

На правах рукописи

Кизилов

КИЗИЛОВ Евгений Александрович

**АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ
ОЧЕРЕДЕЙ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ
С ПОДДЕРЖКОЙ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ**

**Специальность 05.13.15 – Вычислительные машины,
комплексы и компьютерные сети**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ПЕНЗА 2017

Работа выполнена на кафедре «Вычислительная техника» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Коннов Николай Николаевич

Официальные оппоненты: **Костров Борис Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет»,
заведующий кафедрой «Электронные
вычислительные машины»;
Мартышкин Алексей Иванович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
технологический университет»,
доцент кафедры «Вычислительные машины
и системы»

Ведущая организация – АО «Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт» (ПНИЭИ),
г. Пенза

Защита диссертации состоится «___» _____ 2017 г. в ____ часов
на заседании диссертационного совета Д 212.186.01 на базе ФГБОУ ВО «Пен-
зенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Крас-
ная, 40.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». Диссертация раз-
мещена на сайте: http://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tekhnicheskie_nauki/kizilov

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Гурин Евгений Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современным направлением развития компьютерных сетей является обеспечение качества обслуживания (QoS – quality of service), позволяющее передавать в одной сети, использующей пакетную коммутацию, трафик реального времени (потокowego видео, звука и др.) наряду с обычным эластичным трафиком. Параметры QoS: полоса пропускания, задержка и джиттер кадров (пакетов), доля потерянных кадров – обеспечиваются специальными механизмами управления трафиком в телекоммуникационной аппаратуре. Одним из важнейших механизмов QoS является диспетчеризация очередей в коммутаторах и маршрутизаторах, непосредственно определяющая джиттер и выделенную полосу пропускания (S. Vegesna, E. A. Кучерявый, В. Г. Олифер, Н. А. Олифер).

Для организации эффективного управления диспетчеризации в компьютерных сетях широко используется метод имитационного моделирования обработки передаваемого трафика (A. Apte, M. E. Villapol, J. Billington, E. B. Фишман). При этом решаются следующие задачи:

- выбор эффективных алгоритмов диспетчеризации из реализуемых в существующем оборудовании, обеспечивающих заданные параметры QoS, в первую очередь джиттера, для сетей, характеризующихся трафиком с известными характеристиками (корпоративные сети, АСУТП, использующие технологии Ethernet для обмена данными);

- оценка эффективности новых, проектируемых алгоритмов диспетчеризации очередей, ориентированных на повышение обработки трафика определенного вида по сравнению с известными алгоритмами.

Одним из перспективных направлений моделирования компьютерных сетей является использование аппарата расширенных сетей Петри (Д. А. Зайцев, А. А. Суконщиков, В. Б. Механов, В. Brahimi, J. P. Georger). Однако многие вопросы моделирования механизмов QoS, в частности построения сетей Петри, моделирующих алгоритмы диспетчеризации, до сих пор не рассмотрены, что определяет актуальность исследований в области моделирования коммутаторов компьютерных сетей Ethernet с поддержкой QoS на основе аппарата цветных иерархических временных сетей Петри, а также разработки с помощью моделей новых более эффективных алгоритмов диспетчеризации очередей.

Целью диссертационной работы является улучшение технических и эксплуатационных характеристик алгоритмов диспетчеризации очередей в компьютерных сетях Ethernet с поддержкой качества обслуживания.

Основные задачи, решение которых необходимо для достижения цели:

- выбор математического аппарата, позволяющего выполнить имитационное моделирование существующих и новых алгоритмов диспетчеризации очередей в коммутаторах с поддержкой QoS для оценки их вероятностно-временных характеристик продвижения разнородного трафика;

- разработка имитационных моделей как существующих, так и новых алгоритмов диспетчеризации очередей в коммутаторе с поддержкой качества обслуживания;

- анализ эффективности существующих алгоритмов диспетчеризации очередей для различного вида трафика, в том числе для трафика, не согласованного с выделенной полосой пропускания;

- разработка новых эффективных алгоритмов диспетчеризации очередей, обеспечивающих более справедливое распределение ресурсов в условиях несогласованной нагрузки.

Объектом исследования являются компьютерные сети Ethernet с поддержкой качества обслуживания.

Предметом исследования являются алгоритмы и модели диспетчеризации очередей в коммутаторах компьютерных сетей Ethernet с поддержкой качества обслуживания.

Соответствие паспорту научной специальности. Область исследований соответствует паспорту специальности 05.13.15 – Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети по пунктам: 2. Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных характеристик; 5. Разработка научных методов и алгоритмов создания структур и топологий компьютерных сетей, сетевых протоколов и служб передачи данных в компьютерных сетях, взаимодействия компьютерных сетей, построенных с использованием различных телекоммуникационных технологий, мобильных и специальных компьютерных сетей, защиты компьютерных сетей и приложений.

Методы исследования основаны на математическом аппарате цифровых автоматов, цветных временных сетей Петри, математической статистике, а также имитационном моделировании предлагаемых алгоритмов.

Научная новизна:

- впервые разработаны модели алгоритмов диспетчеризации очередей коммутаторов Ethernet с поддержкой QoS: приоритетного, циклических, взвешенного справедливого, с использованием аппарата цветных временных иерархических функциональных сетей Петри, которые в отличие от известных позволяют оценить вероятностно-временные характеристики обработки коммутаторами произвольного трафика;

- предложены новые алгоритмы динамической диспетчеризации очередей коммутатора Ethernet с поддержкой QoS, которые в отличие от циклических алгоритмов диспетчеризации очередей учитывают время ожидания кадров в очередях и ограничивают время непрерывного обслуживания очередей, что обеспечивает значительно меньший разброс значений джиттера для трафика различных классов QoS при нагрузке как согласованной, так и не согласованной с выделенной полосой пропускания;

- разработаны модели алгоритмов динамической диспетчеризации очередей коммутатора Ethernet с поддержкой QoS, которые базируются на аппарате цветных временных иерархических функциональных сетей Петри и позволяют оценить задержку, джиттер продвигаемого трафика различного типа и верифицировать алгоритмы диспетчеризации очередей;

– впервые предложены методики построения цветных сетей Петри, моделирующих поведение, детерминированных и недетерминированных цифровых автоматов, описывающих отдельные компоненты алгоритмов диспетчеризации очередей, что позволило реализовать подход к построению сетей Петри, моделирующих алгоритмы диспетчеризации очередей, как совокупность функциональных модулей, исходно описанных в виде цифровых автоматов, и в результате чего ускорить и упростить создание, модификацию и верификацию имитационных моделей алгоритмов диспетчеризации очередей.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

– разработан набор шаблонов сетей Петри, моделирующих функции классификации, буферизации, управления полосой и выбора очередей, которые позволяют моделировать существующие и новые алгоритмы диспетчеризации очередей коммутатора Ethernet с поддержкой QoS;

– разработаны модели приоритетного, циклических и взвешенного справедливого алгоритмов диспетчеризации очередей в коммутаторах Ethernet с поддержкой QoS, применение которых позволило оценить степень эффективности алгоритмов диспетчеризации очередей при обработке различного вида трафика в компьютерных сетях, в том числе при несогласованности трафика разного класса QoS с выделенной полосой пропускания;

– разработаны новые алгоритмы динамической диспетчеризации очередей в коммутаторах Ethernet с поддержкой QoS, учитывающие время нахождения кадра в очередях и ограничивающие время непрерывного обслуживания очередей, которые в отличие от циклических алгоритмов диспетчеризации очередей обеспечивают уменьшение вариации среднего значения джиттера задержки трафика различных классов QoS в 1,7–5,3 раза, а в сравнении с взвешенным справедливым алгоритмом – в 10–15 раз, и уменьшают чувствительность характеристик джиттера к несогласованности нагрузки с выделенной полосой в сравнении с циклическими алгоритмами более чем в 7,5 раз, уступая взвешенному справедливому алгоритму только в 2 раза при более простой реализации.

Основные положения, выносимые на защиту:

– модели приоритетного, циклического и взвешенного справедливого алгоритма диспетчеризации очередей коммутатора компьютерной сети Ethernet с поддержкой качества обслуживания, выполненные с использованием аппарата цветных иерархических сетей Петри;

– алгоритмы динамической диспетчеризации, учитывающие время ожидания кадров в очередях, и их модели, реализованные с использованием аппарата цветных иерархических сетей Петри;

– методики построения цветных сетей Петри, моделирующих поведение детерминированных и недетерминированных цифровых автоматов, описывающие компоненты поведения коммутатора Ethernet с поддержкой QoS;

– структура аппаратных средств, реализующих новые алгоритмы динамической диспетчеризации.

Реализация и внедрение. Результаты диссертации использованы при выполнении работ ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития разработки научно-технологического комплекса России на 2014–2020» (соглашение № 14.574.21.0045 от 06.19.2014). Результаты работы внедрены в учебном процессе дисциплины «Инфокоммуникации» при подготовке магистров по направлению 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались в форме докладов на следующих конференциях: XVII–XIX, XXI Всероссийских научно-методических конференциях «Телематика» (СПб., 2010, 2011, 2012, 2014), X–XII Международных научно-технических конференциях «Новые информационные технологии и системы» (г. Пенза, 2010, 2012, 2014, 2016), 17-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2010» (г. Зеленоград, 2010), XI Международной научно-технической конференции «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике» (г. Пенза, 2011), Региональном молодежном форуме «Открытые инновации – вклад молодежи в развитие региона» (г. Пенза, 2013), Международной научной конференции «Информационные технологии и системы 2013» (г. Минск, 2013), X Всероссийской научно-технической конференции «Современные охраняемые технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов» (г. Пенза, 2014), The 5th International Workshop on Computer Science and Engineering-Information Processing and Control Engineering (г. Москва, 2015), XVII Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии» (г. Воронеж, 2017).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 19 работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Объем работы: 128 страниц основного текста, 61 рисунок и 17 таблиц, приложение на трех страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы, формулируются цель и задачи, решение которых позволяет достичь этой цели; определены новизна и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе дается определение понятия качества обслуживания в современных компьютерных сетях и приводится обзор механизмов обеспечения качества обслуживания. Определяются задачи, решаемые диспетчеризацией очередей, и показывается влияние алгоритмов диспетчеризации на характеристики качества обслуживания, первую очередь джиттера. Выбран объект исследования – механизм диспетчеризации очередей, сочетающих механизмы обслуживания очередей и управления полосой пропускания.

Дается краткая характеристика различным классическим алгоритмам диспетчеризации: жесткое приоритетное, взвешенное циклическое, дефицитное

циклическое, взвешенное справедливое. Показывается, что при эксплуатации корпоративных сетей возникает задача выбора применяемых алгоритмов диспетчеризации и оптимизации их параметров с точки зрения требуемых показателей качества обслуживания (QoS – quality of service) для трафика различных типов, прежде всего полосы и джиттера. При разработке новых алгоритмов диспетчеризации возникает необходимость оценки вероятностно-временных характеристик джиттера трафика различных классов QoS, которые могут быть использованы для оценки эффективности управления очередями.

Задача определения эффективности алгоритмов диспетчеризации по оценке вероятностно-временных характеристик продвижения сетевого трафика из-за вычислительной сложности аналитических расчетов может быть решена только с помощью имитационного моделирования.

Проведен сравнительный анализ различных инструментальных систем моделирования и обоснован выбор пакета CPN Tools, использующего аппарат цветных иерархических временных сетей Петри, который обеспечивает как верификацию алгоритма, так и оценку вероятностно-временных характеристик, включая задержку кадров, их джиттер, долю потерянных кадров, размер очередей.

Во второй главе предлагается модель коммутатора Ethernet с поддержкой QoS (рисунок 1), описывающая коммутатор и представляющая собой иерархическую структуру, реализованную с использованием аппарата сетей Петри, содержащую модели входных/выходных портов, буферов, блоков коммутации. Показано, что механизмы диспетчеризации очередей реализуются в компонентах модели выходного порта, названной автором «буфер выходного порта».

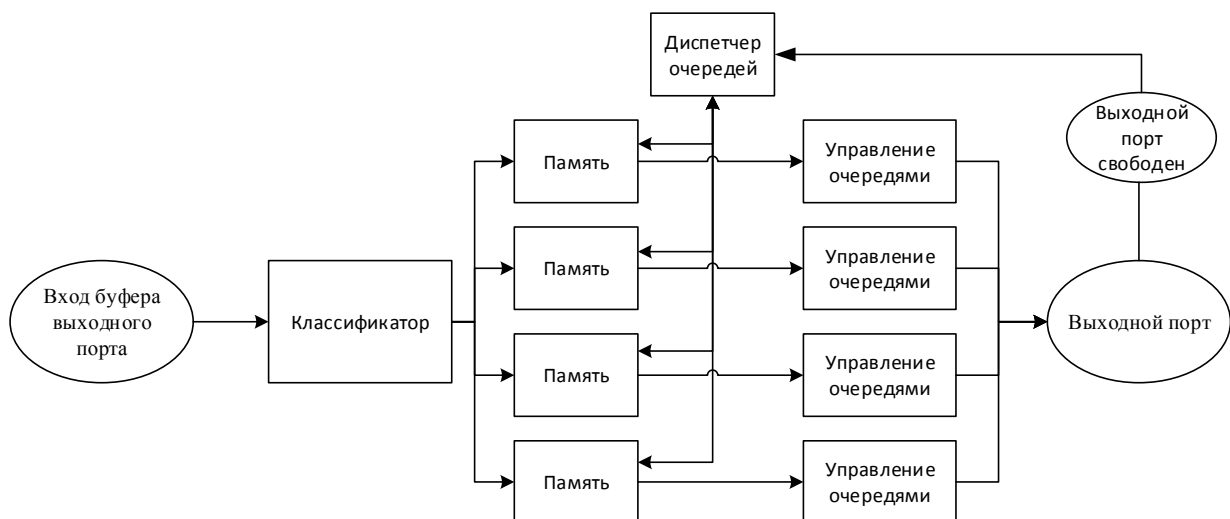


Рисунок 1 – Структура модели буфера выходного порта

Работу буфера выходного порта можно представить в виде одновременного выполнения трех задач. Первая – это получение кадра из коммутационной матрицы, его классификация по полю QoS и запись в соответствующую очередь. Вторая – хранение кадров в соответствующих очередях.

Третья – выбор очереди для доступа к выходному порту в соответствии с алгоритмом обслуживания очередей, чтение кадра из выбранной очереди и передача его в выходной порт.

Для реализации моделей указанных компонентов коммутатора с поддержкой *QoS* в виде цветных временных сетей Петри предложен композиционный подход: сеть формируется из отдельных структурных модулей – моделей коммутационных и оконечных устройств, которые в свою очередь компонуются из функциональных модулей – подсетей Петри, моделирующих определенные этапы обработки данных и/или состояния исследуемого объекта (классификация, буферизация, управление полосой пропускания, выбор очереди).

Известные методы построения сетей Петри, моделирующих телекоммуникационные системы, носят эвристический характер, что вызывает трудности с обеспечением адекватности построенной модели объекту моделирования. Автором предложено описать функционирование компонентов модели коммутатора как цифровых автоматов (ЦА), а затем выполнить формальное построение сети Петри, моделирующей поведение ЦА. Предлагается методика, формализующая процесс построения цветной сети Петри (СП), моделирующей поведение цифрового автомата (ЦА).

Формальное описание сети Петри, моделирующей заданный цифровой автомат, заключается в нахождении соответствия между кортежем M , описывающим цифровой автомат, и кортежем CPN , описывающим сеть Петри.

Автором предложена методика построения сети Петри, моделирующей абстрактный цифровой автомат, включающая следующие шаги:

Шаг 1. Входным и выходным сигналам ставятся в соответствие позиции сети Петри.

Шаг 2. Каждому состоянию автомата ставится в соответствие своя позиция. Нахождение маркера, цвет которого не имеет значения для алгоритма преобразования, в этой позиции отмечает событие нахождения автомата в данном состоянии.

Шаг 3. Каждому состоянию автомата ставится в соответствие один переход сети Петри.

Шаг 4. Каждый переход сети Петри имеет:

- входные и выходные дуги, связанные с позициями состояний;
- входные и выходные дуги, связанные с позицией входного сигнала;
- входные и выходные дуги, связанные с позицией выходного сигнала.

Шаг 5. Для каждого перехода задается условие срабатывания. Для дуг указывается разметка, определяющая, какие маркеры будут передаваться по данной дуге.

Шаг 6. Задается начальная разметка:

- определяются наличие и цвет маркеров во входных и выходных позициях;
- выбирается маркированная позиция состояния, соответствующая начальному состоянию автомата.

Приводятся примеры указанной методики для синтеза сетей Петри, моделирующих автоматы Мили и Мура, исходно описанные системой канонических уравнений (СКУ) (формула (1)), предложенных Н. П. Вашкевичем, и выполнено их моделирование в пакете CPN Tools (рисунок 2). Доказана адекватность построенных сетей Петри исходному аппаратному описанию.

$$\begin{aligned}
 S_0 &= S_1x_0 \vee S_2x_0 \vee S_3x_0 \vee S_0(x_0 \vee x_2 \vee x_3) & y_0 &= S_0 \\
 S_1 &= S_0x_1 \vee S_2x_1 \vee S_1x_1 & y_1 &= S_1 \vee S_3 \\
 S_2 &= S_1x_2 \vee S_2x_2 & y_2 &= S_2 \\
 S_3 &= S_1x_3 \vee S_2x_3 \vee S_3(x_1 \vee x_2 \vee x_3)
 \end{aligned} \tag{1}$$

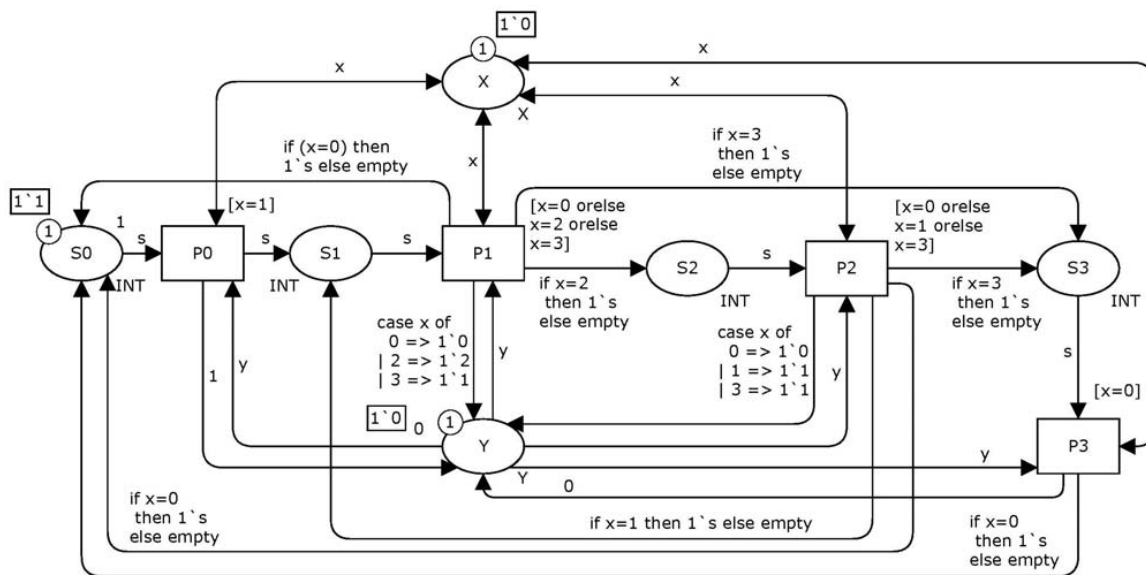


Рисунок 2 – Цветная функциональная сеть Петри, моделирующая подведение цифрового автомата

Рассмотрены особенности применения методики построения сетей Петри при моделировании цифрового автомата с унитарным кодированием входных и выходных сигналов.

В телекоммуникационной аппаратуре ряд процессов выполняется параллельно, для их исходного описания может быть использован аппарат недетерминированных автоматов, характеризующихся возможностью одновременного перехода и нахождения в нескольких состояниях.

Введено понятие потенциально совместных комбинаций состояний автомата. Это состояния или их комбинации, при которых формально могут иметь место переходы при одинаковом входном сигнале. Такие события легко выявляются при любом описании автомата. Использование вместо строго совместных комбинации состояний автомата потенциально совместных обеспечивает:

- построение сети Петри, адекватно моделирующей поведение недетерминированного автомата (НДА);
- условие безопасности сетей Петри;
- снижение трудоемкости при построении топологии сети Петри;

– снижение количества переходов сети Петри, что положительно сказывается на производительности модели, так как время моделирования пропорционально количеству переходов в модели.

Предлагается методика построения сети Петри, моделирующей НДА, который включает следующие шаги:

Шаг 1. Входным и выходным сигналам ЦА ставятся в соответствие по одной позиции СП. В этих позициях всегда находятся маркеры, значения цветов которых соответствуют буквам входного и выходного алфавитов.

Шаг 2. Каждому состоянию автомата ставится в соответствие позиция, в которой могут быть маркеры двух цветов (типов), указывающие на нахождение автомата в данном состоянии.

Шаг 3. Каждому ансамблю связанных потенциально совместных комбинаций состояний автомата (набор возможных пересекающихся комбинаций состояний НДА, из которых возможны переходы в новые состояния под действием одинаковых входных букв) ставится в соответствие переход сети Петри.

Шаг 4. Каждому переходу в соответствие ставятся:

- входные и выходные дуги, связанные с позициями состояний, входящих в соответствующий ансамбль;
- выходные и входные дуги, связанные с выходной позицией;
- двунаправленная дуга, связанная с входной позицией.

Шаг 5. Задаются условия срабатывания каждого перехода сети Петри:

- цвет маркера во входной позиции принимает такие значения, при которых выполняется переход в позиции состояния, отличные от текущих;
- цвета маркеров в позициях состояния, входных для перехода, соответствуют комбинациям состояний НДА, при которых выполняются переходы в его новые состояния (следует учитывать, что условие срабатывания сетевого перехода есть отрицание условия сохранения состояния НДА).

Шаг 6. Задаются условия передачи маркера по выходным дугам переходов:

- для дуг, связанных с позициями состояний, это условие определяет цвет маркера, устанавливаемого в позиции назначения (условие возникновения соответствующего состояния НДА или его сохранения);
- для дуг, связанных с выходными позициями, при срабатывании перехода формируется маркер, значение цвета которого соответствует определенной входной букве. При этом в формировании значения выходной буквы участвуют только те переходы, которые изменяют цвет маркера в выходной позиции.

Шаг 7. Задается начальная разметка:

- определяются цвета маркеров во входных и выходных позициях;
- выбирается маркированная позиция состояния.

Предложенная методика проверена на примере синтеза по описанию абстрактного НДА в виде СКУ (формула (2)) цветной функциональной сети Петри (рисунок 3). Моделированием синтезированной СП в пакете CPN Tools подтверждена адекватность функционирования построенной СП, и выполнена

верификация самого НДА. Проверка адекватности построенной СП, моделирующей поведение НДА, была выполнена анализом таблиц переходов НДА и изменений разметки СП.

$$S_0(t+1) = (S_3(t) \vee S_4(t) \vee S_5(t) \vee S_6(t))x_0 \vee S_0(t)\bar{x}_1$$

$$S_1(t+1) = S_0(t)x_1 \vee S_1(t)(\bar{x}_2\bar{x}_3)$$

$$S_2(t+1) = S_0(t)x_1 \vee S_2(t)\bar{x}_3$$

$$S_3(t+1) = S_1(t)x_2 \vee S_3\bar{x}_0(\bar{S}_4(t) \vee \bar{x}_1)$$

$$S_4(t+1) = S_2(t)x_3 \vee S_1(t)x_3 \vee S_6(t)x_1 \vee S_4(t)(\bar{S}_3(t) \vee \bar{x}_3)\bar{x}_0$$

$$S_5(t+1) = S_3S_4(t)x_1 \vee S_5(t)\bar{x}_0$$

$$S_6(t+1) = S_1(t)x_2 \vee S_6(t)\bar{x}_1$$

$$y_0(t) = S_0(t)$$

$$y_1(t) = S_1(t)S_2(t)$$

$$y_2(t) = S_3(t) \vee S_6(t) \quad (2)$$

$$y_3 = S_4(t) \vee S_5(t)$$

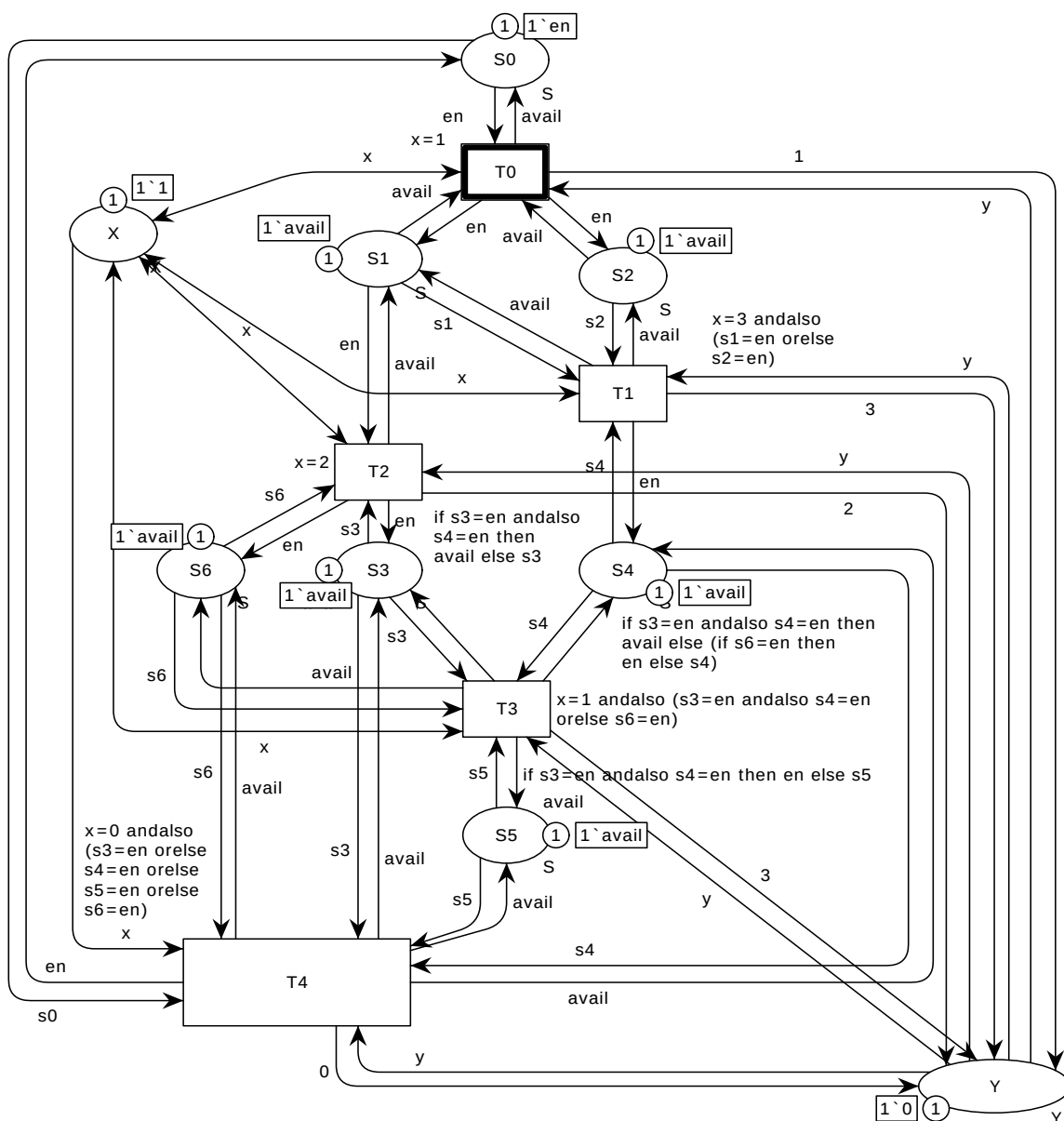


Рисунок 3 – Цветная сеть Петри, моделирующая НДА

Предложенные методики непосредственно использовались при построении подсетей Петри, моделирующих отдельные части функционирования коммутатора в последующих главах.

В третьей главе рассмотрены основные алгоритмы диспетчеризации очередей: приоритетный, циклические, взвешенный приоритетный, которые реализуются в буфере выходного порта предложенной модели коммутатора Ethernet, а также сети Петри, моделирующие данные алгоритмы.

По выполняемым функциям можно выделить следующие компоненты буфера выходного порта (подсети), непосредственно реализующие алгоритмы диспетчеризации очередей: классификатор, память, диспетчер очередей, который в свою очередь разделен на узел сканирования очередей, узел управления полосой пропускания и выходной порт (хотя выходной порт и является самостоятельной функциональной частью коммутатора, его целесообразно рассматривать совместно с буфером выходного порта ввиду того, что взаимодействие с буфером выходного порта является существенным элементом диспетчеризации).

Разработан набор шаблонов подсетей Петри, моделирующих функции классификации (classifier), буферизации (Queue), управления полосой (band) и выбора очередей (scan), выходного порта (Out Port), исходно описанных на языке цифровых автоматов, по которым построены цветные временные иерархические подсети Петри, моделирующие вышеуказанные функции. Следует отметить, что все подсети кроме Out Port и Scan являются не временными, т.е. при срабатывании переходов не анализируется временной штамп маркеров. В подсетях Out Port и Scan задействован временной штамп, соответствующий времени передачи кадра в формате IEEE 802.1q/p с учетом преамбулы и межкадрового интервала.

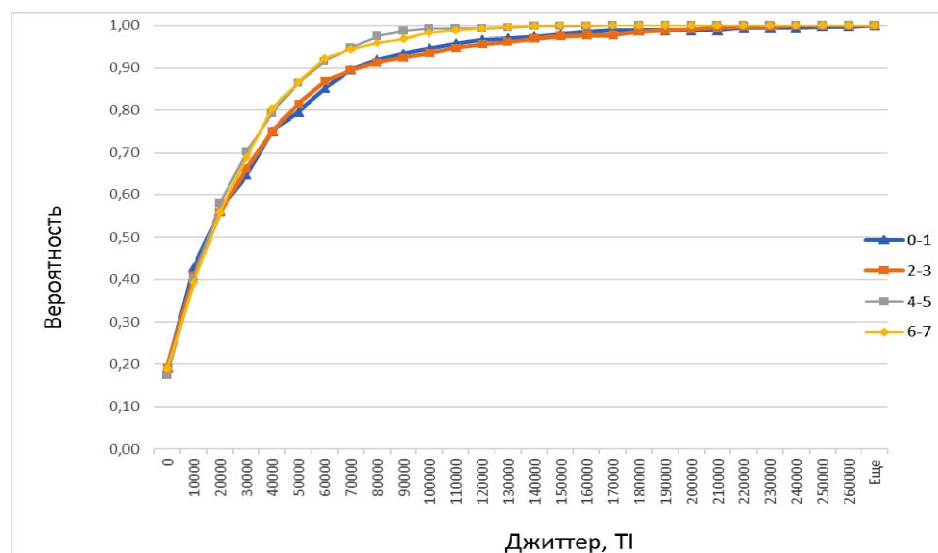
На основе разработанных подсетей в пакете CPN Tools построены сети Петри, моделирующие приоритетный (SPQ), взвешенный циклический (WRR), дефицитно циклический (DRR) и взвешенный справедливый (WFQ) алгоритмы диспетчеризации очередей.

Проведено исследование вероятностно-временных характеристик джиттера при обработке трафика различных классов QoS и заданной полосе пропускания, выделенной для них. Трафик включает случайный поток кадров с экспоненциальным распределением времени между кадрами с полимодальной длительностью кадров и периодически одновременно поступающие кадры всех классов максимальной длины, имитирующие «пачечность». При этом варьировались такие параметры трафика, как общая интенсивность трафика, доли трафика различных классов QoS, имитируя потоки данных с параметрами трафика, которые согласованы (поток 1) и не согласованы (поток 2) с выделяемой полосой пропускания для различных классов QoS. В таблице 1 приведены характеристики распределения трафика для потоков 1 и 2.

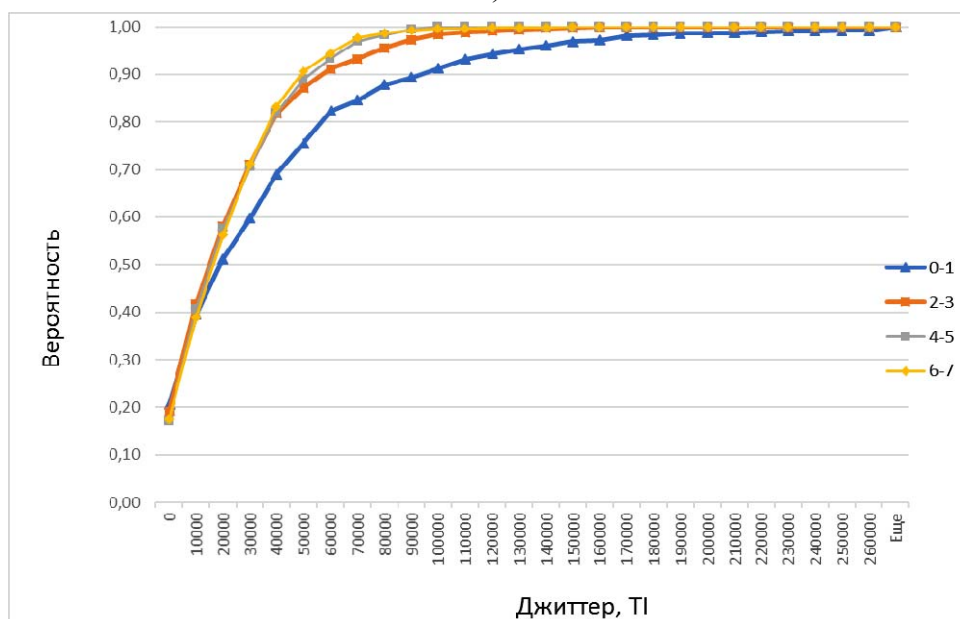
Пример функции вероятности распределения джиттера кадров различных классов QoS, полученной в результате моделирования алгоритма диспетчеризации очередей DRR, приведен на рисунке 4.

Таблица 1 – Распределение полосы пропускания между очередями для различных потоков

№ потока	Параметры	Классы QoS			
		0–1	2–3	4–5	6–7
1	Выделяемая полоса пропускания, %	10	20	30	40
	Доля трафика	0,1	0,2	0,3	0,4
2	Выделяемая полоса пропускания, %	10	20	30	40
	Доля трафика	0,25	0,25	0,25	0,25



а)



б)

Рисунок 4 – Функция распределения джиттера кадров различных классов QoS при алгоритме диспетчеризации очередей DRR:
а – поток 1; б – поток 2

Для оценки эффективности работы алгоритмов предложено в качестве критерия справедливости распределения полосы пропускания использовать вариации среднего (более предпочтительно) и максимального значений джиттера для трафика каждого класса QoS.

Вариация средних значений характеризует предсказуемость джиттера: чем меньше значение вариации, тем меньше различается динамика обслуживания различных классов QoS. Также изменение вариации при изменении трафика может служить индикатором справедливости диспетчеризации очередей с точки зрения джиттера, т.е. чем меньше изменяется вариация средних значений джиттера при изменении нагрузки, тем справедливее алгоритм. Характерным примером является алгоритм WFQ. Вариация (таблица 2) при потоке 2 относительно потока 1 изменяется на 1,6 %, в то время как при алгоритмах WRR и DRR вариация изменяется в 5,3 и 2,1 раза соответственно.

Таблица 2 – Средние значения и вариации джиттера при разных алгоритмах диспетчеризации очередей и различных входных потоках

Класс QoS	Поток 1			Поток 2		
	WRR	DRR	WFQ	WRR	DRR	WFQ
0–1	26 522	28 998	42 760	43 036	34 904	40 377
2–3	28 581	29 119	29 047	21 496	22 498	21 533
4–5	23 712	22 478	19 408	17 857	31 162	14 630
6–7	24 153	23 291	13 707	16 991	21 255	10 861
Вариация	4869	6641	29 053	26 045	13 742	29 516

Было показано, что к известному недостатку циклических алгоритмов – неконтролируемой величине джиттера кадров из-за разброса времени ожидания коммутируемых кадров в различных очередях, вызванной детерминистским порядком их обслуживания, добавляется увеличение джиттера кадров и перегрузка очередей с малой назначенной полосой пропускания в случае несогласованности затребованной полосы пропускания и реального трафика (см. рисунок 4). Это связано с тем, что задержка кадров определенного класса QoS, а также размеры соответствующих очередей, зависят от выделенной полосы пропускания для конкретного класса. Для алгоритма WFQ указанные недостатки свойственны в меньшей мере. Однако данный алгоритм обладает высокой сложностью и требует значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает его применение в коммутаторах. Поэтому формулируется задача разработки новых алгоритмов диспетчеризации, сохраняющих преимущество циклических алгоритмов – простоту реализации, но устраняющих или уменьшающих их недостаток – влияние несогласованности нагрузки на характеристики джиттера, чтобы обеспечить прогнозируемость вероятностно-временных характеристик выходного трафика.

В четвертой главе предложены новые алгоритмы динамической диспетчеризации WTSS и DTSS, учитывающие время ожидания кадров в очереди и использующие взвешенный или дефицитный алгоритм управления полосой пропускания.

TSS диспетчеризация очередей выполняется по следующему алгоритму:

– каждый кадр, направляемый в соответствующую его классу QoS очередь, снабжается атрибутом, отмечающим время его постановки в очередь;

– после окончания обслуживания очередной очереди диспетчер коммутатора анализирует атрибуты кадров, находящихся во главе очередей, и выбирает для дальнейшего обслуживания очередь с его наименьшим значением, т.е. очередь с самым «старым» на данный момент кадром;

– из анализа очередей исключается последняя обслуженная (кроме случая, когда все остальные очереди пусты);

– для регулирования полосы пропускания каждого класса трафика используются стандартные методы взвешивания (WTSS) или дефицита (DTSS).

Разработаны новые варианты подсетей Петри, реализующие функции классификации (Classifier), буферизации (Queue), управления полосой (Scan) и выбора очередей (Band), обеспечивающие моделирование алгоритмов WTSS и DTSS.

Проведенное моделирование диспетчеризации трафиков, описанных в главе 4, показало, что алгоритмы TSS дают выигрыш (рисунок 5) по сравнению с классическими алгоритмами в 2,33–5,36 раза только при несогласованности трафика с выделенной полосой пропускания.

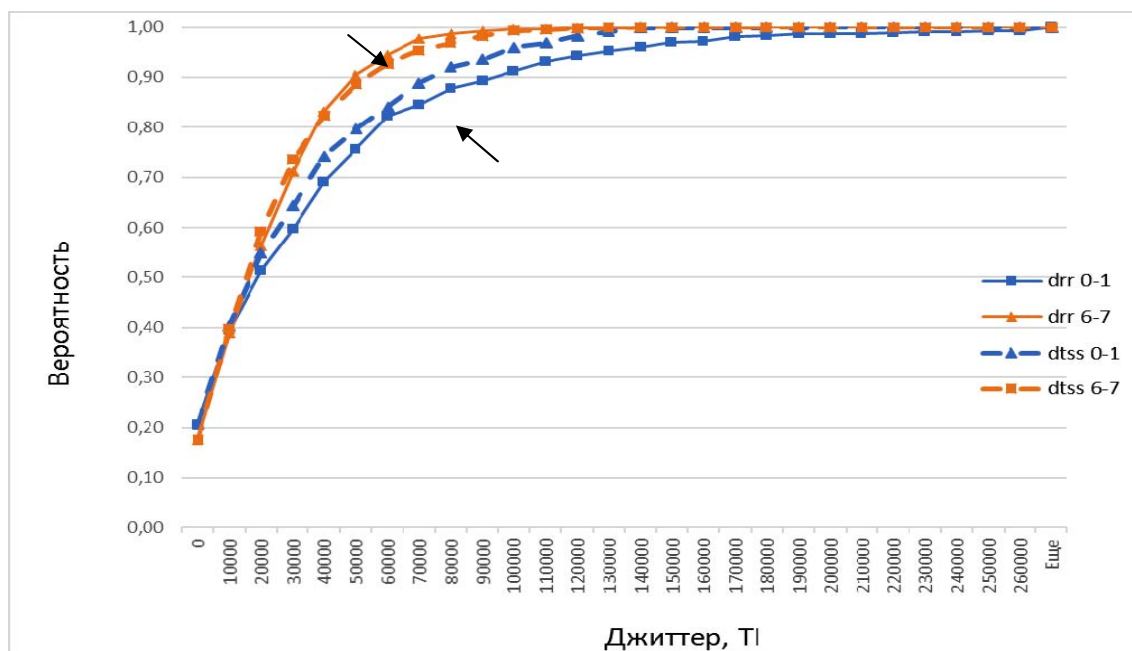


Рисунок 5 – Функция распределения джиттера кадров классов QoS 0–1, 6–7 при алгоритмах диспетчеризации очередей DRR и DTSS

Кроме того, следует отметить, что непрерывная передача больших порций данных одного класса приводит к «пачечности» трафика, что в свою очередь увеличивает нагрузку на буфера последующих телекоммуникационных устройств.

Предлагаются алгоритмы диспетчеризации очередей WRR-TSS и DRR-TSS, совмещающие принципы циклической диспетчеризации с учетом времени ожидания обслуживания кадров при ограничении длительности непрерывного обслуживания каждой очереди, которые обеспечивают более справедливое распределение выделяемой для каждого класса трафика полосы пропускания и уменьшают его «пачечность».

Реализации предлагаемых алгоритмов диспетчеризации заключаются в выполнении следующих действий:

- каждый кадр, направляемый в соответствующую его классу QoS очередь, снабжается атрибутом, отмечающим время его постановки в очередь;
- после окончания обслуживания очередной очереди диспетчер выбирает для дальнейшего обслуживания очередь, используя циклический алгоритм;
- выполняется подсеанс обслуживания выбранной очереди, в рамках которого проводится передача кадров в установленном объеме;
- по окончании подсеанса выбирается очередь по алгоритму, применяемому в TSS, т.е. содержащая кадр с наименьшим значением временной метки;
- выполняется передача одного разделительного кадра из выбранной очереди в выходной канал, при этом размер переданного разделительного кадра учитывается уменьшением текущего значения выделенной квоты той очереди, из которой он взят;
- после передачи разделительного кадра продолжается следующий подсеанс обслуживания ранее выбранной по алгоритму RR очереди до выработки выделенной квоты или подсеанса;
- для регулирования полосы пропускания каждого класса трафика используются весовой либо дефицитный алгоритм.

Разработаны цветные иерархические временные сети Петри, моделирующие отдельные функциональные модули при алгоритмах диспетчеризации WRR-TSS и DRR-TSS, которые представлены на рисунках 6–9.

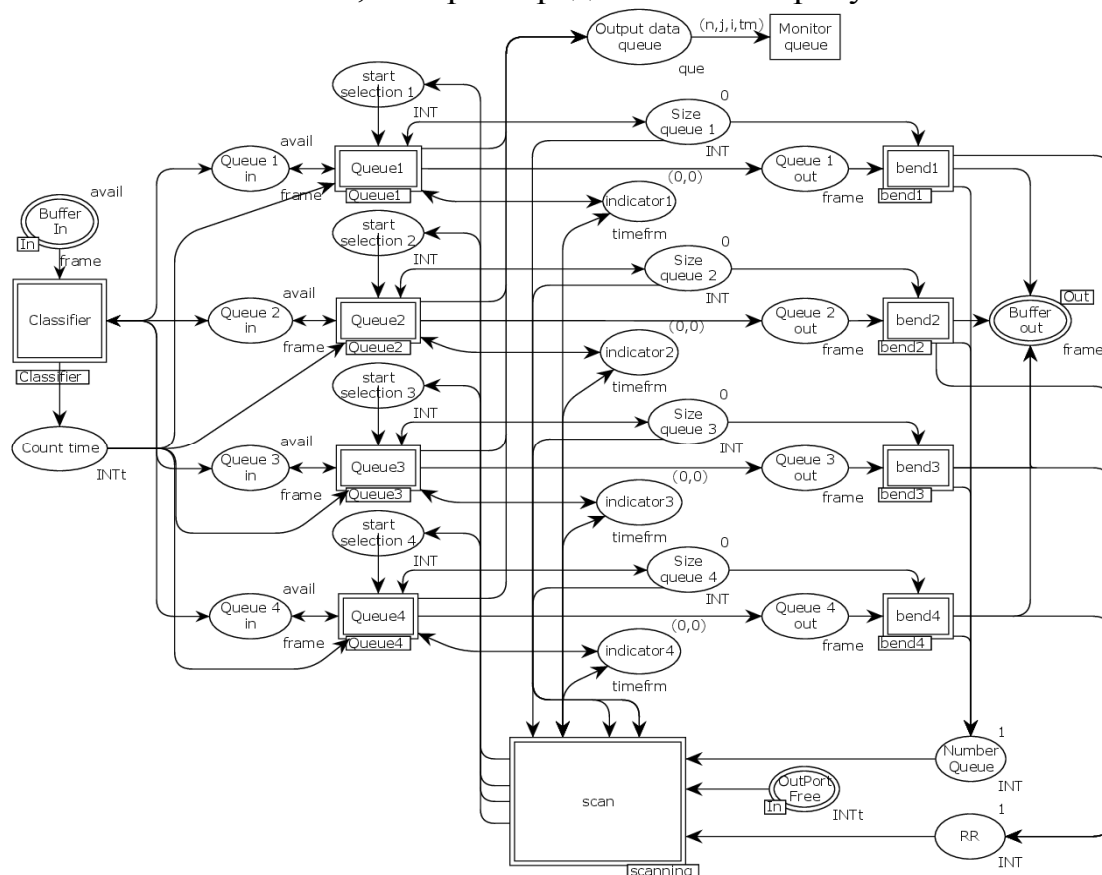


Рисунок 6 – Сеть Петри, моделирующая буфер выходного порта при алгоритме диспетчеризации очередей RR-TSS

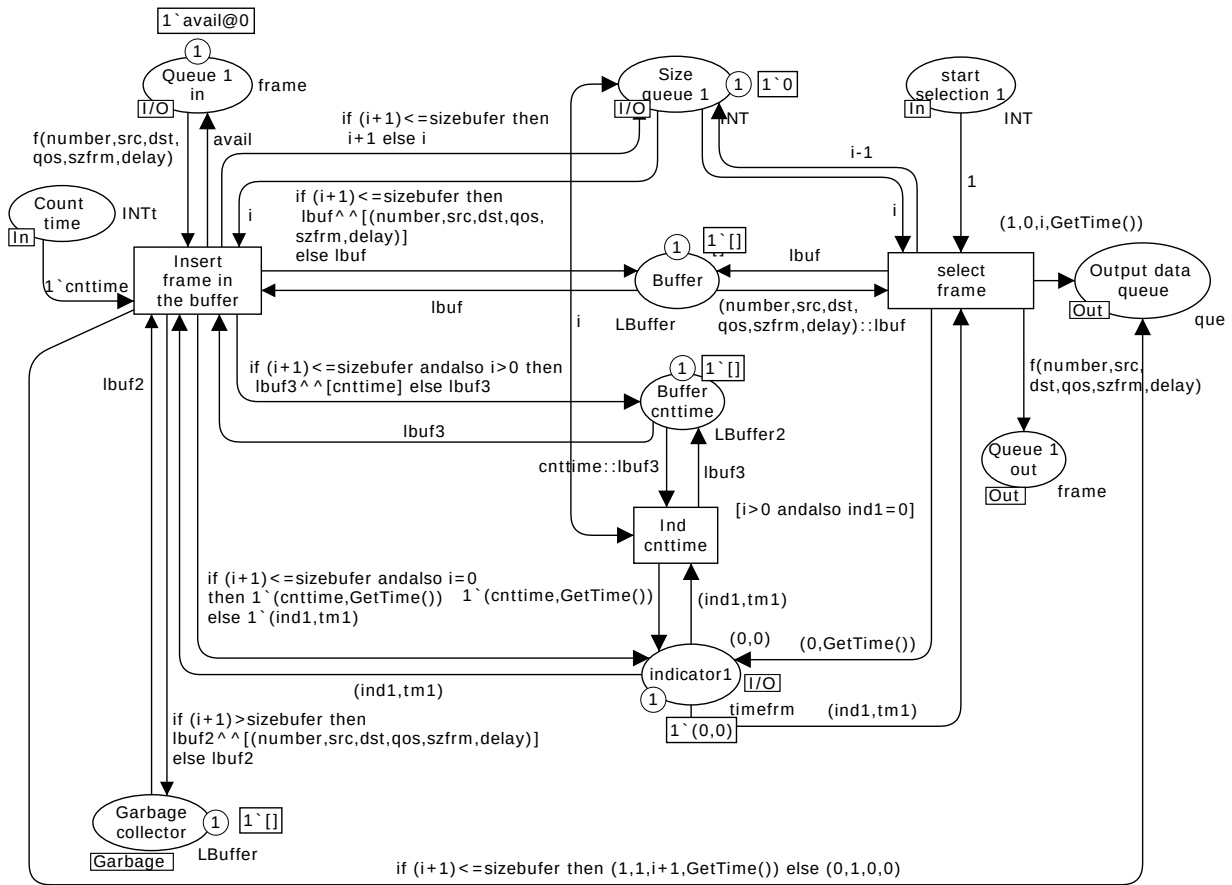


Рисунок 7 – Сеть Петри, моделирующая алгоритм работы памяти буфера выходного порта

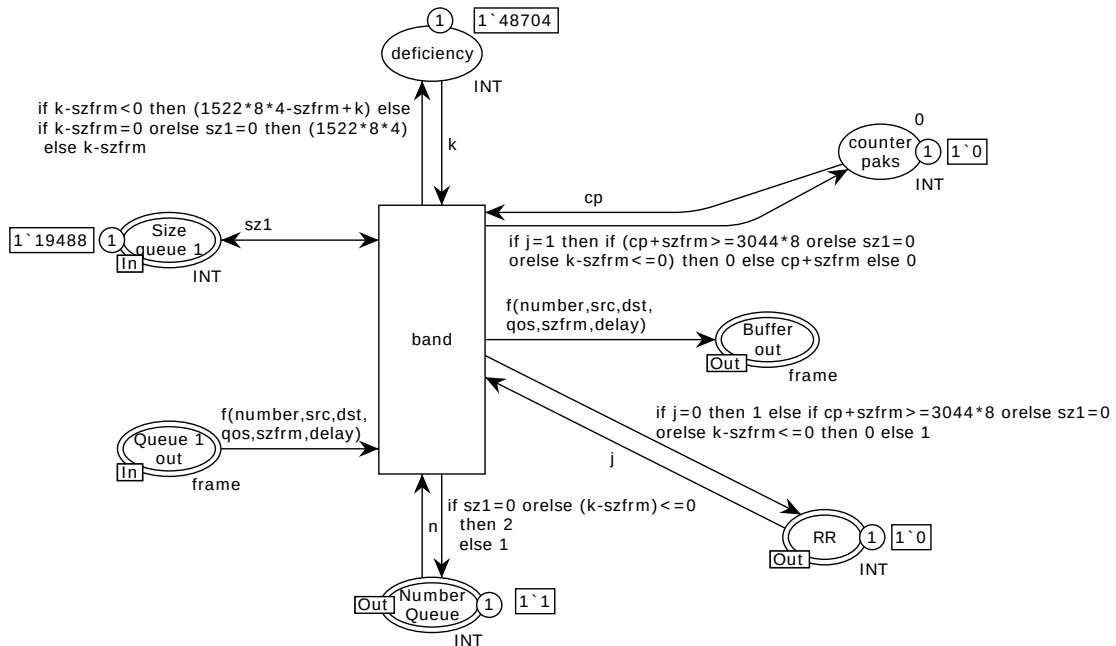


Рисунок 8 – Сеть Петри, моделирующая управление полосой пропускания при алгоритме DRR-TSS

Таблица 3 – Средние значения джиттера для различных алгоритмов при согласованном и несогласованном трафике и коэффициенте загрузки канала 0,8

Класс QoS	Средний джиттер (ТТ)													
	Поток 1							Поток 2						
	WRR	DRR	WFQ	WTSS	DTSS	WRR-TSS	DRR-TSS	WRR	DRR	WFQ	WTSS	DTSS	WRR-TSS	DRR-TSS
0-1	26522	28998	42760	32722	31358	23772	29929	43036	34904	40377	36223	27579	31549	28483
2-3	28581	29119	29047	23440	25902	24920	25029	21496	22498	21533	21450	26714	27385	25817
4-5	23712	22478	19408	24997	24679	25457	24630	17857	21162	14630	21308	22413	21086	23035
6-7	24153	23291	13707	23346	22638	24899	23071	16991	21254	10861	20848	21691	19379	21341
Вариация	4869	6641	29053	8721	8720	1685	6858	26045	13742	29516	15375	5888	12170	7142

Алгоритмы WRR-TSS, DRR-TSS эффективнее циклических алгоритмов диспетчеризации по первому критерию в 2,9 и 4 раза для потока 1, и в 1,96 и 5,3 раза для потока 2. По чувствительности алгоритм WRR-TSS уступает классическому алгоритму WRR, но алгоритм DRR-TSS эффективнее DRR в 1,5 раза.

Выявлено, что алгоритм DRR-TSS уступает алгоритму WFQ по критерию чувствительности лишь в 2 раза, но обеспечивает значительно меньший разброс значений джиттера для трафика различных классов QoS при более простой реализации.

В результате моделирования выявлено, что для алгоритма DRR-TSS наибольшая эффективность достигается при величине непрерывной передачи данных равной средней длине кадра трафика, что показано на рисунке 10.



Рисунок 10 – График зависимости вариации среднего значения джиттера от длительности подсеанса при алгоритме DRR-TSS

Предложено техническое решение, реализующее алгоритмы динамической диспетчеризации WRR-TSS и DRR-TSS, учитывающие время ожидания кадров в очередях и длительность непрерывного обслуживания отдельных очередей. При этом для алгоритма DRR-TSS объем передаваемых непрерывно данных корректируется по значению средней длины кадра, оцениваемой по текущему трафику.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертации решена новая научно-техническая задача, заключающаяся в разработке имитационных моделей алгоритмов диспетчеризации очередей

коммутатора с поддержкой QoS, обеспечивающих как верификацию алгоритмов, так и оценку вероятностно-временных характеристик коммутируемого трафика, а также новых алгоритмов диспетчеризации и сравнительном анализе их эффективности.

Основные результаты состоят в следующем:

- впервые разработаны модели алгоритмов диспетчеризации очередей коммутаторов Ethernet с поддержкой QoS (приоритетного, различных циклических, взвешенного справедливого), которые используют аппарат цветных временных иерархических функциональных сетей Петри и позволяют оценить вероятностно-временные характеристики обработки коммутаторами произвольного трафика и выявить недостаток перечисленных алгоритмов, заключающийся в снижении их эффективности в случае несогласованности фактической нагрузки и выделенной полосы пропускания для трафика различного класса QoS;

- разработаны новые алгоритмы динамической диспетчеризации очередей в коммутаторах Ethernet с поддержкой QoS, учитывающие время нахождения кадра в очередях, которые в отличие от циклических алгоритмов диспетчеризации очередей обеспечивают уменьшение в 1,7–5,3 раза вариации среднего значения джиттера задержки трафика различных классов QoS, а в сравнении с алгоритмом WFQ – в 10–15 раз, по чувствительности характеристик джиттера к несогласованности нагрузки с выделенной полосой в сравнении с циклическими алгоритмами более чем в 7,5 раз, и уступая взвешенному справедливому алгоритму только в 2 раза при более простой реализации;

- впервые предложены методики построения цветных сетей Петри, моделирующих поведение, детерминированных и недетерминированных цифровых автоматов, описывающих отдельные компоненты алгоритмов диспетчеризации очередей, что позволило реализовать подход к построению сетей Петри, моделирующих алгоритмы диспетчеризации очередей, как к совокупности функциональных модулей, исходно описанных в виде цифровых автоматов, и в результате чего ускорить и упростить создание, модификацию и верификацию имитационных моделей алгоритмов диспетчеризации очередей;

- разработан набор шаблонов сетей Петри, моделирующих функции классификации, буферизации, управления полосой и выбора очередей, которые позволяют моделировать существующие и новые алгоритмы диспетчеризации очередей коммутатора Ethernet с поддержкой QoS;

- предложены технические решения, реализующие алгоритмы динамической диспетчеризации, учитывающие время ожидания кадров в очередях.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Кизилов, Е. А. Имитационное моделирование устройства аппаратной поддержки диспетчера задач с использованием пакета CPN Tools / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев, Е. А. Кизилов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – № 10 (14). – С. 152–159.

2. Кизилов, Е. А. Моделирование адаптивной диспетчеризации очередей в коммутаторе с поддержкой QoS / Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов, Д. В. Патунин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 2 (22). – С. 170–183.

3. Кизилов, Е. А. Методика построения цветных сетей Петри, моделирующих работу цифрового автомата / Е. А. Кизилов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3. – С. 37–48.

Публикации в изданиях, индексируемых SCOPUS

4. Kizilov, E. Modeling of QoS in the industrial Ethernet switches / E. Kizilov, N. Konnov, D. Pashchenko, D. Trokoz // The 5th International Workshop on Computer Science and Engineering-Information Processing and Control Engineering (WCSE 2015-IPCE) (April 15–17, 2015, Moscow, Russia). – Moscow, 2015. – P. 185–190.

5. Kizilov, E. Scheduling queues in the Ethernet switch, considering the waiting time of frames / E. Kizilov, N. Konnov, K. Nikishin, D. Pashchenko, D. Trokoz // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 44. – P. 01011-p.1-01011-p 5.

Публикации в других изданиях

6. Кизилов, Е. А. Моделирование механизмов qos в коммутаторах Ethernet цветными сетями Петри / А. Л. Домнин, Е. А. Кизилов, В. А. Пушкарев // Телематика-2010 : тр. XVII Всерос. науч.-метод. конф. (Санкт-Петербург, 21–24 июня 2010 г.). – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2010. – С. 29–35.

7. Кизилов, Е. А. Моделирование цветными сетями Петри обслуживания очередей алгоритмом WRR / В. Б. Механов, Е. А. Кизилов // Новые информационные технологии и системы : тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – Ч. 1. – С. 67–73.

8. Кизилов, Е. А. Моделирование конечного автомата в системе CPN Tools / В. Б. Механов, Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2010. – С. 13–16.

9. Кизилов, Е. А. Преобразование конечного автомата в цветную сеть Петри / В. Б. Механов, Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов // Телематика-2011 : тр. XVIII Всерос. науч.-метод. конф. (Санкт-Петербург, 20–23 июня 2011 г.). – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2011. – С. 238–240.

10. Кизилов, Е. А. Компактное представление цифрового автомата сетью Петри / В. Б. Механов, Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сб. ст. XI Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПДЗ, 2011. – С. 158–162.

11. Кизилов, Е. А. Моделирование механизма взвешенного справедливого обслуживания очередей в компьютерных сетях / Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов, В. Б. Механов // Вычислительные системы и технологии обработки информации : Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 10. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – С. 26–35.

12. Кизилов, Е. А. Моделирование поведения недетерминированного конечного автомата средствами пакета CPN Tools / В. Б. Механов, Н. Н. Коннов, Е. А. Кизилов // Новые информационные технологии и системы : тр. X Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 27–29 ноября 2012 г.) : в 2 ч. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Ч. 2. – С. 283–286.

13. Кизилов, Е. А. Построение сети Петри, моделирующей поведение недетерминированного конечного автомата / В. Б. Механов, Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов // Телематика-2012» : тр. XIX Всерос. науч.-метод. конф. (Санкт-Петербург, 25–28 июня 2012 г.). – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2012 – С. 330–332.
14. Кизилов, Е. А. Использование сетей Петри для моделирования вычислительных систем. / Е. А. Кизилов // Информационные технологии и системы-2013 (ИТС 2013) : материалы Междунар. науч. конф. (БГУИР, Минск, Беларусь, 23 октября 2013 г.). – Минск : БГУИР, 2013. – С. 48–50.
15. Кизилов, Е. А. Учет времени поступления кадров для управления очередями в коммутаторе / Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов, В. Б. Механов, К. И. Никишин // Телематика-2014» : тр. XXI Всерос. науч.-метод. конф. (Санкт-Петербург, 23–24 июня 2014 г.). – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2014. – С. 134–136.
16. Кизилов, Е. А. Моделирование качества обслуживания в сетях IP-видеонаблюдения / Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов, В. Б. Механов // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов : сб. науч. ст. X Всерос. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 388–396.
17. Кизилов, Е. А. Моделирование коммутаторов Ethernet в промышленных сетях / Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов, В. Б. Механов // Новые информационные технологии и системы : тр. XI Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 326–329.
18. Кизилов, Е. А. Анализ алгоритмов динамической диспетчеризации очередей в коммутаторах с поддержкой QoS / Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов, Д. В. Патунин // Новые информационные технологии и системы : сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 166–169.
19. Кизилов, Е. А. Эффективность «дефицитных» алгоритмов диспетчеризации очередей в коммутаторах с поддержкой QoS / Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов, Д. В. Патунин // Информатика: проблемы, методология, технологии : сб. материалов XVII Междунар. науч.-метод. конф. : в 5 т. – Воронеж : Вэлборн, 2017. – С. 95–100.

Научное издание

КИЗИЛОВ Евгений Александрович

АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ
ОЧЕРЕДЕЙ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ
С ПОДДЕРЖКОЙ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ

Специальность 05.13.15 – Вычислительные машины, комплексы
и компьютерные сети

Редактор *Е. Г. Акимова*
Технический редактор *Н. В. Иванова*
Компьютерная верстка *Н. В. Ивановой*

Распоряжение № 21/133-2017 от 25.10.2017.

Подписано в печать 26.10.2017. Формат 60×80¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,16. Заказ № 657. Тираж 100.

Издательство ПГУ.
440026, Пенза, Красная, 40.
Тел./факс: (8412) 56-47-33; e-mail: iic@pnzgu.ru

