления на входе интегратора имеется разность между текущими значениями входной переменной и состоянием процесса. Подставляя эту разность в (1) вместо  $x$ , получаем следующий алгоритм, вычисляющий отношение следования для апериодического процесса:  $y' := y + (x - y) \cdot \Delta t / T$ . В [3] приведены алгоритмы вычисления отношения следования для некоторых других элементарных процессов.

Погрешность реализации процесса на основе транзитивного отношения, естественно, зависит от длительности шага алгоритма. Общая рекомендация сводится к тому, что необходимо обеспечивать  $\Delta t \ll T$ . Использование описанного подхода для моделирования реальных систем, в том числе, больших автоматизированных промышленных установок, показывает, что производительность современных персональных компьютеров вполне достаточна для решения задач управления в режиме реального времени с приемлемой для практики точностью. Что касается моделирования для решения

задач проектирования, то в режиме модельного времени всегда имеется возможность выбрать величину приращения времени, обеспечивающую требуемую точность. При этом, естественно, длительность моделирования будет определяться производительностью компьютера.

Имитационные модели трех больших промышленных установок (двух ожижителей гелия и воздухоразделительной установки) демонстрируются в стендовом докладе «Примеры моделей промышленных установок», представленном на данной конференции. Опыт разработки этих моделей позволяет сделать выводы об эффективности использования:

- ситуационного подхода к построению модели;
- логических переменных для представления дискретных состояний и режимов гибридных процессов;
- отрицания «по умолчанию» для правил трансформации дискретных состояний;
- транзитивных отношений и структурных динамических схем для спецификации непрерывных составляющих процессов.

### Литература

1. **Шпаков В. М.** Ситуационно-событийный подход к спецификации гибридных процессов // Труды СПИИРАН. Вып. 4. СПб.: Наука, 2007.
2. **Alur R., Henzinger T. A., Lafferriere G., Pappas G. J.** Discrete Abstractions of Hybrid Systems // Proceedings of the IEEE. 2000. No. 88. P. 971–984.
3. **Шпаков В. М.** Спецификация знаний динамики на основе транзитивной модели непрерывных процессов // Труды СПИИРАН. Вып. 3. Т. 1. СПб.: Наука, 2006.

Данная работа была частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований за 2009 год (проект № 08-07-00252-а).