

## Оценка эффективности технологии РВВ с помощью раскрашенных сетей Петри

### 1. Введение

Технология магистральных мостов провайдера [1] (Provider Backbone Bridge – PBB) предназначена для построения сетей операторов связи полностью на основе Ethernet. Соответствующий стандарт IEEE 802.1ah [2], разработка которого начата в 2005 году, подготовлен в черновом (draft) варианте, в то время как фирмы производители уже начали выпуск PBB коммутаторов и операторы связи приступили к их эксплуатации. В качестве Ethernet компонентов сети проекта 21CN («Сеть 21 века») Бритиш Телеком выбрал коммутатор-маршрутизатор Nortel Metro 8600, а также Metro Ethernet Services Unit серии 1850. Поставки сверхпроизводительных PBB коммутаторов BlackDiamond 20808 компании Extreme Networks начались в Россию.

С появлением стандартов 1 Gbps и 10 Gbps Ethernet открылись возможности для массового применения технологии Ethernet в магистральных сетях операторов связи, однако технология 802.3, 802.1D имеет ряд существенных недостатков, связанных с масштабируемостью, качеством обслуживания и управляемостью, преодолеть которые призвана серия новых стандартов IEEE: 802.1Q – виртуальные сети, 802.1QinQ – многоуровневые виртуальные сети, 802.1ad – мосты провайдера, 802.1ah – магистральные мосты провайдера, 802.1ag – менеджмент сетей, 802.1Qay – инжиниринг трафика. Указанные стандарты обеспечивают концепцию «Ethernet транспорта» (Carrier Ethernet) для замены в магистральных сетях операторов как SDH, так и решений IP-MPLS, хотя IETF предпринимает активные попытки интеграции стандартов MPLS и PBB в виртуальном частном сервисе VPLS [3].

Следует отметить, что в [4,5] предложено альтернативное решение для обеспечения масштабируемости Ethernet при инкапсуляции IP-Ethernet за счёт создания иерархии единых сетевых E6-адресов, размещённых в поле MAC-адресов Ethernet кадров. Так как PBB предполагает увеличение длины заголовков фреймов за счёт добавления пар MAC-адресов магистральных коммутаторов, E6 имеет определённые преимущества, обусловленные аннулированием протоколов TCP, UDP, IP, соответствующих заголовков пакетов и протоколов отображения адресов ARP/RARP. Модели E6 сетей, представленные в [6], создают основу для сравнения двух технологий. Однако, полноценный сравнительный анализ возможен при построении достаточно детализированных моделей PBB сетей и моделировании процессов инкапсуляции IP-Ethernet.

Целью настоящей работы является построение моделей основных компонентов PBB сетей в форме раскрашенных сетей Петри в среде моделирующей системы CPN Tools [7], а также оценка эффективности технологии PBB с помощью моделирования работы магистральных PBB сетей.

### 2. Обзор технологии РВВ

Кадр IEEE 802.1ah [1,2] инкапсулирует кадры IEEE 802.1QinQ и IEEE 802.3. Заголовок кадра IEEE 802.1ah (Рис. 1, Табл. 1) содержит C-MAC – адреса пользователя (C-DA, C-SA) и B-MAC – адреса магистрали (B-DA, B-SA). Кроме того, предусмотрена повторная инкапсуляция PBB кадров для создания многоуровневых магистральных сетей.

B-DA	B-SA	B-Tag	I-Tag	C-DA	C-SA	S-Tag	C-Tag	Data	FCS
------	------	-------	-------	------	------	-------	-------	------	-----

Рис. 1. Формат заголовка кадра IEEE 802.1ah

Табл. 1. Описание полей заголовка кадра IEEE 802.1ah

Обозначение	Название (оригинальное)	Название (перевод)
B-DA	Backbone destination address	Магистральный адрес получателя
B-SA	Backbone source address	Магистральный адрес отправителя
B-Tag	Backbone VLAN tag	Магистральный тег виртуальной сети
I-Tag	Service instance tag	Тег экземпляра сервиса
C-DA	Customer destination address	Пользовательский адрес получателя
C-SA	Customer source address	Пользовательский адрес отправителя
S-Tag	Service provider VLAN tag	Тег виртуальной сети провайдера
C-Tag	Customer VLAN tag	Тег виртуальной сети пользователя
Data	Data	Данные
FCS	Frame check sequence	Контрольная последовательность кадра

Абстрагируясь от полей виртуальных сетей заголовка кадра, рассмотрим взаимодействие адресных полей на примере сети, представленной на Рис. 2. Пусть компьютер X с MAC-адресом AX отправляет кадр компьютеру Y с MAC-адресом AY. Формируется соответствующий кадр 802.3 (802.1ad) с C-DA=AY, C-SA=AX. Кадр доставляется ближайшему граничному PBB коммутатору PBBX с MAC-адресом ABX. По адресу назначения AY (с помощью адресных таблиц) коммутатор PBBX определяет адрес ABY магистрального PBB коммутатора PBBY, к которому подключена сеть, содержащая Y. PBBX инкапсулирует 802.3 кадр в 802.1ah кадр с указанием B-DA=ABY, B-SA=ABX и отправляет кадр в магистраль. Магистральные PBB коммутаторы используют только пару адресов B-DA, B-SA для доставки кадра граничному PBB коммутатору PBBY. При получении кадра PBBY извлекает инкапсулированный кадр 802.3 (802.1ad) и выполняет доставку кадра компьютеру Y, используя пару адресов C-DA, C-SA.

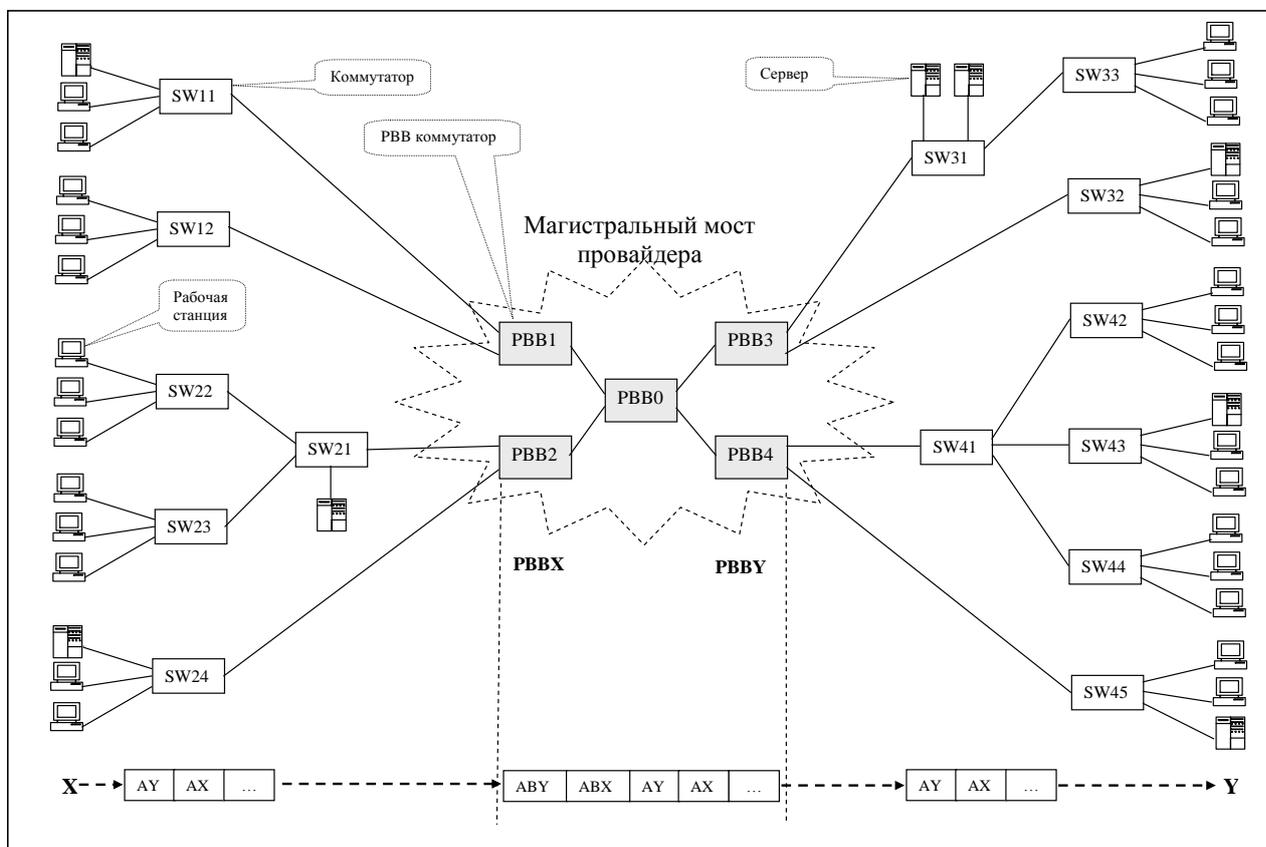


Рис. 2. Пример сети с магистральным мостом провайдера PBB

Для заполнения адресных таблиц используется пассивное прослушивание. Если адрес назначения неизвестен – выполняется широковещание. На Рис. 2 представлена древовидная сеть; для работы на недревовидных топологиях стандарт предусматривает использование модифицированных алгоритмов покрывающего дерева.

Преимуществом технологии РВВ является повышение производительности магистрали за счёт значительного сокращения числа записей в адресных таблицах магистральных РВВ коммутаторов, содержащих только В-МАС адреса. При этом усложняется работа граничных РВВ коммутаторов, которые выполняют отображение С-МАС адресов в В-МАС адреса и инкапсуляцию кадров. На периферии сети могут работать обычные 802.1D коммутаторы.

### 3. Общая организация модели

Для построения моделей выбрана моделирующая система CPN Tools [7], разработанная в университете Охуса в Дании, которая использует для описания моделей язык раскрашенных сетей Петри [8]. В Одесской национальной академии связи им. А.С. Попова в среде CPN Tools создана библиотека моделей компонентов сетей Ethernet, IP, MPLS, Bluetooth, Еб, а также библиотека измерительных фрагментов для оценки производительности и качества обслуживания сетей [6,9-12].

В настоящей работе при моделировании РВВ технологии учитывалась только адресная часть заголовков кадров без использования тегов виртуальных сетей, кроме того, рассматривался один уровень иерархии мостов провайдера и древовидная структура сети. Моделирование тегов виртуальных сетей, многоуровневой иерархии и работы алгоритмов покрывающего дерева магистральных мостов являются направлениями для перспективных исследований. Кроме того, исследование полносвязных сетевых структур (без разделения на виртуальные частные сети), аналогичных Интернет, соответствует цели последующего сравнительного анализа РВВ и Еб с точки зрения преимуществ использования во всемирных сетях.

Для моделирования РВВ сетей построены следующие компоненты:

- модель магистрального РВВ коммутатора SWBm;
- модель граничного РВВ коммутатора SWBm-n;
- модель коммутатора 802.1D (традиционного) SWBn;
- модели терминального (абонентского) оборудования: WS – рабочая станция, MWS – измерительная рабочая станция, S – сервер.

Числа m, n обозначают количество В-портов и С-портов соответственно.

За основу при построении модели коммутатора SWBn (модель порта – port) выбрана [9] с динамическим ведением таблиц коммутации, модифицированная с учётом применения только микросегментированной Ethernet и ведения отдельных очередей кадров по портам. Модель магистрального РВВ коммутатора SWBm (модель порта – РВВport) имеет отличия, связанные с обработкой магистральных В-МАС адресов. Наиболее сложной является модель граничного РВВ коммутатора SWBm-n (модели портов – sport, bport), поскольку она обеспечивает отображение пользовательских С-МАС и магистральных В-МАС адресов, а также соответствующее широковещание двух видов.

При моделировании трафика использовалась концепция взаимодействия клиент-сервер и соответствующие компоненты [9,10], в которые добавлены счётчики для оценки полезного и широковещательного трафика, а также использованы различные законы распределения случайных функций. Следует отметить, что при моделировании крупномасштабных магистралей в дальнейшем целесообразно также использовать модели потокового трафика [6], чтобы абстрагироваться от детализации периферии сети.

Компоненты использованы для построения и исследования модели сети, изображённой на Рис. 1; соответствующая главная страница модели названа Network. Измерительные рабочие станции MWS [9,10] обеспечивают оценку времени отклика сети;

счётчики, представленные совмещёнными позициями, вынесенными на главную страницу модели, обеспечивают оценку полезного и широковещательного трафика.

#### 4. Модель сети

Модель сети, изображённой на Рис. 2, представлена главной страницей модели Network на Рис. 3. и моделями использованных компонентов на Рис. 5-9. Главная страница построена на основе принципа прямого отображения структурной схемы сети. Для моделирования PVB магистрали использован один 4-х портовый магистральный PVB-коммутатор PVB0 типа SWB4 и 4 граничных 3-х портовых PVB-коммутатора PVB1-PVB4 типа SWB1-2 с одним В-портом и двумя С-портами. Для моделирования периферийных сетей использованы 14 4-х портовых коммутаторов типа SW4. Модель терминального (абонентского) оборудования представлена 24 рабочими станциями WS, 4 измерительными рабочими станциями MWS и 8 серверами S.

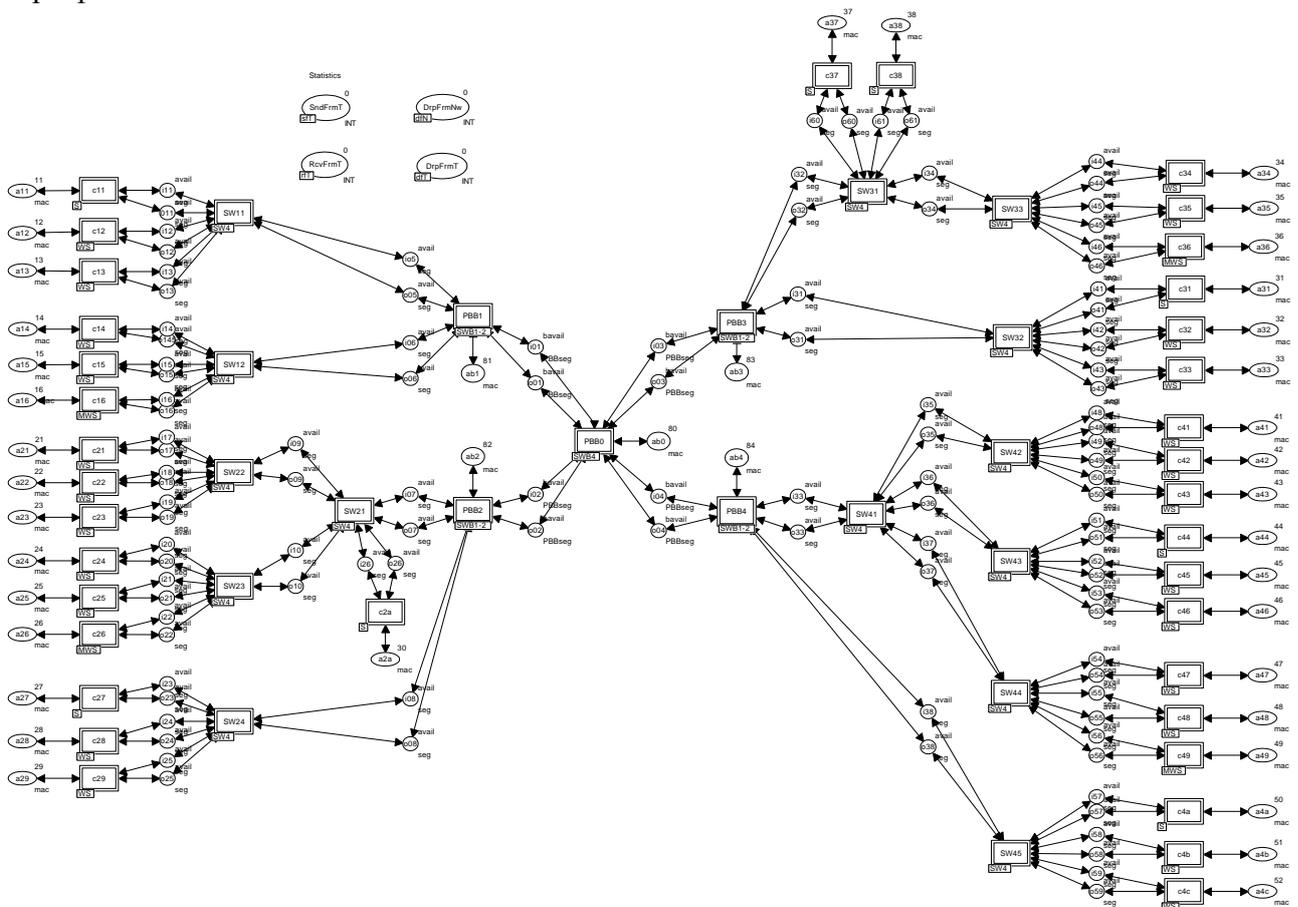


Рис. 3. Модель сети

Описания основных типов данных и функций модели приведены на Рис. 4. На главной странице модели использованы следующие типы позиций: mac – MAC-адрес, seg – обычный сегмент, PVBseg – PVB сегмент; в качестве признака доступности сегмента использованы константы avail, bavail для обычного и PVB сегмента соответственно.

На главной странице модели указаны C-MAC адреса абонентского оборудования в позициях a11-a4c и В-MAC адреса PVB-коммутаторов в позициях ab0-ab5; MAC адреса представлены целыми числами, что не ограничивает общности, если рассматривать, например, только последний байт MAC адресов, совпадающих в первых 5-ти байтах.

Каждый порт коммутаторов представлен парой позиций, моделирующих полнодуплексный режим работы. Позиция ik – входной (input) канал k-го порта; позиция ok – выходной (output). Соединение оборудования в соответствии со структурной схемой сети выполняется путём совмещения входных и выходных позиций портов. Следует отметить,

что при соединении двух коммутаторов входной канал одного из них совмещается с выходным каналом другого и наоборот; названия позиций портов выбраны по отношению к коммутатору наиболее близкому к PBB0.

Кроме того, на главную страницу вынесены совмещённые позиции для оценки трафика: SndFrmT вида sT – счётчик отправленных кадров, RcvFrmT вида rT – счётчик принятых кадров, DrpFrmNw вида dfN – счётчик потерянных кадров сети, DrpFrmT вида dfT – счётчик потерянных кадров терминального оборудования.

```

colset mac = INT;
colset mact = mac timed;
colset frm = product mac * mac * nfrm timed;
colset PBBfrm = product mac * mac * mac * mac * nfrm
timed;
colset seg = union f:frm + avail timed;
colset PBBseg = union b:PBBfrm + bavail timed;
colset swi = product mac * portnum;
colset swita=list swi;
colset PBBswi = product mac * mac * portnum;
colset PBBswita = list PBBswi;
colset qfrm = list frm;
colset pqfrm = product portnum *qfrm;
colset xfrm = union cf:frm + bf:PBBfrm;
colset qxfrm = list xfrm;
colset pqxfrm = product portnum *qxfrm;

fun eqa a (rr:swi)=((#1 rr)=a);
fun eqaB a (rr:PBBswi)=((#1 rr)=a);
fun eqbaB a (rr:PBBswi)=((#2 rr)=a);
fun grec prd [] = (0,0) | grec prd (q::r) = if prd(q) then q
else grec prd r;
fun xrec prd [] = [] | xrec prd (q::r) = if prd(q) then r else
q::(xrec prd r);
fun grecB prd [] = (0,0,0) | grecB prd (q::r) = if prd(q)
then q else grecB prd r;
fun xrecB prd [] = [] | xrecB prd (q::r) = if prd(q) then r
else q::(xrecB prd r);
fun Delay() = poisson( Delta );
fun Dexec() = poisson( dex );
fun Nsend() = poisson( nse );
fun cT()=IntInf.toInt(!CPNTime.model_time)
val TCL=100000000;

```

Рис. 4. Описание основных типов данных и функций

## 5. Модели сетевого оборудования

Модели сетевого оборудования представлены указанными ранее моделями коммутаторов трёх различных типов: SW4, SWB4, SWB1-2. Общая организация модели коммутатора имеет незначительные отличия и может быть рассмотрена на примере коммутатора 802.1D (традиционного) SW4. Модель набирается клонированием необходимого количества моделей портов port.

Каждый порт идентифицируется уникальным номером (mport\*). Для взаимодействия портов используются общие данные, хранимые в памяти коммутатора. В качестве наиболее простой рассматривается архитектура с обязательной буферизацией кадров. Кадр, поступивший во входной канал порта A, размещается для временного хранения в буфере Buf; при этом с помощью таблицы коммутации SwT определяется номер порта B для перенаправления кадра. Если адрес назначения кадра не указан в таблице, порт выполняет широковещание – кадр перенаправляется во все порты коммутатора, кроме порта A. Выходной канал порта B извлекает кадр из буфера и передаёт его в соответствующий сегмент. Общее количество портов коммутатора portt и номер собственного порта mport\* используются в широковещании. Позиция timer содержит MAC адреса, указанные в таблице SwT, вместе с временными метками (тип данных mact); переход ClrSwTa обеспечивает удаление соответствующей записи таблицы SwT по истечении интервала времени старения записи (константа TCL); рекурсивная функция xrec выполняет удаление записи из таблицы, представленной переменной x; функция eqa выполняет сравнение адресов. Порт реализует пассивное прослушивание трафика (адресов отправителя) с целью заполнения таблицы новыми записями.

Следует отметить, что в буфере Buf типа qfrm организованы отдельные очереди кадров по портам коммутатора в соответствии со стандартами. Начальная маркировка создаёт 4 пустые очереди (списка); заголовок очереди равен номеру соответствующего порта.

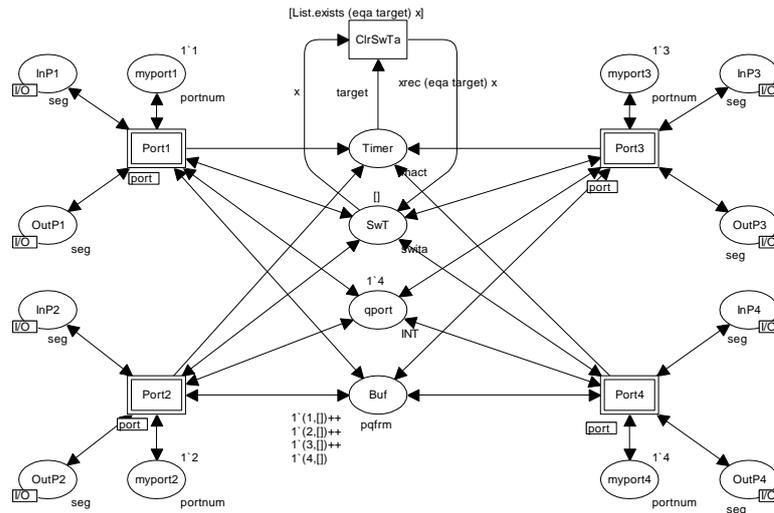


Рис. 5. Модель коммутатора 802.1D (SW4)

### 5.1. Модель порта коммутатора (port)

Модель порта port коммутатора 802.1D представлена на Рис. 6. Тип seg использован для описания канала сегмента Ethernet, который может быть либо свободен (константа avail), либо занят передачей кадра f. Тип frm использован для описания кадра f, состоящего из адреса отправителя src, адреса получателя dst и номера кадра nf (описание абстрагируется от содержимого кадра). Тип swita описывает таблицу коммутации как список записей swi, состоящих из адреса назначения dst и номера порта rnum. Рекурсивная функция gres выбирает запись таблицы коммутации. Тип qfrm буфера Buf описывает занумерованные по портам очереди qfrm кадров frm. Надписи дуг добавления и извлечения, которые будут описаны далее, реализуют FIFO дисциплину очередей.

Кадр поступает во входной канал порта PortIn, при этом адрес отправителя src может быть либо новым (переход NewSrc), либо известным (переход OldSrc). Переход NewSrc пополняет таблицу коммутации новой записью, в которой указан адрес отправителя src и номер порта m (текущий порта коммутатора). Кадр размещается в промежуточной позиции Aux1, затем анализируется адрес получателя кадра dst, который может быть либо новым (переход NewDst), либо известным (переход OldDst). Переход OldDst размещает кадр в буфере Buf с указанием найденного номера выходного порта. Переход NewDst размещает кадр в промежуточной позиции Aux2 и запускает широковещание. Позиция rnum используется для последовательной (i:=i+1) нумерации портов широковещания. Переход BroadC выполняет широковещание до тех пор, пока не исчерпаются номера всех портов (i<=q); затем при (i>q) запускается переход clean, который очищает промежуточные позиции и возвращает признак доступности avail в сегмент. Проверка (i<>m) в надписи дуги широковещания BroadC->Buf исключает широковещание в собственный порт.

Выходной канал порта выбирает кадры из буфера Buf, перенаправленные в текущий порт (m), и передает их в сегмент с помощью перехода Out, который ожидает и удаляет признак доступности сегмента avail.

Рассмотрим более подробно работу с очередями кадров в буфере Buf. Добавление записи выполняется в хвост очереди порта i; для этого из позиции Buf извлекается соответствующая очередь с помощью надписи дуги (i,qu), затем кадр f добавляется в хвост очереди с помощью надписи дуги (i,qu^[f]). Извлечение записи выполняется из головы очереди порта m; для этого из позиции Buf извлекается очередь с выделенным первым кадром с помощью надписи дуги (m,f::qu), затем очередь без первого элемента возвращается с помощью надписи дуги (m,qu). Операция ^^ выполняет конкатенацию очередей; операция :: выделяет головной элемент.

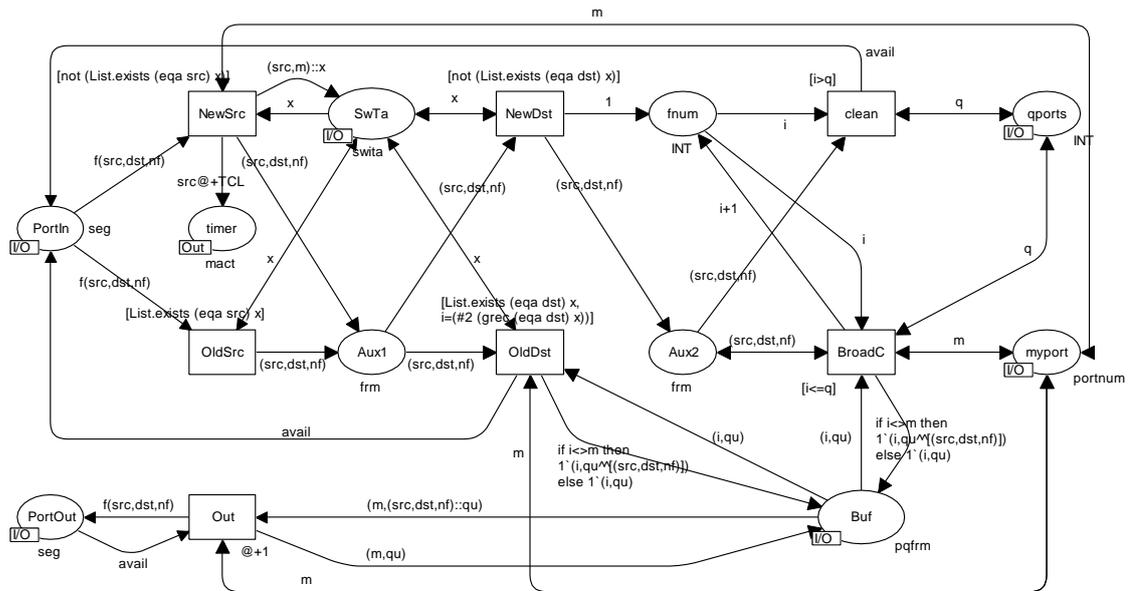


Рис. 6. Модель порта коммутатора 802.1D (port)

### 5.2. Модель порта магистрального PVB коммутатора (PVBport)

Модель порта PVBport магистрального PVB коммутатора представлена на Рис. 7. Работа порта магистрального PVB коммутатора во многом аналогична работе порта обычного коммутатора представленного на Рис. 6 с той разницей, что вместо C-MAC адресов используются V-MAC адреса 802.1ah кадра.

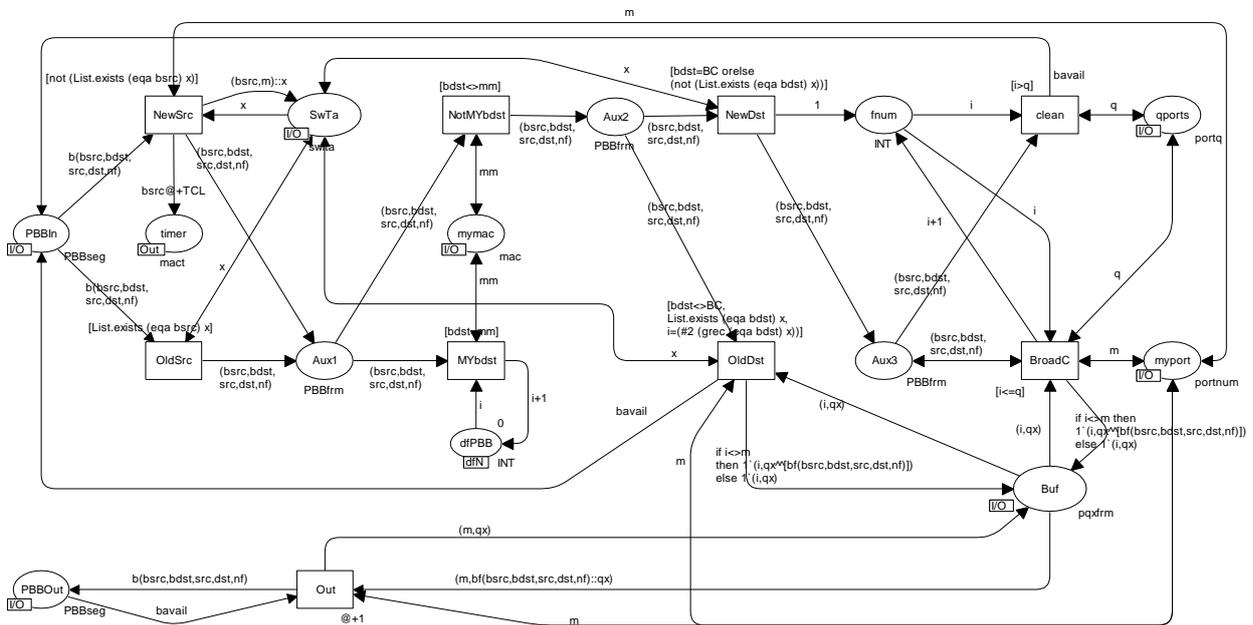


Рис. 7. Модель порта магистрального PVB коммутатора (PVBport)

Тип PVBseg использован для описания канала PVB сегмента, который может быть либо свободен (константа bavail), либо занят передачей кадра b. Тип PVBfrm использован для описания кадра b, состоящего из адреса отправителя магистрали bsrc, адреса получателя магистрали bdst и инкапсулированного 803.3 кадра frm. Таблица коммутации содержит только адреса магистрали V-MAC. Тип pqxfm буфера Buf описывает очереди кадров xfrm портов; тип xfrm представляет собой объединение кадров cf типа frm или кадров bf типа

bfrm. Магистральный PVB коммутатор обрабатывает только bfrm кадры; возможность объединения кадров использована в моделях граничных коммутаторов.

Основные отличия в работе порта связаны с обработкой кадра типа PVBfrm вместо frm и использованием адресов bsrc, bdst вместо адресов src, dst соответственно. Кроме того, переход NotMYbdst устанавливает, что кадр не адресован текущему коммутатору, а переход MYbdst моделирует обработку (служебного) кадра, адресованного текущему коммутатору, путём поглощения кадра и инкремента счётчика dfn в позиции dfPVB.

### 5.3. Модели портов граничного PVB коммутатора (sport, bport)

Основное отличие портов граничного PVB коммутатора состоит в обработке как C-МАС адресов, так и В-МАС адресов и ведении таблиц коммутации, обеспечивающих отображение C-МАС адресов в В-МАС адреса. Кроме того, выполняется широковещание двух видов: по C-портам и по В-портам, передающим кадры различных типов.

Для описания элементов очереди внутреннего буфера использован тип данных объединения xfrm, который может хранить либо кадр cf типа frm, либо кадр bf типа PVBfrm. Для плоского реляционного представления многоуровневых таблиц коммутации и отображения адресов использован тип данных PVBswi, содержащий адрес назначения dst, адрес назначения магистрали bdst и номер порта pnum. Дублирование поля bdst в нескольких записях имеет преимущество быстрого поиска полной информации по ключу src.

#### 5.3.1. C-порт

Модель C-порта sport граничного PVB коммутатора представлена на Рис. 8. Основное отличие от портов port, PVBport (Рис. 6,7) состоит в пополнении таблицы коммутации записями, содержащими кроме src, магистральный адрес bsrc, совпадающий с собственным В-МАС адресом. Кроме того, модифицирована функция рекурсивного поиска gresV и функция сравнения адресов eqaV для обработки записей типа PVBswi; использованы как второе (#2) так и третье (#3) поля таблицы PVBswi; выполняется дополнительная проверка известного адреса назначения с помощью переходов OldDstMy, OldDstNotMy на принадлежность собственной сети. Если известный адрес назначения dst находится в собственной сети (переход OldDstMy) формируется запись cf, которая затем перенаправляется в C-порт. Если известный адрес назначения dst не находится в собственной сети (переход OldDstNotMy) формируется запись bf, которая затем перенаправляется в В-порт, при этом из таблицы определяется не только номер порта назначения (#3 (gresV (eqaV dst) y)), но также магистральный адрес назначения (#2 (gresV (eqaV dst) y)). Широковещание (переход BroadC) различает порты с помощью позиции nPVBp, которая хранит номер первого В-порта; порты нумеруются последовательно: сначала все C-порты, затем все В-порты. Поэтому указанное в надписи дуги BroadC->Buf условие  $i < pbr$  выделяет только C-порты, его альтернатива (then) – только В-порты; в зависимости от этого формируется cf либо bf запись в буфере соответственно. Для широковещания в магистрали в качестве адреса назначения bdst используется константа BC, равная 255.

#### 5.3.2. В-порт

Модель В-порта граничного PVB коммутатора bport представлена на Рис. 9. Она является наиболее сложной, поэтому приведём её подробное описание. Пассивное прослушивание (переходы NewSrc, OldSrc) пополняет таблицу SwTa записями (переход NewSrc), содержащими как пользовательский src, так и магистральный bsrc адреса из текущего кадра. Затем анализируется магистральный адрес назначения bdst; альтернативы представлены переходами: bdstMy – собственный bdst текущего коммутатора, bdstBC – широковещательный bdst, bdstNotMy – адрес bdst некоторого другого PVB коммутатора. Затем выполняются поиск записи в таблице: ключ – адрес назначения dst для собственного bdst (переходы dstNew, dstOld), ключ – адрес bdst для чужого bdst (переходы bdstNew,

bdstOld). В обоих случаях при удачном завершении поиска кадр перенаправляется в буфер (переходы bdstOld, dstOld); в первом случае (переход bdstOld) – без изменения, во втором случае (переход dstOld) – извлекается инкапсулированный 802.3 кадр. Остальные варианты проверок (переходы dstNew, bdstBC, bdstNew) приводят к запуску широковещания (переход BroadC). Таким образом формируется множество из пяти альтернатив: bdstMy&dstNew, bdstMy&dstOld, bdstBC, bdstNotMy&bdstNew, bdstNotMy&bdstOld. Кроме того, специально обрабатывается (переход wrong) случай возможной ошибки: кадр адресован текущему коммутатору (bdstMy), адрес dst присутствует в таблице, но запись таблицы содержит bdst отличный от адреса текущего коммутатора.

Для правильного формирования широковещания использованы дополнительные булевы признаки в позициях: VCcport – широковещание по С-портам, VCbport – широковещание по В-портам. Каждая из трёх альтернатив широковещания формирует собственный набор признаков: bdstMy&dstNew – VCcport=true&VCbport=false, bdstBC – VCcport=true&VCbport=true, bdstNotMy&bdstNew – VCcport=false&VCbport=true. В зависимости от комбинации признаков надпись дуги BroadC->Buf формирует кадры широковещания перенаправленные в С-порты и В-порты.

Следует отметить, что так как элементы очередей буфера представлены объединением, выходные каналы С-портов (переход Out) извлекают из него записи cf, В-портов – записи bf, и передают в сегменты (типа seg либо PBBseg) соответствующие кадры.

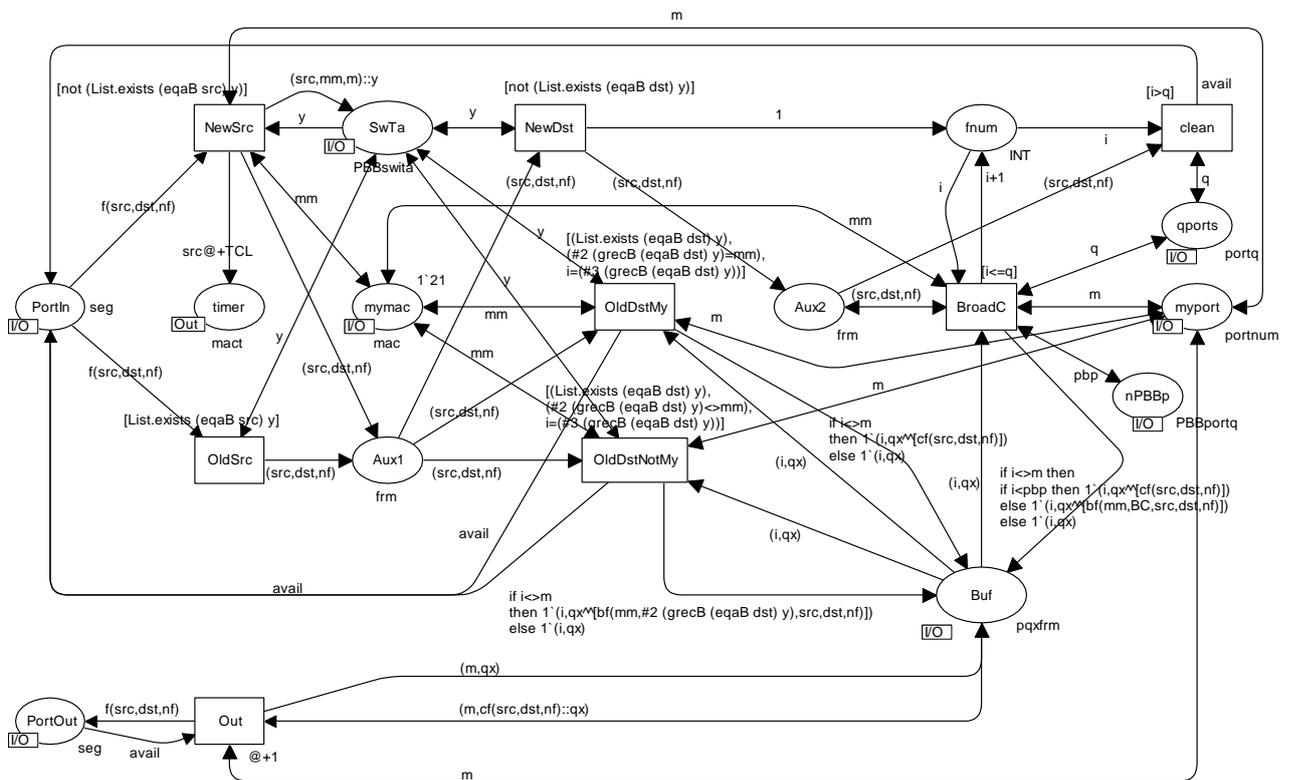


Рис. 8. Модель С-порта граничного РВВ коммутатора (cport)

## 6. Модели терминального оборудования

В настоящей работе использованы модели терминального оборудования, представленные в [9,10]. Рабочая станция WS периодически генерирует запросы серверам; распределение времени между запросами задано случайной функцией Delay(). Сервер выполняет запрос рабочей станции и возвращает случайное число кадров ответа; распределение числа кадров задано случайной функцией Nsend(); распределение времени обработки запроса задано

случайной функцией Dhexec(). Анализировались результаты применения различных законов распределения случайных величин: равномерное, Пуассона, Эрланга.

В модели терминального оборудования добавлены счётчики, представленные совмещёнными позициями: SndFrmT вида sfT – счётчик отправленных кадров, RcvFrmT вида rfT – счётчик принятых кадров, DrpFrmT вида dfT – счётчик потерянных кадров. Для удобства оценки характеристик модели счётчики вынесены на главную страницу (Network). Кроме того, измерительные рабочие станции MWS выполняют оценку времени отклика сети непосредственно в процессе моделирования [9,10].

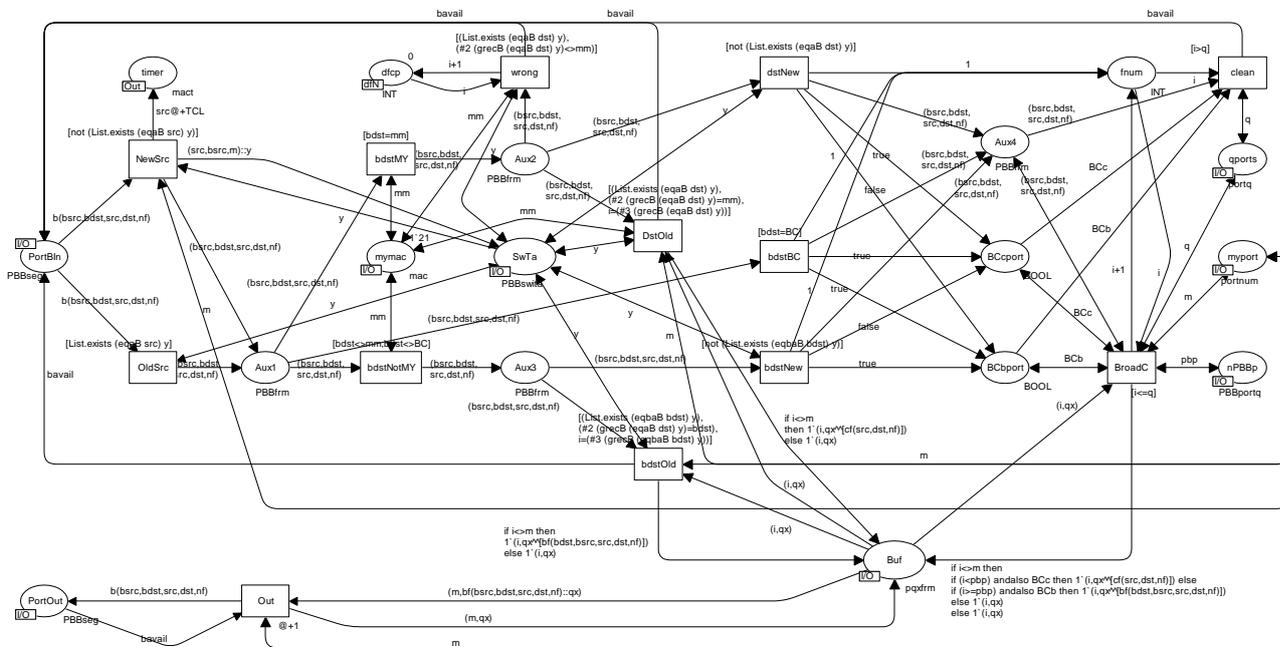


Рис. 9. Модель В-порта граничного РВВ коммутатора (bport)

## 7. Анализ результатов моделирования

Первоначально выполнена раздельная отладка компонентов, а затем комплексная отладка модели сети; выполнена трассировка процессов доставки отдельных кадров и заполнения адресных таблиц. С помощью дополнительных счётчиков установлено, что все отправленные кадры доставляются по назначению. Динамически построенные адресные таблицы полностью соответствуют структурной схеме сети.

Единица модельного времени (MTU) равна 1,2 мкс, что соответствует времени передачи кадров в 10Gbps сегменте. Время работы компонентов оборудования не моделировалось, так как для этого требуются наносекундный масштаб времени, что затрудняет оценки работы сети на длительных временных интервалах.

Измерительные фрагменты модели представлены измерительными рабочими станциями MWS для оценки времени отклика сети и счётчиками кадров для оценки производительности и полезной производительности. Источником накладных расходов в технологии Ethernet, включая РВВ, является использование широковещания, а также затраты ресурсов на построение покрывающих деревьев. Настоящая модель позволяет оценить долю производительности сети, затрачиваемой на широковещание; оценка работы алгоритма покрывающего дерева не выполнялась.

Общее число доставленных терминальному оборудованию кадров широковещания содержит счётчик DrpFrmT множества dfT на главной странице модели; общее число доставленных полезных кадров – счётчик RcvFrmT множества rfT. При останове модели по времени содержимое RcvFrmT меньше содержимого SndFrmT – счётчика отправленных кадров, что связано с тем, что определённое число кадров находится в процессе доставки в

сети; однако, при генерации заданного числа кадров и останове модели по отсутствию событий значения двух счётчиков совпадают.

Полезная производительность сети существенно зависит от времени старения записей адресных таблиц TCL. Кроме того, при включении сети (подключении новых подсетей) создаётся кратковременная перегрузка, вызванная интенсивным широковещанием, что приводит к временному снижению качества обслуживания (времени отклика сети). Динамика широковещания и времени отклика (как показателя качества обслуживания QoS) представлены на Рис. 10. На графиках показан всплеск широковещания при включении сети и его влияние на время отклика, а также вторая волна широковещания после очистки записей таблиц (через 12 с.), влияние которой сглаживается во времени.

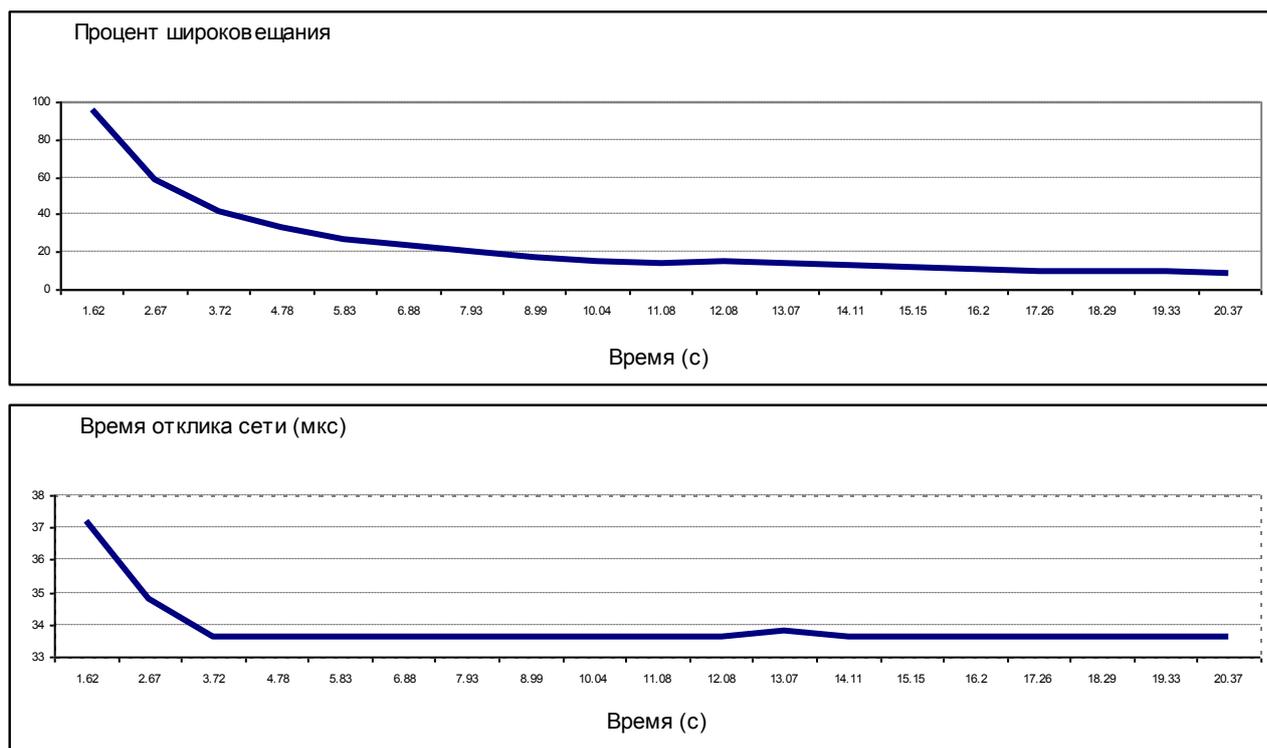


Рис. 10. Динамика широковещания и QoS после включения

Зависимость полезной производительности и времени отклика сети от времени старения записей приведены на Рис. 11. Увеличение времени старения записей приводит к повышению производительности сети и качества обслуживания, однако снижает возможности сети по адаптации к изменению структуры и приводит к неправильной доставке кадров в результате использования неактуальных записей адресных таблиц.

Влияние времени старения записей усиливается при увеличении интенсивности трафика в соответствии с оценками, представленными на Рис. 12. Полезная производительность сети повышается при увеличении интенсивности трафика (хотя и приводит к снижению качества обслуживания), что связано с увеличением частоты использования записей адресных таблиц.

Таким образом, несмотря на существенные преимущества, технология РВВ имеет определённые недостатки, затрудняющие обеспечение заданного качества обслуживания, и требующие резервирования производительности для сглаживания возможных перегрузок. Следует отметить, что в настоящей работе не рассматривались виртуальные сети, которые позволяют изолировать широковещательный трафик (в пределах виртуальной сети).

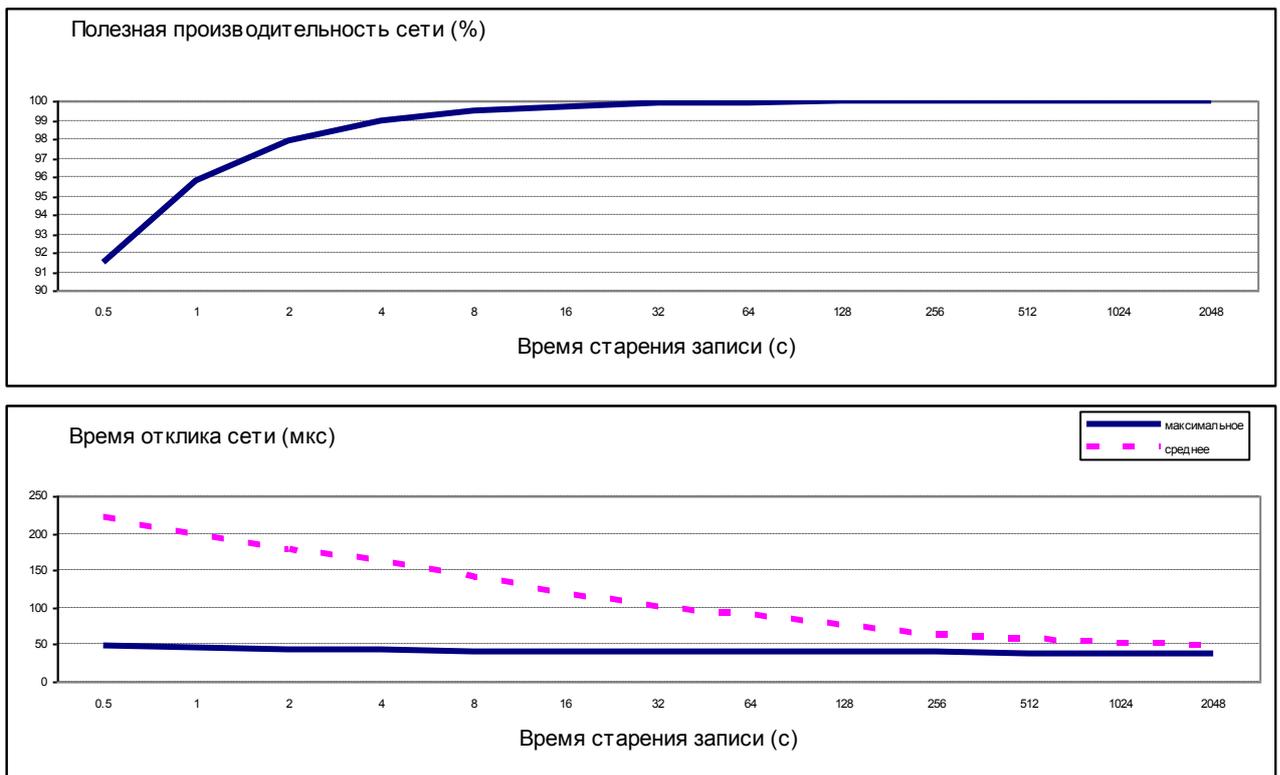


Рис. 11. Влияние времени старения записи на производительность и QoS

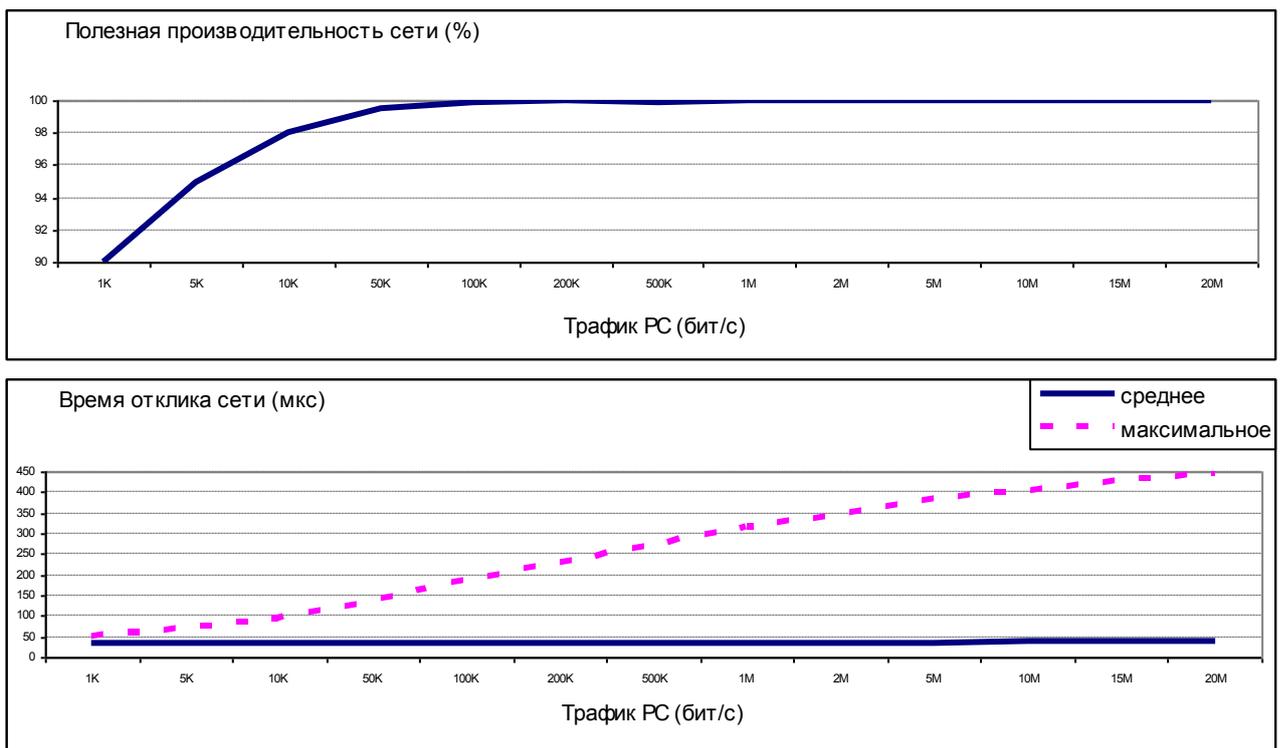


Рис. 12. Влияние интенсивности трафика на производительность и QoS

На основе моделей, построенных в настоящей работе, и моделей Е6 сетей [6] можно выполнить предварительный сравнительный анализ двух технологий. Отсутствие служебного ширококовещания в Е6 позволяет обеспечить гарантированное качества обслуживания. Иерархическая структура Е6 сети (включая магистраль) задаётся при помощи иерархических Е6 адресов и не приводит к увеличению заголовка кадра; в РВВ каждый новый уровень иерархии магистрали требует не менее 12 дополнительных байтов заголовка

кадра (для пары В-МАС адресов). Кроме того, стек Е6 аннулирует 20-36 байтов заголовков протоколов TCP, IP каждого инкапсулированного пакета. Технология РВВ при инкапсуляции IP-Ethernet предполагает двойное отображение адресов: IP->С-МАС, С-МАС->В-МАС, – в то время как Е6 полностью аннулирует отображение адресов в сети за счёт использования единого Е6 адреса.

## 8. Выводы

В настоящей работе построены основные компоненты РВВ сетей: магистральный РВВ коммутатор, граничный РВВ коммутатор с динамическим ведением адресных таблиц. Выполнено моделирование работы РВВ сети. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод об определённых недостатках РВВ технологии, обусловленных чувствительностью к времени старения записей адресных таблиц, затрудняющих обеспечение заданного качества обслуживания.

Предварительные сравнения подтверждают ряд существенных преимуществ Е6 адресации по сравнению с РВВ. Для всесторонней сравнительной оценки двух технологий необходимо построение моделей, отображающих особенности инкапсуляции IP-Ethernet, ведение динамических адресных таблиц Е6, работу виртуальных сетей технологии РВВ, что является направлением для дальнейших исследований.

## Литература

1. Fang L., Zhang R., Taylor M. The Evolution of Carrier Ethernet Services – Requirements and Deployment Case Studies. – Communications, vol. 46, no. 3, March 2008. – p. 69-76.
2. IEEE Draft P802.1ah/D4.2 "Virtual Bridged Local Area Networks, Amendment 6: Provider Backbone Bridges", Work in Progress, March 26, 2008.
3. IETF: VPLS Extensions for Provider Backbone Bridging draft-balus-l2vpn-vpls-802.1ah-03.txt, Work in Progress, July 2008.
4. Воробиенко П.П., Зайцев Д.А., Нечипорук О.Л. Всемирная сеть Ethernet?– Зв'язок, № 5, 2007. - с. 14-19.
5. Воробієнко П.П., Зайцев Д.А., Гуляєв К.Д. Спосіб передачі даних в мережі із заміщенням мережного та транспортного рівнів універсальною технологією каналного рівня.– Патент на корисну модель № 35773, Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи 10.10.2008.
6. Guliaiev K.D., Zaitsev D.A., Litvin D.A., Radchenko E.V. Simulating E6 Protocol Networks using CPN Tools.– Proc. of International Conference on IT Promotion in Asia, August 22-26, 2008, Tashkent (Uzbekistan), P. 203-208.
7. 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>).
8. Jensen K. Colored Petri Nets – Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use.– Vol. 1-3, Springer-Verlag, 1997.
9. Zaitsev D.A., Shmeleva T.R. Switched Ethernet Response Time Evaluation via Colored Petri Net Model.– Proc. of International Middle Eastern Multiconference on Simulation and Modelling, August 28-30, 2006. - Alexandria (Egypt). - 2006. - P. 68-77.
10. Зайцев Д.А. Измерительные фрагменты в моделях Петри телекоммуникационных сетей.– Зв'язок №2(54), 2005, с. 65-71.
11. Зайцев Д.А., Сагун А.Л. Исследование эффективности технологии MPLS с помощью раскрашенных сетей Петри.– Зв'язок. – 2006. – Т. 65, №5. – С. 49-55.
12. Зайцев Д.А., Березнюк М.В. Исследование эффективности использования адресного пространства протокола Bluetooth.– Радиоэлектроника. Информатика. Управление. - 2006, №1. - С. 57-63.