

## РЕЕНТЕРАБЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РВВ СЕТИ

*Шмелёва Т.Р.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[t.shmeleva@onat.edu.ua](mailto:t.shmeleva@onat.edu.ua)*

## РЕЕНТЕРАБЕЛЬНА МОДЕЛЬ РВВ МЕРЕЖІ

*Шмельова Т.Р.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[t.shmeleva@onat.edu.ua](mailto:t.shmeleva@onat.edu.ua)*

## REENTERABLE MODEL OF РВВ NETWORK

*Shmeleva T.R.*

*A.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[t.shmeleva@onat.edu.ua](mailto:t.shmeleva@onat.edu.ua)*

**Аннотация.** Для оценки параметров качества обслуживания РВВ сети построена реентерабельная модель в форме раскрашенной сети Петри. Модель сети состоит из нескольких компонент: моделей граничного РВВ коммутатора, С-порта и В-порта граничного РВВ коммутатора; магистрального РВВ коммутатора, коммутатора и портов коммутатора Ethernet; терминального оборудования: сервера, рабочей станции с измерительными компонентами; главной страницы модели. Модели отлажены и протестированы в моделирующей системе CPN Tools. Проведены вычислительные эксперименты с моделью. Подтверждена адекватность построенной реентерабельной модели по отношению к модели, построенной по принципу прямого отображения. Оценки параметров качества обслуживания, в частности времени отклика сети для различных характеристик сети, достигаемых с помощью различных параметров интенсивности трафика, таких как периодичность запросов, количество кадров ответа и время работы, совпали с ранее полученными результатами.

**Ключевые слова:** технология магистральных мостов провайдера РВВ, динамическая таблица коммутации, реентерабельная модель, раскрашенная сеть Петри, параметры качества обслуживания QoS.

**Анотація.** Для оцінки параметрів якості обслуговування РВВ мережі побудована реентерабельна модель у формі розфарбованої сітки Петрі. Модель мережі складається з кількох компонентів: моделей граничного РВВ комутатора, С-порту і В-порту граничного РВВ комутатора; магистрального РВВ комутатора, комутатора і портів комутатора Ethernet; термінального обладнання: сервера, робочої станції з вимірювальними компонентами; головної сторінки моделі. Моделі налагоджені і протестовані в моделюючій системі CPN Tools. Відповідно до ієрархічного принципу побудови моделей, реентерабельна модель РВВ мережі містить декілька рівнів. Верхній рівень моделі представляє головна сторінка, яка не залежить від топології мережі і не змінюється при вивченні мереж з різними топологіями. Топологія мережі є параметром моделі. Для точного визначення місця розташування будь-якого повідомлення в мережі введений дескриптор (tag) топології, що містить два поля: адрес пристрою і номер порту. Перемикання дескрипторів топологічної інформації відповідно до заданої топології здійснюється за допомогою спеціальних функцій. Для коректного перемикання тегів і передачі повідомлень в мережі введені мітки доступності портів сегментів, що запобігають передачі більше одного повідомлення через порт сегмента. Другий рівень моделі наданий описом моделі граничного РВВ комутатора. Модель граничного РВВ комутатора містить усі РВВ таблиці комутації, буфери усіх портів всіх комутаторів, кількість С-портів і В-портів. Для спрощення моделі і специфікації черг портів введений тип даних, який дозволяє не розділяти черги для С-портів і В-портів. Проведено обчислювальні експерименти з моделлю. Підтверджено адекватність побудованої реентерабельної

моделі по відношенню до моделі, побудованої за принципом прямого відображення. Оцінки параметрів якості обслуговування, зокрема часу відгуку мережі для різних функцій мережі, що досягаються за допомогою різних параметрів інтенсивності трафіка, таких як періодичність запитів, кількість кадрів відповіді і час роботи, збіглися з раніше отриманими результатами.

**Ключові слова:** технологія магистральних мостів провайдера PBB, динамічна таблиця комутації, реєнтерабельна модель, розфарбована сітка Петрі, параметри якості обслуговування QoS.

**Abstract.** For estimation of PBB network a quality of service parameters, a reenterable model has been constructed in the form of a colored Petri net. The network model consists of several components: a PBB edge switch model, a C-port and a B-port edge PBB switch; PBB backbone switch, switch and Ethernet switch ports; terminal equipment: server, workstation with measuring components; main page of the model. Models are debugged and tested in the CPN Tools modeling system. In accordance with the hierarchical principle of model construction, the reenterable PBB network model contains several levels. The top level of the model is the main page, which does not depend on the network topology and does not change when studying networks with different topologies. Network topology is a model parameter. To accurately determine the location of any message on the network, a topology descriptor (tag) is entered, containing two fields: the device address and the port number. Switching topological information descriptors in accordance with a given topology is performed using special functions. For correct switching of tags and transmission of messages in the network, availability tags of segments ports are introduced, preventing the transmission of more than one message through a port of a segment. The second level of the model is represented by the PBB edge switch model. The PBB edge switch model contains all PBB switching tables, buffers of all ports and of all switches, the number of C-ports and B-ports. Conducted computing experiments with the model. The confirmed adequacy of the constructed reenterable model in relation to the model which constructed by the principle of direct mapping. Estimations of the quality of service parameters, particularly the network response time for various network characteristics achieved using various parameters, such as the frequency of requests, the number of response frames and the running time, comparable with previous results.

**Key words:** technology of provider backbone bridge PBB, dynamic switching table, reenterable model, colored Petri net, quality of service parameters QoS.

Стремительное развитие и постоянное совершенствование телекоммуникационных сетей в направлении внедрения технологий нового поколения [1] и сетей будущего [2] требует наличия инструментария для исследования параметров качества обслуживания и производительности сетей, поддерживающих различные сетевые технологии и архитектуры, с учетом взаимодействия произвольного количества устройств и их различных комбинаций. Кроме требований к качеству обслуживания [1, 3], которые являются стандартными функциями современных телекоммуникационных сетей, актуальным остается вопрос надежности и безопасности коммуникационных систем [4].

Традиционная разработка моделей телекоммуникационных сетей путем прямого отображения элементов структурной схемы [5] является существенным препятствием на пути широкого применения данного класса моделей: в управляемой моделью разработке телекоммуникационных устройств и сетей, в обеспечении высокого уровня отказоустойчивости и сетевой безопасности, когда воздействия на сеть приводят к существенному изменению свойств телекоммуникационной сети, ее функциональных и структурных параметров.

В настоящее время складывается необходимость в разработке новых концепций в построении моделей, не требующих модификации структуры моделей при использовании различных топологий, типов коммуникационных и вычислительных устройств, каналов связи. С помощью реєнтерабельных моделей проведена оценка эффективности IP и MPLS сетей, IP сетей с динамической маршрутизацией по исходным стандартным спецификациям протокола RIP и прямоугольных вычислительных решеток [6].

**Целью настоящей статьи** является построение реєнтерабельной модели PBB сети (PBB – Provider Backbone Bridge, технология магистральных мостов провайдера) [7] в форме раскрашенной сети Петри для оценки характеристик качества обслуживания и производительности магистральной сети. Требуется подтвердить адекватность предлагаемой реєнтерабельной модели по результатам вычислительного эксперимента, с результатами, полученными в [8], провести дополнительные эксперименты с двумя типами моделей. Для исследования характеристик качества обслуживания и производительности телекоммуникационных сетей предложено использовать реєнтерабельные модели [6],

временные иерархические раскрашенные сети Петри [5] и моделирующую систему CPN Tools [9].

Принцип реентерабельности применяется в сложных программных системах, в частности в ядре современных операционных систем. Принципы построения реентерабельных моделей применимы для различных языков имитационного моделирования телекоммуникационных сетей и детализированы в [6] для класса раскрашенных сетей Петри [5]. Реентерабельная модель содержит каждый компонент сети (основными компонентами сети являются коммуникационное и терминальное устройства) в единственном экземпляре и задает фактическое местоположение пакета в сети с помощью специального дескриптора топологической информации (тега), который переключается в соответствии с заданной топологией сети, используемой как параметр модели. Для моделирования временных характеристик используются временные штампы фишек и временные задержки переходов и дуг. Обеспечивается иерархическая технология построения моделей путем подстановки переходов. Имеется обширная библиотека моделей типовых компонентов и сетей, построенных путем прямого отображения элементов топологической схемы.

Преимуществами реентерабельных моделей являются: сокращение размера модели и времени ее разработки, повторная используемость модели, которая по существу представляет собой не конкретную сеть, а сетевую технологию, представленную семейством протоколов в целом. Указанные преимущества позволяют успешно применять реентерабельные модели в управляемой моделью разработке телекоммуникационных систем и сетей.

В соответствии с иерархическим принципом построения моделей, реентерабельная модель РВВ сети содержит несколько уровней. Главная страница реентерабельной модели РВВ сети представлена на рис. 1. Она подходит для любой топологической схемы РВВ сети, в том числе и для сети, описанной в [8] и показанной на рис. 2.

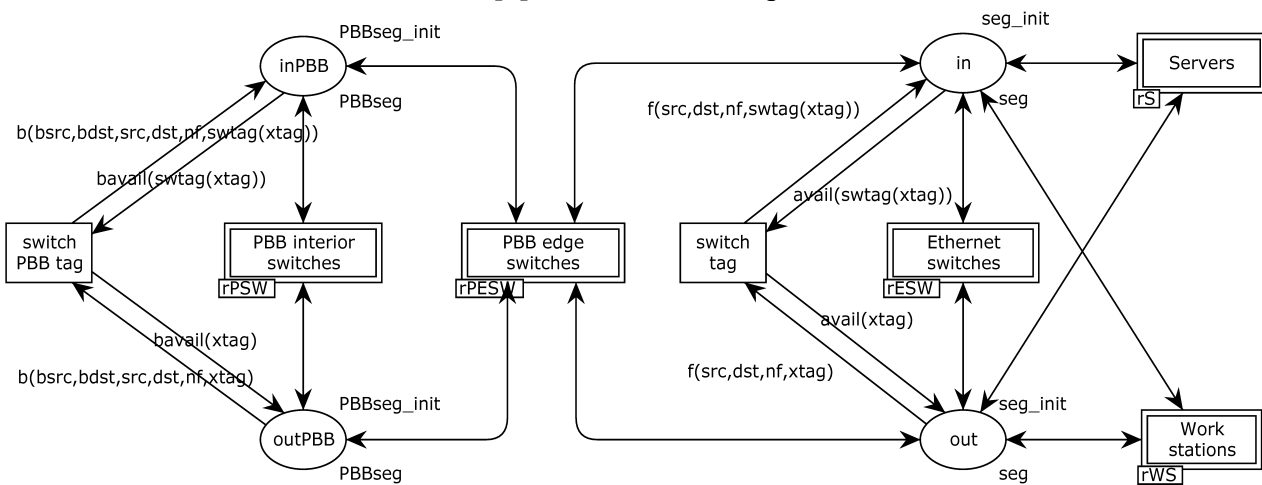


Рисунок 1 – Модель главной страницы РВВ сети

Основные компоненты сети: рабочие станции, серверы, коммутаторы Ethernet и РВВ представлены в виде подмоделей; они обозначены на модели главной страницы в виде переходов, обозначенных двойной линией. Порты всех терминальных устройств и коммутаторов Ethernet описаны позициями *in* и *out*, порты всех коммутаторов РВВ позициями *inPBB* и *outPBB*. Переходы *switch tag* и *switch PBB tag* перенаправляют сообщения из выходного порта одного устройства во входной порт соседнего устройства в соответствии с топологией сети. Для точного определения местоположения любого сообщения в сети введен дескриптор (тег) топологии для пакета, содержащий пару полей, адрес устройства и номер порта, и имеющий следующее описание: *colset tag=product mac\*portnum*.

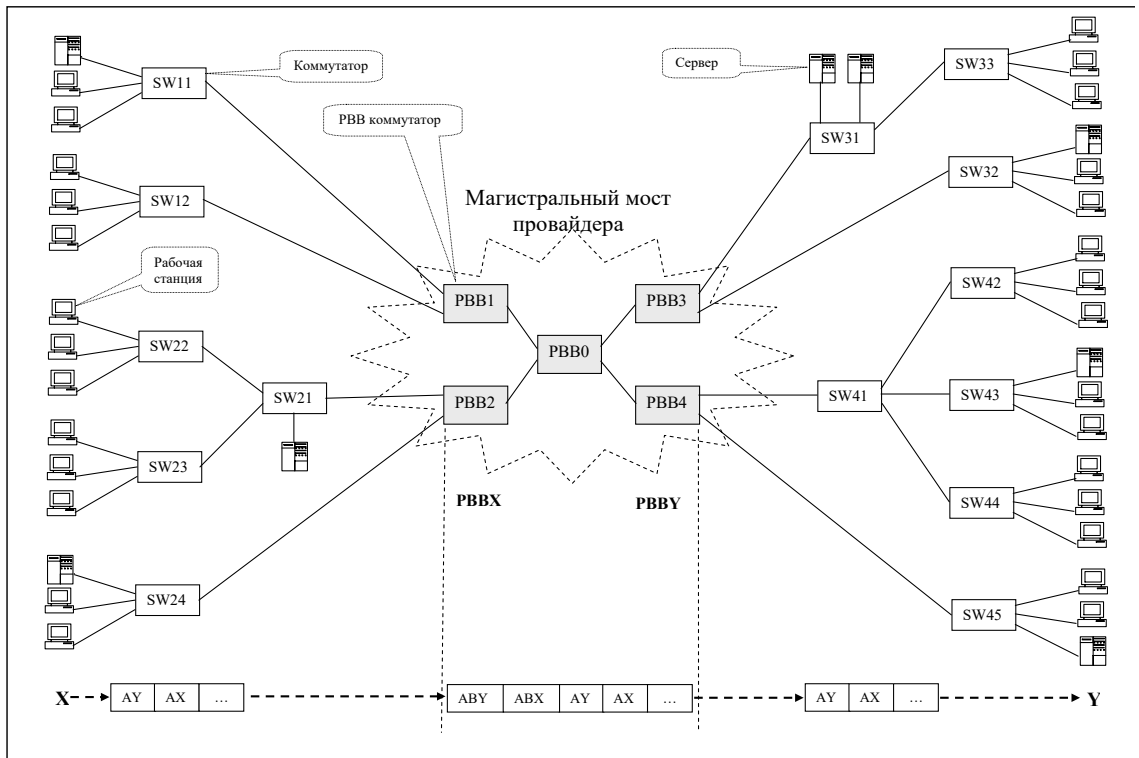


Рисунок 2 – Сеть с магистральным мостом провайдера PBB

Топология сети описывается переменной *nwtopo*, каждая запись содержит два тега, первый тег состоит из адреса устройства и номера порта, к которому присоединено устройство с адресом, описанное во втором теге. Второй тег описывает адрес устройства и номера порта, к которому присоединено устройство с адресом, описанное в первом теге. Для PBB сети (рис. 2) описание топологии показано на рис. 3. Например, запись ((15,1), (112,2)) означает, что устройство с адресом 15 через первый порт соединено со вторым портом устройства с адресом 112.

```
valnwtopo=[((11,1),(111,1)),((12,1),(111,2)),((13,1),(111,3)),((14,1),(112,1)),
((15,1),(112,2)),((16,1),(112,3)),((21,1),(122,1)),((22,1),(122,2)),
((23,1),(122,3)),((24,1),(123,1)),((25,1),(123,2)),((26,1),(123,3)),
((30,1),(121,3)),((122,4),(121,1)),((123,4),(121,2)),((27,1),(124,1)),
((28,1),(124,2)),((29,1),(124,3)),((31,1),(132,1)),((32,1),(132,2)),
((33,1),(132,3)),((34,1),(133,1)),((35,1),(133,2)),((36,1),(133,3)),
((37,1),(131,1)),((38,1),(131,2)),((133,4),(131,3)),((41,1),(142,1)),
((42,1),(142,2)),((43,1),(142,3)),((44,1),(143,1)),((45,1),(143,2)),
((46,1),(143,3)),((47,1),(144,1)),((48,1),(144,2)),((49,1),(144,3)),
((142,4),(141,1)),((143,4),(141,2)),((144,4),(141,3)),((50,1),(145,1)),
((51,1),(145,2)),((52,1),(145,3)),((80,1),(81,3)),((80,2),(82,3)),
((80,3),(83,3)),((80,4),(84,3)),((81,1),(111,4)),((81,2),(112,4)),
((82,1),(121,4)),((82,2),(124,4)),((83,1),(131,4)),((83,2),(132,4)),
((84,1),(141,4)),((84,2),(145,4))];
```

Рисунок 3 – Топология PBB сети

Переключение дескрипторов топологической информации в соответствии с заданной топологией осуществляется с помощью следующих функций:

```
colset topo=product tag*tag;
fun eqtag1 t (rr:topo) = ((#1 rr)=t);
fun eqtag2 t (rr:topo) = ((#2 rr)=t);
fun gtag prd [] = ((0,0),(0,0)) |
```

```

gtag prd (q::r) = if prd(q) then q else gtag prd r;
fun swtag(x:tag) = if (List.exists (eqtag1 x) nwtopo) then (#2 (gtag
(eqtag1 x) nwtopo)) else (if (List.exists (eqtag2 x) nwtopo) then
(#1 (gtag (eqtag2 x) nwtopo)) else (0,0));
    
```

Основная из перечисленных функций – *swtag* переключает теги, остальные функции являются вспомогательными. Для корректного переключения тегов введены специальные метки доступности портов сегментов: *avail* для Ethernet и *bavail* для портов сегментов PBB. Метки доступности необходимы, чтобы предотвратить передачу более одного сообщения через порт сегмента. Первоначальная маркировка требует тщательной спецификации всех меток (которая может быть автоматизирована с помощью специальных функций). Например, для сегмента Ethernet, представленного коммутаторами 121, 122, 123, метки обозначаются переменной *seg\_init*:

```

val seg_init=1`avail(121,1)++1`avail(121,2)++
1`avail(121,3)++1`avail(121,4)++1`avail(122,1)++1`avail(122,2)++
1`avail(122,3)++1`avail(122,4)++1`avail(123,1)++1`avail(123,2)++
1`avail(123,3)++1`avail(123,4)++1`avail(21,1)++1`avail(22,1)++
1`avail(23,1)++1`avail(24,1)++1`avail(25,1)++1`avail(26,1)++1`avail(30,1);
    
```

Аналогичным образом метки доступности портов для сегмента PBB инициализируются константой *PBBseg\_init*.

Модель граничного PBB коммутатора (рис. 4) состоит из трех составных частей: модели граничного коммутатора и подмоделей портов – *PortC*, *PortB*, поскольку она обеспечивает отображение пользовательских C-MAC и магистральных B-MAC адресов, а также соответствующее широковещание двух видов.

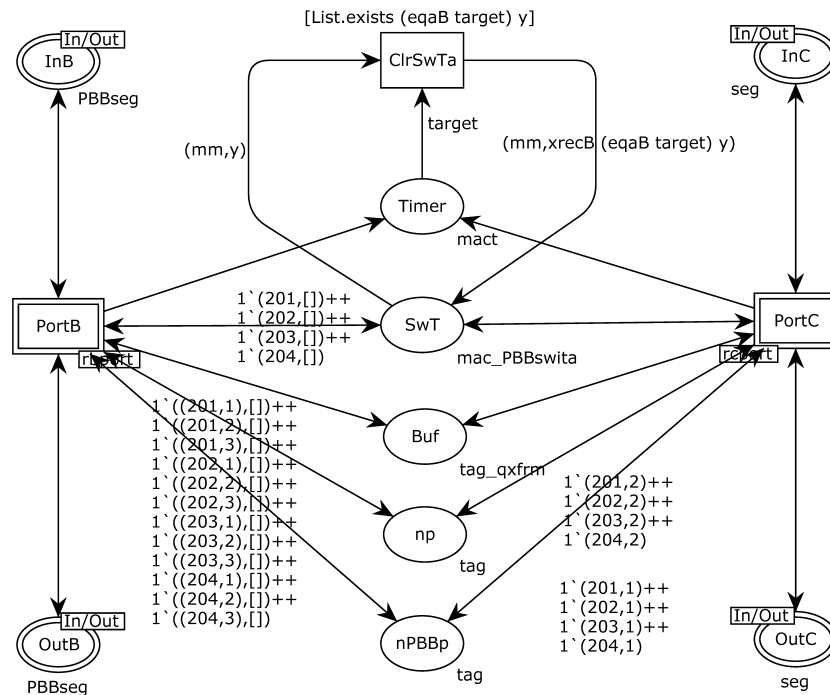


Рисунок 4 – Модель граничного PBB коммутатора

Модель граничного PBB коммутатора содержит все PBB таблицы коммутации в позиции *SwT*, буферы всех портов всех коммутаторов в позиции *Buf*, количество C-портов и B-портов представлено маркировкой позиций *np* и *nPBBp* соответственно. Для упрощения модели и спецификации очередей портов введен тип данных *xfrm*, который позволяет не разделять очереди для C-портов и B-портов. Введенный тип задан набором цветов *xfrm: colset xfrm = union cf:frm + bf:PBBfrm*, и объединяет сообщения для обоих видов портов.

Реентерабельная модель C-порта граничного PBB коммутатора является моделью третьего уровня. Для моделей портов приняты следующие обозначения: *xtag* указывает

дескриптор обробленого повідомлення; *um* вказує дескриптор таблиці комутації РВВ; *ytag* вказує череду порту; *ztag* вказує теґированне кількість С-портів; *vtag* вказує теґированне кількість В-портів. Щоб забезпечити обробку потрібних даних, правила спрацьовування переходів реєнтерабельної моделі містять більше кількості умов по порівнянню з звичайною моделлю [8]. Наприклад, умова спрацьовування переходу *BroadC* містить чотири рядки:

$$\begin{aligned} & [(\# 1 \text{ xtag}) = (\# 1 \text{ ztag}), \\ & (\# 1 \text{ xtag}) = (\# 1 \text{ ytag}), i = (\# 2 \text{ ytag}), \\ & (\# 1 \text{ xtag}) = (\# 1 \text{ vtag}), \\ & i \leq (\# 2 \text{ ztag})]. \end{aligned}$$

Перші три рядки гарантують, що записи з теґами, маючими один і той же MAC-адрес (можливо і номер порту), як описано в *xtag*, вилучаються із позицій: *Buf* (для *ytag*), *nports* (для *ztag*) і *nPBVP* (для *vtag*) відповідно. Останній рядок визначає верхню межу циклу передачі.

Реєнтерабельна модель В-порту граничного РВВ коммутатора (рис. 5), є найбільш складною з усіх компонентів РВВ мережі. Основні переходи моделі реалізують наступні процедури, передбачені стандартами РВВ: *NewSrc* – заповнення в РВВ таблицю комутації нового С-MAC-адреса; *bdstMy* – обробка повідомлення; *bdstNotMy* – передача повідомлення; *DstOld* – передача повідомлення якщо відомий С-MAC-адрес призначення; *DstNew* – широковещання для випадку, якщо С-MAC-адрес призначення невідомий і др.

Для моделювання РВВ мереж і оцінки параметрів якості обслуговування побудовані підмоделі, які не наведені в цій статті:

- магістрального РВВ коммутатора і коммутатора Ethernet;
- термінального обладнання: сервера, робочої станції і вимірної робочої станції.

Результати моделювання дані в табл. 1. Для дослідження характеристик мережі, модель була налаштована в [9], перевірено правильність заповнення динамічних таблиць комутації, підтверджено наявність стаціонарного режиму, одиниця модельного часу відповідає 1,2 мкс реального часу. З допомогою вимірних компонентів моделі і симуляції на тривалих інтервалах часу, відповідних до 10 хвилин реального часу, розраховані характеристики якості обслуговування мережі, коли трафік робочих станцій описаний рівномірним законом розподілу. Результати вимірних експериментів підтвердили адекватність побудованої реєнтерабельної моделі і моделі, представленої в [8]. Отримані результати збігаються з результатами, отриманими з використанням моделі [8] з похибкою близько 3...5%, в частині для максимального часу доставки пакета в межах статистичної помилки. Далі проведено серію вимірних експериментів з двома типами моделей для інших функцій розподілу формування трафіку робочими станціями, середня періодичність запитів дорівнює 18 мс.

Побудована реєнтерабельна модель мережі РВВ у формі розкрашеної мережі Петри в моделюючій системі CPN Tools. Результати моделювання підтверджують, що оцінка продуктивності мережі і QoS збігається з оцінками, отриманими з використанням традиційної моделі. Топологія мережі є параметром реєнтерабельної моделі, тому для моделювання і дослідження нових мереж не потрібно модифікувати структуру моделі. Рекомендовано застосування даного класу моделей для забезпечення надійності і мережевої безпеки, в управляємій моделі розробки телекомунікаційних пристроїв і мереж.

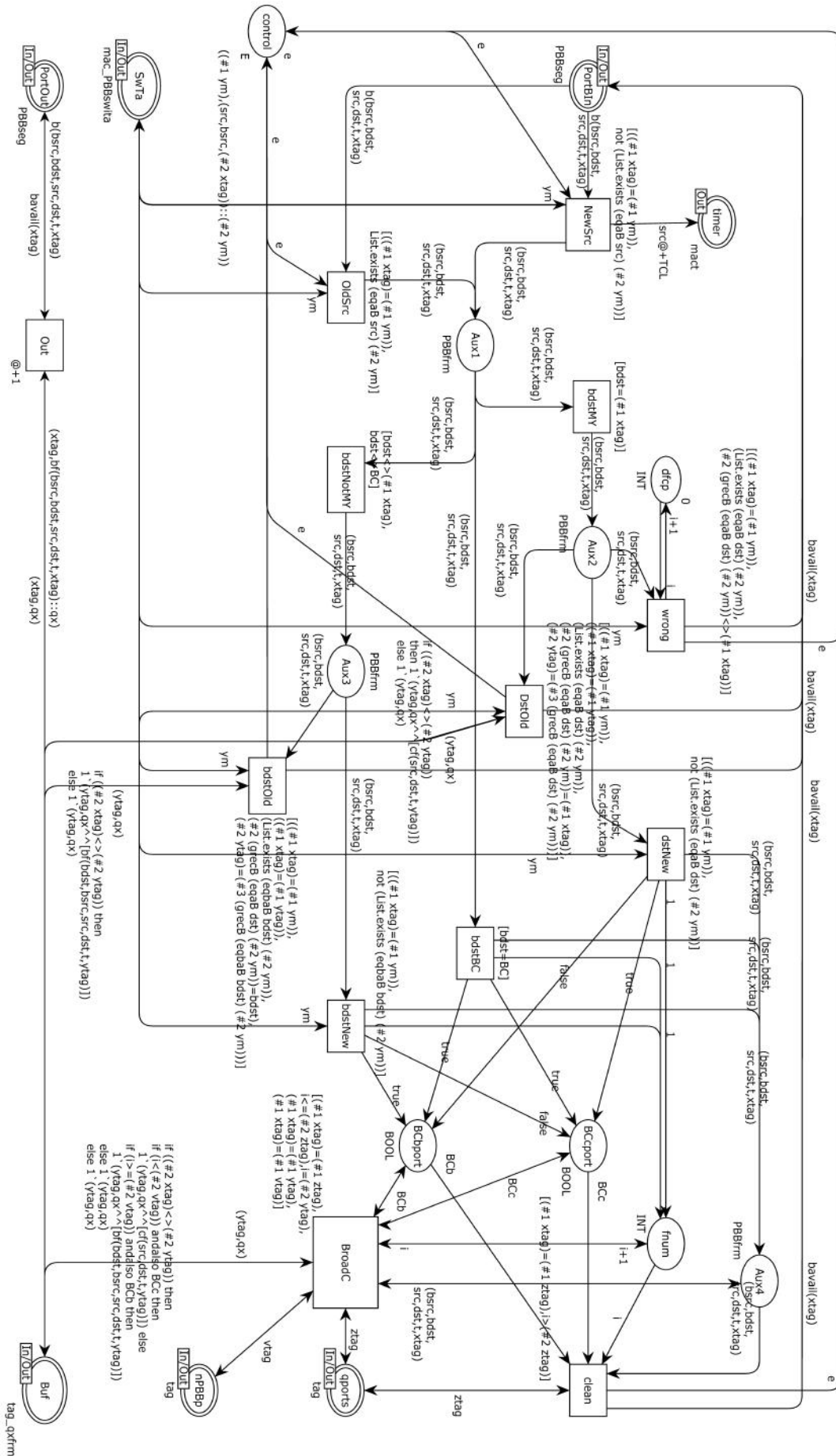


Рисунок 5 – Модель V-порта граничного РВВ коммутатора

Таблица 1 – Характеристики качества обслуживания РВВ сети

Шмелёва Т.Р.

Реентерабельная модель РВВ сети

Закон распределения	Тип модели	Производительность сети, бит/с	Среднее время отклика, мкс	Мах время отклика
Равномерный, 12-24 мс	Прямое отображение	$0,301 \cdot 10^9 \approx 0,3$ Гб/с	34,2	108
	Реентерабельная	$0,305 \cdot 10^9$	34,0	104
Пуассоновский	Прямое отображение	$0,448 \cdot 10^9$	34,8	519
	Реентерабельная	$0,445 \cdot 10^9$	33,6	514
Нормальный	Прямое отображение	$0,297 \cdot 10^9$	39,0	485
	Реентерабельная	$0,298 \cdot 10^9$	38,4	503
Экспоненциальный	Прямое отображение	$0,295 \cdot 10^9$	35,4	216
	Реентерабельная	$0,297 \cdot 10^9$	34,8	223

**Благодарности.** Автор благодарит профессора Слепцова А.И. за обсуждение результатов, представленных в статье.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kryvinska, C. Strauss, "Next Generation Networks - Service Delivery and Management", Book, Electronic Business series, vol. 7, International Academic Publishers, Peter Lang Publishing Group. – 2011; ISBN-978-3-631-60871-5; ISSN: 1868-646X.
2. ITU-T Rec. Y.3001. Future Network Vision: Objectives and Design Goals. May 2011. – 26 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3001-201105-I>.
3. O. V. Lemeshko, O. S. Yeremenko, "Dynamics analysis of multipath QoS-routing tensor model with support of different flows classes," in Proc. of IEEE International Conference on Smart Systems and Technologies (SST). – 2016. – P. 225-230.
4. ITU-T Rec. Y.2701. Security requirements for NGN release 1. April 2007. 44 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2701-200704-I/en>
5. Jensen, K., Kristensen, L.M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany. – 2009. – 384 p.
6. Shmeleva T.R. Efficiency estimation of computing grids with various traffic types // Сборник научных трудов ОНАС им. А.С. Попова. – 2017. – № 2. – С. 89-95.
7. IEEE Draft P802.1ah/D4.2 "Virtual Bridged Local Area Networks, Amendment 6: Provider Backbone Bridges", Work in Progress, March 26, 2008.
8. P.P. Vorbiyenko, K.D. Guliaiev, D.A. Zaitsev, T.R. Shmeleva, PBB Efficiency Evaluation via Colored Petri Net Models. Communications and Network. – 2010. – № 2. – P. 113-124.
9. Моделирующая система CPN Tools <http://www.cpntools.org>.

REFERENCES:

1. Kryvinska, C. Strauss, "Next Generation Networks - Service Delivery and Management", Book, Electronic Business series, vol. 7, International Academic Publishers, Peter Lang Publishing Group, 2011; ISBN-978-3-631-60871-5; ISSN: 1868-646X.
2. ITU-T Rec. Y.3001. Future Network Vision: Objectives and Design Goals. May 2011. 26 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3001-201105-I>.
3. O. V. Lemeshko, O. S. Yeremenko, "Dynamics analysis of multipath QoS-routing tensor model with support of different flows classes," in Proc. of IEEE International Conference on Smart Systems and Technologies (SST). 2016. pp. 225-230.
4. ITU-T Rec. Y.2701. Security requirements for NGN release 1. April 2007. 44 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2701-200704-I/en>
5. Jensen, K., Kristensen, L.M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany. 2009. 384 p.
6. Shmeleva T.R. Efficiency estimation of computing grids with various traffic types // A.S. Popov ONAT proceedings. 2017. No 2. pp. 89-95.
7. IEEE Draft P802.1ah/D4.2 "Virtual Bridged Local Area Networks, Amendment 6: Provider Backbone Bridges", Work in Progress, March 26, 2008.
8. P.P. Vorbiyenko, K.D. Guliaiev, D.A. Zaitsev, T.R. Shmeleva, "PBB Efficiency Evaluation via Colored Petri Net Models." Communications and Network, vol. 2, 2010, pp. 113-124.
9. Modelling system a CPN Tools <http://www.cpntools.org>.

DOI 10.33243/2518-7139-2018-1-2-75-82