

**АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОПИСАНИЯ  
ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ, КОНФЛИКТУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСУРСОВ****К. А. Аксенов (Екатеринбург)**

В настоящее время развитие теории процессов преобразования ресурсов (ППР) идет в двух направлениях – динамического моделирования процессов и интеграции с методами искусственного интеллекта (экспертным, ситуационным и мультиагентным моделированием). В данной работе основное внимание уделено первому направлению – исследованию типовых моделей динамических процессов для формализации параллельных, конфликтующих процессов преобразования ресурсов. Исследование финансируется в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-2208.2007.9. Работа также выполняется при поддержке программы «СТАРТ» в рамках государственного контракта между Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере и ООО «НПП «Системы автоматизации поддержки бизнеса»» по договору № 5058 р/7296 «Разработка моделей, методов и системы динамического моделирования ситуаций и автоматизации проектирования программного обеспечения в области процессов преобразования ресурсов».

**Модель процесса преобразования ресурсов**

Динамическая модель ППР была разработана К. А. Аксеновым и Б. И. Клебановым [1] на основе сетей Петри, систем массового обслуживания и моделей системной динамики. Данная модель взята за основу и расширена интеллектуальными агентами [2]. Основные объекты мультиагентной модели ППР – операции ( $Op$ ), ресурсы ( $RES$ ), команды управления ( $U$ ), средства ( $MECH$ ), процессы ( $PR$ ), источники ( $Sender$ ) и приемники ресурсов ( $Receiver$ ), перекрестки ( $Junction$ ), параметры ( $P$ ), агенты ( $Agent$ ). Описание причинно-следственных связей между элементами преобразования и ресурсами задается объектом «связь» ( $Relation$ ). Для описания иерархических процессов используется аппарат системных графов высокого уровня интеграции [3]. Для построения ядра моделирующей системы использован аппарат продукционных систем. Структура продукционной системы ППР определена в виде

$$PS = \langle Rps, Bps, Ips \rangle, \quad (1)$$

где  $Rps = \{RES(t)\} \cup \{MECH(t)\} \cup \{U(t)\} \cup \{G(t)\}$  – текущее состояние ресурсов, средств, команд управления, целей (рабочая память);  $Bps$  – множество правил преобразования ресурсов и действий агентов (база знаний);  $Ips$  – машина вывода, состоящая из планировщика и машины логического вывода по базе знаний (БЗ) агентов.

Алгоритм имитатора состоит из ряда основных этапов: определения текущего момента времени  $SysTime = \min(T_j)$ ,  $j \in RULE$ ; обработки действий агентов; формирования очереди правил преобразования; выполнения правил преобразования и изменения состояния рабочей памяти. Для диагностирования ситуаций и выработки команд управления имитатор обращается к модулю экспертной системы (ЭС).

С точки зрения динамической составляющей ППР можно выделить следующие основные требования: 1) учет различных типов ресурсов (материальных, информационных, энергетических, трудовых, финансовых); 2) учет состояния операций и условий в конкретные моменты времени; 3) возможность задания начальных состояний операций; 4) учет возникновения конфликтов на общих ресурсах и средствах; 5) возможность задания разветвления и слияния потоков ресурсов; 6) иерархическое представле-

ние структуры процесса; 7) возможность расчета характеристик и параметров процесса на каждом уровне иерархии; 8) описание параллельных процессов.

В качестве математической модели ППР могут быть рассмотрены различные математические модели динамических процессов: 1) сетевые модели (N-схемы) [3–5]; 2) расширенные сетевые модели (N<sub>E</sub>-схемы) [3]; 3) дискретно-детерминированные (конечные автоматы, F-схемы) и дискретно-стохастические (вероятностные автоматы, P-схемы) [4]; 4) системы массового обслуживания (Q-схемы) [4, 6]; 5) модели системной динамики (СД) [3, 7]; 6) модель Глушкова [8]; 7) комбинированные модели (A-схемы), построенные на базе предыдущих моделей [4].

### Системы динамического моделирования процессов преобразования

Модель ППР программно реализована в проблемно-ориентированной системе имитационного моделирования ППР VPsim [1, 9] и системе мультиагентного динамического моделирования ситуаций VPsim2 [2, 10].

### Анализ типовых моделей динамических процессов

1. Для **сетей Петри** при моделировании ППР выявлен ряд недостатков [1]: отсутствие измерения времени; отсутствие конфликтов на одновременно выполняющихся операциях; нет разделения типов меток (типов ресурсов); модели реальных процессов, описанные в терминах сетей Петри, громоздки и плохо читаемы.

2. В силу того, что у **N<sub>E</sub>-схем** переход имеет только два состояния, нет возможности моделировать прерывание процесса. Модели реальных ППР в терминах N<sub>E</sub>-схем также громоздки и плохо читаемы [1].

3. Конечный автомат может быть рассмотрен как частный случай вероятностного автомата (при детерминированных входных и выходных сигналах и детерминированном наборе состояний), поэтому установим соответствие между моделями операции и вероятностного автомата.

Согласно [4] P-автомат характеризуется четверкой элементов  $P = \langle Z, X, Y, B \rangle$ , где  $X$  – конечное множество состояний входного ресурса  $in_i$  операции,  $Y$  – конечное множество состояний выходного ресурса  $out_j$ ,  $Z$  – определено на детерминированном множестве состояний операции  $Status_{Op} = \{wait, go, lock\}$ ,  $B$  – определено функцией  $f$  (преобразования входа в выход), причем, если одна из функций захвата или формирования выходного ресурса является стохастической, то продукция описывается вероятностным автоматом. **F-схемы** и **P-схемы** для моделирования ППР могут быть использованы в ограниченном количестве случаев, в силу того, что у автоматов существует ряд ограничений: 1) один вход и один выход, а в ППР – вектора входов и выходов; 2) состояния ресурсов задаются на конечном множестве дискретных сигналов, а в ППР – на бесконечном непрерывном множестве  $[0, M]$ .

4. Понятийный аппарат **Q-схем** не соответствует проблемной области ППР – Q-схемы ориентированы на моделирование работы средств, а в ППР моделируется последовательность и параметры преобразований ресурсов [1].

5. Для **моделей СД** определены следующие накладываемые ограничения при моделировании ППР [1]: запаздывание захвата входных ресурсов по отношению к реальным ППР, при этом максимальная погрешность захватываемых входных ресурсов определяется как  $\sum_i in_i$ , где  $\{in_i\}$  – множество входных ресурсов, необходимых для од-

новременного выполнения всех преобразований; опережение формирования выходных ресурсов, при этом максимальная погрешность формируемых выходных ресурсов определяется как  $\sum_j \frac{out_j}{k_j} (k_j - 1)$ , где  $\{in_j\}$  – множество выходных ресурсов, формируе-

мых при одновременном выполнении всех преобразований,  $k_j = \text{MAX}(K)$ , где  $K$  – множество длительностей элементов преобразования, выраженных в шагах дискретизации; опережение момента начала работы элементов, по отношению к реальному ППР в условиях ограничения входных ресурсов; запаздывание захвата средств (следствие запаздывания входных ресурсов) и опережение освобождения средств (следствие опережения формирования выходных ресурсов).

**6. Непрерывно-дискретная модель Глушкова.** Непрерывно-дискретной системой называется следующая математическая модель [11]:

$$S = \{T, P, e, E, K, F\}, \quad (2)$$

где  $T = \{t_i\}$ ,  $e \in R \geq 0$  – дискретная модель времени;  $P$  – множество классов процессов;  $e$  – множество классов событий (причин мгновенной смены поведения и структуры системы);  $E$  – множество алгоритмов классов событий (подготовительных дискретных действий при переходе к новому поведению системы). К элементарным действиям относятся пассивизация, активизация, порождение и уничтожение процессов, изменение значений переменных процесса и запись в календарь планирования событий отметки о будущем событии.  $K = \{< t_i, e_i >, L\}$  – календарь планирования событий, в который записываются отметки о событиях отдельными объектами и с помощью которого описывается динамика системы. Планирование события подразумевает явное задание момента его наступления или задание условия  $L$  его наступления через предикат (планирование события по условию).  $F$  – список уравнений, характеризующих локальные поведения процессов во временных интервалах между событиями. Структура процесса и его поведение описывается следующей математической моделью (3):

$$P = \{X, Y, V_s, V_d, B\}, \quad (3)$$

где  $X, Y$  – каналы входа и выхода;  $V_s$  – множество статических переменных процесса, которые задаются алгебраическими выражениями и могут меняться только при исполнении алгоритмов событий;  $V_d$  – множество «переменных-функций» – динамических переменных;  $B$  – тело процесса, содержащее описание его всевозможных поведений.

Под моделированием поведения непрерывно-дискретной системы понимается построение множества последовательностей событий, приводящих к смене ее поведения и структуры, причисляя к событию начальное состояние системы. Глобальное поведение моделируется с помощью специального процесса-монитора, который продвигает системное время в соответствии с календарем планирования событий или в соответствии с анализом времени наступления события, которое планируется по условию. Процесс моделирования заканчивается, когда календарь событий оказывается пустым [8].

Покажем, что модель производственной системы может быть описана в терминах непрерывно-дискретной модели В. М. Глушкова (4):

$$S = \{T, Op \cup resiver \cup sender \cup junction, RES \cup MECH \cup Message \cup Order, Ips, Calendar\} \quad (4)$$

Структура ППР и его поведение описывается следующей моделью (5):

$$P = \{in, out, Action, Status\} \quad (5)$$

**7. А-схема.** Подход, предложенный Н.П.Бусленко, позволяет описывать поведение непрерывных и дискретных, детерминированных и стохастических систем и базируется на понятии агрегативной системы [3–4].

При агрегативном описании сложный объект (система) разбивается на конечное число частей (подсистем), сохраняя при этом связи, обеспечивающие их взаимодействие. В результате такой декомпозиции сложная система представляется в виде многоуровневой конструкции из взаимосвязанных элементов различных уровней.

В качестве элемента А-схемы выступает агрегат, а связь между агрегатами (внутри системы  $S$  и с внешней средой  $E$ ) осуществляется с помощью оператора сопряжения  $R$ . Агрегат может рассматриваться как А-схема, т. е. может разбиваться на элементы (агрегаты) следующего уровня.

Любой агрегат характеризуется следующими множествами: моментов времени  $T$ , входных  $X$  и выходных  $Y$  сигналов (множества входов и выходов  $in, out \in \{RES, MECH, Order, Message\}$ ), состояний  $Z$  (множество состояний операции) в каждый момент времени  $t$ . Переход агрегата из состояния  $z(t_1)$  в состояние  $z(t_2) \neq z(t_1)$  происходит за малый интервал времени  $\delta t$ . Переходы агрегата из состояния  $z(t_1)$  в  $z(t_2)$  определяются собственными (внутренними) параметрами агрегата  $h(t) \in H$  и входными сигналами  $x(t) \in X$  (в продукции – множеством входов  $in$  и состоянием  $Status$ ). В момент поступления в агрегат  $t_n \in T$  входного сигнала  $x_n$  состояние определяется случайным оператором  $V$ . Если интервал времени  $(t_n, t_{n+1})$  не содержит ни одного момента поступления сигналов, то состояние агрегата определяется случайным оператором  $U$ . Совокупность операторов  $V$  и  $U$  рассматривается как оператор переходов агрегатов в новые состояния. В момент выдачи выходного сигнала срабатывает оператор выходов  $G$ . В ППР оператору  $V$  соответствуют действия  $Action_{Ca}$ , случайность оператора определяется выполнением/невыполнением условия запуска. В случае выполнения условия запуска возможно выполнение цепочки действий –  $Action_{IN}, Action_{Lock}, \dots, Action_{UnLock}$ . Оператор  $U$  – рожден в продукции, а оператору  $G$  соответствует действие  $Action_{OUT}$ .

Существуют ППР, которые ввиду их сложности не могут быть формализованы в виде математических схем одиночных агрегатов, поэтому их формализуют конструкцией из отдельных агрегатов  $A_n, n = \overline{1, N_A}$  (А-схемы). Для описания ППР в виде А-схемы необходимо иметь описание как отдельных агрегатов  $A_n$ , так и связей между ними.

В [3] при рассмотрении подсистем агрегативной системы введены понятия следующих операторов:  $R_j$  – частная схема сопряжения агрегата  $A_j$ ;  $R_\mu$  – внутренний оператор сопряжения элементов в подсистеме  $S_\mu$ ;  $R_{II}$  – оператор сопряжения подсистем  $S_\mu$  в системе  $S$ . Применение данных операторов при представлении ППР в виде иерархической многоуровневой модели позволяет однозначно устанавливать связи как между отдельными элементами, так и подмоделями.

### Выводы

Математическая модель ППР, Q- и А-схемы являются адекватным математическим описанием объекта моделирования (т. е. ППР, бизнес-процессов и производственных процессов дискретного характера), служат основой для построения алгоритмов и программ (программных комплексов имитационного моделирования) при машинной реализации модели М, А- и Q-схемы позволяют в упрощенном варианте (для частных случаев) проводить аналитические исследования.

Актуальным направлением дальнейших исследований является развитие аналитических методов анализа процессов преобразования ресурсов и их программной реализации.

## Литература

1. **Аксенов К. А.** Исследование и разработка средств имитационного моделирования дискретных процессов преобразования ресурсов: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. 188 с.
2. **Аксенов К. А., Гончарова Н. В.** Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов: монография. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 311 с.
3. **Аврамчук Е. Ф., Вавилов А. А., Емельянов С. В. и др.** Технология системного моделирования. М.: Машиностроение, 1988. 520 с.
4. **Советов Б. Я., Яковлев С. А.** Моделирование систем: Учеб. для вузов. М.: Высш. школа, 2001. 343 с.
5. **Котов В. Е.** Сети Петри: Главная редакция физико-математической литературы. М.: Наука, 1984. 160 с.
6. **Гнеденко Б. Д., Коваленко И. Н.** Введение в теорию массового обслуживания. М.: Наука, 1987. 336 с.
7. **Форрестер Дж.** Мировая динамика. М.: Наука, 1978. 168 с.
8. **Парийская Е. Ю.** Сравнительный анализ математических моделей и подходов к моделированию и анализу непрерывно-дискретных систем  
[http://home.imm.uran.ru/dolly/vl\\_97/pariis/pariis.html](http://home.imm.uran.ru/dolly/vl_97/pariis/pariis.html)
9. **Аксенов К. А., Клебанов Б. И.** Принципы построения системы имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов VPsim ресурсов//Имитационное моделирование. Теория и практика: Материалы первой Всероссийской научн.-практ. конф. СПб.: изд-во ЦНИИТС, 2003. Т. 1. С. 36–40.
10. **Konstantin A. Aksyonov, Elena F. Smoliy, Natalia V. Goncharova, Alexey A. Khrenov, Anastasia A. Baronikhina,** Development of Multi Agent Resource Conversion Processes Model and Simulation System, Computational Science – ICCS 2006: 6th International Conference, Reading, UK, May 28–31, 2006. Proceedings, Part III. P. 879–882.
11. Программное обеспечение моделирования непрерывно-дискретных систем/Под ред. В. М. Глушкова/М.: Наука, 1975.