

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ BPSIM

К. А. Аксенов, Б. И. Клебанов (Екатеринбург)

### 1. Понятие процесса преобразования ресурсов (ППР)

В качестве дискретного процесса преобразования ресурсов рассматривается процесс, в котором изменения состояний происходят только в дискретные моменты времени, а также «дискретные копии» [1] непрерывного процесса, полученные дискретизацией переменных по времени. Элемент (компонент) такого процесса преобразования ресурсов или весь процесс можно представить в виде структуры, включающей: вход, условие запуска, преобразование, средства преобразования, выход (рис. 1.1).



**Рис. 1.1. Процесс преобразования ресурсов**

В процессе преобразования ресурсов обычно происходит уменьшение объема входа и увеличение объема выхода. В момент выполнения условия запуска уменьшается входной ресурс и захватываются средства. В момент окончания преобразования происходит увеличение выходного ресурса и освобождение средств. Таким образом, ППР позволяет описывать большинство окружающих нас процессов.

К задачам проблемной области ППР относятся: проектирование новых и совершенствование существующих ППР, организация и управление ППР, прогноз состояния ресурсов и средств, оценка временных характеристик процесса, оценка стоимостных характеристик процесса, оценка динамики использования ресурсов и средств.

К основным недостаткам визуальных проблемно-ориентированных средств имитационного моделирования, таких как Arena, iThink, ARIS, ReThink, применительно к ППР, можно отнести: сложность описания ППР и проведения вычислительных экспериментов, слабые средства моделирования конфликтов, возникающих на общих ресурсах и средствах, отсутствие поддержки русского языка. В рамках данной статьи рассматриваются математическая модель ППР и система имитационного моделирования BPsim, в значительной степени свободная от указанных недостатков.

### 2. Математическая модель ППР

Базой создания математического аппарата ППР являются широко распространенные математические схемы описания динамических процессов (расширенные сети Петри [2, 3], системы массового обслуживания [3, 4], модели системной динамики [2, 5, 6]). Однако с помощью указанных моделей достаточно сложно представить все особенности ППР.

Предлагается модель, основанная на аппарате динамических экспертных систем [7–9]. Определены следующие основные объекты дискретных ППР (рис. 2.1): операции (*Op*), ресурсы (*RES*), средства (*MECH*), процессы (*PR*), источники (*Sender*) и приемники ресурсов (*Receiver*), перекрестки (*Junction*), параметры (*P*). Отдельно выделены инфор-

мационные типы ресурсов: сообщения (*Message*) и заявки на выполнение операции (*Order*). Параметры процесса задаются функцией от характеристик объектов и разделяются на производные (свертка различного типа характеристик) и консолидированные (свертка одноименных характеристик операций процесса). Описание причинно-следственных связей между элементами преобразования и ресурсами задается объектом связь (*Relation*).

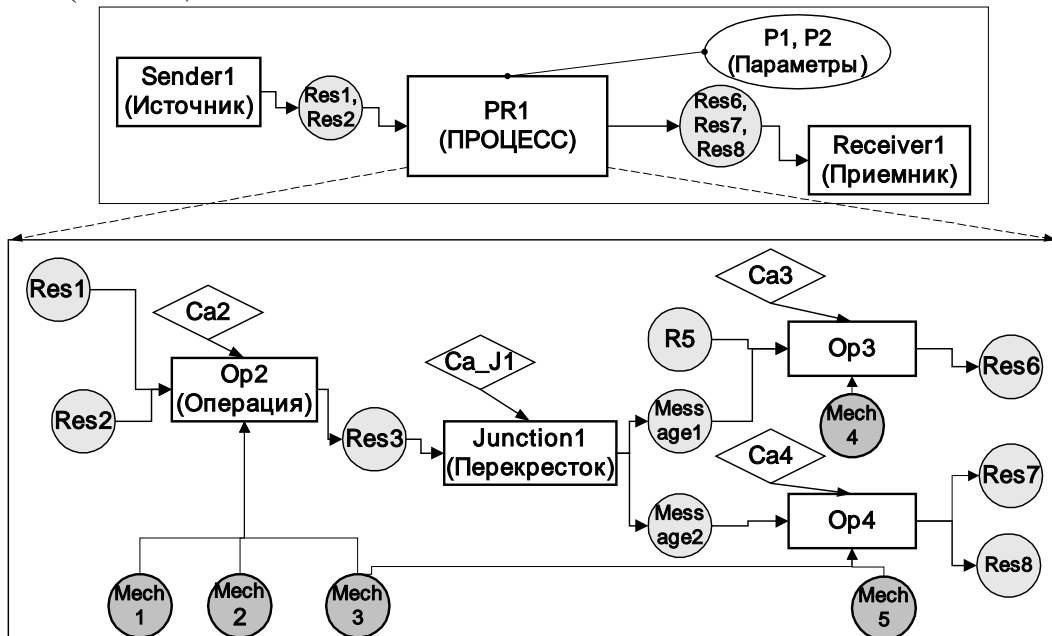


Рис. 2.1. Объекты ППР

Для построения ядра системы имитационного моделирования использован аппарат продукционных систем [7-10]. Определена структура продукционной системы ППР:

$$PS = \langle Rps, Vps, Ips \rangle, \tag{2.1}$$

где  $Rps = \{ RES(t) \} \cup \{ MECH(t) \}$  – текущее состояние ресурсов, средств, сообщений, заявок (рабочая память);  $Vps$  – множество правил преобразования ресурсов (база знаний);  $Ips$  – машина вывода.

Определена структура правила преобразования, которая соответствует структуре операции ( $Op_k$ ) ППР:

$$Op_k = \langle f, in, out, h_{Op}, g_{Op}, c_a, mech, Status_{Op}, time, prior, kind\_prior, break\_off \rangle, \tag{2.2}$$

где  $f$  – функция, реализуемая операцией;  $in = \{ in_1, \dots, in_n \}$  – множество входов, различных типов;  $out = \{ out_1, \dots, out_m \}$  – множество выходов,  $out = f(in)$ ;  $h_{Op} = \{ h_{Op}^1, \dots, h_{Op}^k \}$  – характеристики операции;  $g_{Op}$  – цели операции (требуемые значения характеристик операции),  $g_{Op} \subseteq h_{Op}$ ;  $c_a$  – условие запуска операции;  $mech = \{ mech_1, \dots, mech_q \}$  – средства преобразования;  $Status_{Op} = \{ wait, active, lock, done \}$  – состояние операции, определенное на конечном множестве состояний: *wait* – ожидание, *active* – выполнение, *lock* – прерывание, *done* – выполнена; *time* – длительность выполнения преобразования; *prior* – приоритет операции задает очередность выполнения операций, может быть описан постоянной величиной или функцией, т. е. быть статическим или динамическим; *kind\_prior* – тип приоритета (относительный, абсолютный);  $break\_off = \{ true, false \}$  – признак запрета прерывания, если «true» – правило не может прерываться.

Условие запуска ( $c_a$ ) задается следующим образом:

$$C_a(t) = C_a^{in}(t) \wedge C_a^{out}(t) \wedge C_a^{mech}(t) \wedge C_a^{status}(t) \wedge C_a^{time}(t), \quad (2.3)$$

где  $C_a^{in}$  – условие наличия необходимых входных ресурсов;  $C_a^{out}$  – условие учета ограничений выхода;  $C_a^{mech}$  – условие готовности необходимых средств;  $C_a^{status}$  – условие готовности к исполнению;  $C_a^{time}$  – условие запуска по времени.

Переход операции в состояние «выполнение» сопровождается выполнением действий по захвату входных ресурсов  $A_{in}^{RES}$  и средств  $A_{in}^{MECH}$ . Находясь в состоянии «выполнение», операция может перейти в состояние «прерывание». Операция может быть прервана для того, чтобы обеспечить выполнение другой операции. Переходя в состояние «прерывание» операция запоминает момент остановки и освобождает захваченные средства  $A_{Lock}^{MECH}$ .

В течение состояния «прерывания» проверяется наличие свободных средств  $C_a^{mech}(t)$ . Операция находится в состоянии «прерывания» до тех пор, пока не освободятся необходимые средства. В случае  $C_a^{mech}(t)=true$  операция переходит в состояние «выполнение»: захватываются средства  $A_{UnLock}^{MECH}$  и продолжается выполнение.

Операция находится в состоянии «выполнение» пока  $t < t_{End}^k$ , где  $t_{End}^k$  – момент окончания  $k$ -ой операции. При выполнении условия  $t = t_{End}^k$  операция переходит в состояние «ожидание». Данный переход сопровождается действиями по формированию выходных ресурсов  $A_{out}^{RES}$  и освобождением захваченных средств  $A_{out}^{MECH}$ .

Для представления иерархической структуры сложного ППР и расчета консолидированных характеристик был применен аппарат системных графов [2,11]:

$$\begin{aligned} \rightarrow \Sigma \\ PR_{L=i} = \{ \text{Sender}^m \cup Op^m \cup Receiver^m \cup Junction^m \}_{L=i}; \\ \{ PR_{L=j}^{p_i}; p_i = 1, \dots, n_{L=j}^p \}_{j=2, \dots, i}; \{ Relation_{AB}^{mk} \}_{L=i} > \end{aligned} \quad (2.4)$$

Граф  $i$ -го уровня интеграции образуется в результате поэтапной интеграции графов  $PR_1, PR_2, \dots, PR_{i-1}$  с образованием на каждом  $j$ -м этапе множества  $\{PR_{L=j}^p; p=1, \dots, n_{L=j}^p\}$  процессов (подпроцессов)  $j$ -го уровня интеграции,  $L$  – уровень интеграции. Элементы множества ППР  $\{ \text{Sender}^m \cup Op^m \cup Receiver^m \cup Junction^m \}_{L=i} \subset \{ \text{Sender}^m \cup Op^m \cup Receiver^m \cup Junction^m \}_{L=i-1} \subset \dots \subset \{ \text{Sender}^m \cup Op^m \cup Receiver^m \cup Junction^m \}_{L=1}$  и множества ресурсных отношений  $\{ Relation_{AB}^{mk} \}_{L=i} \subset \{ Relation_{AB}^{mk} \}_{L=i-1} \subset \dots \subset \{ Relation_{AB}^{mk} \}_{L=1}$  системного графа  $\rightarrow PR_{L=i}^{\Sigma}$  представляют собой элементы ППР и ресурсные отношения между элементами, а также элементы  $\text{Sender}^m \cup Op^m \cup Receiver^m \cup Junction^m$  и ресурсные отношения  $Relation_{AB}^{mk}$  системного графа  $PR_1$  первого уровня интеграции, не вошедшие при поэтапной интеграции ни в один процесс  $PR_{L=j}^p$ .

Каждая вершина системного графа ППР характеризуется некоторым набором атрибутов (показателей)  $h_1, \dots, h_z$ . Все множество атрибутов вершин системного графа задают атрибутивное множество. Вычисление интегральных показателей процессов (системных вершин)  $h_1, \dots, h_z$  на произвольном  $i$ -ом уровне ( $i > 0$ ) задается над вершинами  $(i-1)$ -го уровня интеграции.

Алгоритм работы машины вывода состоит из следующих основных этапов [12]: определения текущего момента времени  $SysTime = \min_{j \in RULE} T_j$ ; формирование очереди правил преобразования; выполнение правил преобразования и изменение состояния рабочей памяти (ресурсов и средств).

### 3. Система имитационного моделирования ППР VPsim

На основе рассмотренной модели разработана проблемно-ориентированная система имитационного моделирования, превосходящая по функциональности зарубежные аналоги и позволяющая адекватно описывать и моделировать экономические, производственные, технические, информационные и бизнес-процессы в рамках концепции ППР.

Система имитационного моделирования ППР VPsim обеспечивает выполнение следующих функций:

1. создание динамической модели ППР;
2. имитационное моделирование (в том числе анимация процессов и динамическое формирование графиков) (рис. 3.1);
3. анализ результатов имитационного эксперимента;
4. получение отчетов по моделям и результатам экспериментов;
5. экспорт результатов экспериментов в MS Excel и MS Project.

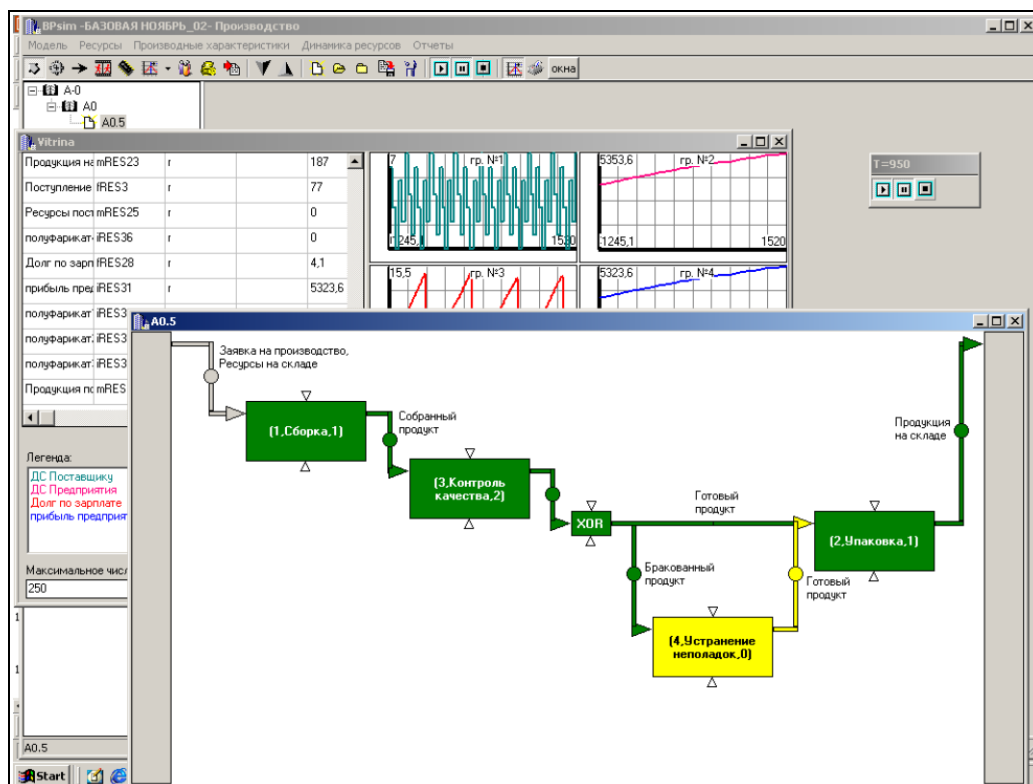


Рис. 3.1. Имитационное моделирование в VPsim

Встроенный математический аппарат используется для описания функций условия запуска, входа, выхода, обработки сообщений ППР. Синтаксически правила задаются с помощью графико-синтаксических диаграмм (интерфейсов), ориентированных на проблемную область ППР. В качестве операндов используются множества: ресурсов, средств, заявок, сообщений, параметров.

Для описания структуры ППР используются операторы: декомпозиции (детализирует сложный ППР на композицию более простых); оператор сопряжения элементов подмодели (в графическом виде задает причинно-следственные связи между элементами подмодели). В выражениях над операндами в VPsim используются арифметические и логические операции, операции генерации случайных значений переменных захватываемого/формируемого ресурса и длительности преобразования.

Система имитационного моделирования позволяет описывать произвольный, сложный ППР, а также решать различные задачи анализа как для дискретных ППР, так и для непрерывных ППР, описываемых моделями системной динамики. Данная система внедрена на ряде предприятий г. Екатеринбурга и используется для решения задач организации и управления производством (в машиностроительной и строительной отрасли), в сферах бизнеса и образования, на фондовом рынке.

### Литература

1. **Прицкер А.** Введение в имитационное моделирование и язык СЛИАМ II: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 646 с.
2. Технология системного моделирования/**Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов и др.** Под общ. ред. С.В. Емельянова и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. – 520 с.
3. **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Моделирование систем: Учеб. для вузов – 3-е изд., – М.: Высш.шк., 2001. – 343 с.
4. **Гнеденко Б.Д., Коваленко И.Н.** Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
5. **Форрестер Дж.** Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика): Пер. с англ./Под ред. Д.М. Гвишиани. – М.: Прогресс, 1971. – 340 с.
6. **Форрестер Дж.** Мировая динамика: Пер. с англ./Под ред. Д.М. Гвишиани, Н.Н. Моисеева. – М.: Наука, 1978. – 168 с.
7. Статические и динамические экспертные системы: Учеб. пособие/**Э.В. Попов, И.Б. Фоминых, Е.Б. Кисель, М.Д. Шапот.** – М.: Финансы и статистика, 1996. – 320 с.
8. **Джексон, Питер.** Введение в экспертные системы.: Пер. с англ.: Уч. пос. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 624 с.
9. **Аксенов К.А., Клебанов Б.И.** Комплексная модель предприятия и аппарат экспертных систем. Научные труды III отчетной конф. молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. Сборник статей. – Екатеринбург, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. Ч. 1. – С. 296–298.
10. **Newell А.** Production systems: models of control structures//Visual information processing. New York: Academic Press, 1973. – P. 463–526.
11. Имитационное моделирование производственных систем/Под общ. ред. А.А. Вавилова. – М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1983. – 416 с.
12. **Aksyonov K., Klebanov B., Hrenov A.** Computer-aided design system of simulation business process model//Proceedings of the 4th IMACS Symposium on Mathematical Modeling, ARGESIM Report no. 24. – Austria, Vienna University of Technology. 2003. – P. 1414–1420.