

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 004.715

БЫСОВ
Анатолий Александрович

**ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОЧЕРЕДЯМИ ПАКЕТОВ
В МАРШРУТИЗАТОРАХ В УСЛОВИЯХ ПРЕОБЛАДАНИЯ
ГОЛОСОВЫХ СЕРВИСОВ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Минск 2020

Научная работа выполнена в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь».

Научный руководитель **Машкин Евгений Вячеславович**, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по развитию открытого акционерного общества «АГАТ-СИСТЕМ»

Официальные оппоненты: **Цветков Виктор Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Половения Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем учреждения образования «Белорусская государственная академия связи»

Оппонирующая организация Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится «26» марта 2020 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « » февраля 2020 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



Т.А. Пулко

ВВЕДЕНИЕ

Переход цифровых сетей связи специального назначения от принципа коммутации каналов к коммутации пакетов предполагает решение ряда дополнительных задач по обеспечению качества обслуживания абонентов:

управление мультисервисным трафиком в условиях преобладания сервисов реального времени на основе оценки критичных параметров для данного вида сервиса;

разработка системы распределения приоритетов для групп абонентов;

согласование приоритетов системы управления с системой приоритетов видов трафика.

Решение данных задач позволит создать динамические протоколы управления трафиком в маршрутизаторах. Динамические протоколы управления трафиком активно разрабатываются армиями разных стран, крупными корпорациями и сетевыми провайдерами.

Преобладание сервисов реального времени (передача речи, видеоконференцсвязь) в сетях связи специального назначения не позволяет в полной мере использовать протоколы управления трафиком, применяемые в сети Интернет и сетях связи общего назначения. Ввиду возможной изменчивости структуры и топологии сети в результате преднамеренных внешних воздействий, разрабатываемые протоколы должны обладать адаптивными свойствами.

Так как цифровые сети связи специального назначения с пакетной коммутацией находятся на стадии проектирования и частичного внедрения, результаты исследований в вышеуказанной области не только снижают затраты на проектирование путем рационализации управления сетями на различных уровнях модели взаимодействия открытых систем, но и позволяют повысить эффективность функционирования сети.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Работа выполнена в рамках государственной научно-технической программы «Создание современных средств и систем радиосвязи и развитие их производства в Республике Беларусь на 2007 – 2010 годы» (шифр «Радиосвязь») утвержденная постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 30 ноября 2005 года № 1358, а также в рамках подпрограммы «Создание современных средств и систем радиосвязи и развитие их производства в Республике Беларусь на 2011 – 2015 годы» (шифр «Радиосвязь-2») государственной научно-технической программы «Разработка и постановка на производство систем и средств радиосвязи и навигации в Республике Беларусь

на 2011 – 2015 годы» («Радиосвязь и навигация»), утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 1 февраля 2011 года № 116.

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении НИР «Обоснование тактико-технических требований для модернизации комбинированной радиостанции Р-142Н» (шифр «Старт», инв. № 1670/11).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка математических моделей, структуры и протокола управления очередями пакетов в маршрутизаторе с учетом преобладания трафика голосовых сервисов, задержки передачи пакетов и самоподобной структуры трафика.

В диссертации решались следующие *задачи*:

Разработка имитационной модели цифровой сети связи специального назначения, обеспечивающей получение статистических данных о пакетах голосового трафика для определения влияния протоколов управления очередями пакетов в буфере маршрутизатора на характеристики качества обслуживания абонентов.

Разработка математической модели обработки пакетов маршрутизатором с учетом критичных параметров для голосового пакетного трафика.

Разработка математической модели задержки ожидания пакетов в буфере маршрутизатора с учетом самоподобной структуры трафика.

Разработка структуры и протокола управления очередями пакетов в маршрутизаторе с учетом преобладания трафика голосовых сервисов, задержки передачи пакетов и самоподобной структуры трафика.

Экспериментальные исследования протоколов управления очередями пакетов в маршрутизаторе.

Объект исследования – маршрутизаторы цифровой сети связи специального назначения.

Предмет исследования – показатели качества обслуживания абонентов при передаче трафика приложений реального времени.

Выбор объекта и предмета исследования обусловлен актуальностью разработки протоколов управления трафиком с целью повышения качества обслуживания абонентов в сетях связи специального назначения.

Научная новизна

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в:

определении локальных приоритетов пакетов в буфере маршрутизатора с использованием среднеквадратического отклонения односторонней задержки передачи пакетов в математической модели обработки пакетов голосового

трафика маршрутизатором в классе моделей систем массового обслуживания вида G/G/1, что позволило повысить точность определения порядка обработки пакетов голосовых сервисов маршрутизатором;

учете самоподобной структуры временного ряда задержки ожидания пакетов голосовых сервисов в буфере маршрутизатора в математической модели задержки ожидания пакета в буфере маршрутизатора в классе авторегрессионных моделей проинтегрированного скользящего среднего с дробным порядком интегрирования, что позволило повысить точность определения задержки ожидания вновь прибывшего пакета до момента начала его обработки маршрутизатором по сравнению с моделью авторегрессии скользящего среднего на 22,5 %;

учете самоподобной структуры временных рядов задержки ожидания пакетов в буфере маршрутизатора и полной односторонней задержки передачи пакета по сети связи в протоколе управления очередями пакетов в условиях преобладания трафика голосовых сервисов, что позволило снизить число пакетов, задержка передачи которых превышает максимально допустимое значение на 33,7 %.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель обработки пакетов голосового трафика маршрутизатором в классе моделей систем массового обслуживания вида G/G/1, отличающаяся функцией определения локальных приоритетов пакетов в буфере маршрутизатора в результате минимизации среднеквадратического отклонения односторонней задержки передачи пакетов, что позволяет более точно определить порядок обработки пакетов голосовых сервисов маршрутизатором.

2. Математическая модель задержки ожидания пакета в буфере маршрутизатора, разработанная в классе авторегрессионных моделей проинтегрированного скользящего среднего с дробным порядком интегрирования, отличающаяся учетом самоподобной структуры временного ряда задержки ожидания пакетов голосовых сервисов в буфере маршрутизатора, позволяющая определить задержку ожидания вновь прибывшего пакета до момента начала его обработки маршрутизатором с ошибкой не превышающей 4,2 %, что на 22,5 % меньше по сравнению с моделью авторегрессии скользящего среднего.

3. Структура и динамический протокол управления очередями пакетов для маршрутизаторов цифровой сети связи специального назначения в условиях преобладания трафика голосовых сервисов, отличающийся учетом самоподобной структуры временных рядов задержки ожидания пакетов в буфере маршрутизатора и полной односторонней задержки передачи пакета по сети связи и позволяющий снизить число пакетов, задержка передачи которых превышает

максимально допустимое значение 275 мс на 33,7 % по сравнению с протоколом обработки пакетов в порядке очередности, что снижает вероятность потери пакета с 0,08 до 0,053.

Личный вклад соискателя ученой степени

Результаты, характеризующиеся научной новизной и выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. Соавторами основных публикаций являются: научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Е.В. Машкин, который осуществлял определение целей и постановку задач, с ним проводилось обсуждение возможных способов решения поставленных задач, оценка полученных результатов; Г.С. Казаков, который определял основные направления совершенствования систем связи специального назначения; кандидат технических наук А.В. Рылов, П.С. Чернявский, Т.П. Троицкий, которые принимали участие в получении статистических данных. Анализ тенденций развития коммутационных устройств специального назначения проводился при участии доцента, кандидата технических наук Г.Г. Меженцева.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Теоретические и практические результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «IV Машеровские чтения» (г. Витебск, 2010);

Международный инновационный форум «Наука и бизнес – 2011» (г. Минск, 2011);

XVII Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (г. Минск, 2012);

48-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Инновационные технологии в учебном процессе» (г. Минск, 2012);

XV Республиканская научная конференция «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (г. Гомель, 2012);

XVI Республиканская научная конференция «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (г. Гомель, 2013);

Международная военно-научная конференция «Актуальные проблемы военной науки и практики в современных условиях и пути их решения» (г. Минск, 2015);

Международная военно-научная конференция «Обеспечение безопасности государства: проблемы и перспективы» (г. Минск, 2017);

7-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам в области обороны и безопасности (г. Минск, 2017).

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликованы 14 печатных работ, в том числе 7 статей в научных рецензируемых журналах и сборниках, общим объемом 3 авторских листа, 5 публикаций по результатам докладов на международных научно-технических и военно-научных конференциях, 2 публикации по результатам докладов на республиканских научных конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений, введения, общей характеристики работы, основной части из четырех глав, заключения, библиографического списка и пяти приложений.

В *первой главе* диссертации произведен аналитический обзор литературы по теме диссертации, рассмотрена проблема обработки и обеспечения качества обслуживания абонентов при передаче голосового пакетного трафика, проанализированы математические модели трафика голосовых сервисов, учитывающие эффект самоподобия.

Вторая глава посвящена математическому моделированию обработки пакетов голосового трафика маршрутизаторами ЦСС специального назначения и разработке имитационной модели ЦСС, с целью получения статистических характеристик передачи пакетов голосового трафика и их обработки в маршрутизаторах.

В *третьей главе* проведен статистический анализ пакетов голосового трафика, полученных на основе имитационной модели. В главе предложена математическая модель задержки ожидания пакета в буфере маршрутизатора и динамический протокол управления очередями пакетов для маршрутизаторов ЦСС специального назначения в условиях преобладания голосовых сервисов.

В *четвертой главе* функциональная схема маршрутизатора П-320 дополнена блоками, реализующими динамический протокол управления очередями пакетов, а также проведен эксперимент по оценке эффективности динамического протокола управления очередями пакетов.

Общий объем диссертационной работы составляет 134 страницы, из которых 79 страниц текста, 63 рисунка на 18 страницах, 24 таблицы на 6 страницах, 5 приложений на 20 страницах, список использованных источников из 118 наименований на 9 страницах, список публикаций автора из 14 наименований на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В *первой главе* проведен анализ протоколов обработки мультисервисного трафика маршрутизаторами цифровых сетей связи (ЦСС) специального назначения и характеристик качества обслуживания абонентов при передаче голосового трафика в ЦСС.

В результате анализа характеристик качества обслуживания абонентов в условиях преобладания сервисов передачи речи (64 %) предложены максимально допустимые значения основных характеристик критичных для обеспечения качества обслуживания абонентов ЦСС. Так для голосового пакетного трафика должны обеспечиваться следующие характеристики: задержка передачи пакета не должна превышать 275 мс, значение джиттера не должно превышать 22 мс, количество потерянных пакетов не должно превышать 0,01 %.

Исходя из структуры пакетного трафика ЦСС специального назначения, применение известных дисциплин обслуживания очередей пакетов в маршрутизаторе не позволяет существенно улучшить характеристики качества обслуживания абонентов: так задержка передачи пакета изменяется в пределах 9 % относительно дисциплины *FIFO* (*First In First Out* – первым пришел, первым будет обработан), джиттер – 11%, количество потерянных пакетов – 7 %.

Пакеты голосового трафика передаются в соответствии с правилами протокола *UDP* (*User Datagram Protocol* – протокол пользовательских дейтаграмм). Данный протокол не накладывает ограничений на характеристики качества обслуживания, однако пакеты данного протокола имеют меньшую задержку за счет отсутствия механизма установления соединения и ожидания квитанций о доставке пакетов. Составляющие суммарной задержки для пакета, переданного по сети в соответствии с протоколом *UDP*, представлены на рисунке 1.

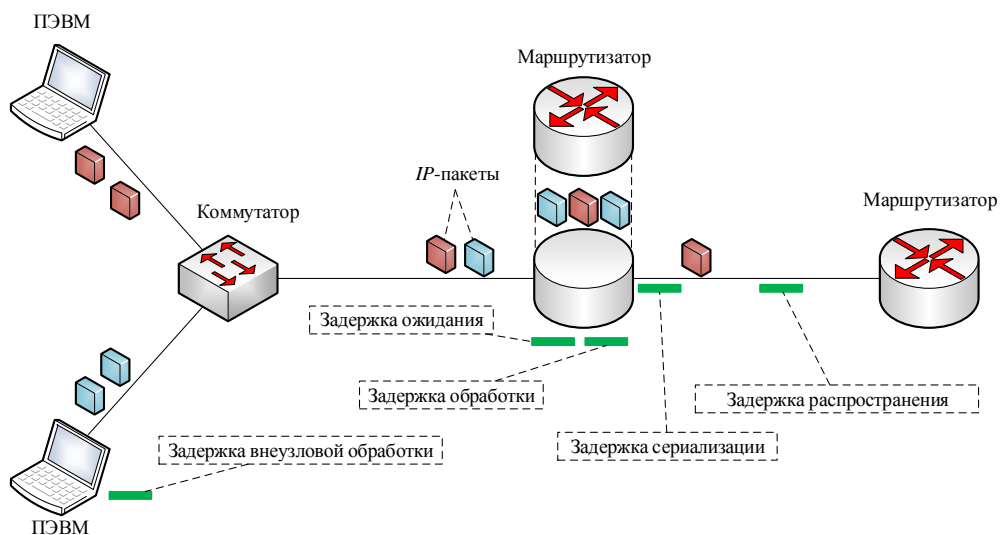


Рисунок 1 – Задержка пакета в телекоммуникационной сети

Для математического описания задержки ожидания пакетов в буфере маршрутизатора наиболее полно подходит модель системы массового обслуживания G/G/1 по классификации Кендала-Башарина для которой квадрат ошибки отклонения в сравнении с реальным трафиком не превышает 5%.

Вторая глава посвящена разработке математической модели обработки пакетов маршрутизаторами учитывающей полную одностороннюю задержку передачи пакета в ЦСС и имитационной модели ЦСС специального назначения.

Предложенная имитационная модель ЦСС специального назначения является типовым вариантом, учитывающим иерархию уровней управления и семиуровневую модель взаимодействия открытых систем, а также свойство долговременной зависимости голосового пакетного трафика. Имитационная модель позволила получить данные о передаче пакетов для каждого маршрутизатора, данные задержки ожидания пакетов в буфере маршрутизаторов и оценить характеристики работы ЦСС специального назначения.

Для математического описания процесса обработки пакетов маршрутизаторами транспортный уровень ЦСС представлен в виде графа $G(\{N\}, \{M\})$, где $\{N\}$ – множество вершин, $\{M\}$ – множество ребер.

Односторонняя задержка передачи пакета $w_{\Sigma i}$ определена в соответствии с выражением:

$$w_{\Sigma i} = w_{bo} + \left[\frac{1}{C_{обрк1}} + \frac{T_{IP}}{c_{k1k2}} + \frac{l_{k1k2}}{c_p} + \frac{\rho_{k1} b_{k1} (v_{ak1}^2 + v_{bk1}^2)}{2(1-\rho_{k1})} f(v_{ak1}) \right] \Big|_{h_{k1}=1} +$$

$$+ \left[\frac{1}{C_{обрк2}} + \frac{T_{IP}}{c_{k2k3}} + \frac{l_{k2k3}}{c_p} + \frac{\rho_{k2} b_{k3} (v_{ak2}^2 + v_{bk2}^2)}{2(1-\rho_{k2})} f(v_{ak2}) \right] \Big|_{h_{k2}=2} +$$

$$+ \dots + \left[\frac{1}{C_{обрм}} + \frac{\rho_m b_m (v_{am}^2 + v_{bm}^2)}{2(1-\rho_m)} f(v_{am}) \right] \Big|_{h_m=max}, \quad (1)$$

где w_{bo} – задержка внеузловой обработки (кодирование, шифрование); $C_{обри}$, пакет/с – производительность i -го маршрутизатора; c_{ij} , бит/с – пропускная способность соединительной линии между маршрутизаторами i и j ; T_{IP} – средняя длина IP-пакета; l_{ij} , м – протяженность соединительной линии между маршрутизаторами i и j ; $c_p = 2 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения электромагнитных волн в медном кабеле; ρ – загрузка маршрутизатора; b – среднее значение длительности обслуживания пакета в маршрутизаторе; v_a – коэффициент вариации интервала времени между поступлениями пакетов на вход маршрутизатора; v_b – коэффициент вариации длительности обслуживания пакетов в маршрутизаторе; $f(v_a)$ – корректирующая функция; h_{ij} – номер маршрутизатора в оптимальном маршруте в соответствии с алгоритмом Форда-Беллмана.

Для обработки голосового пакетного трафика в соответствии с требованиями *QoS* (*Quality of Service* – качество обслуживания) односторонняя задержка передачи

пакета не должна превышать максимально допустимого значения ($w_{\text{доп}} = 275$ мс). Следовательно, для односторонней задержки передачи пакетов по сети должно выполняться условие:

$$w_{\Sigma i} \leq w_{\text{доп}} \quad \forall i \in [1, S], \quad (2)$$

где S – количество конечных устройств.

Для управления очередностью обработки пакетов, введен локальный приоритет пакета в буфере маршрутизатора:

$$p_{nij}, i = \overline{1, S}, j = \overline{1, n_p}. \quad (3)$$

где n_p – количество пакетов от конечных устройств.

Таким образом, вектор-столбец односторонних задержек передачи пакетов от конечных устройств ЦСС с учетом локальных приоритетов, имеет вид:

$$\mathbf{W}_{\Sigma} = \begin{bmatrix} w_{\Sigma 1}(p_{n11}, p_{n12}, \dots, p_{n1N}) \\ w_{\Sigma 2}(p_{n21}, p_{n22}, \dots, p_{n2N}) \\ \dots \\ w_{\Sigma S}(p_{nS1}, p_{nS2}, \dots, p_{nSN}) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Так как для систем массового обслуживания вида $G/G/1$ не получено аналитических выражений для определения времени ожидания пакетов в буфере маршрутизатора для пакетов заданного приоритетного класса, произведена замена приоритета p_{nij} на корректирующий коэффициент $k_{nij}, i = \overline{1, S}, j = \overline{1, n_p}$, который равен отношению производительности устройства коммутации, отведенной для пакетов приоритетного класса $p_{nij}, i = \overline{1, S}, j = \overline{1, n_p}$ к общей производительности устройства коммутации. Таким образом, чем выше односторонняя задержка передачи пакета от i -го конечного устройства, тем большую часть производительности маршрутизатора необходимо отдать на обработку пакетов данного приоритетного класса. Для нахождения задержки ожидания произведена замена в выражении (1):

$$b_m \rightarrow \frac{b_m}{k_{nij}}. \quad (5)$$

Поиск баланса распределения локальных приоритетов является оптимизационной задачей. Математическая постановка оптимизационной задачи имеет вид:

$$\begin{aligned} \sigma(\mathbf{W}_{\Sigma}) &\rightarrow \min, \\ \sum_{n=1}^{n_p} k_{ijn} &= 1, \quad \forall j \in \overline{1, S}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\sigma(\mathbf{W}_\Sigma)$ - среднее квадратическое отклонение односторонней задержки передачи пакетов в ЦСС. Таким образом, в работе выдвинута гипотеза о том, что минимизация параметра (6) приведет к такому перераспределению пакетов в буфере маршрутизатора, которое позволит приблизить одностороннюю задержку передачи пакетов от конкретного оконечного устройства к среднему значению.

Оптимизационная задача решена методом градиентного спуска. В качестве начальных условий для коэффициентов k_{nij} приняты:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{n11} & k_{n12} & \dots & k_{n1N} \\ k_{n21} & k_{n22} & \dots & k_{n2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{nS1} & k_{nS2} & \dots & k_{nSN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{S} & \frac{1}{S} & \dots & \frac{1}{S} \\ \frac{1}{S} & \frac{1}{S} & \dots & \frac{1}{S} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{S} & \frac{1}{S} & \dots & \frac{1}{S} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

что соответствует обработке пакетов без приоритетов.

Итерация в методе градиентного спуска строится в соответствии с выражением:

$$k_{nij}^{(z+1)} = k_{nij}^{(z)} + \varepsilon_n \nabla \sigma(k_{nij}^{(z)}), \quad (8)$$

где ε_n - шаг итерации, $\nabla \sigma(k_{nij})$ - градиент функции $\sigma(k_{n11}, k_{n12}, \dots, k_{n1N})$. Выражение для определения частной производной имеет вид:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial k_{nij}} = \frac{n_p [M(w_\Sigma) - w_{\Sigma i}(k_{nij})] \cdot [v_a^2 + v_b^2]}{\sqrt{S \sum_{i=1}^S (M(w_\Sigma) - w_{\Sigma i}(k_{n11}, k_{n12}, \dots, k_{n1N}))^2}} \cdot \left[\frac{b_m (8k_{nij} b_m \lambda_j - 3b_m^2 \lambda_j^2 - 2k_{nij}^2)}{6(k_{nij}^2 - k_{nij} b_m \lambda_j)^2} \times \right. \\ \left. \times e^{\frac{2(b_m \lambda_j - k_{nij})}{3b_m \lambda_j} \frac{2(1-v_a^2)}{3(v_a^2 + v_b^2)}} \right]. \quad (9)$$

где $M(w_\Sigma)$ - математическое ожидание задержки передачи пакета в ЦСС, λ_j - интенсивность трафика на входе j -го маршрутизатора.

Последовательно находя частные производные в соответствии с (9), получена матрица градиентов:

$$\nabla \sigma = \begin{bmatrix} \frac{\partial \sigma}{\partial k_{n11}} & \frac{\partial \sigma}{\partial k_{n12}} & \dots & \frac{\partial \sigma}{\partial k_{n1N}} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial k_{n21}} & \frac{\partial \sigma}{\partial k_{n22}} & \dots & \frac{\partial \sigma}{\partial k_{n2N}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \sigma}{\partial k_{nS1}} & \frac{\partial \sigma}{\partial k_{nS2}} & \dots & \frac{\partial \sigma}{\partial k_{nSN}} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Подставляя выражения для частных производных в рекуррентное соотношение (8) при помощи ЭВМ получено распределение приоритетов пакетов в буфере маршрутизатора по критерию минимальности среднего квадратического отклонения односторонней задержки передачи пакетов в ЦСС.

Оценка эффективности локальной приоритизации как способа обработки пакетов голосового трафика проведена на основе отношения количества обслуживаемых конечных устройств к общему количеству устройств:

$$J = \frac{S_o - S_n}{S_o}, \quad (11)$$

где S_n – количество необслуживаемых конечных устройств (необслуживаемыми устройствами считаются те, средняя односторонняя задержка передачи пакетов которых $w_{\Sigma i} > w_{кр}$); $w_{кр}$ – максимально-допустимая односторонняя задержка передачи пакета, зависящая от вида используемого кодека.

Оценка прироста коэффициента эффективности проведена для группы голосовых кодеков, диапазон максимально-допустимой задержки которых находится в диапазоне от 150 мс до 300 мс. Среднее значение прироста коэффициента эффективности в данном диапазоне составило 31,49 % (рисунок 2).

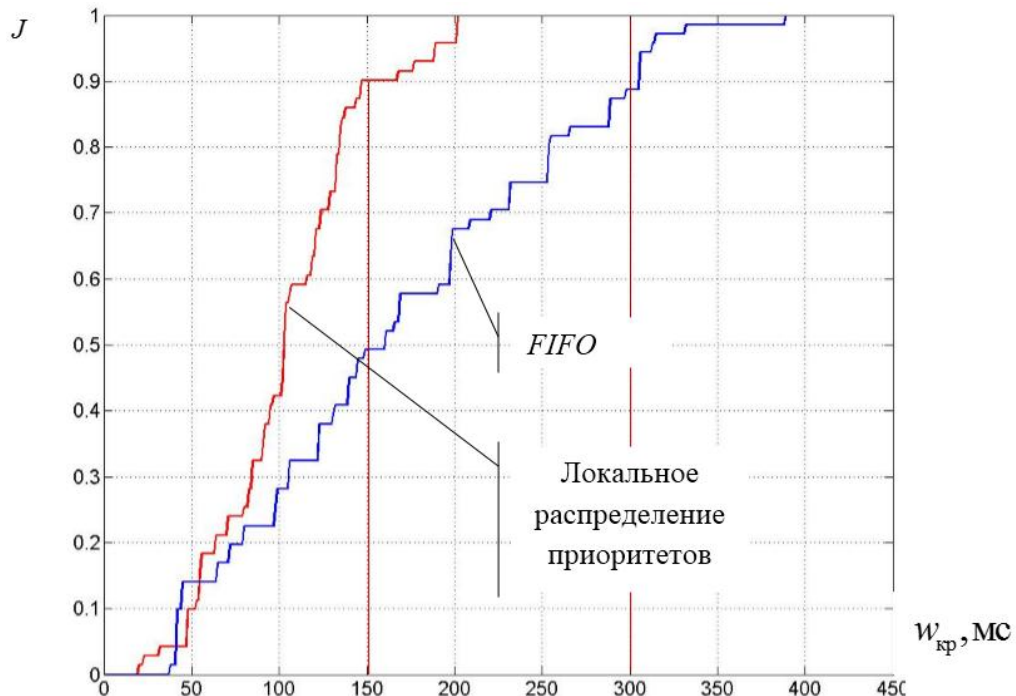


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента эффективности от максимально-допустимой задержки передачи пакета

В *третьей главе* предложена математическая модель задержки ожидания пакета в буфере маршрутизатора и динамический протокол управления очередями пакетов для маршрутизаторов ЦСС специального назначения в условиях преобладания голосовых сервисов.

В результате статистического анализа временных рядов задержки ожидания пакетов в буфере маршрутизатора на основе оценки критериев Диккея-Фуллера, Филлипса-Перрона, Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина и коэффициента Херста показано, что задержка ожидания пакета в буфере маршрутизатора является стационарным процессом с длинной памятью.

При доказанных свойствах стационарности и длинной памяти для рядов задержки, в работе использован математический аппарат авторегрессионных моделей проинтегрированного скользящего среднего с дробным порядком интегрирования (*ARFIMA*) для прогнозирования задержки ожидания пакетов в буфере маршрутизатора и показано, что задержка ожидания пакета в буфере маршрутизатора описывается моделью *ARFIMA*(3;0,364;3).

В соответствии с моделью *ARFIMA* получено аналитическое выражение для определения задержки ожидания пакетов в буфере маршрутизатора $w_{пт}$:

$$\begin{aligned}
 w_{пт} = & \hat{\Psi}_1 (w_{пт-1} - c_{п1}(d)w_{пт-2} - c_{п2}(d)w_{пт-3} - \dots - c_{п40}(d)w_{пт-41}) + \\
 & + \hat{\Psi}_2 (w_{пт-2} - c_{п1}(d)w_{пт-3} - c_{п2}(d)w_{пт-4} - \dots - c_{п40}(d)w_{пт-42}) + \\
 & + \hat{\Psi}_3 (w_{пт-3} - c_{п1}(d)w_{пт-4} - c_{п2}(d)w_{пт-5} - \dots - c_{п40}(d)w_{пт-43}) + \\
 & + \hat{\theta}_0 \xi_t - \hat{\theta}_1 \xi_{t-1} - \hat{\theta}_2 \xi_{t-2} - \hat{\theta}_3 \xi_{t-3} + c_{п1}(d)w_{пт-1} + c_{п2}(d)w_{пт-2} + \dots + c_{п40}(d)w_{пт-40},
 \end{aligned} \tag{12}$$

где $\hat{\Psi}_i, i=1,2,3$ - оценочные значения авторегрессионных коэффициентов;
 $\hat{\theta}_i, i=0,1,2,3$ - оценочные значения коэффициентов скользящего среднего;
 $c_{пi}(d), i=1 \div 40$ - набор весовых коэффициентов для членов временного ряда:
 $c_{п1}(d) = d, c_{п2}(d) = \frac{1}{2}d(1-d), \dots; d = H - 0,5$ - порядок интегрирования модели;
 H - коэффициент Херста.

Использование модели *ARFIMA*(3;0,364;3) позволяет определить с высокой точностью задержку ожидания пакета в буфере маршрутизатора в режиме реального времени (максимальное значение ошибки прогнозирования составляет 4,2 %, что на 22,5 % меньше значения ошибки прогнозирования модели *ARMA*(3;3)).

Суть динамического протокола управления очередями пакетов при обработке трафика голосовых сервисов (рисунок 3) заключается в оценке маршрутизатором трех составляющих задержки передачи пакета: w_n - задержки, равной времени нахождения пакета в сети до момента прихода на вход маршрутизатора; w_o - задержки ожидания пакета в буфере маршрутизатора; $w_{сл}$ - задержки следования пакета от маршрутизатора до окончного устройства и выработке локального приоритета для перераспределения пакетов в буфере маршрутизатора.



Рисунок 3 – Блок-схема динамического протокола управления очередями для маршрутизатора при обработке пакетов голосовых сервисов

Четвертая глава посвящена реализации динамического протокола управления очередями для маршрутизаторов при обработке пакетов голосовых сервисов на базе маршрутизатора П-320 и оценке его эффективности.

Для реализации динамического протокола управления очередями в функциональную модель маршрутизатора П-320, которая включает три уровня: *уровень интерфейсов, уровень сетевого протокола и уровень протокола маршрутизации* (рисунок 4) добавлен блок *создания и ведения таблицы для определения задержки следования пакета* (блок обратной связи). В блок *анализа и модификации заголовка IP-пакета* добавлена функция идентификации пакетов речевых сервисов, путем считывания приоритетной метки *ToS (Type of Service – тип обслуживания)* из заголовка пакета.

Блок ведения очередей дополнен двумя функциональными элементами: *блоком анализа и прогнозирования* и *блоком принятия решений* (рисунок 5).

Блок *анализа и прогнозирования* предназначен для формирования ряда задержки W_i на основе составляющих суммарной задержки пакета и прогнозирования задержки ожидания пакета в буфере маршрутизатора.

Блок *анализа и прогнозирования* состоит из модулей *определения начальных параметров, оптимизации и прогнозирования*. Модуль *определения начальных параметров* позволяет вычислить математическое ожидание, дисперсию, автоковариационные функции ряда задержки и значения авторегрессионных параметров.

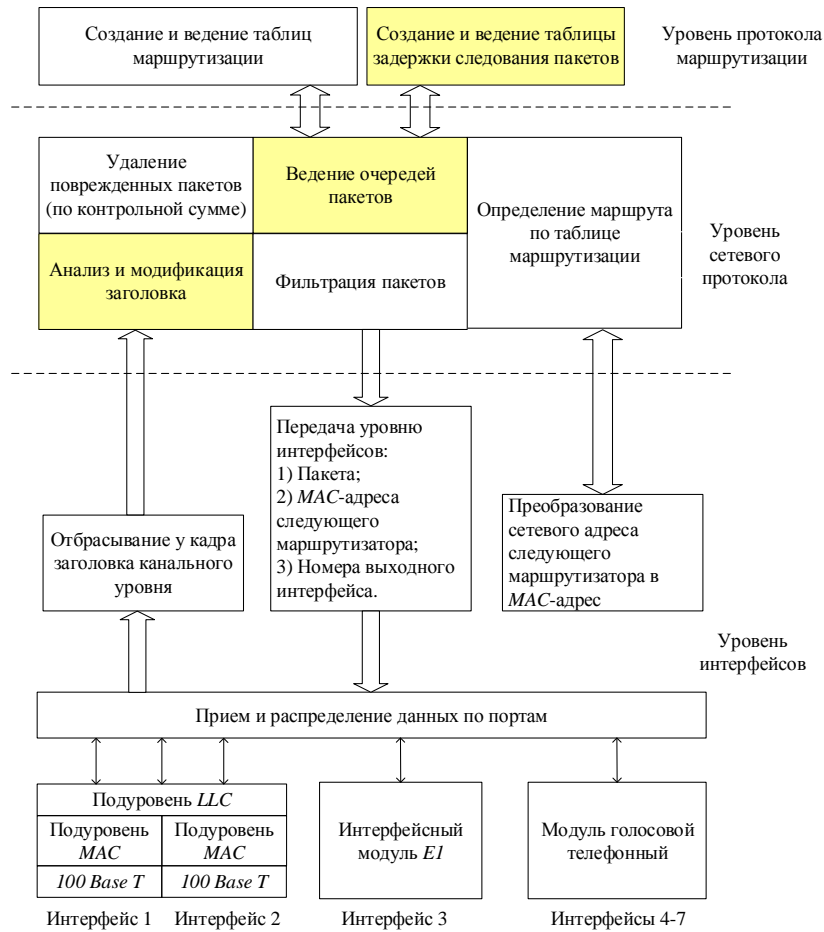


Рисунок 4 – Функциональная модель маршрутизатора П-320

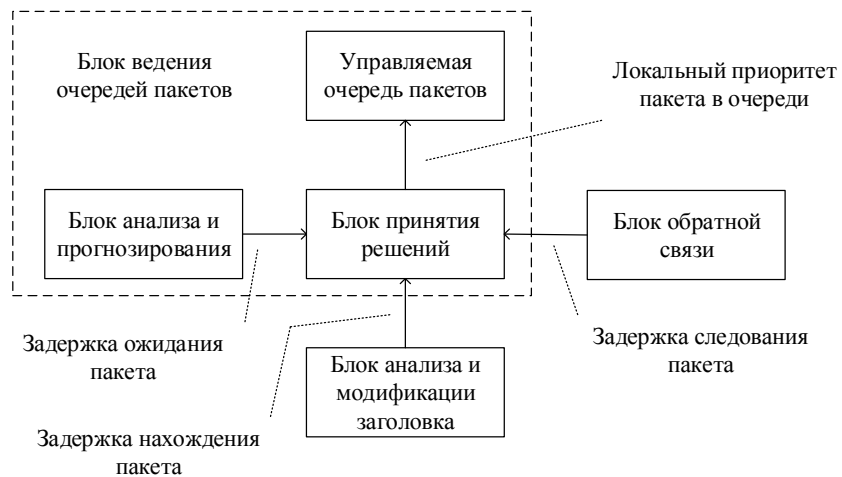


Рисунок 5 – Дополнительные блоки функциональной модели маршрутизатора П-320

Модуль оптимизации параметров определяет модифицированную автоковариационную функцию и реализует алгоритм Ньютона-Рафсона. Модуль прогнозирования на основе вычисленных параметров формирует задержку ожидания пакета на $i+1$ шаге. Блок принятия решений на основе данных об односторонних задержках пакетов находящих в очереди определяет локальные приоритетные метки для пакетов. Управляемая очередь пакетов

формирует из входной последовательности пакетов очередь перераспределенных пакетов в соответствии с локальной приоритетной меткой. Пакеты с равными приоритетными метками обрабатываются в соответствии с дисциплиной *FIFO*.

Оценка эффективности динамического протокола управления очередями для маршрутизаторов проведена при помощи компьютерного эксперимента в имитационной модели маршрутизатора П-320. Имитационная модель построена в прикладном пакете *MATLAB Simulink*.

При проведении эксперимента исследовались следующие характеристики:

- 1) Математическое ожидание и дисперсия количества пакетов в буфере маршрутизатора;
- 2) Математическое ожидание и дисперсия задержки ожидания пакетов в буфере маршрутизатора;
- 3) Максимальная и средняя задержки передачи пакетов в ЦСС;
- 4) Вариация задержки в сети (джиттер);
- 5) Количество пакетов с задержкой, превышающей максимально допустимое значение 275 мс.

Исследуемые характеристики с доверительными интервалами и доверительной вероятностью 0,95 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исследуемые характеристики

Наблюдаемая величина (y)	$M(y) \pm I_d$ без протокола	$M(y) \pm I_d$ с протоколом
Математическое ожидание количества пакетов в буфере маршрутизатора	1,488±0,029	1,502±0,029
Дисперсия количества пакетов в буфере маршрутизатора	1,666±0,0001	1,698±0,082
Математическое ожидание задержки пакетов в буфере маршрутизатора, с	0,01±0,0001	0,01±0,00012
Дисперсия задержки пакетов в буфере маршрутизатора, с ²	$2,6 \cdot 10^{-5} \pm 2,1 \cdot 10^{-8}$	$9,4 \cdot 10^{-5} \pm 2,5 \cdot 10^{-8}$
Максимальная задержка пакетов в сети, с	0,23±0,001	0,28±0,0028
Средняя задержка пакетов в сети, с	0,159±0,0001	0,159±0,0001
Вариация задержки в сети (джиттер), с	$1,72 \cdot 10^{-3} \pm 4,5 \cdot 10^{-6}$	$1,75 \cdot 10^{-3} \pm 7,7 \cdot 10^{-6}$
Кол-во пакетов с задержкой ≥ 275 мс, тыс.	1750±36,9	1160±14,6

Таким образом, в результате функционирования протокола при различном удалении конечных устройств наблюдается: возрастание математического ожидания количества пакетов в буфере маршрутизатора на 0,9 %, дисперсии количества пакетов на 1,9 %, неизменность математического ожидания задержки пакетов в буфере маршрутизатора, увеличение дисперсии задержки пакетов в буфере маршрутизатора в 3,62 раз, увеличение максимальной задержки пакетов в сети на 21,7 %, неизменность средней задержки пакетов в сети, увеличение

вариации задержки пакетов в сети на 1,7 %, уменьшение количества пакетов с задержкой, превышающей максимально допустимое значение 275 мс на 33,7 %.

В таблице 2 приведены основные показатели качества обслуживания абонентов в сети (односторонняя задержка передачи пакета, джиттер, вероятность потери пакета) с учетом и без учета функционирования динамического протокола управления очередями пакетов.

Таблица 2 – Сравнение характеристик качества обслуживания абонентов

Наблюдаемая величина (y)	без протокола	с протоколом
Задержка передачи пакета в ЦСС, мс	159	159
Джиттер, мс	1,72	1,75
Вероятность прихода пакета с заданным качеством	0,92	0,947

Вероятность приема пакета с заданным качеством увеличится на 2,93 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Проведен комплексный анализ протоколов управления трафиком в маршрутизаторах ЦСС специального назначения, на основе чего определено, что основными характеристиками, определяющими качество функционирования сети, являются задержка передачи пакетов и ее вариация, так как сервисы, характерные для ЦСС специального назначения, ориентированы на предоставление услуг реального времени [1, 3, 8, 14].

2. Разработана математическая модель обработки пакетов голосового трафика маршрутизатором. На основе анализа структуры пакетного трафика ЦСС в условиях преобладания голосовых сервисов получено математическое выражение, позволяющее определить локальный приоритет пакета по критерию минимума среднего квадратического отклонения односторонней задержки передачи пакетов в ЦСС. Важным отличием модели является описание трафика приложений голосовых сервисов моделью вида $G/G/1$, учитывающей пульсирующий характер трафика и его самоподобные свойства. Минимизация среднего квадратического отклонения односторонней задержки передачи пакетов в ЦСС позволяет сократить количество оконечных устройств, односторонняя задержка для которых превышает максимально допустимое значение [4, 6, 10, 13].

3. На основе анализа статистических свойств временных рядов задержки ожидания пакетов в буфере маршрутизатора в условиях преобладания трафика голосовых сервисов разработана математическая модель задержки ожидания пакета в буфере маршрутизатора в классе авторегрессионных моделей

проинтегрированного скользящего среднего с дробным порядком интегрирования. Отличием модели является учет самоподобной структуры временного ряда задержки ожидания пакетов на основе оценки коэффициента Херста, авторегрессионных коэффициентов и коэффициентов проинтегрированного скользящего среднего в режиме реального времени. Математическая модель позволяет определить задержку ожидания вновь прибывшего пакета до момента начала его обработки маршрутизатором с ошибкой не превышающей 4,2 %, что на 22,5 % меньше по сравнению с моделью авторегрессии скользящего среднего [2, 5, 7, 9, 11, 12].

4. Определение задержки ожидания и локального приоритета пакета в буфере маршрутизатора на основе математических моделей позволило разработать структуру и динамический протокол управления очередями пакетов для маршрутизаторов ЦСС специального назначения в условиях преобладания трафика голосовых сервисов, отличающийся учетом самоподобной структуры временных рядов задержки ожидания пакетов в буфере маршрутизатора и полной односторонней задержки передачи пакета по сети связи. Применение динамического протокола управления очередями пакетов позволило снизить число пакетов, задержка передачи которых превышает максимально допустимое значение 275 мс на 33,7 % по сравнению с протоколом обработки пакетов в порядке очередности, что снижает вероятность потери пакета с 0,08 до 0,053 [5, 12].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанная математическая модель обработки пакетов маршрутизаторами может применяться для обработки других сервисов реального времени путем уточнения порогового значения односторонней задержки передачи пакетов для данного типа сервисов [13].

2. Построение ЦСС специального назначения рекомендуется осуществлять на базе маршрутизаторов П-320 с использованием двухуровневой приоритезации пакетов: первый уровень – абсолютная приоритезация пользователей; второй уровень – локальная приоритезация пакетов маршрутизаторами на основе динамического протокола управления очередями пакетов [7, 9].

3. Программная реализация динамического протокола управления очередями пакетов в маршрутизаторе П-320 позволяет повысить эффективность их применения без замены аппаратного обеспечения устройств коммутации, в том числе тех маршрутизаторов, которыми уже укомплектованы модернизированные аппаратные Р-142НМБ [9].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1. Чернявский, П. С. Приоритетное управление трафиком центра коммутации сети связи военного назначения / П. С. Чернявский, Г. Г. Меженцев, А. А. Бысов // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2012. – № 4 (37). – С. 119–124.
2. Бысов, А. А. Обоснование необходимости перехода к динамическим алгоритмам обработки пакетов голосового трафика / А. А. Бысов, Е. В. Машкин, П. С. Чернявский // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2012. – № 4 (37). – С. 70–74.
3. Машкин, Е. В. Задержка передачи пакета по цифровым каналам связи / Е. В. Машкин, А. В. Рылов, А. А. Бысов // Весн. сувязі. – 2012. – № 2 (112). – С. 27 – 29.
4. Чернявский, П. С. Имитационная модель системы приоритетной обработки неоднородного трафика центра коммутации / П. С. Чернявский [и др.] // Весн. сувязі. – 2014. – № 2 (124). – С. 44–47.
5. Чернявский, П. С. Методика приоритетной обработки неоднородного трафика сети связи военного назначения / П. С. Чернявский, А. А. Бысов, Г. Г. Меженцев, // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2014. – № 2 (43). – С. 151–157.
6. Машкин, Е. В. Основные направления совершенствования систем связи специального назначения / Е. В. Машкин, Г. С. Казаков, А. А. Бысов // Наукоемкие технологии. – 2014. – Т. 1.5. – № 5. – С. 62–65.
7. Чернявский, П. С. Совершенствование центров коммутации сети связи специального назначения / П. С. Чернявский, А. А. Бысов // Доклады БГУИР. – 2014. – № 7 (85). – С. 90–95.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

8. Бысов, А. А. Анализ распределения времени обработки пакетов в сети NGN / А. А. Бысов, Е. В. Машкин // IV Машеровские чтения : материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Витебск, 28–29 окт. 2010 г. / Витебский гос. ун-т ; редкол. : А. П. Солодков [и др.]. – Витебск, 2010. – С. 9–10.
9. Бысов, А. А. Математическая модель прогнозирования задержки пакетов в буфере маршрутизатора / А. А. Бысов, Е. В. Машкин // Современные средства связи : материалы XVII междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 окт. 2012 г. / Вышш. гос. колледж связи, Региональное содружество в обл. связи, Белорусский гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2012. – С. 52–54.

10. Бысов, А. А. Имитационная модель VoIP-сети специального назначения для симулятора Network Simulator 2 / А. А. Бысов // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XV Респ. науч. конф., Гомель, 26–28 марта 2012 г. : в 2 ч. / Гомел. гос. ун-т; редкол. : О. М. Демиденко [и др.]. – Гомель, 2012. – Ч. 1. – С. 67–68.

11. Бысов, А. А. Самоподобная структура задержки ожидания пакетов голосового трафика в буфере маршрутизатора / А. А. Бысов, Е. В. Машкин // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XVI Респ. науч. конф., Гомель, 25–27 марта 2013 г. : в 2 ч. / Гомел. гос. ун-т; редкол. : О. М. Демиденко [и др.]. – Гомель, 2013. – Ч. 1. – С. 177–178.

12. Машкин, Е. В. Динамический способ обработки трафика голосовых сервисов маршрутизаторами / Е. В. Машкин, А. А. Бысов // 7-я междунар. науч. конф. по воен.-техн. проблемам, проблемам в области обороны и безопасности, Минск, 20–22 мая 2017 г. : в 3 ч. / Государственный военно-промышленный комитет Респ. Беларусь; редкол. : О. Г. Тиханович [и др.]. – Минск, 2017. – Ч. 3. – С. 77–78.

Тезисы докладов на научных конференциях

13. Машкин, Е. В. Аналитическая модель обработки пакетов голосового трафика / Е. В. Машкин, А. А. Бысов // Актуальные проблемы военной науки и практики в современных условиях и пути их решения: тезисы докладов Междунар. воен.-науч. конф., Минск, 23–24 апр. 2015 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь; редкол. : Т. Я. Талейкина [и др.]. – Минск, 2015. – С. 136.

14. Машкин, Е. В. Анализ способов обработки голосового пакетного трафика центрами коммутации военной сети связи / Е. В. Машкин, А. А. Бысов // Обеспечение безопасности государства: проблемы и перспективы : тезисы докладов Междунар. воен.-науч. конф., Минск, 23–24 март. 2017 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь; редкол. : Т. Я. Талейкина [и др.]. – Минск, 2017. – С. 190.

РЭЗІЮМЭ

Бысаў Анатоль Аляксандравіч

Дынамічнае кіраванне чэргамі пакетаў у маршрутызатарах ва ўмовах перавагі галасавых сэрвісаў

Ключавыя словы: лічбавая сетка сувязі, якасць абслугоўвання, затрымка перадачы пакета, верагоднасць своєчасовай дастаўкі пакета.

Мэта працы: распрацоўка матэматычных мадэляў, структуры і пратаколу кіравання чэргамі пакетаў у маршрутызатары з улікам перавагі трафіку галасавых сэрвісаў, затрымкі перадачы пакетаў і самоподобной структуры трафіку.

Метады даследавання: агульналагічныя – аналіз, сінтэз, параўнанне, абстрагаванне, абагульненне, індукцыя, дэдукцыя, аналогія і мадэляванне; эмпірычныя – назіранне, апісанне, вымярэнне і эксперымент; метады тэарэтычнага даследавання – фармалізацыя, матэматычная гіпотэза.

Атрыманыя вынікі і іх навізна:

Распрацавана матэматычная мадэль апрацоўкі пакетаў галасавога трафіку маршрутызатарам, адрозная функцыяй вызначэння лакальных прыярытэтаў пакетаў у буферы маршрутызатара ў выніку мінімізацыі сярэднеквадратычнае адхіленні аднабаковай затрымкі перадачы пакетаў, што дазваляе больш дакладна вызначыць парадак апрацоўкі пакетаў галасавых сэрвісаў маршрутызатарам.

Распрацавана матэматычная мадэль затрымкі чакання пакета ў буферы маршрутызатара, адрозная улікам самоподобной структуры часовага шэрагу затрымкі чакання пакетаў галасавых сэрвісаў у буферы маршрутызатара, якая дазваляе вызначыць затрымку чакання пакета да моманту пачатку яго апрацоўкі маршрутызатарам з памылкай якая не перавышае 4,2 %, што на 22,5 % менш у параўнанні з мадэллю аўторэгрэсіі слізгальнага сярэдняга.

Распрацаваны структура і дынамічны пратакол кіравання чэргамі пакетаў для маршрутызатараў, які адрозніваецца улікам самоподобной структуры часовых шэрагаў затрымкі чакання пакетаў і поўнай аднабаковай затрымкі перадачы пакета па сетцы сувязі і які дазваляе знізіць колькасць пакетаў, затрымка перадачы якіх перавышае максімальна дапушчальнае значэнне 275 мс на 33,7 % у параўнанні з алгарытмам апрацоўкі пакетаў у парадку чарговасці, што зніжае верагоднасць страты пакета з 0,08 да 0,053.

Ступень выкарыстання: вынікі дысертацыйнага даследавання ўкаранёны ў тэхналагічны працэс у ААТ «АГАТ-СІСТЭМ» пры распрацоўцы і вытворчасці маршрутызатара П-320.

РЕЗЮМЕ

Бысов Анатолий Александрович

Динамическое управление очередями пакетов в маршрутизаторах в условиях преобладания голосовых сервисов

Ключевые слова: цифровая сеть связи, качество обслуживания, задержка передачи пакета, вероятность своевременной доставки пакета.

Цель работы: разработка математических моделей, структуры и протокола управления очередями пакетов в маршрутизаторе с учетом преобладания трафика голосовых сервисов, задержки передачи пакетов и самоподобной структуры трафика.

Методы исследования: общелогические – анализ, синтез, сравнение, абстрагирование, обобщение, индукция, дедукция, аналогия и моделирование; эмпирические – наблюдение, описание, измерение и эксперимент; методы теоретического исследования – формализация, математическая гипотеза.

Полученные результаты и их новизна:

Разработана математическая модель обработки пакетов голосового трафика маршрутизатором, отличающаяся функцией определения локальных приоритетов пакетов в буфере маршрутизатора в результате минимизации среднеквадратического отклонения односторонней задержки передачи пакетов, что позволяет более точно определить порядок обработки пакетов голосовых сервисов маршрутизатором.

Разработана математическая модель задержки ожидания пакета в буфере маршрутизатора, отличающаяся учетом самоподобной структуры временного ряда задержки ожидания пакетов голосовых сервисов в буфере маршрутизатора, позволяющая определить задержку ожидания вновь прибывшего пакета до момента начала его обработки маршрутизатором с ошибкой не превышающей 4,2 %, что на 22,5 % меньше по сравнению с моделью авторегрессии скользящего среднего.

Разработаны структура и протокол управления очередями пакетов для маршрутизаторов, отличающийся учетом самоподобной структуры временных рядов задержки ожидания пакетов и полной односторонней задержки передачи пакета по сети связи и позволяющий снизить число пакетов, задержка передачи которых превышает максимально допустимое значение 275 мс на 33,7 % по сравнению с алгоритмом обработки пакетов в порядке очередности, что снижает вероятность потери пакета с 0,08 до 0,053.

Степень использования: результаты диссертационного исследования внедрены в технологический процесс в ОАО «АГАТ-СИСТЕМ» при разработке и производстве маршрутизатора П-320.

ABSTRACT**Bysov Anatoly Alexandrovich****Dynamic packet queue management in routers in the prevailing voice services**

Key words: digital communication network, quality of service, packet transmission delay, probability of timely package delivery.

The objective of the investigation: development of mathematical models, structure and protocol of packet queue management in the router, taking into account the prevalence of voice services traffic, packet transmission delays and a self-similar traffic structure.

Research methods: general logical - analysis, synthesis, comparison, abstraction, generalization, induction, deduction, analogy and modeling; empirical - observation, description, measurement and experiment; theoretical research methods - formalization, mathematical hypothesis.

The obtained results and their novelty:

A mathematical model for processing voice traffic packets by a router has been developed. It differs by the function of determining local priorities of packets in the router's buffer because of minimizing the standard deviation of one-way packet delay, which allows for a more precise determination of the processing order of voice services packets by a router.

A mathematical model has been developed for delaying a packet in a router's buffer, differing by taking into account the self-similar structure of a time series of waiting for voice service packets in a buffer of a router, which allows determining the delay in waiting for a newly arrived packet until the router starts processing with an error not exceeding 4,2 %, which is 22,5 % less compared to the moving average auto regression model.

A structure and a dynamic protocol for managing packet queues for routers has been developed, featuring a self-similar structure of time series of packet latency and full one-way packet transmission delay over a communication network and reducing the number of packets whose transmission delay exceeds the maximum allowable value of 275 ms by 33.7 % compared to the algorithm packet processing in order of priority, which reduces the chance of packet loss from 0.08 to 0.053.

Degree of use: The results of the dissertation research were introduced into the technological process in JSC «AGAT-SYSTEM» in the development and production of the P-320 router.

Бысов Анатолий Александрович**ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОЧЕРЕДЯМИ ПАКЕТОВ
В МАРШРУТИЗАТОРАХ В УСЛОВИЯХ ПРЕОБЛАДАНИЯ
ГОЛОСОВЫХ СЕРВИСОВ****АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Подписано в печать	Формат 60 × 84 1/16	Бумага офсетная
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе	Усл. печ. л.
Уч.-изд. л.	Тираж 60 экз.	Заказ

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 23.03.2014, ЛП № 02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6