

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 681.3.06

А.А.Болтянский, В.К.Беликов
СТРУКТУРИРОВАННЫЕ СЕТИ ПЕТРИ.
НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
(г. Куйбышев)

Структурированные сети, представленные на нескольких уровнях абстракции, позволяют существенно упростить модель сложной динамической системы, делая ее более наглядной, естественной для пользователя.

На простых примерах описания динамических моделей показаны новые возможности модифицированных сетей Петри в сравнении с традиционными методами ее представления. Приводится сопоставление сетей и дается краткий анализ структурированного подхода.

Для описания дискретных процессов успешно используются сети Петри, являющиеся двудольными ориентированными мультиграфами с двумя типами вершин: позициями и переходами /1, 2/. Позиции соответствуют условиям дискретного процесса, а наличие фишки в позиции определяет выполнение условия. Переход моделирует событие, т.е. смену условий. Структура сети Петри определяется входными и выходными функциями переходов. При моделировании процесса обычно задается начальная маркировка – распределение фишек в позициях сети.

Возможности моделирования параллельных процессов, наглядность представления, широкий диапазон решаемых задач в самых различных областях позволяет применять сети Петри для моделирования динамических систем и исследования динамических характеристик процессов. Расширение области применения сетей Петри вызывает необходимость разработки их теории.

Авторы при решении ряда задач динамического анализа автоматизированных систем обработки данных столкнулись с трудностями практического применения сетей Петри. Стала очевидна оправданность замечаний ряда авторов, которые указывали на недостатки сетей Петри при их практическом использовании /3-6/.

рель нагрузочных способностей, контроль отдельных цепей, выбор элементов и т.п.).

4. Стимулируется применение технологических приемов и дисциплинируется работа разработчика, появляется возможность накопления в базе данных ЭВМ личного и коллективного опыта в виде заготовок, шаблонов, типовых решений и т.п., что в свою очередь способствует созданию ощущения комфортной профессиональной микросреды.

5. Изготовление конечной документации на изделие оказывается практически полностью автоматизированным.

Фактически речь идет о создании специализированного рабочего места разработчика РЗА, обеспечивающего:

создание семантического изображения ПС и его редактирование в режиме активного диалога;

хранение ПС в базе данных и удобный доступ к ним;

вывод чертежей ПС на различные устройства;

интерфейс данных для выполнения прикладных программ: контроль, моделирование, размещение, трассировка и др.

Концептуальной основой СИРИС является разделение функций и организация взаимодействия человека с ЭВМ, имитирующие "ручные" методы работы квалифицированного разработчика электронных устройств, а именно: ЭВМ должна заменить ему бумагу и карандаш, ластик, ножницы и клей, а также предоставить в его распоряжение накопленный опыт в виде типовых решений.

Функции диалогового редактирования ПС должны использовать единые синтаксические и семантические правила, причем их не надо изобретать, поскольку имеется стандарт представления ПС.

Изображение ПС состоит из условных графических обозначений (синтаксис) различных объектов (семантика): элементов и соединений, образующих эквивалентные цепи. Кроме того, могут использоваться каналы соединений, называемые жгутами. Любой объект может быть снабжен либо поясняющей надписью, передающей важную информацию (например, номер вывода), либо комментарий (рисунок).

Очевидно, что подобное изображение ПС допускает автоматическую интерпретацию и поэтому главная задача разработки СИРИС заключается в определении удобного набора функций и эффективной программно-аппаратной реализации.

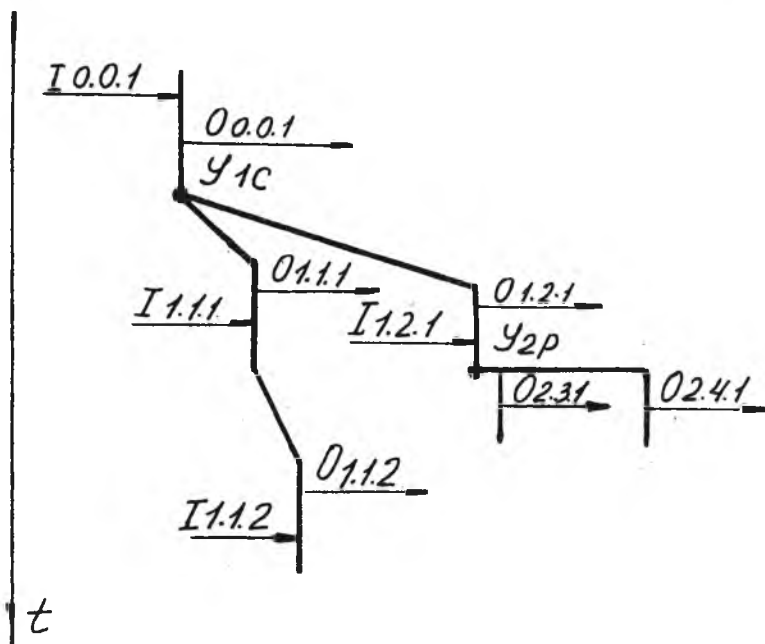
По аналогии с ручной технологией вводится понятие носителя изображения - лист. Схема может располагаться на нескольких листах,

Авторы предлагают модифицировать сети Петри с тем, чтобы исключить или по крайней мере уменьшить влияние факторов, сдерживающих конструктивное использование сетей при решении практических задач. На начальном этапе изменены основные категории сети и форма ее представления в виде структурированной модели, которая выделяет важнейшие параметры на каждом из уровней моделирования.

Модифицированная сеть задается пятеркой:

(I, O, B, P, C) ,

где I - множество входных сообщений, O - множество выходных сообщений, B - множество ветвей, P - множество узлов типа P , C - множество узлов типа C .



Р и с. 1. Пример модифицированной сети Петри

Графическое представление модифицированной сети дано на рис. 1. Категории - входное и выходное сообщение, являются многоаспектными понятиями. Их характеризует: семантика, пространствен-

ный и временной тип, структура, связность. Спецификации сообщений позволяют строить модели данных более низких уровней, переходя с одного уровня на другой с помощью детализации модели, вплоть до уровня команд и операций. Все построенные модели являются ступенями иерархии описания процесса и сохраняют преемственность. Основной категорией модели при описании динамики процесса на основе понятия "сообщение" является время, которое в модифицированных сетях вводится как основной системный параметр. При моделировании необходимо различать процессы, управляемые временными параметрами — синхронизируемые и процессы асинхронные, построенные на логической основе. Сети Петри позволяют наглядно моделировать процессы второго типа, а модифицированные сети — и те и другие. Моделирование синхронизируемых процессов приобретает особое значение при синтезе и анализе систем реального времени, параллельных процессов и систем с распределенными ресурсами. В модифицированных сетях каждое сообщение может быть дополнено временным параметром: интервалом или моментом времени. На графе сообщения обозначаются направленными стрелками. Каждое входное и выходное сообщение получает свое личное индексируемое имя: $Ii, j, q; Oj, j, q$, где I, O — имена сообщений, i — индекс, определяющий место сообщения относительно предыдущего узла, j — индекс ветви, в которую входит или выходит сообщение, q — номер сообщения в этой ветви. Индексация облегчает построение спецификаций, последующий анализ модели и ее детализацию.

Категорией связности сообщений служат введенные в модифицированной сети ветви, узлы типа σ и типа ρ . На графе ветви обозначаются ломаными линиями. Моменты или интервалы прихода (выхода) сообщений фиксируются точками на ветвях. Эти точки обозначаются для входных сообщений как t или Δt , а для выходных как τ или $\Delta \tau$. Точка на определенном уровне анализа модели может характеризовать временной интервал или момент, с этим связано использование двух типов обозначения, моменты обозначаются t и τ , а интервалы Δt и $\Delta \tau$. Ветвь как бы связывает в единое целое входные и выходные сообщения, моделирующие основные этапы развития процесса во времени.

Ветви не могут моделировать ветвление процесса. Для этого вводятся специальные категории "узлы". Узел типа ρ (*раз*) разветвляет процесс на несколько параллельных подпроцессов. Узел типа σ (*случай*)

моделирует выбор альтернативных направлений развития процесса. На графе разные узлы обозначаются по-разному (см. рис. I), рядом с узлами ставятся индексируемые символы, определяющие их тип. Ветви и узлы нумеруются по ходу развития сети.

Достоинством модифицированных сетей является возможность построения временных шкал, связанных с ветвями графа.

Сложности использования сетей Петри заключаются в следующем. Модель Петри не структурирована – это приводит к необходимости использования в самом начале решения задачи большого объема априорной информации, которая, как правило, в реальных условиях не доступна исследователю. Особенно этот недостаток проявляется при моделировании процессов в задачах синтеза или проектирования сложных динамических систем. Действительно, для представления системы сети Петри, основанной на понятиях событие и условие, необходимо сформулировать все события, условия и их связь /7/.

Для того чтобы устранить этот недостаток, следует представить сеть на нескольких уровнях, выделив на каждом из них те факторы, без которых дальнейшее решение невозможно. Естественно, при этом необходимо обосновать конструктивность разбиения модели на уровни и определить целевые задачи на каждом из них.

В каждой предметной области сети Петри строятся с использованием специальной терминологии /8/, что лишает модель общности. Вместе с тем любая задача имеет некоторые общие информационные свойства, которые инвариантны к предметной области. В модифицированной сети вместо позиций и переходов введены более гибкие информационные категории "входное и выходное сообщение". При этом от пользователя требуется ясное определение основной цели моделирования. Использование таких категорий, которые в определенном смысле являются обобщением понятий позиция, переход, входная и выходная функции, существенно упрощают начальный этап построения сети.

Между сетями Петри, моделирующими процесс с разной степенью детализации, не существует строгой преемственности, что позволяет строить иерархические модели систем и адекватно описывать развитие процессов во времени. Модифицированная сеть предусматривает естественный переход от одной модели при ее детализации к другой, строящейся для решения других задач, соответствующих следующему уровню моделирования. Возможен итерационный процесс.

Сеть Петри по существу дает "моментальный снимок" процесса и

не позволяет исследовать его алгоритмическую структуру, во многих случаях те средства и языковые конструкции, которые предлагаются для моделирования динамики, неудобны, не наглядны /4/.

Время – важнейший параметр любого динамического процесса /9/. Однако в сети Петри оно не является атрибутивным параметром. Модель Петри может быть косвенно связана со временем, но эта связь не наглядна и сложно используется при решении задач. Модифицированная сеть позволяет наглядно моделировать как асинхронные, так и синхронные процессы.

Модифицированная сеть Петри является попыткой преодолеть сложности при использовании весьма перспективного и интересного аппарата, который в последние годы активно и успешно развивается.

Рассмотрим общность и различия сетей Петри и модифицированных сетей на примерах.

Питерсон в работе /1/ приводит модель сети Петри для моделирования вычислительной системы, которая обрабатывает задания, поступающие с устройства ввода и выводит результаты на устройство вывода. Когда процессор свободен и задание выдано устройством ввода, процессор начинает его обработку. Когда задание выполнено, оно посылается в устройство вывода: процессор либо ждет прихода нового задания, либо продолжает обрабатывать другое, поступившее вновь.

Условиями этой системы для сети Петри являются /1/:

процессор свободен,

задание ждет,

задание обрабатывается,

задание ожидает вывода.

Сеть фиксирует следующие события:

задание помещается во входную очередь,

начало выполнения задания,

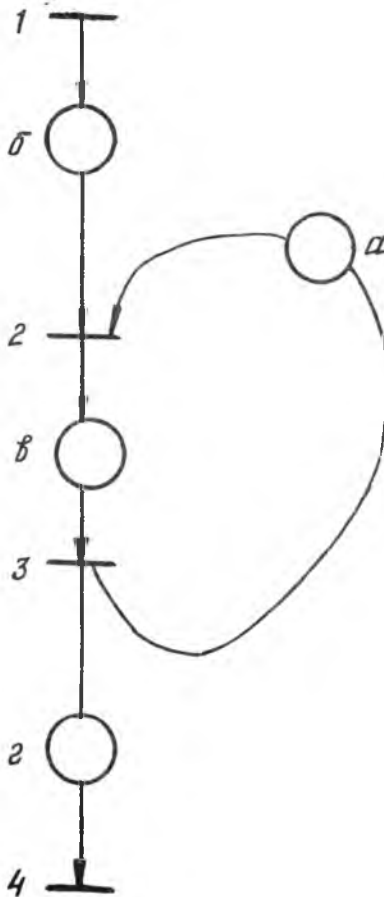
завершение выполнения задания,

задание выводится.

Для удобства построения сети Петри составляем таблицу событий и их пред- и послеусловий (табл. I). Такое представление моделируется сетью Петри (рис.2). Проделаем эту систему модифицированной сетью Петри. Рассмотрим построение модифицированной сети. Решая задачу с помощью сети Петри, мы сталкиваемся с некоторыми неоднозначностями, например, в какие моменты времени и по каким условиям происходит моделируемое событие, какие субъекты участвуют в про-

Т а б л и ц а I

События	Предусловия	Послеусловия
1	-	б
2	а, б	в
3	в	г, а
4	г	-



Р и с. 2. Сеть Петри, моделирующая вычислительную систему

процессе обмена, какими они наделяются правами, т.е. могут ли они управлять событиями и какими, как связаны между собой возможные варианты исхода событий.

Временной параметр в сетях Петри отсутствует официально, все же основные неопределенности вызваны тем, что при определении задачи моделирования фиксируется некое статическое состояние и не определяется четко последовательность событий.

В модифицированных сетях сделана попытка устранить возникающие неоднозначности. Сформулируем первое правило построения модели: с самого начала, после постановки задачи, необходимо строго определить субъекты обмена данных и указать возможности каждого из них и требования к нему. В категориях - входное и выходное сообщение - это правило выполнимо, более того, заставляет разрабатывать модели, акцентирующие внима-

ние на решениях строго поставленных задач и исключать неоднозначности.

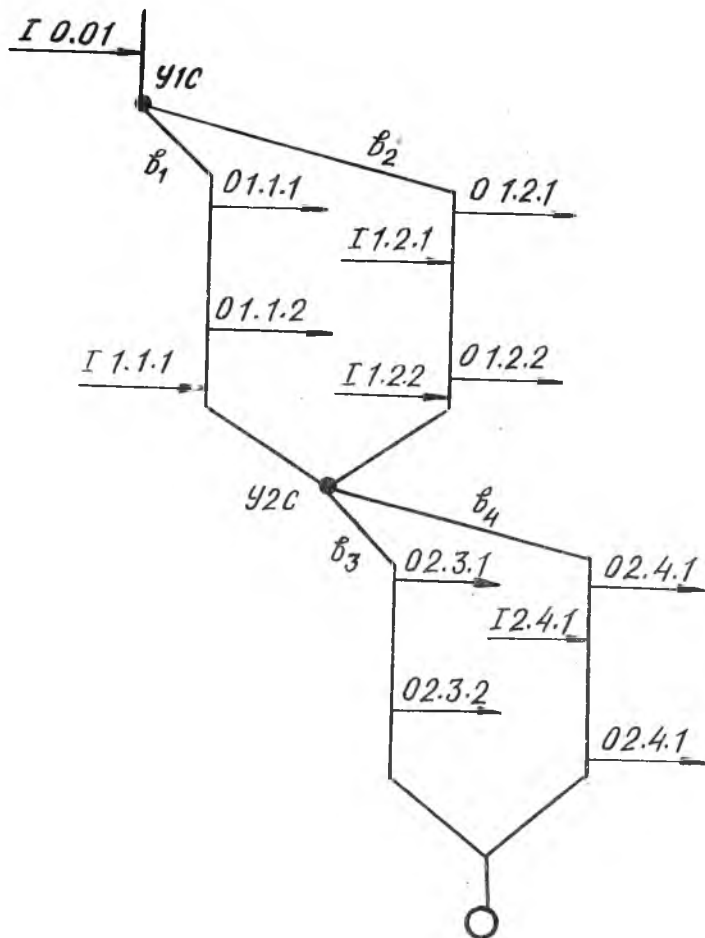
В обмене участвуют четыре субъекта: 1 - оператор, 2 - процесс ввода, 3 - процессор, 4 - процесс вывода. Определение возможных вариантов следования сообщений является основной задачей построения модифицированной сети на начальном уровне. Все сообщения индексируются строго определенным образом, как об этом говорилось ранее.

Всем процессом управляет оператор, выдающий сообщения, которые являются входными для всех остальных субъектов. Сам оператор запускается внешним сообщением $\Gamma 0.0.1$, по которому также начинается работа процесс ввода. Процесс ввода сообщает о том, что задание введено и в зависимости от состояния процессора: обрабатывается $O 1.1.1$, если процессор свободен или $O 1.2.1$, если задание ожидает освобождения процессора, развитие процесса моделирует узел $Ус$. Для запуска процесса обработки после освобождения процессора необходимо сообщение оператора $\Gamma 1.2.1$. По окончании обработки процессор выдает сообщения $O 1.1.2$ или $O 1.2.2$, далее оператор выдает сообщения процессу вывода $\Gamma 1.1.1$ или $\Gamma 1.2.2$, после поступления которых альтернативные ветви объединяются в одну, так как дальнейший процесс в них будет протекать одинаково. Вывод может проходить по двум альтернативным путям: если устройство вывода свободно, то оно выдает сообщение о начале вывода $O 2.3.1$, если устройство вывода занято, оно выдает сообщение $O 2.4.1$, в этом случае задание ожидает вывода и для его начала необходимо сообщение оператора

$\Gamma 2.4.1$. Сообщение об окончании вывода $O 2.3.2$ или $O 2.4.2$ заключает процесс. Для удобства моделирования составляют таблицу входных и выходных сообщений субъектов (табл. 2). По таблице легко построить модифицированную сеть, которая показана на рис. 3.

Т а б л и ц а 2

Субъект обмена	Сообщения	
	Входные	Выходные
1	$\Gamma 0.0.1$	$\Gamma 1.1.1, \Gamma 1.2.2, \Gamma 1.2.1, \Gamma 2.4.1$
2	$\Gamma 0.0.1$	$O 1.1.1, O 1.2.1$
3	$\Gamma 1.2.1$	$O 1.1.2, O 1.2.2$
4	$\Gamma 1.1.1, \Gamma 1.2.2, \Gamma 2.4.1$	$O 2.3.1, O 2.3.2, O 2.4.1, O 2.4.2$



Р и с. 3. Модифицированная сеть, моделирующая вычислительную систему

Переход от абстрактных понятий – событие и условие к единым, инвариантным к предметной области информационным категориям – сообщение, процесс и субъект обмена, позволяет устранить неоднозначность, делает модель более наглядной и четкой. Кроме того, появление событий и выдача сообщений в модели могут сопровождаться указанием моментов и интервалов времени, что необходимо для построения сети ре-

ального времени, параллельных процессов и описания алгоритмических структур. К примеру, описанная выше модель может быть значительно усложнена, если дополнить ее временными ограничениями появления событий и сообщений.

Интересную логическую задачу предложил Дейкстра в [10]. Пять мудрецов сидят за круглым столом, на котором много блюд китайской кухни, и попеременно то думают, то едят. Между соседями лежит одна палочка для еды, однако для приема пищи необходимо две палочки, следовательно, каждый мудрец должен для еды взять палочки слева и справа от себя. Для решения задачи необходимо рассчитать последовательность, в которой мудрецы должны есть, чтобы равномерно питаться, не давая повода для обиды друг другу.

В [1] Питерсон построил сеть Петри, которая моделирует эту задачу, однако, несмотря на наглядность модели, решить задачу с ее помощью достаточно сложно.

Более конструктивно и наглядно задачу можно представить модифицированной сетью. Более того, кроме решения задачи модифицированная сеть позволяет вводить дополнительные условия и временные ограничения.

Из условия задачи можно определить, что одновременно могут есть два мудреца, не являющиеся соседями, так как передавать палочки нельзя. При этом всегда одна из палочек будет свободна. Чтобы пять мудрецов ели равномерно по двое за такт, нужно пять тактов приема пищи, которые должны создавать цикл, за который каждый мудрец должен есть два раза.

Пусть еду в первой паре начинает первый мудрец, так как любой другой вариант не изменяет логику решения задачи. Для начала еды необходимо сообщение о том, что все палочки лежат на местах $10.0.1$; при этом выходное сообщение $0.0.1$ говорит о том, что все мудрецы думают и готовы к еде. В дальнейшем, для наглядности, будем присваивать выходным сообщениям имена типа m, n , где m и n номера мудрецов, которые едят; входным сообщениям не будем присваивать имен, так как все они свидетельствуют об окончании еды обедающих мудрецов и освобождении палочек. Еду могут начать 1-й и 3-й или 1-й и 4-й мудрецы, выбор решения из этих альтернатив моделирует узел $41c$. Рассмотрим ветвь, образованную первой альтернативой. По окончании еды 1-й и 3-й мудрецы освобождают палочки, и приняться за еду могут 2-й и 4-й или 2-й и 5-й мудрецы, выбор из этих равно-

сильных альтернатив осуществляет узел *У2с*. В свою очередь, эти альтернативы порождают дальнейшее ветвление процесса, но уже с третьего такта можно производить отсечение альтернатив, не соответствующих справедливому распределению материальных благ: в одном цикле два мудреца не могут есть вместе более одного раза, так как в противном случае некоторые мудрецы будут незаслуженно долго ожидать своей очереди. Так, для узла *У4с* отсекается альтернатива I.3, так как она уже встречалась на первом шаге. Аналогично происходит отсечение в узлах *У5с* и *У14с*.

Рассматривая модифицированную сеть, показанную на рис. 4, можно проследить закономерность: если на *n*-м шаге два мудреца ели вместе, то один из них должен есть затем через один шаг, а другой — через два шага. Из этого следует, что из каждой начальной альтернативы существует два пути решения задачи, следовательно, их будет 4 для всей задачи.

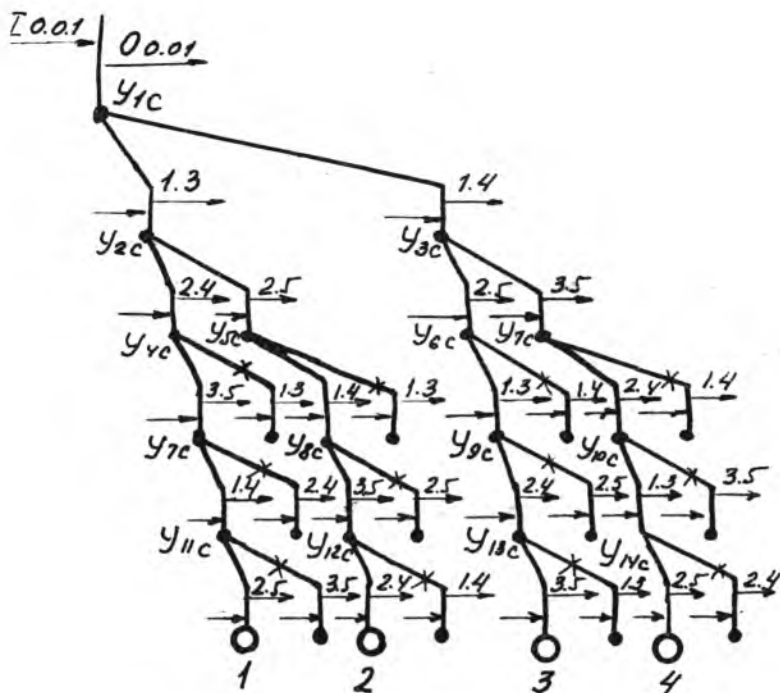
Ветви после узлов *У11с-У14с* замыкаются на узел *У1с*, т.е. система возвращается в начальное состояние: все мудрецы за цикл по два раза ели, палочки для еды вновь свободны. Однако последующее развитие процесса поглощения пищи будет определяться предысторией процесса, от чего будет зависеть выбор альтернатив. В соответствии с требованием равномерности принятия пищи каждое из четырех решений со второго прохода цикла замкнется на себя. В этом случае каждый мудрец будет есть через 1 и 2 такта, которые будут последовательно чередоваться ...I-2-I-2-I-2..., это обеспечивает равномерное питание все компании.

Краткое сопоставление модифицированной и обычной сети Петри дает основание сделать следующие выводы.

В ы в о ы

Структурирование модели с выделением на начальном этапе таких категорий, как входное и выходное сообщение, ветви, альтернативные и параллельные узлы, позволяют более четко и строго формулировать цель моделирования и условия задачи, вводить временной фактор как основной, атрибутивный параметр, строить на высоком уровне абстракции алгоритмическую структуру моделируемых процессов, формировать начальную спецификацию циркулирующей в системе информации.

Переход на более общие информационные категории, перечисленные выше, позволяет строить модели, инвариантные к предметной области, и делает эти модели общезначимыми и сопоставимыми.



Р и с. 4. Решение задачи об обедающих мудрецах с помощью модифицированной сети

Модифицированные сети могут представлять собой разные по форме модели, естественным образом связанные между собой и характеризующие различные аспекты развития процессов во времени.

Библиографический список

1. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. - М.: Мир, 1984. - 264 с.
2. Котов В.Е. Сети Петри. - М.: Наука, 1984. - 160 с.
3. Kosaraju S. Limitation of Dijkstra's semaphore primitives and Petri nets, *Operating Systems Review*, 1973, 7, No. 4, p.122-126.

4. Crespi-Reghizzi S., Mandrioli D., *Petri nets and Commutative Grammars, Interel Report 74-5, Laboratorio die Cocolatori, Istituto di Electtro-technica ed Elektronika del Politecnio di Milano, Italy, 1974, 80p.*

5. Moe J.D. *Nets in modeling and simulation. "Lect. Notes Comput. Sci", 1980, 84, p. 347-368.*

6. *The non-sequential Behaviour of Petri nets. Coltz U., Rezig W., "Inf. and Contr.", 1984, 57, No. 2-3, p. 125-147.*

7. Holt A., Commoner F., *Events and Condition. Record of the Project MAC, N. Y.: ACM, 1970, p. 1-52.*

8. Zuse K. *Petri-nets from the engineer's view-point. Lecture 1 "Lect. Notes Comput. Sci.", 1980, 84, p. 441-449.*

9. Цифровая имитация автоматизированных систем /А.А.Болтянский, В.А.Виттих и др. - М.: Наука, 1983. - 263 с.

10. *Dijkstra E.W. Cooperating sequential processes. - In: Programming Languages. N. Y.: Academic Press, 1968, p. 43-112.*

УДК 658.512.2.011.56

В.П.Дерябкин, В.В.Бойко

ФОРМАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ
И АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

(г. Куйбышев)

АСНИ и АСУ ТП, рассматриваемые как системы управления процессом исследования (испытания) и технологическим процессом, соответственно, должны создаваться на единой методологической основе. В качестве такой основы предлагается функциональный подход с использованием понятий автоматизированного технологического комп-