

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ MPLS СЕТЕЙ В ФОРМЕ РАСКРАШЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

ПАРАМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ MPLS МЕРЕЖ У ФОРМІ РОЗФАРБОВАНИХ СІТЕЙ ПЕТРИ

PARAMETRICAL MODEL OF MPLS NETWORKS IN THE FORM OF COLORED PETRI NETS

Аннотация. Разработана параметрическая модель MPLS сетей в форме раскрашенных сетей Петри, содержащая фиксированное число вершин сети Петри и инвариантна по отношению к топологии сети, количеству подключенных маршрутизаторов и терминальных сетей. Построенная параметрическая модель не требует модификации её структуры, снижает время построения модели для сети с произвольным количеством устройств и оценки эффективности сетей. Адекватность модели подтверждена сравнением с ранее полученными результатами.

Анотація. Розроблено параметрична модель MPLS мереж у формі розфарбованих сітей Петрі, що містить фіксоване число вершин сіті Петрі й інваріантна по відношенню до топології мережі, кількості підключених маршрутизаторів і термінальних мереж. Побудована параметрична модель не вимагає модифікації її структури, знижує час побудови моделі для мережі з довільною кількістю пристроїв та оцінки ефективності мереж. Адекватність моделі підтверджена порівнянням з раніше отриманими результатами.

Summary. A parametrical model of MPLS networks in the form of colored Petri nets was developed, which consists a fixed number of Petri nets nodes and invariants to the topology of the network, number of attached routers and terminal networks. The build parametrical model does not require the modification of its structure, reduces time of construction of model for a network with the arbitrary number of devices and performance evaluation of networks. The model adequacy is confirmed comparing with pre-existing results.

Технология многопротокольной коммутации меток MPLS (Multi-Protocol Label Switching) [1...3] считается одной из самых перспективных транспортных технологий. По опыту проектирования и построения операторских MPLS сетей, данная технология оптимальна как для крупных операторов связи, так и для альтернативных небольших провайдеров. Высокая сложность технологии, стандартные спецификации которой насчитывают более пяти сотен страниц, затрудняет построение аналитических моделей MPLS сетей. Возникает проблема оценки качества обслуживания и производительности сетей с коммутацией меток.

Раскрашенные сети Петри [4] и моделирующая система CPN Tools [5] применены ранее для исследования коммутируемой Ethernet, IP сетей [6...10]. Метод измерительных фрагментов [8] позволяет выполнить измерение нетривиальных характеристик моделируемого объекта в процессе имитации динамики сети Петри. В указанных работах [6,8,10] для оценки характеристик сети были использованы модели, в основу построения которых положен модульный подход или подход прямого отображения: модель сети komponуется из ранее построенных подмоделей сетевых и конечных устройств. Существенными недостатками этого подхода являются большое общее количество используемых элементов сети Петри, замедляющих процессы построения и исследования моделей, необходимость перекомпоновки модели для каждой новой структурной схемы сети.

Однако, сложность построения моделей MPLS сетей, связанная с изменениями структуры сети и существенным её отличием от классической технологии коммутации требует построение модели, инвариантной по отношению к топологии сети. В работах [7,9] представлено построение параметрических моделей коммутируемой Ethernet и IP сетей.

Целью настоящей работы является построение параметрической модели MPLS сетей в форме раскрашенных сетей Петри и дополнительных средств оценки качества обслуживания и производительности сетей.

1. Обзор технологии коммутации меток MPLS. Архитектура MPLS, наиболее эффективная для передачи IP трафика и работы в среде IP ориентированных приложений, разрабатывалась и позиционируется для построения высокоскоростных магистральных сетей, позволяет передавать IP трафик на высокой скорости и в большем объеме, обеспечивая экономичность и безопасность. Архитектура MPLS стандартизирована и объединяет наиболее удачные элементы разработок

нескольких компаний. Основными документами являются [1...3], особенности технологии уточняются в RFC с номерами 2547, 2702, 2917 и т.д.

На входе в сеть пограничным маршрутизатором назначается метка (label), основной информацией для назначения метки является IP адрес назначения. Маршрутизаторы, находящиеся на границе MPLS сетей принято именовать LER (Label Edge Router), дополнительно их классифицируют во входные (ingress) и выходные (egress). Другими критериями назначения метки могут быть качество обслуживания (поле тип сервиса ToS в заголовке IP пакета) либо критерии трафика инжиниринга (TE). Для назначения меток предусмотрен [1] протокол распределения меток LDP (Label Distribution Protocol), в соответствии с которым соседние маршрутизаторы коммутации меток LSR (Label Switching Router) обмениваются маршрутной информацией и строят свои таблицы коммутации меток. Формат метки, стек меток, процедуры обработки меток LSR описаны в [2]. При выходе из MPLS домена метка отсекается, внутри MPLS домена метка является единственной информацией для доставки пакета. Упрощенно метка представляет собой целое число – 20 бит, технология MPLS также предусматривает создание стека меток и выполнение операций над метками: замещение, погружение в стек, извлечение из стека. На рис. 1 изображена MPLS сеть, взаимодействующая с двумя IP сетями.

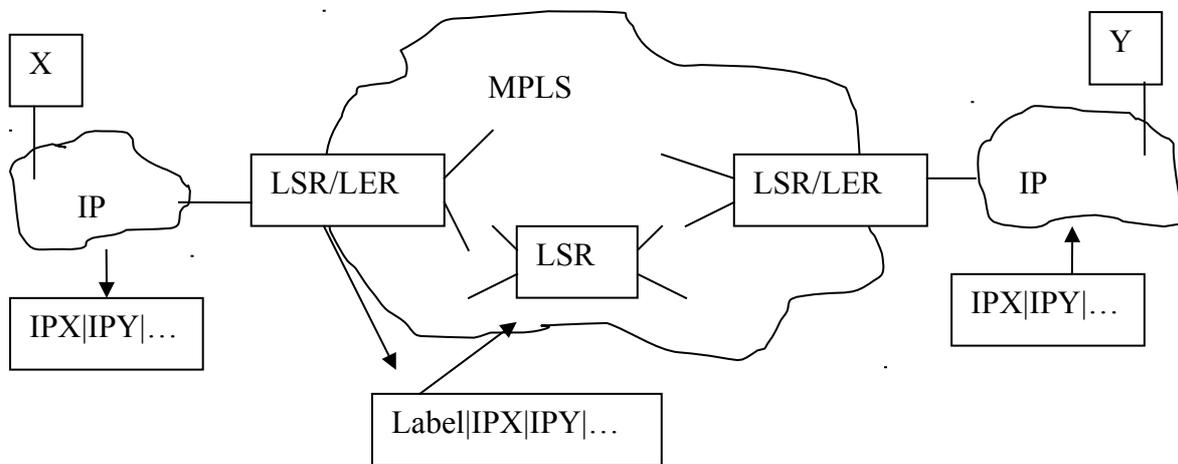


Рисунок 1 – MPLS сеть

Качество и надежность сетей MPLS проверены временем. Многие провайдеры связи эксплуатируют подобные сети на коммерческой основе. Подавляющее большинство вновь проектируемых и строящихся сетей основываются на MPLS архитектуре. Решение с использованием MPLS сети в качестве основы инфраструктуры имеют экономические и технические преимущества, в том числе:

- эффективное инвестирование в инфраструктуру провайдера, исключение необходимости строительства и поддержки разных типов сетей;
- экономически выгодное использование физических каналов связи между узлами провайдера за счет передачи данных клиентских VPN и данных Интернета через единую сеть IP/MPLS;
- возможность использования любых существующих сетей для магистрали и доступа клиентов;
- расширение списка сервисов, предоставляемых клиентам;
- простота настройки и эксплуатации сети;
- высокая масштабируемость сети и надежность решения;
- низкая требовательность к ресурсам оборудования.

2. Модель MPLS сети. На рис. 2 изображена магистральная сеть Новосибирского региона [7] с двумя MPLS маршрутизаторами (R7, R8) LSR типа, с шестью терминальными сетями (ТС – Т1... Т6) и IP/MPLS маршрутизаторами (R1-R6) LSR/LER типа.

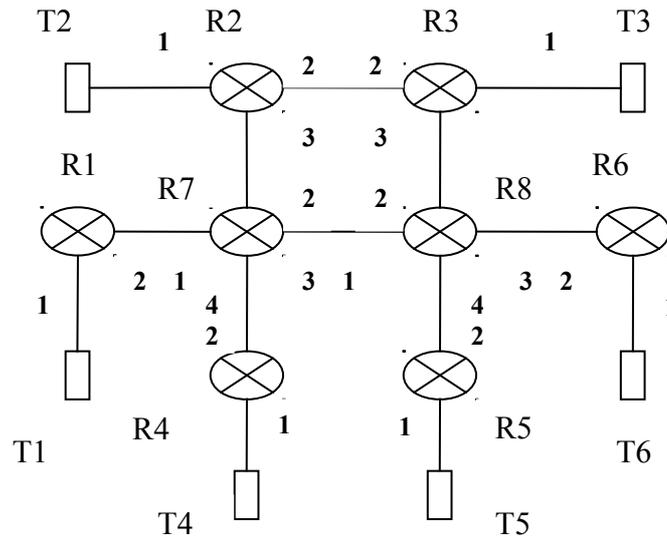


Рисунок 2 – Новосибирская региональная сеть

В стандартной терминологии [1] отмечена необходимость агрегирования маршрутов сети в классы эквивалентности передачи FEC (Forwarding Equivalence Classes) и назначения каждому классу уникальной метки (label), идентифицирующей принадлежность к FEC. В табл. 1 представлено назначение меток для каждой пары терминальных устройств для сети, представленной на рис. 2 (в таблице метки заключены в скобки).

Таблица 1 – Назначение меток

| | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 |
|----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| T1 | - | R1(1)-R7(1)-R2 | R1(2)-R7(2)-R8(2)-R3 | R1(3)-R7(3)-R4 | R1(4)-R7(4)-R8(4)-R5 | R1(5)-R7(5)-R8(5)-R6 |
| T2 | R2(6)-R7(6)-R1 | - | R2(7)-R3 | R2(8)-R7(8)-R4 | R2(9)-R7(9)-R8(9)-R5 | R2(10)-R7(10)-R8(10)-R6 |
| T3 | R3(11)-R8(11)-R7(11)-R1 | R3(12)-R2 | - | R3(13)-R8(13)-R7(13)-R4 | R3(14)-R8(14)-R5 | R3(15)-R8(15)-R6 |
| T4 | R4(16)-R7(16)-R1 | R4(17)-R7(17)-R2 | R4(18)-R7(18)-R8(18)-R3 | - | R4(19)-R7(19)-R8(19)-R5 | R4(20)-R7(20)-R8(20)-R6 |
| T5 | R5(21)-R8(21)-R7(21)-R1 | R5(22)-R8(22)-R7(22)-R2 | R5(23)-R8(23)-R3 | R5(24)-R8(24)-R7(24)-R4 | - | R5(25)-R8(25)-R6 |
| T6 | R6(26)-R8(26)-R7(26)-R1 | R6(27)-R8(27)-R7(27)-R2 | R6(28)-R8(28)-R3 | R6(29)-R8(29)-R7(29)-R4 | R6(30)-R8(30)-R5 | - |

2.1. Главная страница модели MPLS сети. Построена параметрическая модель MPLS сети, содержащая фиксированное число вершин сети Петри. Главная страница модели представлена на рис. 3. Основные элементы модели сети все маршрутизаторы и терминальные сети представлены двумя вершинами сети Петри **Router** и **Customer** соответственно. Информация о подключении устройств к портам задается топологией **TopologyIP** и **TopologyMPLS**, топология сети является параметром модели. Описание топологии сети содержит: 1) связи между маршрутизаторами LSR типа внутри домена MPLS (TopologyMPLS); 2) связи между маршрутизаторами LSR/LER типа и терминальными сетями (TopologyIP); указывается номер маршрутизатора (TC) и номер интерфейса для каждого из двух концов линии связи. Запись 1'(6,1,7,3) обозначает, что маршрутизатор номер 6

через первый интерфейс соединен с третьим интерфейсом маршрутизатора номер 7. Запись $1^{((-4),1,5,4)}$ обозначает, что терминальная сеть с номером 4 (номер терминальной сети выделяется знаком «~») через первый порт связана с четвертым интерфейсом маршрутизатора номер 5.

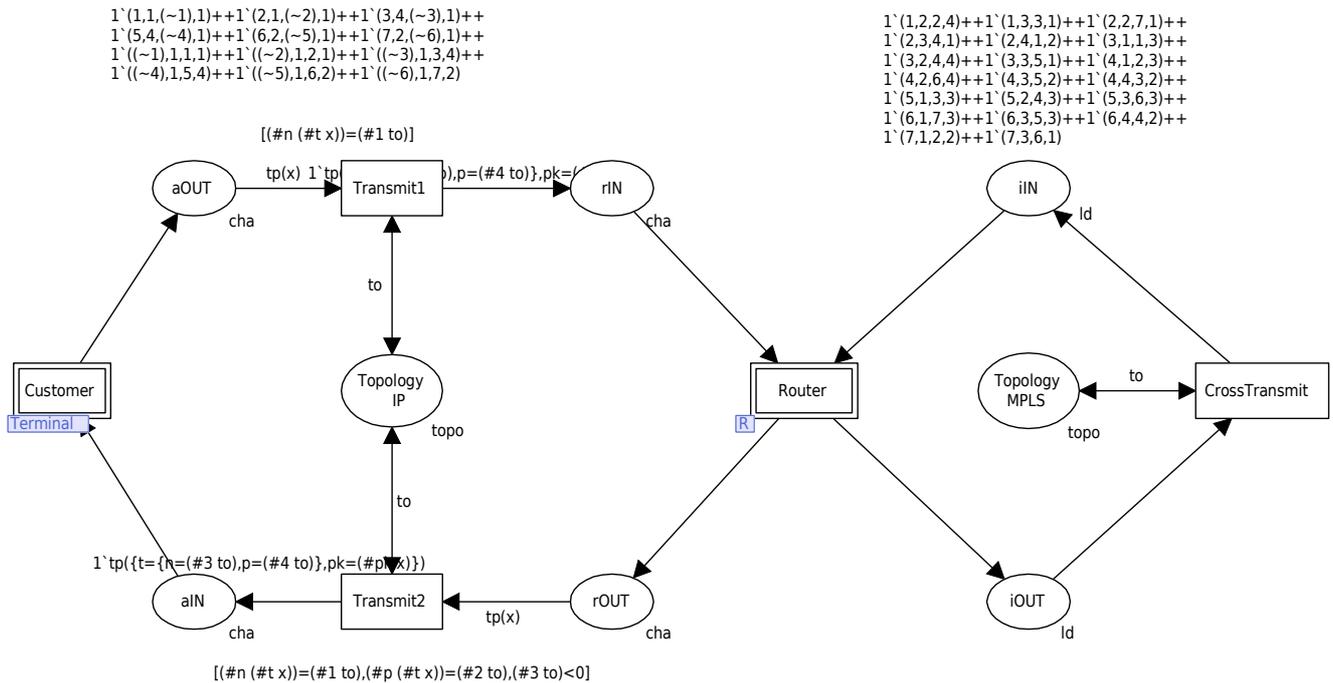


Рисунок 3 – Главная страница модели MPLS сети

Порты (интерфейсы) маршрутизаторов **Router** представлены позициями **rIN**, **rOUT**, **iIN**, **iOUT**, порты терминальных сетей **Customer** представлены позициями **aIN**, **aOUT**, порты работают в полнодуплексном режиме. Терминальная сеть периодически генерирует пакеты со случайными адресами источника и приёмника. Из выходного порта **aOUT** пакет извлекается переходом **Transmit1** и передается на входной порт **rIN** LSR/LER маршрутизатора, номер и порт маршрутизатора определяются значениями ранее описанной топологии в позиции **TopologyIP**. Маршрутизатор перенаправляет пакет на выходной порт **rOUT**(**iOUT**) в соответствии с таблицами маршрутизации или коммутации меток. Далее пакет извлекается переходом **Transmit2** и передается на входной порт **aIN** терминальной сети или переходом **Cross Transmit**, и передается на входной интерфейс **iIN** следующего LSR маршрутизатора в соответствии с топологией сети.

Местоположение пакета в сети полностью определяется номером маршрутизатора и номером интерфейса как для пакетов, передаваемых в каналах, так и для пакетов находящихся в процессе обработки внутри маршрутизатора. Следует отметить, что пакет, передаваемый в канал может иметь двойную нумерацию в соответствии с двумя концами линий. Таким образом, пакет дополненный тегом, содержащим номер маршрутизатора и номер интерфейса, самоидентифицируется, что позволяет передавать его в параметрической модели, состоящей из единственной копии терминальной сети и единственной копии маршрутизатора. Повторная входимость указанных компонентов обеспечивается добавлением аналогичных тегов ко всем внутренним (локальным) данным: таблице маршрутизации, списку IP адресов, таблице коммутации меток, записям буферов и т.д.

2.2. Модель MPLS маршрутизаторов. Стандарт технологии MPLS предусматривает два типа используемых маршрутизаторов: LSR маршрутизаторы размещаются внутри MPLS сети и реализуют только коммутацию меток; LER маршрутизаторы размещаются на границе MPLS сети и используются для стыковки с сетями других стандартов. Основное отличие состоит в том, что LER маршрутизатор вычисляет первоначальную метку пакета на основе маршрутной информации, например, на основе таблиц IP маршрутизации для IP сетей. Как правило, граничные маршрутизаторы являются комбинированными LSR/LER типа. Для структурирования моделей построим типовые модели LER и LSR портов; модели конкретных маршрутизаторов будем собирать путём клонирования моделей портов требуемого типа: LSR при стыковке с MPLS сетью и LER при

стыковке с IP сетью. В настоящей работе алгоритм LDP назначения классов эквивалентности меток FEC не моделируется, рассматриваются классы эквивалентности меток, полученные в результате его применения к указанной сети.

Типовая модель LSR порта маршрутизатора в параметрической форме изображена на рис. 4. Основное отличие от модели порта IP маршрутизатора [7,10] состоит в том, что для перенаправления пакета используется таблица коммутации меток. Кроме того, моделируется замещение метки, и для идентификации интерфейсов используются их номера. Для входящего пакета по его метке определяется соответствующая запись таблицы коммутации меток **LS**. Исходящая дуга перехода **geti** замещает входную метку **L1** новой меткой **L2** и присваивает номер интерфейса назначения для направления пакета. Тип данных **lpkt** описывает пакет, дополненный меткой, тип **ld** – записи таблицы коммутации меток, тип **bufLSR** – записи внутреннего буфера пакетов. Заметим, что в настоящей работе не моделируется стек меток, предусмотренный стандартом [1,2], а выполняется лишь замещение меток. Построена типовая модель LER порта маршрутизатора в параметрической форме, которая представлена на рис. 4 позициями **INr**, **OUTr**.

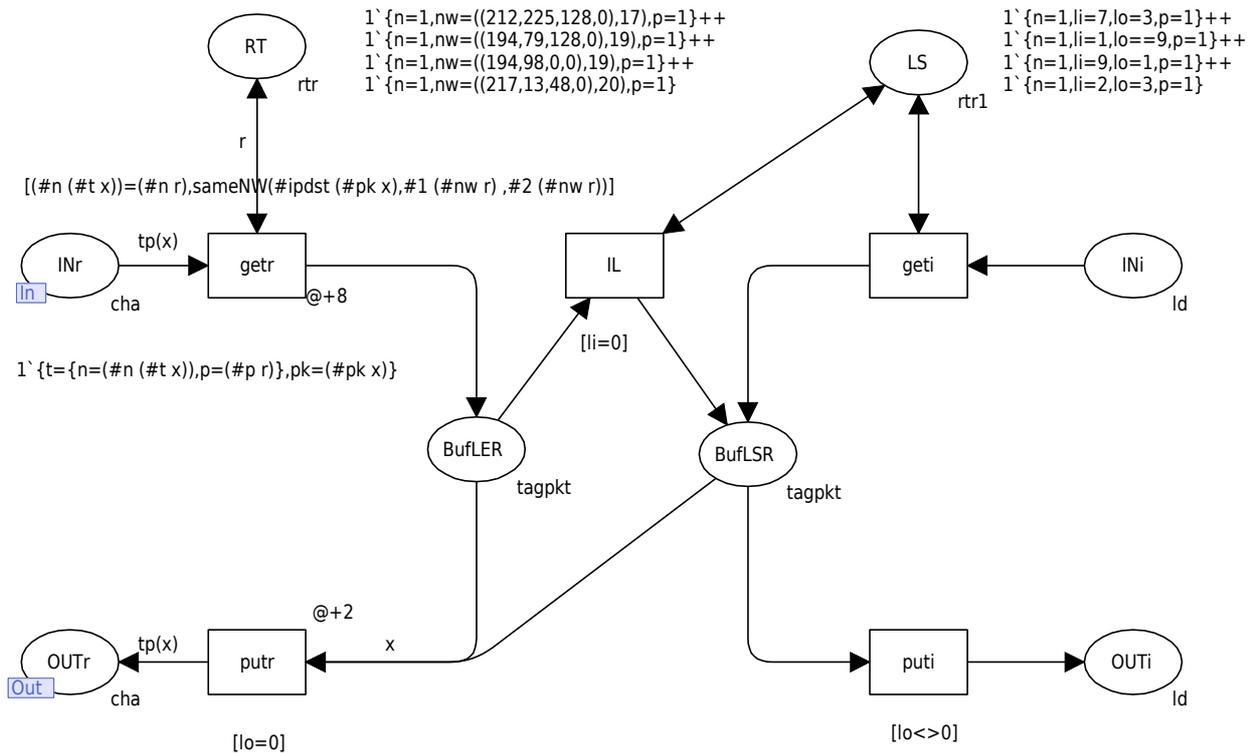


Рисунок 4 – Модели LSR и LER портов MPLS маршрутизатора

Порт выполняет первоначальное назначение меток в соответствии с агрегированными маршрутами сети. Внешне модель напоминает комбинацию портов IP и LSR; используется как таблица маршрутизации **RT**, так и таблица коммутации меток **LS**. Позиция **BufLSR** представляет внутренний буфер пакетов маршрутизатора; позиция **BufLER** предназначена для временного хранения пакетов после первоначального назначения меток. Заметим, что в выходной канал порта **OUTr** выводится пакет без метки.

2.3. Модели терминальных сетей. Модель реалистичного трафика является важной составляющей, обеспечивающей общую адекватность построенных моделей реальным процессам, в работе моделируется трафик, предложенный в [7,10]. Терминальная сеть периодически генерирует пакеты со случайными адресами источника и приёмника, при этом адрес источника находится в диапазоне адресов собственных сетей, а адрес приёмника в диапазоне адресов всех сетей моделируемого фрагмента Новосибирской региональной сети.

Входные пакеты, предназначенные для терминальной сети, помещаются во входной порт – позицию **IN**, далее обрабатываются с помощью перехода **Count**. Результатом обработки входных пакетов является накопление статистической информации, в позиции **TrafficIN** выполняется подсчёт

количества всех доставленных пакетов в сети. Модель терминальной сети **Terminal** [7] дополнена измерительным фрагментом оценки времени доставки сообщения, который представлен на рис. 5.

Оценка времени доставки сообщения выполнена на основе вычисления разности штампов времени получения и отправления сообщения для пары взаимодействующих терминальных сетей. Переход **culcQoS** запускает перевычисления характеристик, хранимых в позициях **sum**, **averDT**, **maxDt**, **quant**. При вычислении среднего использована информация о новом доставленном фрейме $(s+(\#dt a) \text{ div } (i+1))$.

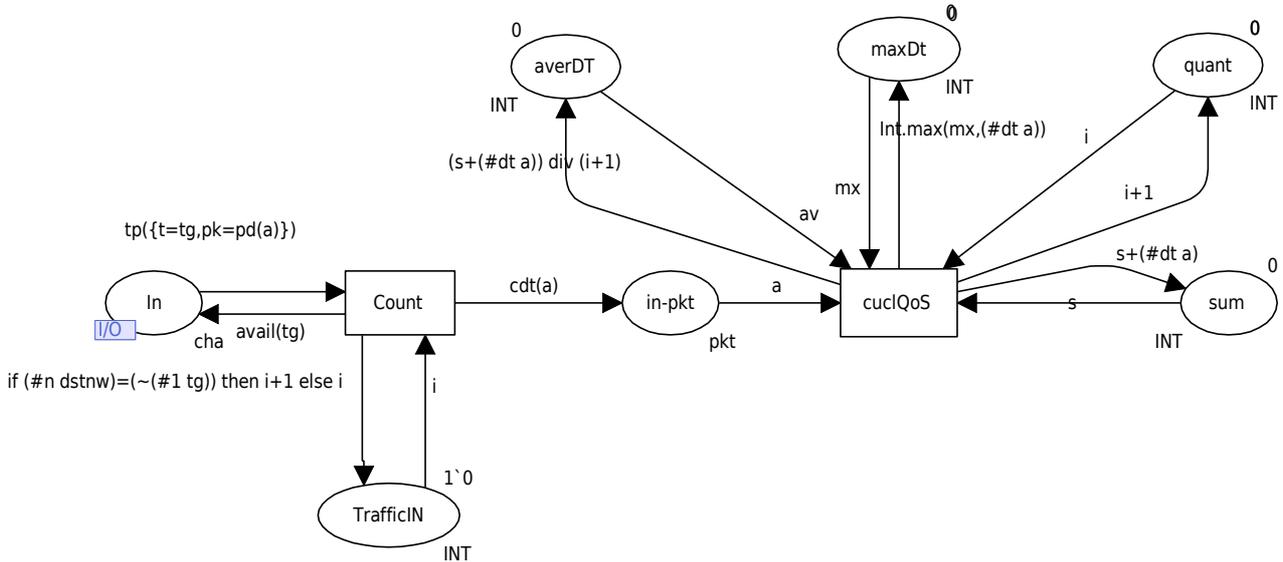


Рисунок 5 – Измерительный фрагмент

3. Сравнительная оценка параметрической модели и прямого отображения. В серии вычислительных экспериментов показано, что оценки характеристик, полученных с помощью параметрической модели и традиционным методом [10], одинаковы. Таким образом для оценки взаимозаменяемости (эквивалентности) остановимся на достоинствах и недостатках предложенных моделей. Недостатками параметрических моделей являются в первую очередь сложность восприятия и слабая наглядность. Преимущества состоят в том, что модели содержат малое число элементов сети Петри, что позволяет ускорить загрузку модели и проведение вычислительных экспериментов; не требуют перекомпоновки при изменении структуры сети, следовательно предложенные модели удобно использовать при проектировании сетей, в САПР; сравнительная характеристика представлена в табл. 2.

Таблица 2 – Оценка количества элементов модели

| Сеть | Топология | | Маршрутизатор | | ТС | | Всего | |
|-----------------|-----------|--------|---------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| | компонент | вершин | компонент | вершин | компонент | вершин | компонент | вершин |
| Европейская | 1 | 87 | 7 | 49 | 6 | 102 | 14 | 238 |
| Новосибирская | 1 | 105 | 8 | 56 | 6 | 102 | 15 | 263 |
| Параметрическая | 1 | 13 | 1 | 13 | 1 | 16 | 3 | 42 |

На рис. 6, а представлена диаграмма сравнения количества элементов сети Петри в прямом и параметрическом представлении.

Кроме того, параметрическое отображение позволяет радикально снизить нагрузку вычислительной машины на просчет модели в режиме моделирования, а следовательно сэкономить процессорное время (рис. 6, б). Результаты проведенного исследования представляют, что время загрузки параметрической модели значительно меньше, чем традиционной модели, т.е. параметрическая модель является эффективной.

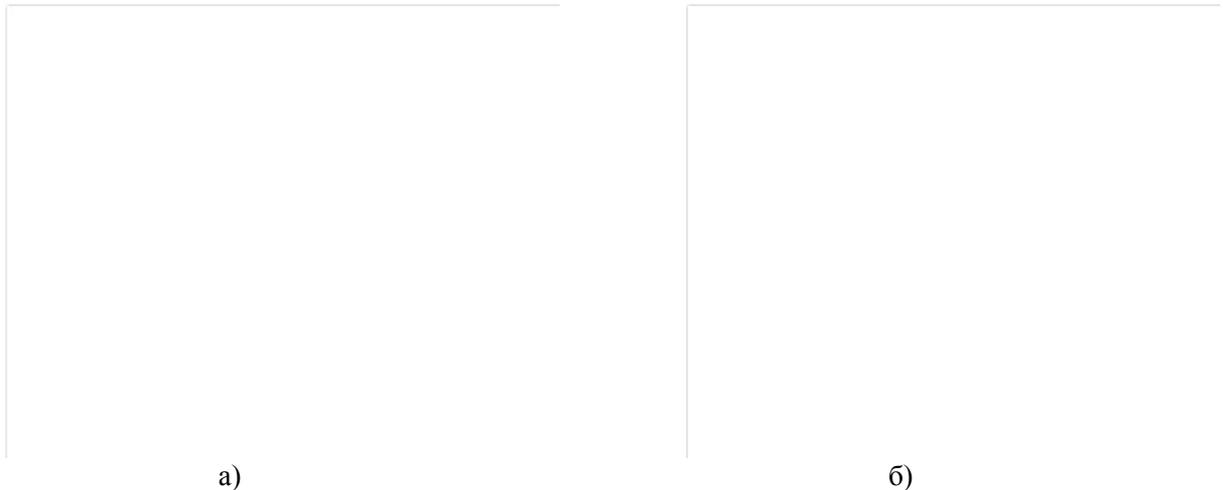


Рисунок 6 – Сравнение различных типов моделей: а) сравнение количества элементов сети Петри; б) оценка времени загрузки различных типов моделей

В заключении отметим, что представленная модель MPLS сети в параметрической форме, содержит фиксированное число вершин сети Петри. На примере Новосибирской региональной сети и Европейской магистрали Интернет описана топология сети, которая является параметром сети. Показано, что построенная параметрическая модель снижает время построения модели для сети с произвольным количеством устройств, подтверждена адекватность модели сравнением с ранее полученными результатами и измерениями характеристик реальных сетей.

Литература

1. *RFC 3031: Multiprotocol Label Switching Architecture* / E. Rosen, A. Viswanathan, R. Callon, (January 2001). – 61p.
2. *RFC 3032: MPLS Label Stack Encoding* / E. Rosen, D. Tappan, G. Fedorkow, Y. Rekhter, D. Farinacci, T. Li, A. Conta, (January 2001). – 23p.
3. *RFC 3270: Multi-Protocol Label Switching (MPLS) Support of Differentiated Services* / [F. Le Faucheur, L. Wu, B. Davie, S. Davari, P. Vaananen, R. Krishnan, P. Cheval, J. Heinanen], (May 2002). – 64p.
4. *Jensen K. Colored Petri Nets – Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use* / K. Jensen – Springer-Verlag, 1997. – Vol. 1-3. – 673 p.
5. *Beaudouin-Lafon M. CPN Tools: A Tool for Editing and Simulating Coloured Petri Nets* / M. Beaudouin-Lafon, W.E. Mackay, M. Jensen et al. // LNCS: Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. – 2001. – Vol. 2031. – P. 574-580.
6. *Zaitsev D.A. Switched LAN Simulation by Colored Petri Nets* / D.A.Zaitsev // Mathematics and Computers in Simulation. – 2004. – Vol. 65, № 3. – P. 245-249. .
7. *Шмельёва Т.Р. Параметрическая модель IP-сетей в форме раскрашенных сетей Петри* / Т.Р. Шмельёва // Сборник УНДИС. – 2009. – № 2. – С. 62-67.
8. *Zaitsev D.A. An Evaluation of Network Response Time using a Coloured Petri Net Model of Switched LAN* / D.A. Zaitsev // Proc. of Fifth Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools, (October 8-11, 2004). – Aarhus (Denmark). – 2004. – P. 157-167.
9. *Зайцев Д.А. Основы построения параметрических моделей Петри коммутируемых сетей* / Д.А. Зайцев, Т.Р. Шмельёва // Моделирование и компьютерная графика: материалы 1-й междунауч.-технич. конф. 4-7 октября, 2005. – Донецк: ДонНТУ (Украина). – 2005. – С. 207-215.
10. *Зайцев Д.А. Исследование эффективности технологии MPLS с помощью раскрашенных сетей Петри* / Д.А. Зайцев, А.Л. Сакун // Зв'язок. – 2006. – Т. 65, № 5. – С. 49-55.