

УДК 519.74, 681.51

Д.А. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, Т.Р. ШМЕЛЕВА

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОУРОВНЕВОЙ КОММУТИРУЕМОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕТРИ

Измерение характеристик проектируемых телекоммуникационных сетей является одной из важнейших проблем при создании систем реального времени, таких, например, как системы управления технологическими процессами. Сложность взаимодействия компонентов программно-аппаратных комплексов затрудняет использование для этих целей аналитических моделей.

Применение раскрашенных сетей Петри [1] позволяет обеспечить адекватное модельное представление как взаимодействия в системах клиент-сервер традиционных для современных компьютерных сетей, так и особенностей функционирования телекоммуникационного оборудования, такого как сетевые адаптеры, концентраторы, коммутаторы. Использование моделирующей системы CPN Tools [2] обеспечивает автоматизацию процессов разработки модели и измерения её характеристик. Методология построения моделей Петри коммутируемых сетей [3] представлена в [4]. Для измерения характеристик модели предложено [5] использовать специальные измерительные фрагменты сетей Петри. Параметрическая организация модели [6] позволяет значительно ускорить процессы проектирования телекоммуникационных сетей и сократить размер типовой модели. Однако, в [6] отсутствует методика измерения характеристик параметрической модели. Кроме того, модель не учитывает ограничения размера буфера коммутатора, количества процессоров в серверных подсистемах, а также дисциплины выборки информации из накопителей.

Целью настоящей работы является, построение адекватной параметрической модели Петри одноуровневой коммутируемой сети, обеспечивающей автоматическое измерение времени отклика, а также разработка методики исследования характеристик коммутируемой сети с помощью моделей Петри [1] и системы CPN Tools [2].

Описание объекта. Исследуется одноуровневая коммутируемая локальная сеть, образованная коммутатором [3] (стеком коммутаторов) к каждому порту которого подключено либо терминальное устройство (рабочая станция, сервер), либо сегмент, образованный с помощью концентратора. Логически такая сеть может быть представлена как массив множеств MAC-адресов устройств, подключенных к портам коммутатора. Примеры конкретных сетей рассмотрены в [6].

Описание модели. Параметрическая модель одноуровневой коммутируемой сети представлена на рис. 1. В отличие от модели, описанной в [6], обеспечено автоматическое вычисление времени отклика, введены ограничения размера буфера коммутатора и количества процессоров каждого из серверов, реализована дисциплина FIFO для очередей запросов и ответов серверов, а также очередей фреймов во внутреннем буфере коммутатора. Начальная маркировка модели соответствует топологии LAN1: $1^{\backslash}(1,1) ++ 1^{\backslash}(2,1) ++ 1^{\backslash}(3,2) ++ 1^{\backslash}(4,2) ++ 1^{\backslash}(5,3) ++ 1^{\backslash}(6,3) ++ 1^{\backslash}(7,3)$, изображённой в [6]. Перед рассмотрением новых элементов модели ознакомимся с описанием дополнительных типов данных, переменных и констант, представленных на рис. 2. Для расчета среднего времени отклика введена константа NumWS – количество рабочих станций в исследуемой сети. Для организации очереди входных/выходных сообщений используется модельное представление очереди (тип `qframe`), включающее адрес сервера (тип `mac`) и список фреймов (тип `lframe`); в списке используется тип фрейма `frame1`, не временной, состоящий из адреса отправителя `src`, получателя `dst` и номера фрейма `nf`. Введен целочисленный тип `proc`, определяющий количество про-

цессоров для каждого сервера. Константа `MaxBuf` содержит размер внутреннего буфера коммутатора исследуемой модели. Для организации очереди сообщений в буфере коммутатора используется тип `qswf`, который аналогичен типу `qframe`; отличие состоит в типе передаваемого фрейма `swf1`, где добавлен тэг номера сегмента.

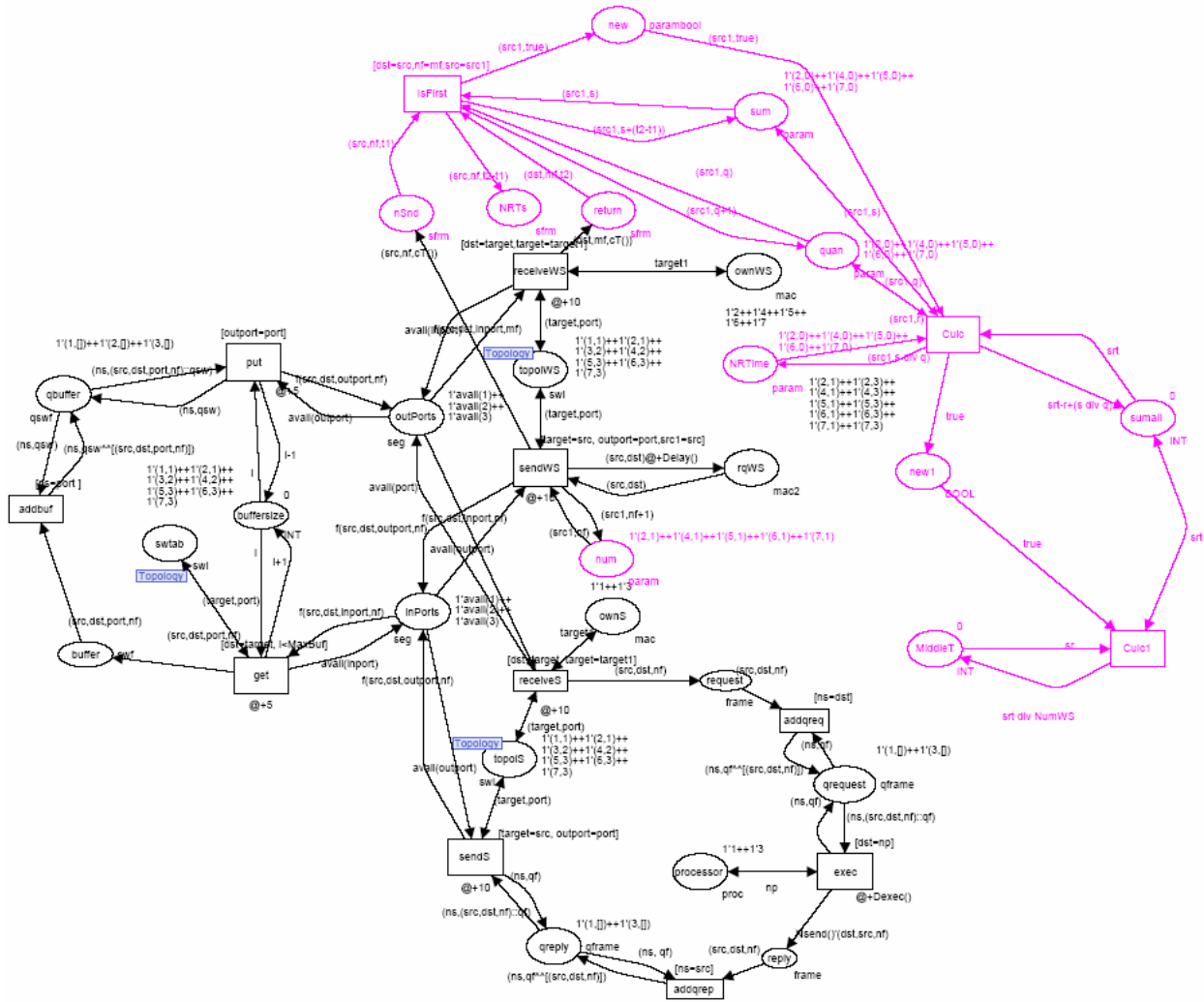


Рис. 1. Модель сети

Опишем новые элементы модели:

1) Измерительная рабочая станция. В параметрической модели [6] фрагмент, моделирующий рабочие станции локальной сети, заменён фрагментом, представляющим измерительные рабочие станции [5]. В отличие от [5] измерение времени отклика выполняется всеми рабочими станциями локальной сети (позиция `NRTime`), кроме того, вычисляется среднее время отклика (позиция `MiddleT`).

2) Ограничение размера буфера коммутатора. Позиция `bufferSize` (размер буфера; начальное значение равно нулю) определяет текущее количество фреймов в буфере. Значение `i` увеличивается на единицу (`i+1`) при получении фрейма из входного порта (позиции `inPorts`) в результате срабатывания перехода `get` при условии, что `i < MaxBuf`. Значение `i` уменьшается на единицу (`i-1`) при срабатывании перехода `put`, который перемещает фрейм в выходной порт (позицию `outPorts`). Переменная `MaxBuf`, содержащая максимальный размер буфера, инициализируется при генерации модели.

3) Организация очередей фреймов в буфере коммутатора (по портам). После срабатывания перехода `get`, фрейм, попадает в позицию `buffer`, где находится указанное время

задержки и далее, при срабатывании перехода `addbuf`, становится в очередь порта получателя (позицию `qbuffer`) в соответствии с дисциплиной FIFO (первым пришел, первым ушел). Номер очереди `ns` равен тэгу номера порта получателя `port`, который присвоен фрейму в соответствии с таблицей коммутации `swtab`. Для добавления в очередь нового сообщения используется переменная `qsw` типа `lswf`, список состоит из одного фрейма. При наличии свободного порта фрейм из буфера коммутатора `qbuffer` передается в выходной порт `outPorts`. Переход `put` срабатывает, если выполняется условие не занятости выходного порта `outPorts` и наличия сообщений в буфере с тэгом номера порта `port`. Позиция `qbuffer` посылает список, состоящий из одного фрейма.

```

color mac=INT;
color nfrm=INT;
color portnum=INT;
color proc=INT timed;
var np:proc;
color frame1=product mac*nfrm*nfrm ;
color lframe=list frame1;
color qframe=product mac*lframe;
var qf:lframe;
color swf1=product mac*mac*portnum*nfrm ;
color lswf=list swf1;
color qswf=product mac*lswf;
var qsw:lswf;
var src,dst,target,target1: mac;
var ns, i :mac;
var port, inport, outport: portnum;
val MaxBuf=20;
val NumWS=5;

```

Рис. 2. Описание типов данных, переменных и констант

4) Организация очереди запросов от рабочих станций к серверам. Фрейм, принятый сервером из входного порта (позиции `outPorts`) при срабатывании перехода `receiveS`, попадает в позицию `request`, где находится указанное время задержки. Далее, срабатывает переход `addreg`, при условии, что номер очереди `ns` равен адресу получателя `dst`; фрейм становится в очередь к серверу (в позицию `qrequest`), очередь организована в соответствии с дисциплиной FIFO. При добавлении нового сообщения в очередь используется переменная `qf` типа `lframe` (список фреймов); позиция `qrequest` передаёт список, к которому добавляется список из одного вновь поступившего фрейма.

5) Ограничение количества процессоров серверов. Для каждого сервера в позиции `processor` указано количество процессоров. Позиция `qrequest` передает список, в котором выделен первый фрейм; переход `exec` срабатывает лишь при наличии свободного процессора требуемого сервера (переменная `np`), `np` должно быть равно адресу получателя `dst`.

6) Организация очереди фреймов ответов сервера. После обработки запроса от рабочей станции, сервер формирует ответ из случайного числа фреймов `Nsend()` в позиции `reply`. Переход `addrep` исполняется по истечении времени задержки `Dexec()`, в результате чего фреймы становятся в очередь ответов – позицию `qreply`. Номер очереди `ns` равен адресу сервера `src`, который сформировал ответ. Для добавления в очередь нового фрейма используется переменная `qf` типа `lframe`, вновь поступивший фрейм добавляется в конец списка. Переход `sends` моделирует передачу фреймов в сеть, выбирая первый фрейм из очереди ответов сервера, и помещает его во входной порт коммутатора (позицию `inPorts`),

при наличии фишки `avail (outport)` – признака доступности необходимого сегмента сети.

Следует отметить, что атрибуты элементов модели, такие как, например, времена срабатывания переходов выбраны в соответствии с описанием программно-аппаратных средств локальной сети LAN1 [6]. Методика масштабирования временных и емкостных характеристик модели представлена в [5]. Единица модельного времени (MTU) для изображенной на рис. 1 модели равна 100 нс.

Функционирование модели. Рассмотрим функционирование модели, представленной на рис. 1. Рабочая станция формирует запрос к серверу, содержащий `src` – адрес отправителя, `dst` – адрес получателя, `inport` – номер сегмента (порта), в котором находится рабочая станция, `nf` – номер фрейма, который необходим для дальнейших вычислений времени отклика. Далее фрейм попадает в порт коммутатора, после определения номера порта сервера, к которому направлено сообщение, фрейм становится в очередь с номером порта сервера в буфере коммутатора. При не занятости порта получателя, фрейм пересылается в порт и далее в сервер. Обработка сообщений в сервере организована в соответствии с дисциплиной FIFO, фрейм обрабатывается свободным процессором сервера и формирует ответ из `Nsend()` фреймов, которые передаются сервером тоже в порядке FIFO. Фрейм ответа попадает в порт коммутатора; после определения номера порта рабочей станции получателя, становится в соответствующую очередь в буфере коммутатора. Сообщение передается в порт назначения и далее рабочей станции. При получении рабочей станцией ответа на запрос, вычисляется время отклика для данного запроса, пересчитывается среднее время отклика для этой станции и сети в целом. Среднее время отклика для станции хранится в позиции `NRTIME`, где каждому MAC-адресу соответствует среднее время отклика для указанной рабочей станции.

В описываемой модели измерительная станция [5] модифицирована: добавлен сегмент, позволяющий рассчитать среднее время отклика модели. Переход `Culc` рассчитывая среднее время отклика по каждой станции, позволяет в позиции `sumall` постоянно обновлять `srt` – сумму средних времен отклика всех станций и помещает фишку со значением `true` в позицию `new1`, которая необходима для запуска перехода `Culc1`. Переход `Culc1` вычисляет среднее время отклика модели, равное сумме средних времен станций `srt` деленное на количество станций `NumWS` и помещает в позицию `MiddleT`. Начальные значения маркировок позиций `sumall` и `MiddleT` равны нулю.

Измерение характеристик модели. Для измерения характеристик модели применена система CPN Tools [2]. Отладка модели выполнена в пошаговом режиме, а также в автоматическом режиме с визуализацией динамики сети Петри. Для накопления статистической информации использован скоростной автоматический режим работы моделирующей системы без визуального отображения динамики процессов. Основным параметром для управления процессом моделирования является количество шагов (Ш) моделирующей системы. На каждом шаге вычисляется модельное время (МВ) и реализуются все события, для которых выполнены условия запуска. Функционирование модели представляет собой случайный процесс, обусловленный с одной стороны случайными функциями вычисления времён и объёмов информации, а с другой стороны, недетерминированностью процессов разрешения конфликтов, возникающих в сетях Петри. Поэтому, указываемые далее величины являются средними значениями, вычисленными по результатам не менее двадцати индивидуальных измерений.

Первым из вопросов, связанных с оценкой работоспособности локальной сети является наличие стационарного режима функционирования модели. Действительно, низкопроизводительное сетевое либо серверное оборудование может не справляться с потоком запросов, генерируемым рабочими станциями. Для наблюдения стационарного режима использо-

влась последовательность измерений времени отклика сети. Таблицы 1 и 2 содержат такие последовательности для неограниченного размера буфера и неограниченного количества процессоров, а также неограниченного размера буфера и одного процессора соответственно. Заметим, что в обоих отмеченных случаях достигается стационарный режим; отличие состоит лишь в значении времени отклика: 390 при неограниченном количестве процессоров и 405 при одном процессоре. В то время как при размере буфера коммутатора в 5 фреймов и одном либо двух процессорах (Таблица 3) стационарный режим не достигается. Аналогичные результаты можно получить при использовании сетевого оборудования с вдвое меньшей производительностью (увеличение вдвое временных задержек соответствующих переходов).

Таблица 1

Неограниченный размер буфера и неограниченное количество процессоров

Тысяч шагов (Ш)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	1000
Модельное время (МВ)	16218	32037	47452	63581	79004	94366	109458	124735	141056	155725	1517213
Среднее время отклика (СВО)	374	389	400	397	392	403	399	393	391	390	390

Таблица 2

Неограниченный размер буфера и один процессор

Ш	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	1000
МВ	15486	16198	45078	63943	75881	94257	105585	122002	136242	152964	1512269
СВО	443	438	432	425	419	411	414	410	407	405	405

Далее будем исследовать зависимость времени отклика сети от характеристик программно-аппаратных средств в стационарном режиме. Основными рассматриваемыми характеристиками являются: размер буфера и быстродействие коммутатора; количество процессоров и быстродействие серверов; производительность сетевых адаптеров и скорость передачи информации в сети.

Таблица 3

Примеры нестационарных режимов работы сети

Ш	Размер буфера 5, один процессор				Размер буфера 5, два процессора			
	1	10	100	1000	1	10	100	1000
МВ	1386	15843	154333	1539722	1518	15635	153862	1542347
СВО	662	901	1205	14017	723	978	1949	7948

Рассмотрим, как влияют размер буфера и количество процессоров на среднее время отклика. Времена отклика сети из Таблиц 1,2, равные 390 и 405 MTU соответственно, представляют собой нижние границы; при приближении среднего времени отклика к ним, увеличение размера буфера и количества процессоров не улучшает значительно измеряемый показатель (рис. 3). Диапазон изменения размера буфера выбираем следующим образом: минимальное значение 10, при котором изменение количества процессоров реально влияет на СВО, на меньших значениях такого результата не наблюдается; максимальное значение 25, дальнейшее увеличение размера буфера для данной топологии не влечет значительного увеличения СВО при любом количестве процессоров; шаг изменения показателя равен 5. Значения диапазона изменения количества процессоров: один и два процессора для каждого сервера, дальнейшее увеличение количества процессоров не влияет на СВО.

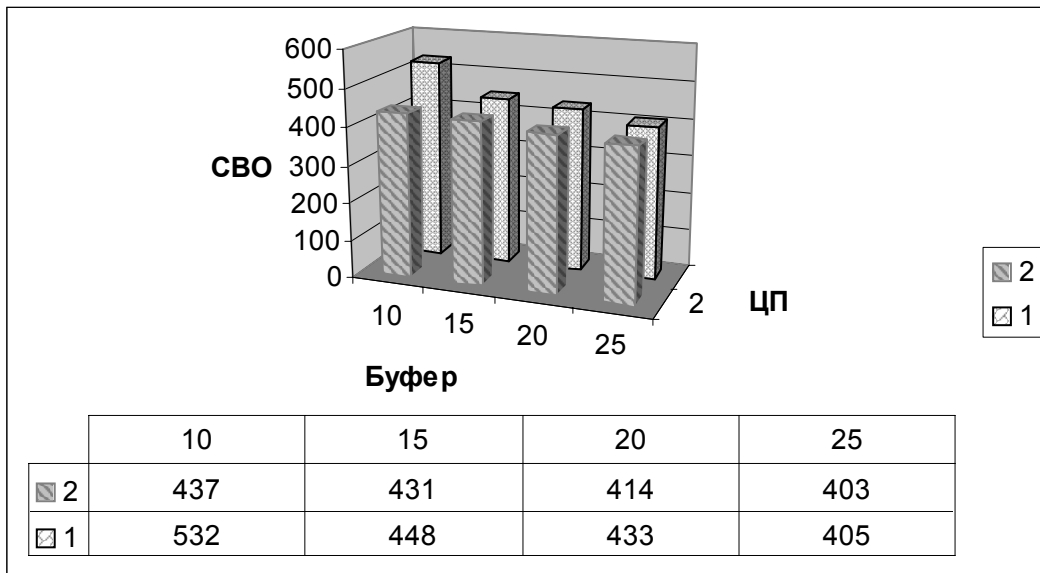
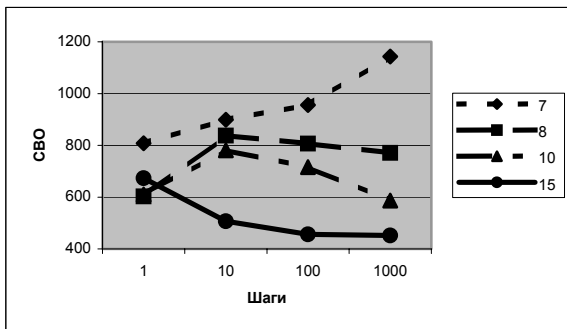
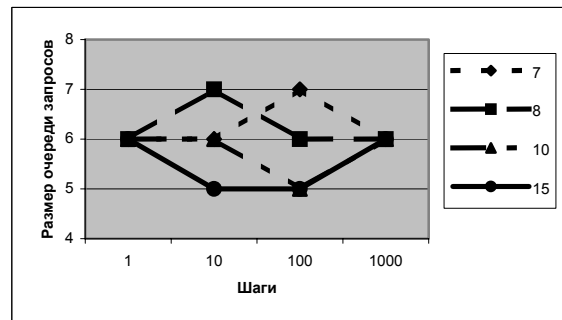


Рис. 3. Диаграмма зависимости СВО от размера буфера и количества процессоров

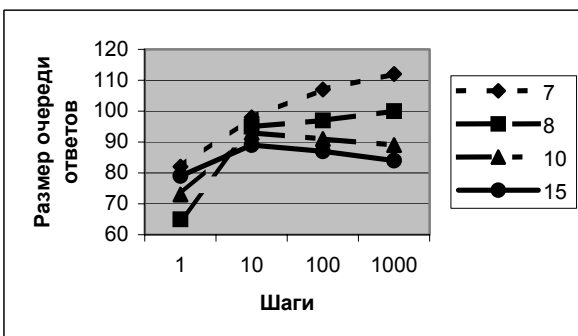
На рис. 4 представлены графики зависимости характеристик сети от размера буфера коммутатора; измерения проводились при количестве процессоров равном единице. Кроме времени отклика сети СВО рис. 4 а) оценивались такие характеристики как средние размеры очередей: запросов рис. 4 б), ответов рис. 4 в), коммутатора рис. 4 г). Исследование размеров очередей необходимо для оценки требуемых объемов оперативной памяти. Кроме того, производительность коммутатора, представленная временными задержками переходов `put` и `get`, в совокупности с размером внутреннего буфера является достаточно точной спецификацией необходимого сетевого оборудования. Аналогичную спецификацию серверного оборудования составляет производительность, заданная временной задержкой перехода `exec`, и количество процессоров, указанное в позиции `processor`.



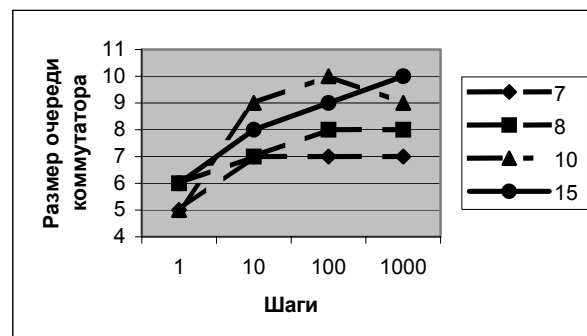
а) СВО



б) Размер очереди запросов



в) Размер очереди ответов



г) Размер очереди коммутатора

Рис. 4. Графики зависимости характеристик сети

Полученные в настоящем разделе таблицы, диаграммы и графики являются основой для оптимального выбора оборудования локальной сети, такого как коммутаторы, серверы, рабочие станции. Типовой является задача минимизации стоимости оборудования при гарантированном времени отклика, не превышающем заданное. Следует также отметить, что характеристики информационной системы, такие как периодичность запросов рабочих станций, размеры запросов и ответов также рассматривались в качестве заданных априори. Вопросы оценки этих характеристик по исходным спецификациям информационной системы обсуждались в [5].

Таким образом, в настоящей работе представлена параметрическая модель Петри одноуровневой коммутируемой локальной сети, позволяющая ограничивать размеры буферов и количество процессоров, и реализующая дисциплину FIFO при работе с очередями. Обеспечено автоматическое измерение времени отклика локальной сети в процессе имитации динамики модели; для этих целей использованы специальные измерительные фрагменты сетей Петри. Исследованы вопросы существования стационарного режима работы локальной сети, а также зависимости времени отклика от характеристик применяемых программно-аппаратных средств. Результаты представлены в виде диаграмм, графиков, таблиц.

Список литературы: 1. *Jensen K.* Colored Petri Nets – Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use.- Vol. 1-3, Springer-Verlag, 1997. 2. *Beaudouin-Lafon M., Mackay W.E., Jensen M. et al.* CPN Tools: A Tool for Editing and Simulating Coloured Petri Nets. LNCS 2031: Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems, 2001, 574-580 (<http://www.daimi.au.dk/CPNTools>). 3. *Rahul V.* LAN Switching // ОНЮ, 2002, 20 п. 4. *Зайцев Д.А., Шмелёва Т.П.* Моделирование коммутируемой локальной сети раскрашенными сетями Петри // Зв'язок, №2, 2004, с. 56-60. 5. *Zaitsev D.A.* An Evaluation of Network Response Time using a Coloured Petri Net Model of Switched LAN // Fifth Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools, Aarhus, Denmark, October 8-11, 2004, p. 157-167. 6. *Зайцев Д.А., Шмелёва Т.П.* Параметрическая модель Петри одноуровневой коммутируемой сети // Научные труды ОНАС им. А.С.Попова.- №1.- 2005.- 8 с.