

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНЫХ СИСТЕМАХ ИЕРАРХИЧЕСКИМИ РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ВО ВРЕМЕНИ СЕТЯМИ ПЕТРИ

Введение

Рассматриваемые иерархически распределённые во времени сети Петри (И-РВСП) обладают двумя достоинствами: техникой нисходящей декомпозиции, сохраняющей общий вид моделируемых фрагментов системы, и восходящей составляющей синтеза, обеспечивающей эффективный маршрут связи от более низких до верхних уровней. Результатом такого подхода является “гибридная” методология, обеспечивающая одновременно возможности моделирования и анализа. Иными словами, в то время, как сложные системы могут декомпонироваться нисходящей И-РВСП-модельной технологией, восходящая технология позволяет синтезировать точные И-РВСП-модели из более низких уровней.

Как известно, большинство реальных организационно-технических и технологических процессов функционируют или могут быть приближены к представлению в виде дискретно-событийных, а соответствующие системы – к дискретно-событийным системам (ДСС) [2], и аппарат сетей Петри (СП) с его соответствующими расширениями [1, 3] является мощным средством моделирования при анализе/синтезе подобных систем.

Данная работа построена следующим образом: начало статьи знакомит с основами И-РВСП; далее рассматривается структура И-РВСП, представляющая иерархическую модель интеллектуального управления ДСС, а также изложена методика классификации ошибок и формирования соответствующих идентифицированных состояний СП. В продолжении статьи, которая предполагается к опубликованию в следующем сборнике, будут рассмотрены свойства позиций и переходов в иерархических структурах и общие структурные свойства И-РВСП сгенерированной 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.

Базисная основа И-РВСП

Базовая структура И-РВСП – это обобщение СП, описанное в [5], однако в качестве определяющих установлены следующие 5 различных типов позиций (рис. 1, а), которые включают в себя: *пассивную позицию* (ПП-позиция), которая хорошо согласуется с позицией в классических СП;

© О.И. Лисовиченко, К.Б. Остапченко, Е.С. Пуховский, Л.С. Ямпольский, 2004

активную позицию (АП-позиция): которая указывает на то, что в системе выполняется операция (действие), *решающую позицию* (РП-позиция), указывающую на конфликтную ситуацию (это представление позиции отличается от общепринятого в виде бинарного переключателя “да/нет”), *подсетевую позицию* (ПСП-позиция), определение которой дано в [5], но смягчено в И-РВСП в части ограничения в том, что ПСП-позиция должна обязательно быть “единственно входной/единственно выходной” (single input/single output, SISO), позволяя ПСП-позиции, таким образом, обеспечивать большую гибкость при её использовании в случае необходимости отображения многовыходных и многовыходных структурных компонент И-РВСП; *позицию истока-стока* (ПИС-позиция), отображающую начало и окончание происхождения меток в сети, как показано на рис. 1, б (эта позиция, по сути, практически исключает необходимость в отдельных местах истока и стока, как это принято в стандартных СП). Это означает, что полная И-РВСП-модель системы существует между выходной и входной дугами этой позиции (см. рис. 1, в). Дело в том, что ПСП-позиция как самостоятельное звено не существует; её существование в сети поддерживается динамическим потоком меток, и это свойство называется “квази-живостью”, для тестирования которого и необходима ПИС-позиция.

Решающая РП-, активная АП- и пассивная ПП-позиции всегда являются входными и выходными позициями подсети ПСП. ПИС-позиция весьма полезна для анализа и исследования индивидуальных свойств ПСП-позиций, как это показано на рис. 1, в. Некоторые сети SISO, в которых присутствуют общие позиции, переходы и дуги, комбинируются в формы “multi-input/multi-output” (МИМО) И-РВСП-сетей, что отражает восходящий синтез моделей СП.

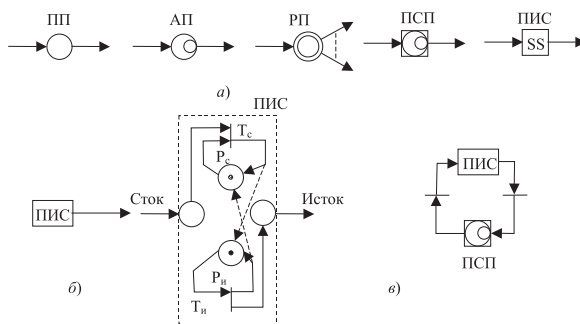
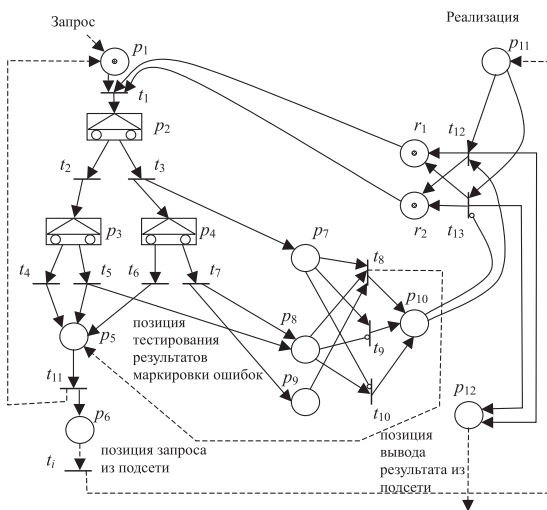


Рис. 1 – Отображение позиций в И-РВСП: а) ПП-, АП-, РП, ПСП, ПИС – позиции ; б) T_c , P_c и T_u , P_u – переходы и позиции стока и истока, соответственно; в) общая И-РВСП модель системы

Кроме того, РП-позиция при генерировании решений скорее может быть обобщена *мультивыбором*, чем позицией бинарного выбора. Двои-

чный подход к бинарному выбору (РП-позиция при бинарном выборе называется *позицией переключения*) успешно используется во многих расширенных СП, хотя при этом возникают серьезные осложнения при проверке свойств позиций переключения в моделях систем с временными атрибутами. Такое свойство, как ограниченность, которая определяется для СП позицией максимальной ёмкости (или с максимальным количеством маркеров), может зависеть от количества объединенных переходов, что поясняется примером (рис. 2).

Два ресурса – r_1 и r_2 – используются совместно для выполнения некоторых операций. Отказ одного из них не приводит к остановке всей системы, но отказ обоих ресурсов приводит к возникновению серьезных последствий, в результате чего система блокируется. Подход “бинарного выбора” используется в модели для опроса и вывода результатов тестирования двух ресурсов на рис. 2,а. Ошибки идентифицируются с помощью РП-позиций переключения p_2, p_3, p_4 .



Позиция	Описание
p_1	в подсеть для опроса ресурсов
p_2	проверка на наличие ошибок в ресурсе r_1 и r_2
p_3	проверка на наличие ошибок в ресурсе r_1
p_4	проверка на наличие ошибок в ресурсе r_2
p_7	ошибка ресурса r_1
p_8	ошибка ресурса r_2
p_9	ошибки ресурсов r_1 и r_2

Примечание: При использовании РП-позиций в качестве переключающих при операциях инкапсуляции (соподчинённой иерархической

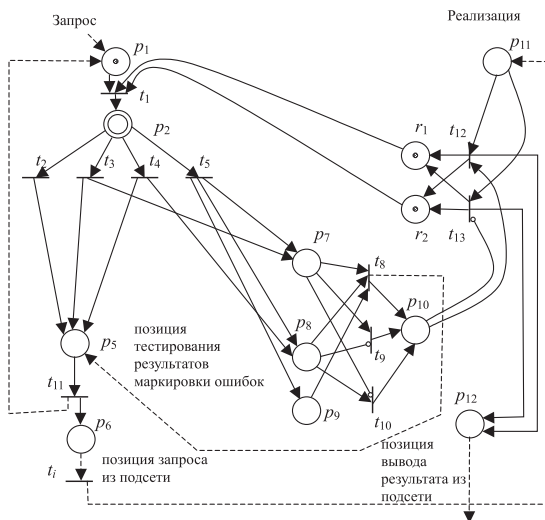
Срабатывания переходов	Ошибки в ресурсах
t_2, t_4	Ошибок нет
t_2, t_5	Ошибка в ресурсе r_1
t_3, t_6	Ошибка в ресурсе r_2
t_3, t_7	Ошибка в обоих ресурсах

субординации с унаследованием нижеуровневыми фрагментами сети свойств верхнеуровневых) в группах ресурсов возможно порождение структуры, примером которой служит подсеть, изображённая на рис. 2,а. Три РП-позиции (p_2, p_3, p_4) отображают тестирование информации об ошибках в ресурсах r_1 и r_2 .

Раскодирование соответствующих действий осуществляется с помощью переходов t_8, t_9 и t_{10} и зависит от количества ассоциированных с этим соответствующих переходов. Иными словами, если переходы прохронометрированы, то принять корректирующие действия для сохранения свойства ограниченности можно путём приостановки срабатывания одного из переходов t_8, t_9 или t_{10} до момента выполнения (срабатывания) одного из переходов t_4, t_5, t_6, t_7 . Вместе с тем, если использовать для данного случая вместо позиций переключений p_2, p_3 и p_4 вариант мультивыбора, как, например, на рис. 2, б, то в этом случае свойства модели системы независимы от количества выполненных переходов. В частности, данный пример иллюстрирует наличие невыявляемых ошибок, которые могут возникнуть в сетевой модели при использовании пошагового решения об использовании РП-позиций, а также при необходимости изучения свойств системы с временными атрибутами в моделях на соответствующих расширениях СП. Подобного феномена “временного тупика”, который очень трудно поддаётся идентификации в моделях сложных систем, можно избежать с помощью И-РВСП-модели.

Активные АП-, решающие РП-позиции ассоциируются с дискретными временными атрибутами, тогда как подсетевые ПСП-позиции имеют, скорее, переменную сущность (ограниченную набором значений), что и позволяет ПСП-позициям реализовать различные пути между их входами и выходами, каждый из которых может иметь разные наборы ассоциированных АП- и РП-позиций. Именно в этом смысле АП- и РП-позиции являются “временными позициями”.

Расширения функции переходов отождествляются с их способностью “хронометрирования” и “событийно-чередующимся поведением”; при этом переход выполняется только в том случае, если на всех входных позициях есть сигналы, а также произойдет событие (или несколько одновременных событий), связанное со специальными переходами. Такими событиями могут быть сенсорные входы, начала или окончания операций и т.п. События, которые могут возбудить переход, классифицируются на: *внутренние* – такие события имеют более прогнозируемую структуру и могут быть квантифицированы значениями стохастических или дискретных временных интервалов; *внешние* – такие события случайны либо беспорядочны, что делает невозможным их квантификацию



Позиция	Описание
p_1	В подсеть для опроса ресурса
p_2	Проверка на наличие ошибок в ресурсах r_1 и r_2
p_7	Ошибка в ресурсе r_1
p_8	Ошибка в ресурсе r_2
p_9	Ошибки в ресурсах r_1 и r_2

Срабатывания переходов	Ошибки в ресурсах
t_2	Ошибок нет
t_3	Ошибка в ресурсе r_1
t_4	Ошибка в ресурсе r_2
t_5	Ошибки в обоих ресурсах

Рис. 2 – Структура подсети для ресурсного запроса и вывода: а) -подход “бинарного выбора”, б) вариант мультивыбора

(здесь необходимо отметить, что те из событий, которые являются внешними для системы, но поддающимися количественному определению и входящими в И-РВСП-модель, считаются внешними).

Переходы, которые инициируются внутренними событиями, называются *внутренне управляемыми переходами* (ВтУП-переходы), а переходы, которые ассоциируются с внешними событиями, – *внешне управляемыми переходами* (ВшУП-переходы). По классической теории СП все переходы, характеризующиеся маркированными входными позициями, считаются годными и потенциально функционирующими. Но с вводом модификации И-РВСП в качестве моделирующего средства для систем управления реального времени определение разрешающего состояния переходов становится процессом нескольких факторов:

обеспечивающая разрешение позиция – условие, при котором все входные позиции перехода И-РВСП соответственно маркированы, так что переход считается способным (готовым) к возбуждению; *обеспечивающее разрешение событие* – разрешающее событие, обусловленное расширением (модификацией) И-РВСП на случай моделирования ДСС с изменяющейся, вследствие появления внешних и внутренних событий, структурой. Таким образом, переход может сработать, только когда это действие обеспечено и позициями, и событиями одновременно. Проиллюстрируем это примером подсети, приведенной на рис. 3.

У всех переходов есть три, связанных с ними, определяющих дискретных периода времени, а именно:

1. *Возможное время* (ВВ-время) перехода t_i - период времени, который начинается, когда все входные позиции перехода промаркированы, т.е. переход фактически уже может выполняться, и заканчивается, когда происходят связанные с маркировкой события. Для ВтУП-переходов существует общее событие u , которое связано с ВВ-временем, тогда как у ВшУП-переходов есть добавление к u – случайно происходящее событие v , которое связано с ВВ-временем (учитывая, что $v \in V$, не все ВшУП-переходы управляются простым случайным событием. Некоторые случайные события могут быть сгенерированы диспетчером/анализатором).

Примечания: 1) e_{10}, e_{11} - сенсорно управляемые события; 2) сочетание событий - булевы операторы “ \cap ” (И), “ \cup ” (ИЛИ).

Во время реализации события соответствующий ему переход считается “возможным”. Событие u происходит периодически, и при каждом таком явлении доступными оказываются все те ВтУП-переходы, которые удовлетворили условия ограничений в их входных позициях. По умолчанию значение ВВ-времени равно \emptyset ;

2. *Время пребывания в системе* (ВПС-время) для перехода t_i – максимальный период времени, связанный с любой входной позицией для перехода t_i , и характеризуется длительностью операции, отражаемой входной позицией. В зависимости от входных позиций p_i к переходу t_i ($p_i \in P$ и $P = \bullet(t_i)$), существуют два типа значений t_i по умолчанию для ВПС-времени:

а) ВПС=0. Это случай, когда подсетевой ПСП-, АП- или РП-позиций

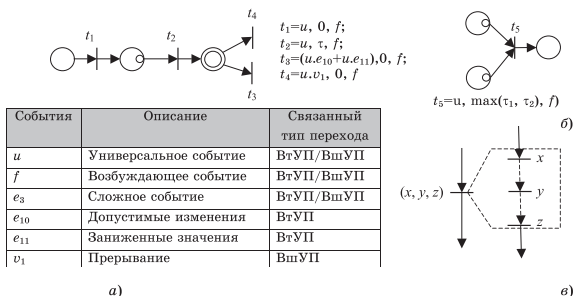


Рис. 3 – Фрагменты подмоделей ДСС с изменяющейся структурой: а) - пример 1; б) - пример 2; в) структура хронометрирующего перехода (где x, y, z – три периода времени перед актуализацией хронометрирующего перехода).

не существует, и входной позицией для перехода является (см. рис. 3, а): $\exists p_i, p_i \in P_k : k \in \{\text{АП - , РП - , ПСП - позиции}\}$, то есть $P_k \cap \bullet(t_i) = \emptyset$, где $P_{\text{ап}}$ – совокупность всех АП-позиций, $P_{\text{рп}}$ – совокупность всех РП-позиций и $P_{\text{псп}}$ – совокупность всех ПСП-позиций подсети;

б) $\text{ВПС}=\tau$. Это случай, когда у перехода существует хотя бы одна входная позиция, которая является либо позицией подсети, либо активной позицией, либо решающей, причём, τ - максимальное время, связанное с какой-либо входной позицией перехода (см.рис.3, б) $\exists p_i, p_i \in P_k : k \in \{\text{АП - , РП - , ПСП - позиции}\}$, то есть $P_k \cap \bullet(t_i) \neq \emptyset$. Значение ВПС-времени определяется временем выполнения и зависит от совокупности входного набора временных позиций. Основанием для такого утверждения служит то, что если устранение ошибок встроено в позицию, например, S_p подсети, тогда время τ_p , связанное с этой позицией, является динамически переменным. Как уже отмечалось ранее, это возможно в связи с существованием сложных путей прохождения между входом в подсеть и выходами через различные наборы временных мест.

3. *Рабочее время* (РВ-время). Это время определяет период ожидания на реализацию события f перед тем, как сработает переход, в результате чего из входных позиций удаляются метки, а в выходные позиции - добавляются. По умолчанию значение РВ=1. Событие f происходит периодически, и для отдельного перехода может осуществляться в различные моменты времени 1 или $\tau + 1$ (в зависимости от значения РВ-времени). Если у перехода имеется больше, чем одно место входа (каждое из которых связано с различными операциями), тогда f может представлять собой композиционное событие (для представления композиционных событий обычно используются дополнительные к “И” и “ИЛИ” булевы операторы), которое происходит только в случае, если произошло одно из соответствующих событий, связанное с такими операциями.

Общее отображение хронометрирующего перехода приведено на

рис. 3, в.

Можно также отметить тип *мгновенных переходов* (МП-переходы), которые не определены как отдельный класс, но выделены в особый случай ВтУП-переходов, ибо связаны с последними как значениями по умолчанию (временем пребывания в системе ($H = 0$)), так и временем работы (управляемые только событиями u и f).

В И-РВСП-модели все ВтУП-переходы связаны со всеми типами позиций, тогда как ВшУП-переходы связаны только с ПП- или РП-позициями, которые инициируют переход к состоянию системы под влиянием некоторых внешних случайных переменных. Переход t_i может не выполняться за отведенный на это период времени, что связано с одной из следующих причин: 1) переход t_i больше не возможен – это означает, что событие e_j , связанное с переходом t_j , который принадлежит тому же набору конфликта Λ_s , произошло раньше события e_i , связанного с переходом t_i (случай ВВ-времени); 2) переход t_i до сих пор возможен, но событие, связанное с этим переходом, не произошло (случай ВПС-времени). Это указывает на ситуацию сбоя, которая предотвратила происхождение события и инициировала короткую on-line диагностику сбоя. Реальные конфликты между двумя переходами существуют только в том случае, если они оба доступны: и позиции, и событию. ВПС-время пребывания в системе и ВВ-время выполнения предназначены для четкого разграничения трех вышеуказанных уровней времени при выполнении перехода. Некоторые механизмы СП легко позволяют обеспечивать согласования назначений времени в переходах/позициях СП, но, в то же время, не позволяют специфицировать особенности события в переходах.

Наконец, следует обратить внимание на принятую далее визуализацию различий в отображении схемных решений на иллюстрационных представлениях: *штрихованные* и *сплошные*. Сплошные отображения являются важной частью фактического описания системы. Штрихованные (или временные) – это отображения, которые генерируются во время выполнения операций в системе. Штрихованные отображения обеспечивают квази-живую модель И-РВСП. Это не физические части или модели данной системы, а они возникают во время операций системы (благодаря ПИС-позициям, либо в связи с промежуточными операциями в сети), маркируя таким образом немаркированные позиции. Такой подход в отображении полезен для упрощения анализа сети (анализа достижимости подсети, отсутствия тупиковых состояний и т.д., так как они предопределяют свойство “живости”).

Модельное представление структуры системы

Как показано на рис. 4, а, система имеет трехуровневую иерархическую структуру задач: организационную, координационную и исполнительную. Исходный [4] и модифицированный координационные уровни (КУ) представлены, на рис. 4, б и в, соответственно. Коммуникационные связи трёх уровней исходной и модифицированной структур отображены на рис. 4, г.

Модифицированная топология КУ состоит из двух отдельных вертикальных уровней: 1) *диспетчер / анализатор* – этот уровень осуществляет связь между организационным уровнем (ОУ) и базовым И-РВСП-контроллером и наблюдает за операциями, т.е. анализирует ошибки в результате реализации алгоритма по предварительной их классификации; 2) *базовый И-РВСП-контроллер*, с помощью которого реализуется модельное представление системы. Такая (изначальная) модель системы используется для просмотра её ожидаемых действий. В свою очередь, И-РВСП-контроллер включает в себя два подуровня: верхний (ВУК) и нижний (НУК) уровни контроля и координации, каждый из которых связан с разными компонентами системы. Диспетчер/анализатор является основой И-РВСП-контроллера и осуществляет анализ ошибок, устранение их и поддержание системы, а также выполняет роль связующего звена между ОУ и И-РВСП-контроллером. Связь ВУК-НУК-уровней (см. рис. 4, г) в И-РВСП трактуется так: промаркированные НУК-уровнем позиции, указывающие на необходимость координации при устранении ошибок; переходы, которые являются входами этих позиций; переходы, которые восстанавливают нормальное функционирование модели после восстановления ошибок.

Потенциальные ошибки системы идентифицируются с помощью сенсорного ввода и могут быть классифицированы как поддающиеся, не поддающиеся устранению, и не классифицируемые. *Поддающиеся устранению* классифицируются также как локальные устранимые (ЛЮО) и взаимно устранимые (ВУО) ошибки. Ошибки, *не поддающиеся устранению*, называют фатальными (ФО). *Не классифицируемые* ошибки (фактически такие, о которых нам предварительно не известно, и поэтому И-РВСП-модель системы защищена от них мерами предосторожности) и *случайно генерируемые* ошибки происходят в режиме on-line и позднее могут быть переклассифицированы как ЛЮО-, ВУО-, ФО-ошибки.

Идентификация ошибок всегда происходит на НУК-уровне. Классификация ошибок, по которым была исходная (априорная) информация (это учтено при создании И-РВСП), осуществляется в процессе И-РВСП-моделирования.

* - в И-РВСП-модели системы это состояние перехода исключается. Пунктирные линии указывают на состояние перехода, который инициируется диспетчером/анализатором внешне управляемыми переходами (ВшУП)

Ошибки, не поддающиеся классификации, анализируются и затем классифицируются диспетчером/анализатором. На НУК-уровне ЛЮО-ошибки обеспечиваются ресурсами, связанными с одним из координаторов, тогда как ВУО-ошибки нуждаются во множественных ресурсах от разных координаторов и обеспечиваются с помощью ВУК-уровня. В соответствии с И-РВСП-подходом проектирования, виды операций системы могут быть проклассифицированы в одно из пяти состояний, изображённых на рис. 5.

Ресурсы, которые связаны с различными координаторами системы,

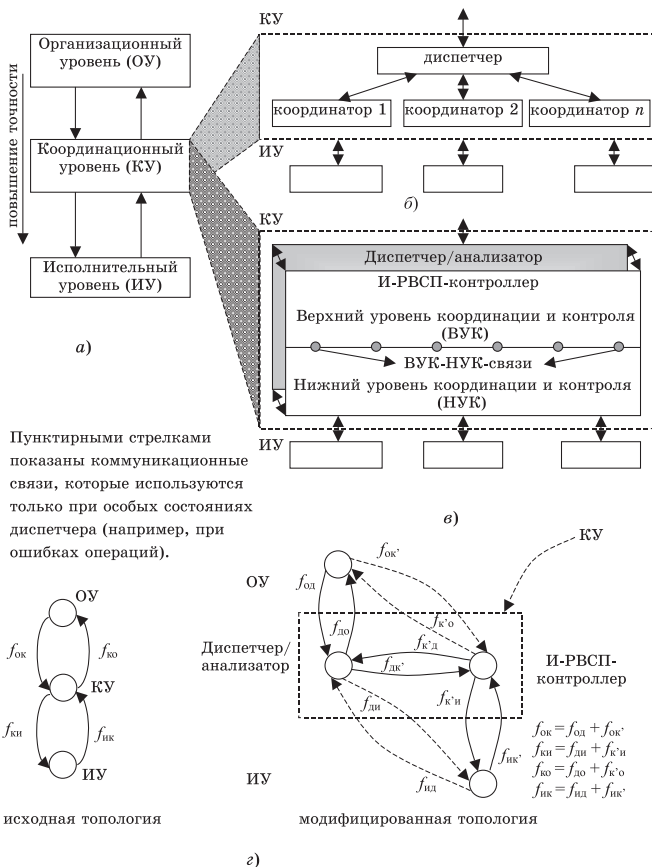


Рис. 4 – Структурная схема координационного уровня: а) - структура системы; б) исходная топология координационного уровня; в) – модифицированная топология координационного уровня; г) - коммуникационные связи.

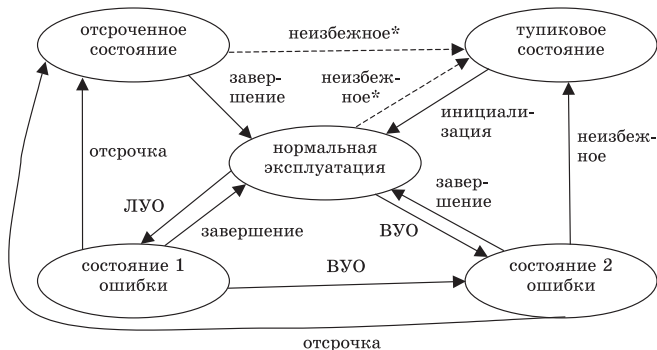


Рис. 5 – Состояния ошибок системы

выполняют операции, которые могут быть сгруппированы в три непересекающихся множества: обычные операции, ЛЮО-операции и МУО-операции. Описанное выше представление состояний системы исходит, в основном, из потенциальных ошибок, природа которых заранее известна. Вместе с тем, И-РВСП-модель может быть использована для представления процесса устранения всех видов рассмотренных ошибок.



Рис. 6 – Общая модель ошибки

Кроме мониторинга нормального функционирования системы, НУК-уровень производит также наблюдение за восстановлением ЛУО-ошибок. В том случае, если ЛУО-ошибка не связана с НУК-уровнем, она увязывается с ВУК-уровнем (через ВУК-НУК-коммуникационные связи) с помощью ВУО-запроса, инициирование которого вызывается либо неразрешимостью внезапно произошедшей ЛУО-ошибки, либо слишком большим количеством ЛУО-ошибок в реально функционирующей системе.

Возникновение ЛУО-ошибки отображается в ВУК-уровне, так как его позиции и переходы ассоциируются с возникновением ЛУО-ошибок как абстрагирование высокого уровня (позиция подсети) на ВУК-уровне. Восстановление ВУО-ошибки происходит на ВУК-уровне, ибо там осуществляется координация ресурсов для восстановления ошибки. Когда система достигает своего стабильного функционирования, практически все ошибки могут быть проклассифицированы на поддающиеся и не поддающиеся устранению. Общая модель ошибки представлена на рис. 6. Диспетчер/анализатор выполняет роль контрольно-поверочного устройства операций реально функционирующей системы и И-РВСП-базовой её модели. Если И-РВСП-модель представлена только выполнимыми маркировками, то фактически существующая система может включать в себя как выполнимые, так и невыполнимые маркировки. *Реальные* (выполнимые) *маркировки* соответствуют состояниям системы, которые связаны с временными переходами (входные позиции ассоциированы с временным нагружением), а *нереальные* (исчезающие) *маркировки* соответствуют состояниям системы, связанным с быстродействующими (мгновенными) переходами. Диспетчер/анализатор состоит в основном из четырех главных модулей, каждый из которых может быть, в свою очередь, подразделён на подмодули, в зависимости от сложности реализации. Главной функцией этих модулей является координация контрольных операций в режиме реального времени. В случае наличия несоответствия между операционным состоянием фактически существующей системы и представлением её И-РВСП-моделью, инициируется анализ ошибок. Если позднее обнаруживается “известная” ошибка программного обеспечения, нормальное функционирование системы восстанавливается в режиме on-line (по мере устранения уже определённых ошибок И-РВСП-моделью).

Таким образом, через какой-то промежуток времени становятся известными все доступные маркировки системы. Эти маркировки могут соответствовать ошибкам данной системы или нереальным маркировкам И-РВСП-модели системы. В случае других “неизвестных” ошибок системы (которые наблюдались, но не зарегистрированы И-РВСП-моделью), в режиме on-line выполняется восстановление (анализ ошибки), если этот процесс связан с заранее известной определенной маркировкой ошибки. В случае сложных ошибок функционирующая система останавливается, и затем её состояние отображается условиями маркировки И-РВСП-модели. Эта маркировка наблюдается диспетчером/анализатором и передаётся на организационный уровень. Такой процесс упрощает незави-

симый анализ ошибок, задавая, таким образом, начальную точку алгоритма независимого анализа ошибки на организационном уровне.

Выводы

Предложена нисходящая иерархическая структура достижимой базовой И-РВСП-модели для любой иерархической ДСС. Подробно рассмотрена двухуровневая топология модели ДСС с функционированием её координатного уровня в режиме on-line: предложены и обсуждены классифицирующие группирования позиций и переходов при диагностировании ошибок в моделируемых дискретных системах. При этом с помощью диспетчера/анализатора можно как абстрагировать, так и уточнять особенности функционирования ДСС.

Другим важным достоинствами основанного на И-РВСП-подходе системного моделирования является возможность легкой адаптации к системам с параллельными процессами путём создания их адекватных моделей, когда различные ресурсы системы могут выполнять независимые операции для достижения общей цели. Пример такой адаптации - присвоение приоритетного правила срабатывания переходам, принадлежащим к конфликтному множеству, что позволяет переходам с активизированными дугами иметь более высокий приоритет.

Литература

1. Модифікація апарату сіток Петрі і моделювання складних комп'ютерно-інтегрованих систем з ієрархічною семантикою подання процесів / Кузьмін П.В., Лавров О.А., Лісовиченко О.І., Остапченко К.Б., Ямпольський Л.С.// Вісник ЖІТІ. - 1998. - 8.-С. 80-92.
2. Управление дискретными процессами в ГПС / Л.С.Ямпольский, З.Банашак, К.Хасегава, Б.Крог, К. Такахаша, А.В.Борусан. – К.: Техника; Вроцлав: Изд-во Вроцлав. политехн. ин-га; Токио: Токосё.- 1992.- 251 с.
3. Lavrov A., Jampolskiy L. Configuration Synthesis and Refinement: an Approach to Simulation of Heterogeneous Distributed Systems // УСИМ.- 2000.- 3.-P. 11-17.
4. Saridis, G. N. Intelligent Robotic Control// IEEE Transactions on Automatic and Control, Vol. AC-28, No. 5, 1983.
5. Valavanis, K. P. On the Hierarchical Modeling Analysis and Simulation of Flexible Manufacturing Systems with Extended Petri Nets // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.20.- 1.-Jan/Feb.- 1990.-P94-100