

## РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНЫХ СИСТЕМ ИЕРАРХИЧЕСКИМИ РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ВО ВРЕМЕНИ СЕТЯМИ ПЕТРИ

### Введение

Рассмотренные в [1] иерархические распределённые во времени сети Петри (И-РВСП) обладают двумя достоинствами: техникой нисходящей декомпозиции, сохраняющей общий вид моделируемых фрагментов дискретно-событийных систем (ДСС), и восходящей составляющей синтеза, обеспечивающей эффективный маршрут связи с более низких до верхних уровней. При этом сложные ДСС могут декомпонироваться нисходящей И-РВСП-технологией, тогда как восходящая технология позволяет синтезировать точные И-РВСП-модели для функционирования более низких уровней.

Данная статья является продолжением работы [1], знакомящей с базовыми основами И-РВСП и особенностями их структуры с отображением иерархической модели интеллектуального управления ДСС, а также методикой классификации ошибок и формирования соответствующих идентифицированных состояний СП. Рассмотрены свойства позиций и переходов в иерархических структурах и общие свойства сгенерированной И-РВСП-модели ошибки на координатном уровне с сопровождающим примером, демонстрирующим удобство и простоту излагаемой технологии моделирования и структурной классификации и обобщающим результаты исследований по реализации предложенного подхода.

### Иерархическая структура позиций и переходов

Группирование позиций и переходов в И-РВСП-модели выполнено в зависимости от состояний системы, которые эти группы представляют, а именно, нормальное состояние работы, а также состояние ошибок. На рис. 1 приведено подробное описание такой классификации и определены основные свойства группирования.

Пусть  $P_k$  и  $T_k$  представляют все позиции и переходы в И-РВСП-модели всех состояний системы. Итак, И-РВСП-контроллер координационного уровня имеет следующий вид: И-РВСП =  $(P_k, T_k, I, O)$ , где  $I$  и  $O$  – функции входа-выхода (в обычных СП);  $P_k, T_k$  – соответственно, множество позиций и переходов сети.

С точки зрения описания системы, это множество позиций  $P_k$  может быть определено как объединение четырех подмножеств позиций  $P_{e_i}$ , где  $i = (0, 1, 2, 3)$ . Эти четыре подмножества зависят от различных факторов моделирования системы, проиллюстрированных на рис. 1,б :  $P_{e_0}$

© Л.С. Ямпольский, Ю.Н. Ланкин, О.И. Лисовиченко, 2005

,  $P_{e_1}$ ,  $P_{e_2}$ ,  $P_{e_3}$  - позиции, отображающие нормальное функционирование системы (ЛЮО-ошибки исключены), при наличии ЛЮО-ошибок, при наличии ВУО-ошибок, при наличии неустраняемых ошибок, соответственно.

С учётом вышеизложенного, переходы в И-РВСП-модели могут быть определены как принадлежащие к одному из подмножеств переходов  $T_{e_i}$ , где  $i = (0, 1, 2, 3)$ . И снова эти четыре подмножества переходов зависят от факторов, проиллюстрированных на рис. 1,б:  $T_{e_0}$ ,  $T_{e_1}$ ,  $T_{e_3}$  – переходы, отображающие, соответственно, нормальное функционирование системы (ЛЮО-ошибки исключены), при наличии ЛЮО-ошибок или приводящих к этому состоянию из нормального в процессе функционирования системы, при наличии ВУО-ошибок или приводящих к этому состоянию из нормального в процессе функционирования системы (а также из одного ошибочного состояния), при неустраняемых ошибках (т.е. таких, которые могут привести к тупиковому состоянию системы) или приводящих к этому состоянию из нормального в процессе функционирования системы (а также из двух ошибочных состояний).

В свою очередь, групповые переходы  $T_{e_1}$ ,  $T_{e_2}$ ,  $T_{e_3}$  состоят из трех разделённых подсетей переходов:

- переходы, у которых входные и выходные позиции находятся в одной и той же группе (в общем случае идентифицирующиеся как  $T_{e_i}$ );
- переходы, у которых хотя бы одна из входных позиций находится в нижестоящей группе, и одна из выходных позиций – в вышестоящей группе (это группы 1, 2 или 3, см. рис. 1(б));
- переходы, у которых хотя бы одна из входных позиций находится в вышестоящей группе (1, 2 или 3), и одна из выходных позиций – в нижестоящей группе (группа 0, см. рис. 1(б)).

Два последних типа переходов (которые являются подмножеством перехода  $T_{e_k}$ , где  $k = \max\{i, j\}$ ) отображают изменения состояний функционирующей системы. Переходы форм  $T_{e_{21}}$ ,  $T_{e_{32}}$ ,  $T_{e_{31}}$  не рассматриваются, так как предполагается, что процедуры восстановления ошибок вернут систему в нормальное рабочее состояние. Переходы форм  $T_{e_{03}}$ ,  $T_{e_{13}}$  возможны, но при этом запрещены для разрешения иерархического распространения информационной ошибки (это становится очевидным при рассмотрении следующего примера:

пусть некоторые переходы формы  $T_{e_{ij}}$  являются внешне-управляемыми. Тогда, выполнение этих переходов возможно при условии, когда происходит случайное событие  $r$ . На рис. 1,а показаны группирование позиций и переходов в координационном уровне И-РВСП-модели).

Переходы  $T_{e_{01}}$ ,  $T_{e_{02}}$ ,  $T_{e_{12}}$  и т.д. представляют группу (так называемых блокирующих), которые могут привести к ЛЮО- или к ВУО-ошибкам, либо к различным ошибкам при восстановительных процедурах (это может соответствовать различным точкам ввода в некоторой подсетевой

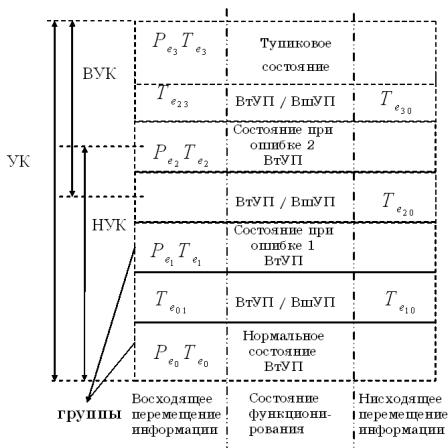


Рис. 1 – а. – Классификация позиций и переходов



Рис. 1б. – Классификация позиций и переходов

позиции более высокого уровня или совершенно другой подсети). Они могут быть либо внешне, либо внутренне управляемыми переходами– в зависимости от детализации системы. У такой классификации нет отдельных группировок позиций или переходов, которые представляли бы приостановленное состояние функционирования. По определению, приостановленное состояние функционирования отдельного координатора (включая связанные с ним позиции и переходы) такое, при котором его объединенные ресурсы используются другим координатором во время восстановления ВУО-ошибок. Таким образом, набор позиций и переходов, которые отражают приостановленное состояние, может охватывать группы 0, 1, и 2 классификации.

### Структурные свойства И-РВСП-модели

Пусть:  $P_k$  и  $T_k$  – совокупность позиций и переходов;  $p_k$  и  $t_k$  – отдельные позиции и переходы: позиции с индексами  $d, a, s, ss$  и  $su$  – означают, соответственно, решающую РП-позицию, активную АП-позицию, пассивную ПП-позицию, истока-стока ПИС-позицию и подсетевую ПСП-позицию; переходы с индексами  $idt$  и  $edt$  –внутренне ВтУП и внешне ВшУП управляемые переходы, соответственно [1];  $\rho(P)$  - количество элементов множества  $P$ ;  $\bullet(t_1)$  - множество входных позиций для перехода  $t_1, t_1 \in T_k; p_{s_j}^p$  – означает  $p$ -ю позицию  $j$ -й группы. Иерархические структурные свойства группировок позиции и перехода (по нисходящей на рис. 1) следующие:

**Свойство 1.** Общая И-РВСП-модель системы состоит из всех разновидностей типов позиций и переходов:

$$P_k = \bigcup_{i=\{d,a,s,ss,su\}}^{P_i} = \bigcup_{i=\{0,1,2,3\}} P_{e_i};$$

$$T_k = \bigcap_{i=\{idt,edt\}} T_i = \bigcap_{i=\{0,1,2,3\}} T_{e_i},$$

где

$$\rho(P_k) = \rho(P_d) + \rho(P_a) + \rho(P_s) + \rho(P_{ss}) + \rho(P_{su}) = \rho(P_{e_0}) + \rho(P_{e_1}) + \rho(P_{e_2}) + \rho(P_{e_3});$$

$$\rho(T_k) = \rho(T_{idt}) + \rho(T_{edt}) = \rho(T_{e_0}) + \rho(T_{e_1}) + \rho(T_{e_2}) + \rho(T_{e_3}).$$

**Свойство 2.** Действия четко определены на самом нижнем уровне детализации системы, что означает, что все позиции подсети приведены в их исходное состояние – РП- и АП-позиций:

$$\forall j \in \{1, 2\}, P_{e_j} = \bigcup_{k=\{d,a,su,s\}} P_{e_{kj}};$$

$$\forall j \in \{0\}, P_{e_j} = \bigcup_{k=\{d,a,s\}} P_{e_{kj}}.$$

**Свойство 3.** В данной группе ПСП-позиция состоит из позиций и переходов, определенных в тех же группах или группах нижестоящего уровня:

$$\forall i \in \{0, 1, 2\}, j \in \{1, 2\}, i \leq j;$$

$$p_{su_j}^p = \bigcap_i P'_{eki} \cup T_{e_i}, k \in \{d, a, su, s\},$$

где

$$P'_{eki} = P_{eki}^- \{p_{su_j}^p\}.$$

**Свойство 4.** Позиции уникальных группирований не могут одновременно находиться в двух различных группах:

$$\forall i, j \in \{0, 1, 2, 3\}, P_{e_i} \cap P_{e_j} = \left\{ \begin{matrix} 0, i \neq j \\ P_{e_i, i=j} \end{matrix} \right\}.$$

**Свойство 5.** Входящие в два группирования переходы

$\forall i, j \in \{0, 1, 2, 3\}, T_{e_i} \cap T_{e_j} = \left\{ T_{e_i}, i = j^{T_{e_{ij}}, i \neq j} \right\}$  – такие, у которых входные и выходные позиции между этими двумя группированиями подчиняются следующим в п.п. 5, а и 5, б подсвойствам:

Подсвойство 5,а. У таких переходов существует хотя бы одна входная позиция  $p_r$  в  $i$ -ой группе и хотя бы одна выходная позиция  $p_s$  в  $j$ -ой группе (типа  $T_{e_{ij}}, i < j$ , как показано на рис. 1) в иерархически восходящей передаче информации в И-РВСП-модели системы, причём:

$p_r$  – это АП- или РП-позиция  $i$ -ой группы;  $p_s$  – это ПП-, АП-, РП-позиции или позиция ПИС-позиция  $j$ -ой группы. Позиции, принадлежащие группе  $m, ((m < i) \vee (m > j))$ , не могут являться позициями входа и выхода для переходов типа  $T_{e_{ij}}$ . Все другие позиции, которые принадлежат  $m'$ -ой группе,  $i \leq m' \leq j$ , могут быть либо входными, либо выходными для таких переходов.

Таким образом:

$$\begin{aligned} &\forall t_l \in T_{e_{ij}}, i, j, m \in \{0, 1, 2, 3\}, i < j, k \in \{d, a, su, s, ss\}, ((m < i) \vee (m > j)); \\ &\exists p_r, p_r \in \bullet(t_l) : (p_r) \in (P_{e_{ai}} \vee P_{e_{di}}); \\ &\exists p_s, p_s \in (t_l) \bullet : (p_s) \in \left\{ \begin{matrix} (P_{ts_j} \vee P_{e_{aj}} \vee P_{e_{dj}}), & \text{если } j = \{0, 1, 2\} \\ P_{ess_j}, & \text{если } j = 3 \end{matrix} \right\}; \\ &\neg \exists p_t, p_t \in (t_l) \bullet \vee p_t \in \bullet(t_l) : (p_t) \in P_{ek_m}. \end{aligned}$$

Подсвойство 5,б. У таких переходов существует хотя бы одна входная позиция  $p_r$  в  $i$ -ой группе и хотя бы одна выходная позиция  $p_s$  в  $j$ -ой группе (типа  $T_{e_{ij}}, i > j, j = 0$ , как показано на рис. 1) в иерархически восходящей передаче информации в И-РВСП-модели системы, причём:  $p_r$  – это ПП-, АП-, РП-позиции или ПИС-позиция  $i$ -ой группы;  $p_s$  – это ПП- либо АП-позиция в  $j$ -ой группе. Позиции, принадлежащие  $m$ -ой группе, не могут являться входными или выходными позициями для переходов типа  $T_{e_{ij}}$ . Все остальные позиции, которые принадлежат к группе  $m', i > m' > j$ , могут быть либо входными, либо выходными для таких переходов.

Таким образом:

$$\begin{aligned} & \forall t_i \in T_{e_{ij}}, i, m \in \{1, 2, 3\}, j = 0, k \in \{d, a, su, s, ss\}, m > i; \\ & \exists p_r, p_r \in \bullet(t_i) : (p_r) \in \left\{ \begin{array}{l} (P_{ts_i} \vee P_{ea_i} \vee P_{ed_i}), \text{ если } i = \{1, 2\} \\ P_{ess_i}, \text{ если } i = 3 \end{array} \right\}; \\ & \exists p_s, p_s \in (t_i) \bullet : (p_s) \in (P_{es_j} \vee P_{ea_j}); \\ & \neg \exists p_t, p_t \in (t_i) \bullet \vee p_t \in (t_i) \bullet : (p_t) \in P_{ek_m}. \end{aligned}$$

Подсвойства 5,а и 5,б доказывают, что И-РВСП-модель является полной и совместимой структурой. Все вышеприведенные свойства отражают структуру И-РВСП-контроллера с точки зрения функций диспетчера/анализатора. В том случае, когда диспетчер/анализатор функционирует как контролирующе-сертифицирующее устройство всех операций системы, все действия, выполняемые на НУК-подуровне, “не просматриваются” диспетчером. Вместе с тем, при запуске анализатора ошибок диспетчер выборочно проверяет подсети (и их соответствующие нижестоящие сетевые уровни) до тех пор, пока не будет достигнута соответствующая маркировка ошибок: после идентификации маркировки начинается анализ ошибок. Этот важный аспект функционирования И-РВСП-модели способствует упрощению процесса идентификации ошибок и снижению количества маркировок достижимости подсети.

### Общая структура И-РВСП модели

На рис. 2 показана обобщенная структура И-РВСП-модели любой иерархической системы с учетом сбоев на координационном уровне. На рис. 3 и рис. 3 представлены базисные композиции И-РВСП моделей для любой системы. Эти структуры могут быть использованы для идентификации операций, которые одновременно выполняются различными координаторами при их взаимодействии. На этих двух рисунках обобщены фрагменты, отображённые разобщено в рассмотренных ранее иллюстрациях.

У каждого координатора есть связанные с ним операции, и у всех таких операций есть связанные с ними позиции и переходы, которые можно разделить на три группы, как показано на рис. 2 (состояния: нормальное, при ошибке 1, при ошибке 2, соответственно). Когда координатор начинает операцию, он работает в нормальном состоянии. Когда он обнаруживает ЛУО-ошибку (ЛУО<sub>иниц</sub>), им инициируются операции, связанные с состоянием при ошибке 1; если же ЛУО-ошибка обработана (идентифицирована) (ЛУО<sub>обр</sub>), происходит возврат координатора к нормальной работе. Если ЛУО-ошибка не идентифицирована еще на стадии ошибки 1, или если имеет место ВУО-ошибка, тогда координатором выполняются действия, связанные с восстановлением ошибки 2. Подобные операции нуждаются в поддержке/использовании ресурсов, связанных с другими координаторами, и данный координатор приостанавливается до высвобождения и доступности необходимых ресурсов.

Передача ресурсов между двумя координаторами (от координатора  $j$  к координатору  $i$ ) на рис. 2 показана штрихованными линиями “X”.



В табл. 1 в виде  $C_{ij}$ -матрицы, являющейся, по-существу, координирующей ячейкой, отображается взаимодействие между различными координаторами и направленным потоком ресурсов при наличии ВУО-ошибки. Введение переменной  $X$  в матрице  $C_{ij}$  обозначает наличие системного ресурса (работающего под управлением координатора  $C_i$ ), использовавшего во время ВУО-ошибки управляющее состояние координатора  $C_j$ . Наличие ввода для  $C_{ij}$  не означает существование соответствующего ввода для  $C_{ji}$ . “Пустой” ввод в матрицу для обоих  $C_{ij}$  и  $C_{ji}$  обозначает совместное действие координаторов  $C_i$  и  $C_j$ . Ввод в  $C_{ij}$  в виде  $(X_p + \dots + X_q)$  обозначает, что ресурсы  $X_i \in C_j$  (отдельных или всех переменных) используются в ВУО-восстановительном процессе в  $C_i$ .

### Примеры реализации

Производственный пример. Для того, чтобы продемонстрировать методологию И-РВСП-проектирования, рассмотрим производственную систему, представленную на рис. 3 [3] и состоящую из трех рабочих станций  $СТ_1$ ,  $СТ_2$ ,  $СТ_3$  и робота Р. Заготовка должна быть последовательно обработана на рабочих станциях  $СТ_1$  -  $СТ_3$ , причём, станции  $СТ_1$  и  $СТ_3$  могут обрабатывать только одну заготовку и используют робот Р при обработке и выгрузке (следовательно, ресурс робота поделен между  $СТ_1$  и  $СТ_3$ ), тогда как станция  $СТ_2$  может обрабатывать две заготовки одновременно и может загружаться и выгружаться самостоятельно. Если робот уже начал работу на рабочих станциях, его работа не может быть прервана до окончания операции по выгрузке. Фиксированные заготовки ожидают своего времени выполнения в специальном входном буфере  $БУФ_{вх}$ . Готовые детали автоматически перемещаются в выходной буфер  $БУФ_{вых}$ . Освободившаяся тара возвращается роботом во входной буфер  $БУФ_{вх}$  после окончания разгрузки станции  $СТ_3$ .

С позиций И-РВСП-модели можно выделить четыре основных этапа функционирования: операции на входном накопителе, связанные с фиксацией партии поступивших на  $БУФ_{вх}$  заготовок, подлежащих обработке на  $СТ_1$ ; операции на  $СТ_1$ , сопровождаемые загрузкой роботом Р станции  $СТ_1$  заготовками из  $БУФ_{вх}$ , их обработкой этой станцией и дальнейшей выгрузкой роботом Р обработанных полуфабрикатов и транспортировкой последних на станцию  $СТ_2$ ; операции на  $СТ_2$  по автозагрузке полуфабрикатов, их обработке этой станцией и автовыгрузке обработанного изделия; операции на  $СТ_3$ , когда робот Р загружает обработанные на  $СТ_2$  изделия в станцию  $СТ_3$ , на которой осуществляется их окончательная обработка, и далее робот Р разгружает  $СТ_3$ , транспортирует готовое изделие на выходной буфер  $БУФ_{вых}$  и затем возвращает освободившуюся тару на входной буфер  $БУФ_{вх}$ .

При моделировании описанной производственной ситуации на верхнем уровне И-РВСП-модели можно констатировать следующее (см. рис. 3):

- станции  $СТ_1$ ,  $СТ_2$  и  $СТ_3$  работают в определённой последовательности с фиксированными партиями заготовок. Если отдель-



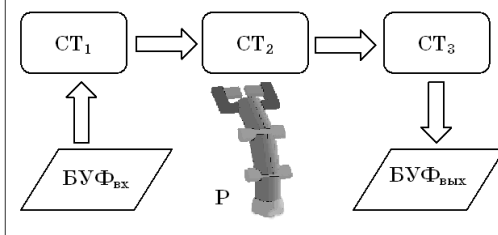


Рис. 3 – Производственный пример

ные элементы партии заготовок любой специализированной группы по каким-то причинам не будут обработаны на какой-либо стадии (то есть не пройдут через какую-либо из рабочих станций), этот факт зафиксируется соответствующей позицией  $p_x$  подсети в И-РВСП-модели, виртуально отражающей состояние реально функционирующей системы. Рабочие станции СТ<sub>1</sub> и СТ<sub>3</sub> используют робот Р для своего обслуживания, в связи с чем последний должен быть свободным перед активизацией позиции  $p_x$  одной из этих рабочих станций;

- робот Р переносит партии из зоны питателя БУФ<sub>вх</sub> на станцию СТ<sub>1</sub>, либо с выхода станции СТ<sub>2</sub> на вход станции СТ<sub>3</sub>, либо возвращает освободившуюся тару после станции СТ<sub>3</sub> на буфер БУФ<sub>вх</sub>. Этот процесс может быть абстрагирован более высоким уровнем представления в модели - операцией функционирования робота.

Фрагментарно И-РВСП-модель представлена рисунками 4, 5 и 6 [2]. Группирование позиций и переходов (аналогично рассмотренному выше и отображённому на рис. 1) указано в таблице 2. Таблицы 3 и 4 дают общее представление об И-РВСП-модели с координирующей ячейкой. Следует отметить, что таблицы 2-4 отражают результат функционирования системы с позиций диспетчера/анализатора. Заметим, что И-РВСП-моделью системы отражаются лишь некоторые из возможных ошибочных ситуаций. Нет и чёткого представления о восстановительном процессе после некоторых ошибок, ибо этим примером отображения на диспетчере/анализаторе лишь демонстрируются возможности декомпозиции И-РВСП-подхода, причём, сеть разбита на такие минимально возможные состояния, в которых удаётся наблюдать определённое группирование позиций и переходов.

В таблице 5 приведено описание состояния позиций и переходов в декомпозициях И-РВСП. Восходящим способом проверяются такие важные свойства системы, как *ограниченность*, *живость* и *реверсивность*. Анализ достижимости подсети связан с состоянием её маркировки, т.е. с *проблемой достижимости* и заключается в следующем: вначале проверяются свойства подсети  $p_{44}$  (или  $p_{23}$ , рис. 6); затем проверяются свойства подсети  $p_3$  (или  $p_{15}$ , см. декомпозицию сети на рис. 5); далее следует про-

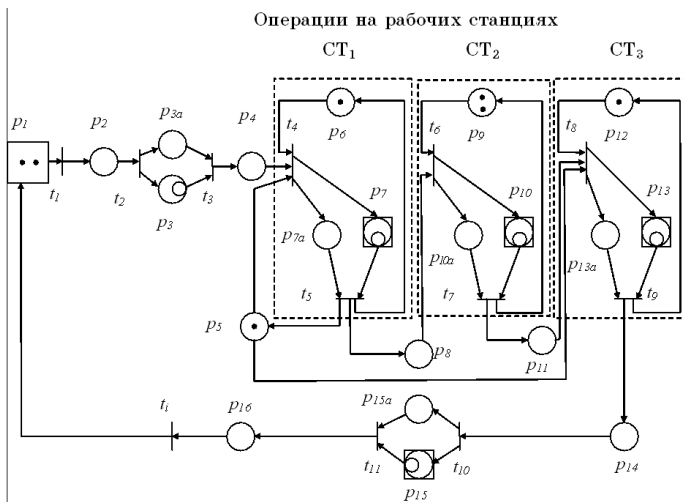


Рис. 4 – Первая декомпозиция И-РВСП-модели

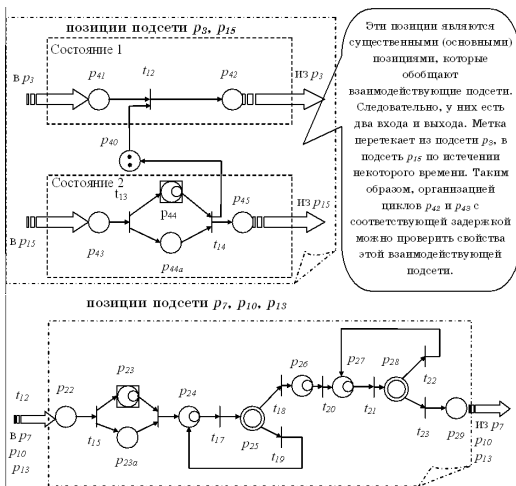


Рис. 5 – Вторая декомпозиция И-РВСП-модели



верка свойств подсетей  $p_7$  (или  $p_{10}$ , или  $p_{13}$ ); наконец, следует проверка свойств всей И-РВСП-модели, отображённой на рис. 4. Процессное время, связанное с позицией  $p_{26}$  для различных рабочих станций, определяется динамической маркировкой системы. Это значит, что процессное время, связанное с операциями в позициях  $p_{24}$ ,  $p_{26}$  и  $p_{27}$ , будет зависеть от маркировки позиций  $p_{7a}$ ,  $p_{10a}$  и  $p_{13a}$ . Если позиция  $p_{10a}$  маркирована, то процессное время может зависеть от маркировки позиции  $p_9$ , что также повлияет на загруженность рабочей станции (обрабатываются одно или два задания).

*Анализ функционирования.* Функционируя как контрольное устройство, диспетчер \ анализатор сможет также “видеть” все операции системы, которые проиллюстрированы в табл. 1. Таким образом, произойдет переключение на режим контроллера операций, сразу после обнаружения ошибки в операции. В этом режиме будет выбрана и проанализирована необходимая подсеть для идентификации размещения ошибки и связанных состояний подсети. Во время этих операций, диспетчер может активировать ВшУП или инициировать системные операции еще раз в необходимых точках входа/выхода, как было отражено в И-РВСП модели системы.

Таблица 3.

Структурная координация в И-РВСП модели

	Источники	ЛЮО <sub>иниц</sub>	ЛЮО <sub>обр</sub>	ВУО <sub>иниц</sub>	ВУО <sub>обр</sub>
Робот	$p_5$				
БУФ <sub>вх</sub>	$p_{40}$	$t_{13}$	$t_{14}$		
СТ <sub>1</sub>	$p_6$	$t_{15}, t_{17}, t_{21}, t_{24}$	$t_{16}, t_{18}, t_{19}, t_{22}, t_{23}, t_{25}, t_{27}, t_{30}, t_{31}$	$t_{28}$	$t_{32}$
СТ <sub>2</sub>	$p_9$	$t_{17}, t_{21}, t_{24}$	$t_{18}, t_{19}, t_{22}, t_{23}, t_{25}$		
СТ <sub>3</sub>	$p_{12}$	$t_{15}, t_{17}, t_{21}, t_{24}$	$t_{16}, t_{18}, t_{19}, t_{22}, t_{23}, t_{25}, t_{27}, t_{30}, t_{31}$	$t_{28}$	$t_{32}$
БУФ <sub>вых</sub>	-				

Таблица 4.

Связи в ячейках координатора

	Робот	БУФ <sub>вх</sub>	СТ <sub>1</sub>	СТ <sub>2</sub>	СТ <sub>3</sub>	БУФ <sub>вых</sub>
Робот			X		X	
БУФ <sub>вх</sub>			X			
СТ <sub>1</sub>				X		
СТ <sub>2</sub>					X	
СТ <sub>3</sub>						X
БУФ <sub>вых</sub>						

Таблица 5.

Интерпретация состояний позиций и переходов

Позиции	Переходы
$p_1$ Входная ПИС-позиция	$t_1$ ВшУП1
$p_2$ Доступность входной партии	$t_2$ В подсеть $p_3$
$p_3$ Подсеть количества носителей	$t_3$ Из подсети $p_3$
$p_4$ Фиксированная партия доступна на БУФ <sub>вх</sub>	$t_4$ Начало операции СТ <sub>1</sub>
$p_5$ Робот свободен	$t_5$ Конец операции СТ <sub>1</sub>
$p_6$ СТ <sub>1</sub> (рабочая станция 1) свободна	$t_6$ Начало операции СТ <sub>2</sub>
$p_7$ Подсеть для операций на рабочей станции 1	$t_7$ Конец операции СТ <sub>2</sub>
$p_8$ Незагруженная деталь из рабочей станции 1	$t_8$ Начало операции СТ <sub>3</sub>
$p_9$ СТ <sub>2</sub> (рабочая станция 2) свободна	$t_9$ Конец операции СТ <sub>3</sub>
$p_{10}$ Подсеть для операций на рабочей станции 2	$t_{10}$ В подсеть $p_{15}$
$p_{11}$ Незагруженная деталь из рабочей станции 2	$t_{11}$ Из подсети $p_{15}$
$p_{12}$ СТ <sub>3</sub> (рабочая станция 3) свободна	$t_{12}$ Приспособления готовы для загрузки
$p_{13}$ Подсеть для операций на рабочей станции 3	$t_{13}$ Подсеть передвинуть вовнутрь
$p_{14}$ Незагруженная деталь из рабочей станции 3	$t_{14}$ Подсеть передвинуть наружу
$p_{15}$ Подсеть возвращает все приспособления на БУФ <sub>вх</sub>	$t_{15}$ Инициирование операций СТ <sub>1</sub> , СТ <sub>2</sub> , или СТ <sub>3</sub>
$p_{16}$ Выполняющаяся деталь на БУФ <sub>вых</sub>	$t_{16}$ Деталь, передв. к рабочей станции
$p_{40}$ Количество приспособлений, доступное на БУФ <sub>вх</sub>	$t_{17}$ Загрузка закончена
$p_{41}$ В подсеть $p_3$	$t_{18}$ Загрузка успешна
$p_{42}$ Из подсети $p_3$	$t_{19}$ Неуспешная загрузка
	$t_{20}$ Деталь обработана
	$t_{21}$ Выгрузка закончена
	$t_{22}$ Выгрузка неуспешна
	$t_{23}$ Выгрузка успешна
	$t_{24}$ Деталь перенесена на не-большое расстояние
	$t_{25}$ Достигнут пункт назначения
	$t_{26}$ Полезное отклонение

Продолжение таблицы 5.

Интерпретация состояний позиций и переходов

Позиции	Переходы
$p_{43}$ В подсеть $p_{15}$	$t_{27}$ Пункт назначения не достигнут
$p_{44}$ Подсеть переносит приспособления к БУФ <sub>вх</sub>	$t_{28}$ Деталь выгружена, вне подсети
$p_{45}$ Из подсети $p_{15}$	$t_{29}$ Деталь в зоне достижимости
$p_{22}$ Начало операций на СТ <sub>1</sub> , СТ <sub>2</sub> , СТ <sub>3</sub>	$t_{30}$ Деталь не опущена
$p_{23}$ Перенесение деталей на СТ <sub>1</sub> , СТ <sub>2</sub> , СТ <sub>3</sub>	$t_{31}$ Деталь поднята
$p_{24}$ Загрузка деталей на СТ <sub>1</sub> , СТ <sub>2</sub> , СТ <sub>3</sub>	$t_{32}$ Деталь может быть бракована
$p_{25}$ Операция загрузки успешна?	$t_{33}$ Деталь доставлена на место назначения
$p_{26}$ Загрузка успешна, деталь обрабатывается	$ti$ Возврат к началу цикла
$p_{27}$ Выгрузить детали с СТ <sub>1</sub> , СТ <sub>2</sub> , СТ <sub>3</sub>	
$p_{28}$ Успешна ли процедура выгрузки?	
$p_{29}$ Деталь выгружена, вне подсети	
$p_{30}$ Переместить в подсеть, на небольшое расстояние	
$p_{31}$ Полезное отклонение/пункт назначения достигнуты	
$p_{32}$ Инициализировать переключение детали	
$p_{33}$ Деталь опущена	
$p_{34}$ Инициализировать поднятие детали	
$p_{35}$ Деталь вне достижения, сложная ошибка	
$p_{36}$ Вне движения подсети	

## Выводы

Рассмотрены свойства И-РВСП-базовой многофункциональной модели иерархической ДСС. Синтезированы и проанализированы структурные объединения позиций и переходов для диагностирования ошибок диспетчером/анализатором, позволяющим одновременно интерпретировать особенности функционирования реальной системы как на верхних (абстрагированных), так и на нижних (детализированных) её уровнях.

Дополнительным важным достоинствами основанного на И-РВСП-подходе системного моделирования является возможность адаптации к системам с параллельными процессами и различными ресурсами, выполняющими независимые операции для достижения общей цели. Примером такой адаптации служит присоединение приоритетного правила для принадлежащих к конфликтному множеству переходов (например, обеспечение возможности более высокого приоритета для переходов с активизированными дугами).

Приведенный пример реализации описанного подхода наглядно интерпретирует особенности И-РВСП-моделирования сложных процессов в ДСС при выявлении и прогнозировании возможных сбоев.

## Литература

1. Моделирование процессов в дискретно-событийных системах иерархическими распределёнными во времени сетями Петри / Лисовиченко О.И., Остапченко К.Б., Пуховский Е.С., Ямпольский Л.С. // Адаптивні системи автоматичного управління. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Вип. 7(27).- Дніпропетровськ, 2004.- С. 26-38.
2. Ramaswamy S., Valavanis K. P. Modeling, Analysis and Simulation of Failures in a Materials Handling System with Extended Petri Nets // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.-Vol. 24.- 9.-1994.
3. Zhou M. C., DiCesare F. Petri Net Synthesis for Discrete event Control of Manufacturing Systems // Boston: Kluwer Academic Publishers.-1993.