
УДК 621.398
ББК 32.965.7
С 37

Симанков В.С.

Доктор технических наук, профессор, директор института информационных технологий и безопасности университетского комплекса Кубанского государственного технологического университета, Краснодар, тел. (861) 275-11-10, e-mail: vs@simankov.ru

Толкачев Д.М.

Аспирант кафедры компьютерных технологий и информационной безопасности Кубанского государственного технологического университета, Краснодар, e-mail: Gendalf373@rambler.ru

**Моделирование сложных объектов в режиме реального времени
на основе сетей Петри
(Рецензирована)**

Аннотация

Для получения надежных данных о развитии чрезвычайных ситуаций на важных стратегических и промышленных объектах необходимо проводить моделирование изменения их состояния. В связи с этим в статье рассмотрены сети Петри как один из математических аппаратов моделирования и разработана модифицированная нечеткая сеть Петри, наилучшим образом подходящая для моделирования сложных объектов и систем в режиме реального времени.

Ключевые слова: *моделирование, иерархические временные цветные сети Петри, классификация сетей Петри, элементарные сети Петри, специальные сети Петри, комбинированные сети Петри, нечеткие сети Петри, ликвидация чрезвычайной ситуации, CPN Tools.*

Simankov V.S.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Institute of Information Technologies and Security of University Complex, Kuban State University of Technology, Krasnodar, ph. (861) 275-11-10, e-mail: vs@simankov.ru

Tolkachev D.M.

Post-graduate student of Department of Computer Technologies and Information Security, Kuban State University of Technology, Krasnodar, e-mail: Gendalf373@rambler.ru

Modeling of composite objects in real time on the basis of a Petri net

Abstract

For obtaining reliable data on development of emergency situations on important strategic and industrial facilities it is necessary to carry out modeling of change of their condition. In this regard this paper examines Petri nets as one of the mathematical apparatuses of modeling, as well as develops the modified indistinct Petri net which is best suitable for modeling of composite objects and systems in real time.

Keywords: *modeling, hierarchical temporary color Petri nets, classification of Petri nets, elementary Petri nets, special Petri nets, combined Petri nets, indistinct Petri nets, elimination of an emergency situation, CPN Tools.*

В настоящее время получение надежных данных о развитии чрезвычайных ситуаций на важных стратегических и промышленных объектах является приоритетной научно-прикладной задачей [1]. Эти данные могут быть получены по результатам моделирования состояния систем, обладающих рядом характеристик, которые трудно формализовать. Обозначенным системам свойственен существенно нечеткий характер взаимодействующих в них динамических процессов, их сложное параллельно-последовательное взаимодействие.

Для моделирования изменения состояния сложных объектов во времени применимы универсальные алгоритмические системы. Одной из таких систем является Машина Тьюринга, представляющая собой расширение конечного автомата и, согласно

тезису Черча-Тьюринга [2], способная имитировать любые устройства (с помощью задания правил перехода), каким-либо образом реализующие процесс пошагового вычисления, в котором каждый шаг вычисления достаточно элементарен. Однако даже представление модели простого объекта в виде Машины Тьюринга весьма громоздко и неэффективно. Поэтому для целей моделирования произвольного сложного объекта необходима эквивалентная Машине Тьюринга в плане универсальности и, в то же время, более простая и удобная алгоритмическая система. Такой системой являются иерархические временные раскрашенные (цветные) сети Петри [3]. Математический аппарат сетей Петри и их применение в моделировании подробно описаны в [4] и [5].

Рассмотрим классификацию сетей Петри и выявим наиболее подходящие для целей моделирования сложных объектов в режиме реального времени классы. Представим классификацию в виде схемы на рисунке 1.

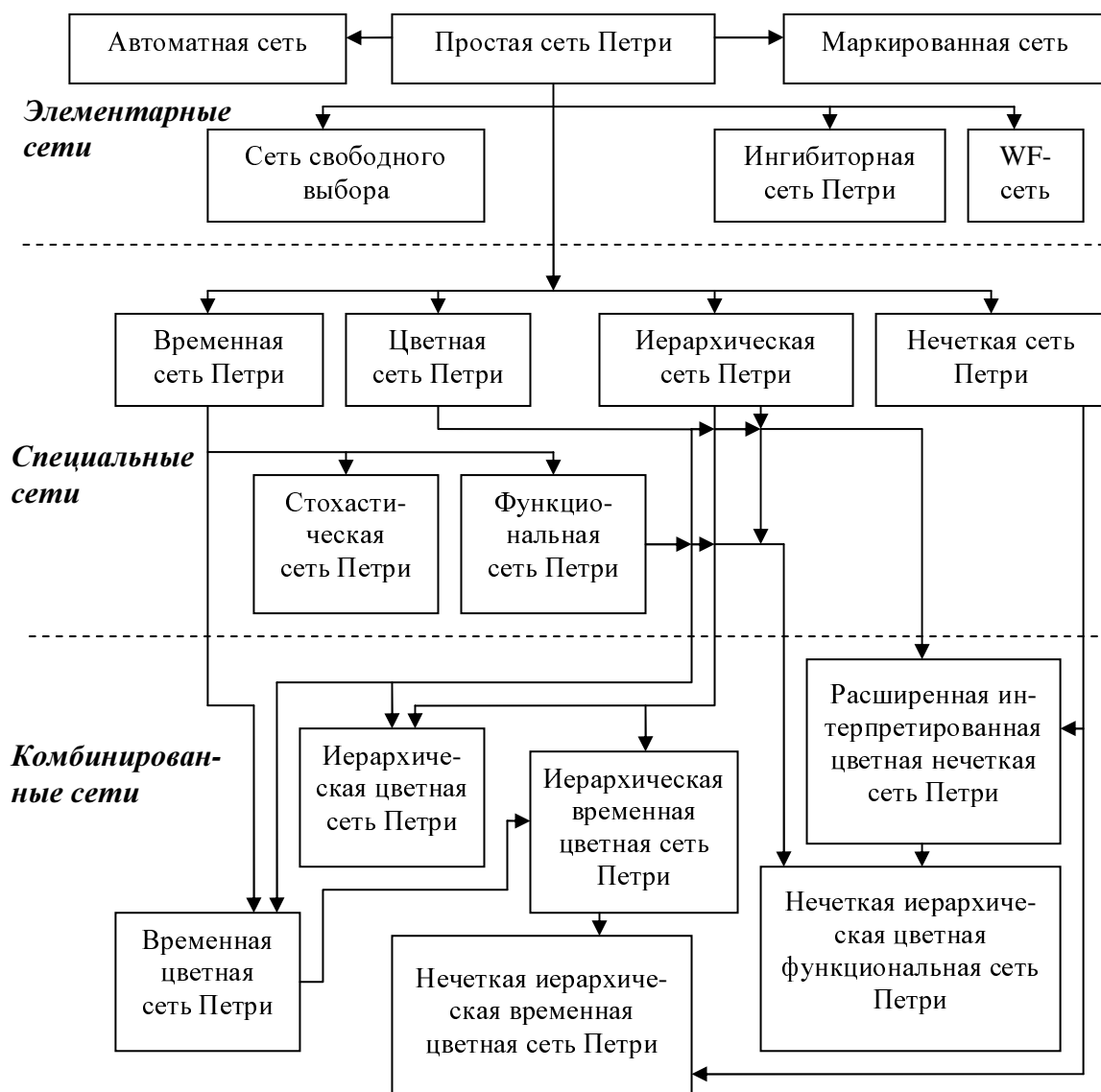


Рис. 1. Классификация сетей Петри

Рассмотрим *элементарные сети Петри*. Основные их виды были введены в [4]. Данные сети содержат наименьшее количество видов элементов, что делает их наибо-

лее простыми для понимания. В этом их главное достоинство. Элементарные сети хорошо подходят для моделирования простых объектов и систем, а также для представления некоторых общих закономерностей, свойственных более сложным системам.

Все разновидности элементарных сетей Петри являются модификациями *простой сети Петри*. Данная сеть наиболее универсальна из всех элементарных, а поэтому не имеет специфических ситуаций, в которых применяют именно ее.

В *автоматной сети* каждый переход имеет не более одного входа и не более одного выхода. Такие сети обычно описывают последовательные процессы с ветвлением по условию.

В *маркированной сети* каждая позиция имеет не более одного входа и не более одного выхода. С помощью данной сети моделируют последовательно-параллельные процессы.

WF-сеть называют также сетью потоков работ. Данная сеть используется для проверки графов потоков работ на наличие таких структурных конфликтов, как «тупики» и «недостатки синхронизации». Структурные конфликты отсутствуют, если WF-сеть является бездефектной.

В *сети свободного выбора* каждая дуга, выходящая из позиции, является либо единственным выходом из нее, либо единственным входом в переход. Данные сети используются для описания процессов управления.

Ингибиторные сети Петри содержат дуги особого типа – так называемые ингибиторные дуги, которые запрещают срабатывание перехода, если во входной позиции, связанной с переходом ингибиторной дугой, находится метка. Они применяются в случаях, когда необходимо осуществить проверку маркировки позиции на ноль [6].

Элементарные сети Петри не являются универсальными алгоритмическими системами, либо требуют для представления ряда объектов составление моделей, размер которых стремится к бесконечности. В частности, это можно сказать о простых сетях Петри, поскольку любая иерархическая цветная сеть Петри может быть заменена простой сетью Петри бесконечной размерности. Невозможность моделирования любого произвольного объекта является главным недостатком элементарных сетей Петри.

Специальные сети Петри отличает от элементарных более высокая сложность устройства первых. Такие сети содержат характеристики, позволяющие точнее отобразить те или иные свойства реальных объектов и систем.

Временные сети Петри особенно актуальны при моделировании изменения состояния объекта с течением времени. В реальности процессы не протекают мгновенно, поэтому возникает необходимость учитывать их продолжительность. Такую возможность и предоставляют временные сети Петри, равно как и другие, основанные на них виды сетей.

Стохастические сети позволяют лучше учесть вероятностный характер многих событий, однако здесь кроется и недостаток. Дело в том, что при моделировании сложных объектов для ряда прикладных задач, в частности, в системах поддержки принятия решений, одной из проблем является обеспечение предсказуемости [7], т.е. одинакового результата работы при одних и тех же входных данных. Стохастические сети не обладают свойством предсказуемости, следовательно, их практическое применение ограничено.

Функциональные сети обеспечивают выполнение вычислений в сети для определения некоторых параметров, например, времени задержки. Это может быть весьма эффективно с практической точки зрения, поэтому целесообразно внедрять свойства функциональных сетей в другие их виды.

Наиболее важным классом сетей Петри являются *раскрашенные (цветные) сети*. Именно они преобразуют дискретное множество меток в непрерывное. Более того, каждая метка в них может являться объектом со сложной структурой [5]. Такое свойство

предоставляет большую гибкость при создании модели.

Иерархические сети удобны при представлении сложных объектов, поскольку модель разбивается на уровни иерархии, следовательно, ее проще проектировать, анализировать и видоизменять.

Нечеткие сети Петри возникли из необходимости моделировать объекты, у которых ряд параметров и характер протекающих процессов нельзя строго формализовать. Реальные промышленные и стратегические, равно как и многие другие объекты, относятся именно к таким.

Хотя специальные сети Петри и позволяют моделировать более широкий класс объектов и систем в сравнении с элементарными сетями Петри, они так же не являются универсальными алгоритмическими системами. Однако в случаях объектов и систем, у которых основополагающей является какая-либо одна характеристика, например, время протекающих процессов, специальные сети оказываются наиболее эффективными.

Комбинированные сети Петри отличаются наибольшей сложностью. Они образуются путем взаимодействия различных видов специальных сетей Петри и обладают характеристиками всех своих «родителей». В частности, иерархическая цветная сеть Петри является комбинацией иерархических и цветных сетей Петри и обладает преимуществами и тех, и других. На рисунке 1 представлены не все возможные комбинированные сети.

Характеристики и сфера применения комбинированных сетей напрямую зависят от тех специальных сетей, от которых они произошли.

Временные цветные сети Петри находят свое применение в случаях, когда необходимо моделировать изменение состояния объекта во времени, который обладает рядом характеристик, не являющихся дискретными величинами.

Иерархические цветные сети Петри используются вместо цветных сетей Петри, когда моделируемая система состоит из большого количества частей, связанных между собой отношениями подчинения.

Иерархические временные цветные сети Петри являются универсальной алгоритмической системой. Именно эти сети позволяют моделировать любой произвольный объект или систему любой сложности, в чем состоит их основное преимущество.

Нечеткие иерархические временные цветные сети Петри также позволяют моделировать любой произвольный объект, но они значительно эффективнее предыдущего вида при работе с объектами, не поддающимися строгой формализации.

Особый интерес представляют *расширенные интерпретированные цветные (раскрашенные) нечеткие сети Петри*, полученные в [8] в результате комбинации и некоторого дополнения нечетких и цветных сетей Петри. Их можно представить следующим образом:

$$\tilde{S}_c(f) = \langle \tilde{P}, \tilde{T}, \tilde{F}(f), \tilde{M}_{oc}(f), \tilde{M}_c(f), L\{x_u\}, u \in U, \tilde{C}, \tilde{V}, \tilde{K} \rangle, \quad (1)$$

где

$\tilde{P} = \{\tilde{p}_j\}$ – конечное множество нечетких позиций \tilde{p}_j , которым ставятся в соответствие функции принадлежности $\mu_{\tilde{p}_j}^{(k)}$, k – некоторая переменная, определяющая значение функции;

$\tilde{T} = \{\tilde{t}_i\}$ – конечное множество нечетких переходов \tilde{t}_i , которым ставятся в соответствие функции принадлежности $\mu_{\tilde{t}_i}^{(k)}$, k – некоторая переменная, определяющая значение функции;

$\tilde{F}(f) = (\tilde{P} \times \tilde{T}) \cup (\tilde{T} \times \tilde{P})$ – нечеткая функция инцидентностей;

$\tilde{M}_{0c}(f)$ – вектор начальной маркировки;

$\tilde{M}_c(f)$ – вектор текущей маркировки;

$L\{x_u\}$, $u \in U$ – некоторый предикат, отнесенный на модели к множеству позиций, переходов, функции инцидентности в пространстве состояний нечетких взаимодействующих процессов и определяющий дополнительные условия выполнения переходов;

\tilde{C} – функция цвета маркера, определяющая в данном случае цвета каждого из маркеров $\tilde{M}(\tilde{p}_j)$ для позиций сети;

\tilde{V} – условия срабатывания переходов в зависимости от цвета маркера;

\tilde{K} – емкость маркеров в позициях с учетом \tilde{C} .

Сеть (1) является намного более гибкой, чем нечеткая сеть Петри. Она может быть применена для моделирования различных нечетких процессов, что подробно описывается в [8]. Однако, при этом, рассматриваемая сеть не лишена некоторых недостатков. Рассмотрим их.

Во-первых, сеть (1) не является иерархической, что значительно повышает ее громоздкость и затрудняет работу с ней. Теоретически любую иерархическую структуру можно преобразовать в линейную, однако, как правило, такое преобразование, в отличие от обратного, лишено практического смысла.

Во-вторых, нет явного указания, что сеть (1) является временной. В практической части [8] рассматриваются примеры временных сетей, однако обозначение временных и условных характеристик через некоторый предикат $L\{x_u\}$, $u \in U$ неочевидно и требует отдельного пояснения.

Таким образом, необходимо добавить в сеть (1) возможность построения иерархических структур. Также важно явно ввести временную характеристику. Для нее имеет смысл использовать принцип функциональной сети Петри, поскольку время выполнения реальных процессов может существенно зависеть от ряда параметров.

С учетом недостатков сети (1) и достоинств различных классов сетей Петри был разработан модифицированный вид нечеткой сети Петри. Его можно обозначить как нечеткую иерархическую цветную функциональную сеть Петри. Такая сеть будет иметь следующий вид:

$$\tilde{S}_{ITCF}(f) = \langle \tilde{P}, \tilde{T}, \tilde{F}(f), \tilde{M}_{0c}(f), \tilde{M}_c(f), TF, CF, \tilde{C}, \tilde{V}, \tilde{K}, PR \rangle, \quad (2)$$

где $TF = \{tf_{ni}\}$ – конечное множество функций tf_{ni} , определяющих продолжительность срабатывания переходов, по размерности равное \tilde{T} ;

$CF = \{cf_{ni}\}$ – конечное множество функций cf_{ni} , определяющих изменение маркировки в результате срабатывания перехода, по размерности равное \tilde{T} ;

$\tilde{V} = \{\tilde{v}_a\}$ – множество условий \tilde{v}_a , определяющих срабатывания переходов в зависимости от цвета маркера и попадания маркеров из переходов в позиции, по размерности равное множеству пар инцидентности $\tilde{F}(f)$;

PR – множество целых неотрицательных чисел, по размерности соответствующее \tilde{P} и определяющее уровень иерархии позиций в сети.

Каждое дополнительное свойство сети усложняет ее понимание, но при этом сокращает ее размерность, что, в конечном счете, упрощает процесс моделирования. Последнее справедливо лишь для сложных объектов, поэтому комбинированные сети целесообразно применять исключительно при моделировании сложных объектов и систем.

Рассмотрим процесс ликвидации чрезвычайной ситуации (ЧС) в общем виде. Для этого составим таблицу возможных событий и условий их возникновения при ликвидации ЧС (табл. 1).

Таблица 1

События, их пред- и постусловия при ликвидации ЧС

Событие	Предусловия	Постусловия
Произошла ЧС (\tilde{t}_1)	нет	ЧС не ликвидирована (\tilde{p}_1)
Начинается ликвидация ЧС (\tilde{t}_2)	ЧС не ликвидирована; соответствующие службы готовы приступить к ликвидации ЧС (\tilde{p}_4)	Осуществляется ликвидация ЧС (\tilde{p}_2)
Заканчивается ликвидация ЧС (\tilde{t}_3)	Осуществляется ликвидация ЧС	ЧС ликвидирована (\tilde{p}_3); соответствующие службы готовы приступить к ликвидации ЧС
Начинается нормальное функционирование объекта (\tilde{t}_4)	ЧС ликвидирована	нет

Необходимо заметить, что условие «ЧС ликвидирована» является существенно нечетким, поскольку любой комплекс действий может привести лишь к частичной нейтрализации деструктивных факторов, и опасность будет оставаться, пусть и в меньшей степени.

Используя (2), представим процесс ликвидации ЧС с помощью нечеткой иерархической цветной функциональной сети Петри (рис. 2).

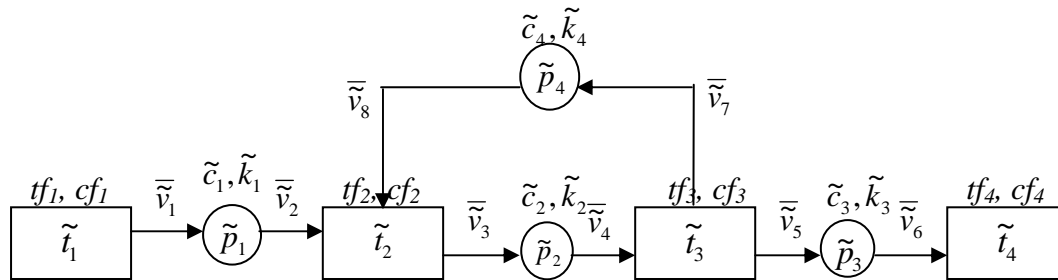


Рис. 2. Модель процесса ликвидации ЧС

На рисунке 2 использовались следующие обозначения:

$tf_1, cf_1, tf_2, cf_2, tf_3, cf_3, tf_4, cf_4$ – функции, определяющие соответственно продолжительность срабатывания и изменение маркировки в результате срабатывания переходов $\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \tilde{t}_3, \tilde{t}_4$ соответственно;

$\tilde{c}_1, \tilde{k}_1, \tilde{c}_2, \tilde{k}_2, \tilde{c}_3, \tilde{k}_3, \tilde{c}_4, \tilde{k}_4$ – функции цвета маркера и емкость маркеров соответственно для позиций $\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \tilde{p}_3, \tilde{p}_4$ соответственно;

$\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \tilde{v}_3, \tilde{v}_4, \tilde{v}_5, \tilde{v}_6, \tilde{v}_7, \tilde{v}_8$ – условия, определяющие срабатывания переходов в зависимости от цвета маркера и попадания маркеров из переходов в позиции.

Осуществляя декомпозицию позиций, например, \tilde{p}_2 , можно получить сети нижнего уровня, описывающие действия по ликвидации ЧС применительно к конкретной предметной области. Именно поэтому свойство иерархичности является важным при моделировании сложных систем.

С теоретической точки зрения сеть (2) отлично подходит для моделирования сложных объектов в режиме реального времени, поскольку обладает алгоритмической универсальностью, унаследованной от иерархических временных цветных сетей Петри, бесконечным пространством состояний, гибким учетом фактора времени, вычислительной мощностью и поддержкой нечеткости. Следовательно, задача практической апробации такой сети является актуальной.

На сегодняшний день существует большое число программных продуктов, позволяющих проводить моделирование в режиме реального времени с помощью сетей Петри. Из них выделяется CPN Tools, поскольку только эта моделирующая система в полной мере поддерживает иерархические временные раскрашенные сети Петри [5]. Более того, CPN Tools также позволяет использовать свойства стохастических и функциональных сетей Петри при построении моделей. Однако непосредственной поддержкой нечетких сетей Петри данный программный продукт не обладает. Задание нечеткости в нем возможно лишь с помощью нетривиальных процедур программирования на языке CPN ML, что является малоэффективным, особенно в условиях ограниченного времени на создание и адаптацию модели. Поэтому целесообразно создание специализированного программного продукта, основным назначением которого было бы обеспечение проведения моделирования с помощью нечетких сетей Петри либо его упрощение в CPN Tools. Данный программный продукт должен отличаться максимально возможной простотой в использовании и не требовать от аналитика знаний и навыков в области программирования.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- на основе классификации сетей Петри раскрыты их сильные и слабые стороны и обосновано их применение для моделирования сложных объектов;
- при анализе классификации сетей Петри выявлено, что для моделирования сложных систем в режиме реального времени наилучшим образом подходят нечеткие иерархические цветные функциональные сети Петри;
- разработано формальное описание сетей Петри с учетом существенно нечеткого характера взаимодействующих в сложных системах процессов и необходимости осуществления моделирования в режиме реального времени;
- в связи с ограниченными возможностями существующих программных продуктов требуется создание полнофункциональной, но в то же время простой для пользователя системы, осуществляющей моделирование с помощью нечетких сетей Петри, либо отдельного модуля, позволяющего учитывать элемент нечеткости в существующих пакетах, таких как CPN Tools.

Примечания:

1. Симанков В.С., Бучацкая В.В. Системные исследования безопасности региона на основе нейронной сети: монография. Краснодар, 2003. 228 с.
2. Хопкрофт Д., Мотвани Р., Ульман Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений: пер. с англ. М.: Вильямс, 2002. 528 с.

References:

1. Simankov V.S., Buchatskaya V.V.. System researches of region security on the basis of a neural network: a monograph. Krasnodar, 2003. 228 pp.
2. Hopcroft D., Motvani R., Ullman D. Introduction to the theory of automatic machines, languages and calculations: transl. from English. M.: Williams, 2002. 528 pp.

-
3. Jensen K. Colored Petri Nets – Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Springer-Verlag, 1997. Vol. 1-3. 673 p.
 4. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 264 с.
 5. Jensen K., Kristensen L.M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modeling and Validation of Concurrent Systems. Software Tools for Technology Transfer manuscript. 2007. 40 p.
 6. Зайцев Д.А. Верификация протоколов Ethernet // Труды Одесской национальной академии связи им. А.С. Попова. 2004. № 1. С. 42-48.
 7. Лебедев В.Г. Исследование и разработка методов и программных систем поддержки принятия оперативных решений в реальном масштабе времени: на примере управления процессами уничтожения химического оружия: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 230 с.
 8. Бодянский Е.В., Кучеренко Е.И., Михалев А.И. Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем: монография. Днепропетровск: Системные технологии, 2005. 311 с.
 3. Jensen K. Colored Petri Nets – Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Springer-Verlag, 1997. Vol. 1-3. 673 p.
 4. Piterson D. Theory of Petri nets and modeling of systems: transl. from English. M.: Mir, 1984. 264 pp.
 5. Jensen K., Kristensen L.M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modeling and Validation of Concurrent Systems. Software Tools for Technology Transfer manuscript. 2007. 40 p.
 6. Zaytsev D.A. Verification of the Ethernet protocols // Proceedings of the Odessa national academy of communications of. A.S. Popov. 2004. No. 1. P. 42-48.
 7. Lebedev V.G. Research and development of methods and program systems of support of taking operational decisions in real time scale: on the example of control of processes of annihilation of chemical weapon: Diss. for the Dr. of Techn. sciences degree. M., 2005. 230 pp.
 8. Bodyanskiy E.V., Kucherenko E.I., Mikhalev A.I. Neuro-fuzzy Petri nets in complex systems modelling: a monograph. Dnepropetrovsk: System technologies, 2005. 311 pp.