

На правах рукописи

**Бабкин Владимир Анатольевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА  
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПАКЕТНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА**

Специальность 05.12.13 —  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва — 2021 г.**

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель:

**Строганова Елена Петровна** - доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Метрология, стандартизация и измерения в инфокоммуникациях» МТУСИ

Официальные оппоненты:

**Гольдштейн Борис Соломонович** - доктор технических наук, профессор кафедры инфокоммуникационных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича»;

**Молчанов Дмитрий Александрович** - доктор физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятностей федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов».

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт связи» (ФГУП ЦНИИС).

Защита состоится 20 мая 2021г. в 13:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д.219.001.04 при МТУСИ по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, МТУСИ, ауд. А-448.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ

<http://www.srd-mtuci.ru/images/Dis-Babkin/dis-Babkin.pdf>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь,

диссертационного совета Д.219.001.04

доктор технических наук, доцент \_\_\_\_\_

Максим Валерьевич Терешонок

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время имеет место конвергенция мультисервисных услуг связи на единой транспортной инфраструктуре сетей связи, построенных по технологии коммутации пакетов. Наиболее распространенными для передачи пакетного трафика на сетевом и канальном уровнях модели взаимодействия открытых систем (OSI) являются протоколы IP и Ethernet.

Качество передачи данных при предоставлении услуг связи оказывает влияние на общую оценку качества услуг связи со стороны пользователей (Quality of Experience - QoE) и формируемые за время предоставления услуг связи значения субъективных и расчетных оценок качества услуг связи. Качество предоставления услуг связи на технологическом уровне определяется понятием качества сервиса (Quality of Service - QoS). Влияние характеристик передачи трафика услуг связи на уровне сети на обеспечение QoS выражается показателями сетевой производительности (Network Performance - NP). Управление QoS на уровне сети связи осуществляется управлением значениями показателей NP. Перечень показателей NP и области их допустимых значений в зависимости от класса обслуживаемого трафика определены в виде пороговых значений в соответствующих нормативных документах и без определения их соответствия значениям шкалы QoE. Важно отметить, что в нормативной документации показатели NP определены для передачи пакетов данных между отправителем и получателем на сетевом уровне модели OSI, т.е. как показатели качества работы сетевых соединений.

Пригодность сетевых соединений для передачи трафика определенного класса определяется путем расчета значений показателей NP за интервалы времени фиксированной длительности и сравнения полученных значений с пороговыми значениями показателей для соответствующих классов трафика. При оценке качества работы сетевых соединений присутствует использование методов оценки качества, которые исходно разработаны для сетей с коммутацией каналов и основаны на выборке единственного значения показателя из ряда полученных значений по определенному критерию. Критерием непригодности сетевого соединения для передачи трафика определенного класса может быть наличие одиночного или среднего значения показателя NP за интервал времени определенной длительности, которое превышает установленное пороговое значение. Использование одиночных значений показателей качества, которые получены на интервалах времени фиксированной длительности и, как правило, значительно меньше интервалов времени предоставления услуг связи, не позволяет оценить качество передачи данных за все время предоставления услуг связи. Использование усредненных значений показателей качества, которые могут оказаться ниже пороговых значений, искажает оценку качества работы сетевых соединений и приводит к

скрытию имеющих место проблем с качеством передачи трафика при предоставлении услуг связи.

Пороговые значения показателей NP не учитывают, что современная услуга связи является, как правило, мультисервисной и при ее предоставлении осуществляется передача пакетного трафика различных классов через общее сетевое соединение. При этом в виду различных технологических требований со стороны трафика различных классов сетевое соединение может быть пригодно для передачи всего трафика услуги связи, пригодно частично только для передачи трафика определенных классов или непригодно совсем. При управлении передачей пакетного трафика для обеспечения QoS следует иметь в виду, что превышение значениями показателей NP установленных пороговых значений не означает обязательное прекращение предоставления услуг связи.

Таким образом, разработка способов оценки качества работы сетевых соединений при передаче мультисервисного трафика с использованием протоколов IP и Ethernet, которые позволяют формировать значения оценки качества с учетом величины и длительности изменений значений показателей NP за интервалы времени произвольной длительности (предоставления услуг связи) и позволяют оценить влияние изменений значений показателей NP на формирование значений оценки качества услуг связи (QoE) является актуальной задачей по обеспечению качества передачи мультисервисного трафика в сетях с коммутацией пакетов.

**Степень разработанности темы.** Вопросы обеспечения качества передачи данных в современных мультисервисных сетях активно исследуются в работах отечественных (М.А. Шнепс-Шнеппе, Б.С. Гольдштейн и Г.Г. Яновский, А.Е. Кучерявый, С.Н. Степанов, В.И. Битнер, В.П. Шувалов, В.А. Нетес, Г.В. Попков, Г.П. Башарин, К.Е. Самуйлов, Ю.В. Гайдамака и др.) и зарубежных (J.D. McCabe, В. Claise, R. Ackerley, R.G. Cole и др.) авторов. Анализ этих и других работ показывает актуальность обеспечения качества передачи пакетного трафика для целей обеспечения качества предоставления услуг связи. В частности, внимание уделяется вопросам распределения сетевых ресурсов для обеспечения качества передачи трафика, способам формирования показателей для оценки качества и надежности сети связи, рассматриваются вопросы математического моделирования сетей связи с целью создания наиболее подходящих моделей для моделирования поведения сети связи в различных условиях. При этом все еще не решен вопрос «дуализма» в оценке качества работы сетей связи. В частности, определяется, что параметры качества обслуживания (QoS) измеряются либо объективно с помощью технических средств (путем измерения физических свойств каналов, сетей, сетевых элементов и сигналов) или субъективно (воспринимаемое QoS) с помощью обследований и субъективных тестов, проводимых среди пользователей. С другой стороны, существует ряд нормативных документов совершенно четко определяющих требования к

качественным параметрам сетей связи, построенных с использованием протокола IP. При этом политика в отношении измерения QoS должна принимать в расчет параметры, влияющие на результирующее качество услуги, включая весь диапазон аспектов построения архитектуры сети связи.

**Объект исследования.** Объектом исследования является построенная по технологии коммутации пакетов сеть крупного оператора связи, на которой предоставляется широкий спектр услуг связи для различных категорий пользователей.

**Предмет исследования.** Предметом исследования является качество работы сетевых соединений по передаче мультисервисного пакетного трафика с использованием протоколов Ethernet и IP на канальном и сетевом уровнях модели OSI.

**Целью диссертационного исследования** является исследование и разработка методов мониторинга производительности пакетной транспортной сети на основе анализа значений показателей качества, которые бы обеспечили повышение производительности сетей связи по передаче мультисервисного пакетного трафика услуг связи.

**Задачи диссертационного исследования.** Для достижения поставленной цели в рамках диссертационного исследования решены следующие задачи:

1. Проведен анализ взаимосвязи показателей качества между собой и рассмотрено влияние показателей качества на гарантию доставки пакетов данных от отправителя к получателю в соответствии с технологическими требованиями по доставке пакетов со стороны обслуживаемых услуг связи.

2. Разработана модель, описывающая единство и синергетичность показателей качества с технологическими и архитектурными особенностями построения сетей связи.

3. Разработаны методы интегральной оценки качества работы сетевых соединений, позволяющие оптимизировать производительность сетевых соединений с учетом технологических требований обслуживаемых услуг связи и обеспечить перераспределение трафика услуг связи по сетевым соединениям с показателями качества, наиболее соответствующими требованиям услуг связи в рамках развития операционной среды. С учетом близости разработанных методов к методам формирования оценок QoE получена возможность оценки влияния показателей NP на формирование оценок QoE и обеспечения поддержания требований соглашений об уровне предоставления услуг (SLA) на должном уровне.

4. Разработаны интегральные показатели качества работы сетевых соединений, позволяющие проводить оценку качества работы сетевых соединений с учетом индивидуальных требований к показателям качества со стороны обслуживаемых услуг связи в рамках разработки методов эффективного использования сетей связи.

5. Разработан метод формирования диапазонов пороговых значений при оценке значений показателей качества с учетом требований к значениям показателей качества со стороны мультисервисных услуг.

#### **Научная новизна.**

1. Предложена модель взаимосвязи между показателями функционирования сетей с коммутацией пакетов, которая, в отличие от моделей, описывающих только взаимное влияние показателей качества, учитывает влияние архитектурно-технологических особенностей построения сети связи и влияние со стороны информационных систем и сетевых платформ на качество предоставления сетевых сервисов, позволяет формировать оценку качества работы сетевых соединений с учетом единства и синергетичности показателей качества.

2. Предложен и обоснован метод статистической интегральной оценки качества работы сетевых соединений в сети связи с коммутацией пакетов, который, в отличие от методов, основанных на статистическом анализе значений показателей качества, учитывает влияние величины и продолжительности (количества) кратковременных отклонений значений показателей сетевой производительности от областей допустимых значений на интервале времени проведения измерений на качество предоставления мультисервисных услуг связи.

3. Предложен метод формирования диапазона пороговых значений показателей качества для проведения оценки качества работы сетевых соединений в сетях с коммутацией пакетов, который, в отличие от методов, основанных на пороговой (дискретной) оценке ухудшения качества, учитывает различные требования со стороны набора услуг к качеству обслуживания сетевым соединением трафика данных, формируемого в мультисервисной сети на различных уровнях модели взаимодействия открытых систем с использованием различных транспортных технологий передачи пакетного трафика.

4. Предложены интегральные показатели качества работы сетевых соединений в сети с коммутацией пакетов, которые, в отличие от показателей, основанных на анализе абсолютных значений, позволяют оценить степень деградации качества передачи данных при передаче по сетевому соединению неоднородного трафика путем учета величины и длительность превышения значениями показателей сетевой производительности установленных пороговых значений на интервале времени проведения оценки.

5. Предложен метод ретроспективной оценки пригодности сетевых соединений для передачи мультисервисного трафика существующих и перспективных услуг связи с учетом их технологических требований, который дополняет существующие методы текущей оценки качества и позволяет управлять маршрутизацией пакетного трафика путем выбора для передачи трафика сетевого соединения с учетом исторической оценки качества при равенстве значений

текущей оценки. Такой подход к управлению маршрутизацией пакетного трафика в мультисервисных сетях связи повышает производительность сетей связи.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы состоит в развитии методологии оценки качества работы сетевых соединений в сетях с коммутацией пакетов путем учета взаимосвязи и влияния отдельных показателей сетевой производительности на качество передачи пакетного трафика в соответствии с требованиями к ресурсам сети со стороны отдельной услуги связи или набора услуг. Практическая значимость диссертации заключается в том, что формируемые оценки качества работы сетевых соединений позволяют обеспечить управление передачей трафика мультисервисных услуг с использованием сетевых соединений, максимально соответствующих требованиям к качеству передачи трафика обслуживаемых услуг связи, и проводить мониторинг изменения качества работы сетевых соединений с целью своевременного принятия мер технического характера по поддержанию качества работы сетевых соединений на необходимом уровне, осуществлять планирование развития сети связи оператора с учетом текущего технического состояния и изменения нагрузки на сетевые соединения со стороны пользователей услуг связи.

**Использование и внедрение результатов диссертации** подтверждено актами о внедрении, приложенными к диссертации. При непосредственном участии диссертанта была создана система мониторинга производительности сетей с коммутацией пакетов крупного оператора связи РФ, которая подтвердила эффективность своей работы на протяжении нескольких лет эксплуатации.

**Личный вклад.** Все основные научные положения, результаты, выводы и рекомендации сформулированы, получены, обработаны и проверены автором лично в ходе проведения оценок параметров и показателей качества работы сети крупного оператора связи РФ.

**Методология и методы исследования.** В работе при решении поставленных задач использовались методы теорий вероятностей, массового обслуживания, математической статистики. При оценке качества передачи пакетного трафика использованы объективные (интрузивные и неинтрузивные) методы оценки, выполнено компьютерное моделирование и получены экспериментальные подтверждения результатов моделирования.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Разработанная логическая модель взаимосвязи показателей сетевой производительности обеспечивает планирование и управление качеством передачи трафика в мультисервисных сетях связи с коммутацией пакетов.

2. Разработанный метод формирования интегральной оценки качества работы сетевого соединения в сети с коммутацией пакетов позволяет формировать оценку соответствия качества

работы сетевого соединения технологическим требованиям со стороны обслуживаемых услуг связи на интервале времени произвольной длительности.

3. Разработанный метод формирования диапазонов пороговых значений показателей качества обеспечивает поддержание качества работы сетевых соединений с учетом технологических требований со стороны обслуживаемых услуг связи и производственно-технологических возможностей сети связи.

4. Предложенные интегральные показатели качества работы сетевых соединений в сети с коммутацией пакетов позволяют выполнить оценку степени влияния изменений значений показателей сетевой производительности на качество передачи мультисервисного трафика на интервале времени произвольной длительности и увеличить в среднем в 1,2 раза объем данных, передаваемых через сетевые соединения с обеспечением необходимых требований к качеству передачи трафика, по сравнению с использованием традиционных показателей NP.

5. Метод анализа качества работы сетевых соединений с использованием интегральных показателей качества позволяет определять перечень необходимых изменений в сети связи для обеспечения качества передачи пакетного трафика с учетом требований существующих и перспективных услуг связи, оптимизировать маршрутизацию трафика различных классов с учетом исторических данных о качестве работы сетевого соединения.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью применения математического аппарата и согласованностью теоретических и практических результатов исследования, проводимых в сети оператора связи на протяжении нескольких лет. В виду практической ценности полученных результатов они внедрены на пакетной сети связи данного оператора.

Полученные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: международная научно-техническая конференция «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» (Беларусь, Минск, 2018г.), международная научная конференция «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» (Санкт-Петербург, 2018), международная научная конференция «Технические и естественные науки» (Санкт-Петербург, ГНИИ «Нацразвитие», 2018 г.), международная научная конференция «2019 Системы генерации и обработки сигналов в области бортовых коммуникаций» (Москва, МТУСИ, 2019 г.), XIII международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии Информационного Общества» (Москва, МТУСИ, 2019 г.), международная научно-техническая конференция «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» (Ярославль, Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 2019 г.), XIV международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества 2020» (Москва,

МТУСИ, 2020 г.), международная научно-техническая конференция «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» (Россия, Светлогорск, 2020г.).

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 6 в рецензируемых периодических изданиях, входящих в перечень ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации.

**Основное содержание работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложения. Основная часть (без приложений) изложена на 168 страницах машинописного текста, содержит 95 рисунков и 16 таблиц. Список литературы состоит из 175 наименований. Приложения изложены на 2 страницах машинописного текста.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, обозначена цель исследований, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** рассматриваются существующие подходы к определению качества работы сети связи, виды оценок качества и их распределение по уровням модели OSI. Проводится сравнительный анализ работы сетей с коммутацией каналов и с коммутацией пакетов. Для сетей с коммутацией пакетов рассматриваются определенные в нормативных документах показатели качества работы сети и их применение с учетом использования для передачи пакетного трафика оборудования, работающего на канальном (коммутаторы) и сетевом (маршрутизаторы) уровнях модели OSI, при использовании различных транспортных технологий передачи пакетного трафика (MPLS, VxLAN, GTP-туннели и т.п.). Рассматриваются в сравнении методы формирования оценок NP и QoE при предоставлении услуг связи, а также использование интрузивных и неинтрузивных методов оценки качества работы сети. Выполнен обзорный анализ научных публикаций по вопросам разработки методов оценки качества работы сетей с коммутацией пакетов. Особое внимание уделено рассмотрению методов оценки качества работы сети с коммутацией пакетов на основе протоколов IP и Ethernet при передаче мультисервисного трафика и присущих этим методам недостаткам. Отмечено, что имеет место использование методов оценки качества, которые были ранее разработаны для оценки качества работы сетей с коммутацией каналов и не обеспечивают формирование оценок качества на всем интервале времени проведения измерений/наблюдений, в частности при использовании значений показателей качества, полученных в час наибольшей нагрузки (ЧНН).

Установлено, что в нормативной документации для значений показателей NP при использовании для передачи данных протоколов IP и Ethernet используется метод пороговой деградации качества работы сетевого соединения, который не подтверждается практическими результатами оценки качества передачи пакетного трафика при предоставлении большинства услуг связи, основанных как на передаче трафика одного класса (моносервисные услуги связи),

так и на передаче мультиклассового трафика (мультисервисные услуги связи). В ходе проведенных исследований всегда наблюдались области значений показателей NP, в которых происходили постепенные ухудшения качества передачи пакетного трафика, приводящие к ухудшению качества предоставления услуг связи. Пороговые значения показателей NP установлены из предположения стационарности и ординарности процесса передачи пакетного трафика с отсутствием последствия, что позволяет использовать минимальные, максимальные и средние значения показателей на интервале времени оценки качества. При этом в реальной сети связи процесс изменения значений показателей качества не является стационарным, отсутствует ординарность потока пакетов данных в виду конкуренции пакетов с разным уровнем приоритета, присутствует влияние последствий в виду использования разных пакетных буферов по значениям приоритета пакетов данных и функций профилирования (шейпинга), присутствует просеивание потока пакетов данных с использованием функций сброса (полисинга) пакетов данных по условию. При этом нахождение значений показателей NP в области допустимых значений (ниже порогового значения) обеспечивает 100% качество передачи трафика независимо от абсолютных значений показателей, что указывает на необходимость оценки величины превышения значениями показателей NP установленных пороговых значений.

С учетом вышеизложенного формируется задача на разработку показателей качества работы сетевых соединений для сетей с коммутацией пакетов, которые должны учесть вышеуказанные недостатки нормативных показателей NP и обеспечить оценку влияния изменения значений показателей NP на формирование значений QoE на интервале времени произвольной длительности при предоставлении мультисервисных услуг связи.

**Во втором разделе** решается определенная в первом разделе задача по формированию показателей качества работы сетевых соединений. Рассматривается определенная в нормативной документации классификация пакетного трафика на канальном и сетевом уровнях модели OSI и установленные в соответствии с классификацией пороговые значения для показателей NP. При этом указывается, что в рамках нормативной документации определяются различные диапазоны допустимых значений показателей NP для различных услуг связи, которые могут иметь одинаковый класс трафика в сети связи. С учетом того, что различные услуги связи, у которых может совпадать класс трафика, имеют разную чувствительность к изменению значений одного и того же показателя NP, то разрабатываемые показатели качества должны формироваться по значениям каждого показателя NP в отдельности. Формирование оценки качества по каждому показателю в отдельности обусловлено также тем фактом, что с точки зрения обеспечения качества услуг связи в виде показателей QoS показатели NP могут быть конвертированы в другие показатели качества и необходимо иметь возможность

сопоставления показателей NP и QoS. Например, согласно рекомендации ITU-T G.1020 при превышении времени задержки передачи пакета данных по сети связи на приемной стороне при обработке такой пакет может быть отнесен к потерянным пакетам данных и увеличит значение уровня потерь. В нормативной документации в отношении интервалов времени для формирования значений показателей NP определены интервалы времени различной длительности, причем длительность интервала времени может определяться типом обслуживаемой услуги связи. С учетом вышеизложенного для оценки качества передачи пакетного трафика по сетевому соединению за интервал времени проведения измерений/наблюдений приняты или значения длительности времени предоставления конкретных услуг связи или интервал времени цикличности использования услуг связи пользователями в виде суточного интервала времени. Изменения значений показателей NP рассматриваются в областях деградации значений показателей NP, определяемых как превышение установленного порогового значения вплоть до величины значения показателя, когда качество передачи пакетов данных в интересах услуг связи приводит к неудовлетворенности пользователей качеством услуги связи. Определение диапазонов значений показателей NP для областей деградации качества услуг связи рассматривается в третьем разделе.

Для формирования значений оценки качества работы сетевого соединения на интервале времени проведения оценки предлагаются однопороговый и многопороговый методы интегральной оценки, представленные на рисунках 1а и 1б соответственно. Основная суть метода интегральной оценки представлена на рисунке 1а.

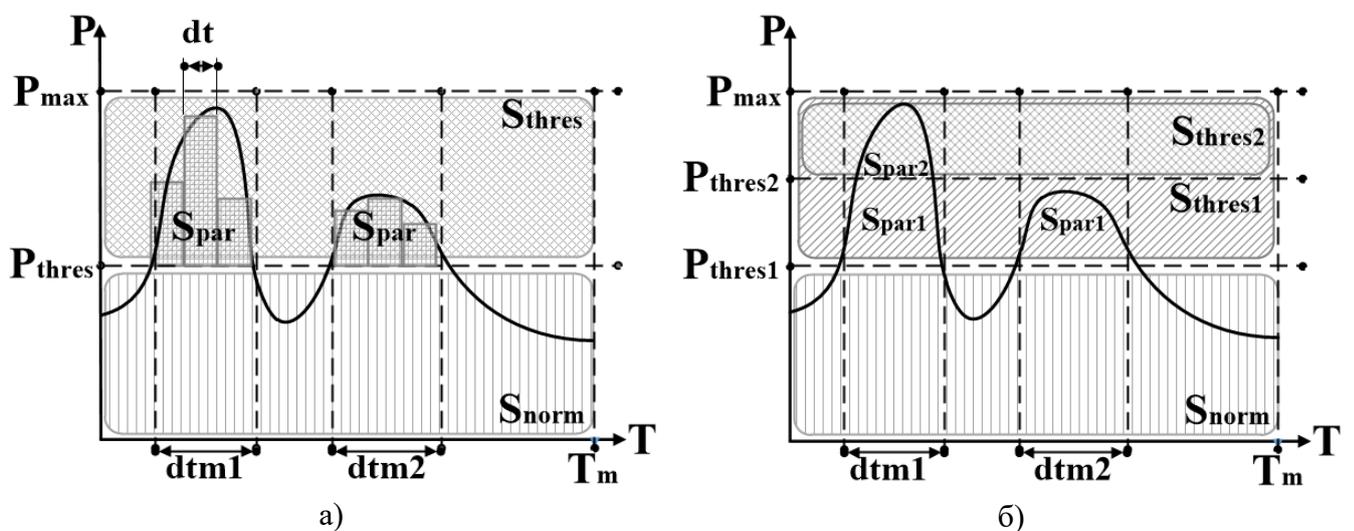


Рисунок 1 - Формирование однопороговой (а) и многопороговой (б) интегральной оценки качества работы сетевых соединений

В качестве параметра  $P$  выступают значения показателей NP. Область деградации значений  $P$  определяется пороговым значением  $P_{thres}$  и значением  $P_{max}$ , начиная с которого сетевое соединение непригодно для передачи трафика в интересах услуг связи. За интервал времени оценки качества работы сетевого соединения  $T_m$  максимальная величина деградации качества описывается значением площади  $S_{thres}$ . Величина ухудшения качества работы сетевого соединения  $S_{par}$  за время  $T_m$  описывается суммой величин превышения значениями параметра  $P$  порогового значения  $P_{thres}$  на интервалах времени  $dt$  формирования значений показателей NP

$$S_{par} = \int_0^{T_m} (P(t) - P_{thres}(t))dt. \quad (1)$$

При этом значение оцениваемого параметра  $P(t)$  в (1) определяется следующим образом

$$\begin{cases} P(t), \text{ при } P_{thres} < P(t) \leq P_{max}, \\ P_{thres}, \text{ при } P(t) \leq P_{thres}, \\ P_{max}, \text{ при } P_{max} < P(t). \end{cases}$$

Длительность времени, в течение которого сетевое соединение не обеспечивало должного качества передачи пакетного трафика  $T_{thres}$  определяется как

$$T_{thres} = \sum_{i=1}^n dt(i),$$

где  $n$  – количество интервалов времени формирования значений показателя NP, на которых наблюдалось превышение значением показателя  $P$  величины  $P_{thres}$ .

Для учета описанных в нормативной документации и технической литературе нелинейных зависимостей, обычно экспоненциальных, значений показателей NP от величины нагрузки на сетевое соединение, в том числе при кратковременных изменениях величины нагрузки, с учетом наличия нелинейных взаимосвязей между значениями QoE и QoS или NP, с целью повышения чувствительности интегральной оценки качества к одиночным «всплескам» значений показателей NP, сформирована нелинейная экспоненциальная функция для оценки качества работы сетевого соединения, график которой представлен на рисунке 2. При формировании нелинейной экспоненциальной функции учитывался тот факт, что деградация качества работы сетевого соединения имеет существенное значение на начальных этапах и с увеличением длительности времени деградации качества общая оценка качества

предоставления услуг связи изменяется незначительно. Это подтверждается широко известной зависимостью значений QoE от значений QoS, представленной на рисунке 3.

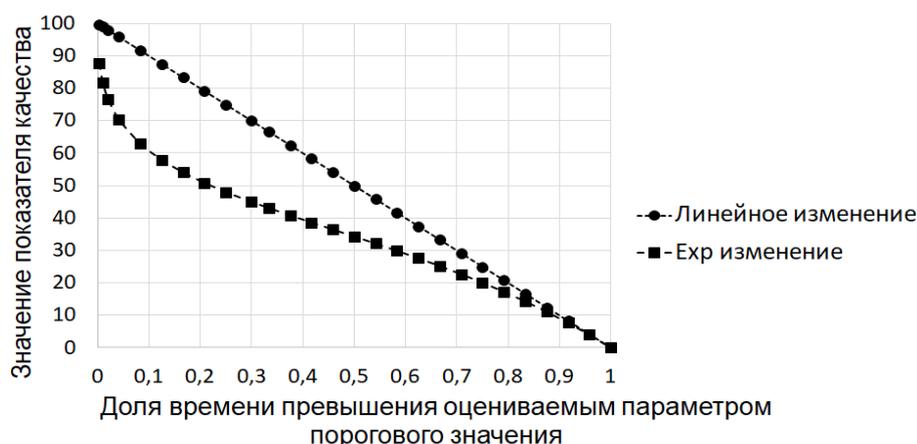


Рисунок 2 – График нелинейной функций для учета влияния «всплесков» интенсивности трафика на формирование значений интегрального показателя качества

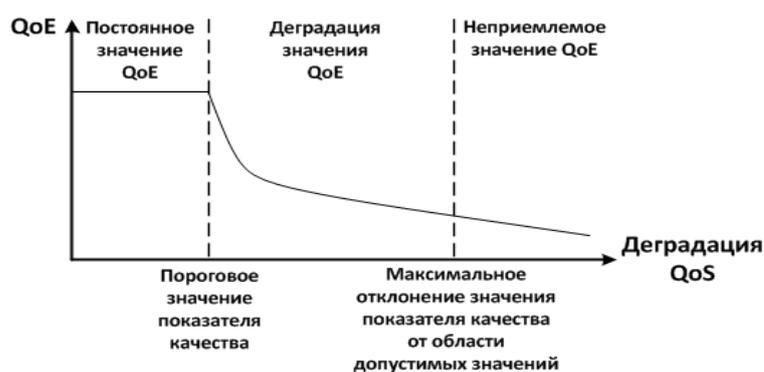


Рисунок 3 – График зависимости значений QoE от значений QoS

В виду наличия в сетях связи интервалов времени с отсутствующими значениями показателей NP, необходимо исключить такие интервалы времени из рассмотрения при формировании интегральной оценки качества и производить расчет значения интегрального показателя  $Q_p$  только за интервалы времени  $T_{av}$  с наличием значений показателей NP. Формируемый интегральный показатель качества  $Q_p$  описывается отношением значений  $S_{par}$  и  $S_{thres}$  и показывает долю пакетного трафика, переданного по сетевому соединению с соответствием значений параметра  $P$  установленным требованиям на интервале времени  $T_m$

$$Q_p = \left( 1 - \left( \frac{S_{par}}{S_{thres}} \right)^{e^{-(1-T_{thres}/T_{av})}} \right) * 100\% , \quad (2)$$

где  $0 \leq T_{thres} \leq T_{av}$  и  $T_{av} \leq T_m$ .

Для исключения влияния значений  $T_{av}$  небольшой величины по сравнению с  $T_m$  на результат интегральной оценки используется коэффициент достоверности  $K_t$  набора используемых значений  $P$ , который определяется как

$$K_t = \frac{T_{av}}{T_m}.$$

При значении  $K_t$  менее установленной величины, используемый набор значений  $P$  считается непригодным для формирования оценки качества работы сетевого соединения.

Для случая, когда для различных услуг связи существуют разные пороговые значения оцениваемого параметра  $P$ , используется многопороговый метод оценки качества работы сетевого соединения, представленный на рисунке 16. Значения интегральных показателей качества для разных пороговых значений параметра имеют вид

$$Q_{p1} = \left( 1 - \left( \frac{S_{par1}}{S_{thres1}} \right)^{e^{-(1-T_{thres1}/T_{av1})}} \right) * 100\%,$$

$$Q_{p2} = \left( 1 - \left( \frac{S_{par2}}{S_{thres2}} \right)^{e^{-(1-T_{thres2}/T_{av2})}} \right) * 100\%.$$

На основании полученных значений  $Q_{p1}$  и  $Q_{p2}$  осуществляется выбор наиболее качественных сетевых соединений для передачи трафика конкретной услуги связи. Общее качество сетевого соединения при этом оценивается как

$$Q_p = MIN(Q_{p1}, Q_{p2}).$$

Результаты многопороговой оценки качества работы сетевых соединений в отношении передачи трафика различных услуг связи могут использоваться для маршрутизации пакетного трафика в целях обеспечения наилучшего качества передачи для трафика соответствующей услуги связи.

Таким образом, интегральный показатель качества  $Q_p$  позволяет характеризовать качество работы сетевого соединения на интервале времени проведения оценки  $T_m$  с учетом индивидуального профиля значений оцениваемого параметра, наличия нелинейной составляющей в изменении значений оцениваемых параметров (нормативных показателей качества) и с учетом статистической достоверности данных  $K_t$  о значениях параметра  $P$  за время проведения оценки.

В публикациях по вопросам оценки качества услуг связи представлена оценка зависимости значений QoE от значений QoS

$$QoE(QoS(X)) = Q_r * (1 - QoS(X))^{\frac{QoS(X)*A}{R}}, \quad (3)$$

где  $X$  – вектор-параметр значений уровня загрузки, потерь, времени задержки, джиттера,  
 $Q_r$  – коэффициент влияния значения QoS на значение QoE,  
 $A$  – константа, описывающая класс трафика,  
 $R$  – константа, описывающая структуру трафика соответствующего класса.

Из анализа функций формирования значений  $Q_r$  и зависимости значений QoE от значений QoS, представленных на рисунках 2 и 3 и описываемых соответствующими формулами (2, 3), можно сделать вывод, что значения интегральных показателей качества работы сетевого соединения позволяют оценить влияние качества работы сетевых соединений на качество предоставления услуг связи.

**В третьем разделе** проводится анализ взаимосвязи определенных в нормативной документации показателей качества работы сетей с коммутацией пакетов и подходы к анализу значений данных показателей. На основании проведенного анализа предлагаются: логическая модель взаимосвязи показателей сетевой производительности, учитывающая синергетичность показателей качества, разработанные для анализа показателей NP интегральные показатели качества, учитывающие изменения значений нормативных показателей качества на интервале времени проведения оценки и подходы к определению пороговых значений для нормативных показателей качества с учетом требований к ресурсам сети со стороны обслуживаемых услуг связи и производственно-технологических возможностей сетей связи.

Предлагаемая логическая модель взаимосвязи показателей сетевой производительности, представленная на рисунке 4, обеспечивает формирование оценки качества работы сетевых соединений с учетом степени важности показателей NP при предоставлении мультисервисных услуг связи согласно рекомендации ITU-T G.1010, архитектуры сети, влияния качества функционирования сетевых служб на подключенных к сети клиентских и сервисных устройствах. Использование логической модели позволяет ввести граничные условия по каждому из показателей NP при использовании для оценки качества комплексных показателей, составленных из набора показателей NP с некоторыми весовыми коэффициентами, т.к. сетевое соединение может быть непригодно для передачи трафика услуг связи по любому из показателей NP в отдельности. Логическая модель также устраняет возникающие порой упущения по структуре сетевого соединения в виде периодической последовательности каналов связи и пакетных буферов под определенные наборы классов и типов пакетного трафика.



- Коэффициент качества сетевого соединения (ККС), позволяющий проводить оценку степени пригодности сетевого соединения для предоставления услуг различного типа в зависимости от уровня ошибок. В качестве параметра при расчете используется уровень ошибок при передаче пакетов на портах сетевого соединения.

При формировании порогового значения уровня загрузки для расчета значения КПС были учтены требования стандарта IEEE 802.3-2012, рекомендаций ITU-T Y.1564 и МЕР 10.3 по влиянию размера передаваемых Ethernet-кадров на значение уровня загрузки сетевого соединения. График зависимости уровня загрузки сетевого соединения на канальном уровне модели OSI в зависимости от размера Ethernet-кадров представлен на рисунке 5.

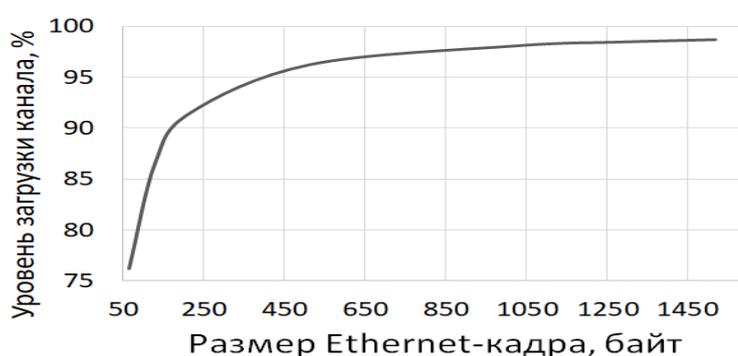


Рисунок 5 - Влияния размеров Ethernet-кадров на уровень загрузки сетевого соединения

С учетом того, что согласно теории СМО время обработки пакетов данных возрастает в 2 раза при уровне загрузки равном примерно 67% и аппроксимации по синусоидальному закону квазигармонического изменения уровня нагрузки на сеть при наличии периодических миграций пользователей услуг связи по территории обслуживания оператора связи определено, что оптимальным пороговым значением уровня загрузки является значение равное 70%.

При определении пороговых  $P_{thres}$  и максимальных  $P_{max}$  значений показателей NP при формировании значений ККПО, ККНО, ККС необходимо руководствоваться соответственно наиболее строгими и наименее строгими требованиями к значениям показателей NP со стороны обслуживаемых услуг связи и рекомендациями по обслуживанию со стороны сети трафика соответствующих типов и классов. Иллюстрация такого подхода к формированию требований к значениям показателей NP представлена на рисунке 6. При этом все требования со стороны услуг связи должны быть соотнесены с используемыми технологиями передачи данных по уровням модели OSI и сегментам сети с учетом архитектуры их построения и синергетичности используемых показателей качества.

Предложенные интегральные показатели качества и методы формирования диапазона пороговых значений для значений нормативных показателей качества позволяют провести сравнительную оценку качества работы сетевых соединений с учетом требований услуг связи,

трафик которых передается по конкретному сетевому соединению, т.е. выполнить оценку в соответствии с функциональной задачей каждого сетевого соединения. Это позволяет обеспечить должное качество предоставления услуг при минимизации затрат со стороны оператора связи на обеспечение качества работы сетевых соединений.



Рисунок 6 - Формирование требований к значениям показателей NP

**В четвертом разделе** на примерах описываются результаты практического использования предложенных интегральных показателей для оценки качества работы сетевых соединений в сети с коммутацией пакетов и определения степени пригодности сетевых соединений для передачи пакетного трафика различных услуг связи на основе их требований к качеству работы сетевых соединений. Графики изменения значений интегральных показателей качества позволяют выявить проблемы с производительностью сетевых соединений при передаче пакетного трафика и выявить причины возникновения таких проблем.

На рисунке 7 представлены примеры графиков изменения значений уровня загрузки сетевого соединения и соответствующих значений КПС в зависимости от длительности времени передачи трафика с соответствующим изменением уровня загрузки.

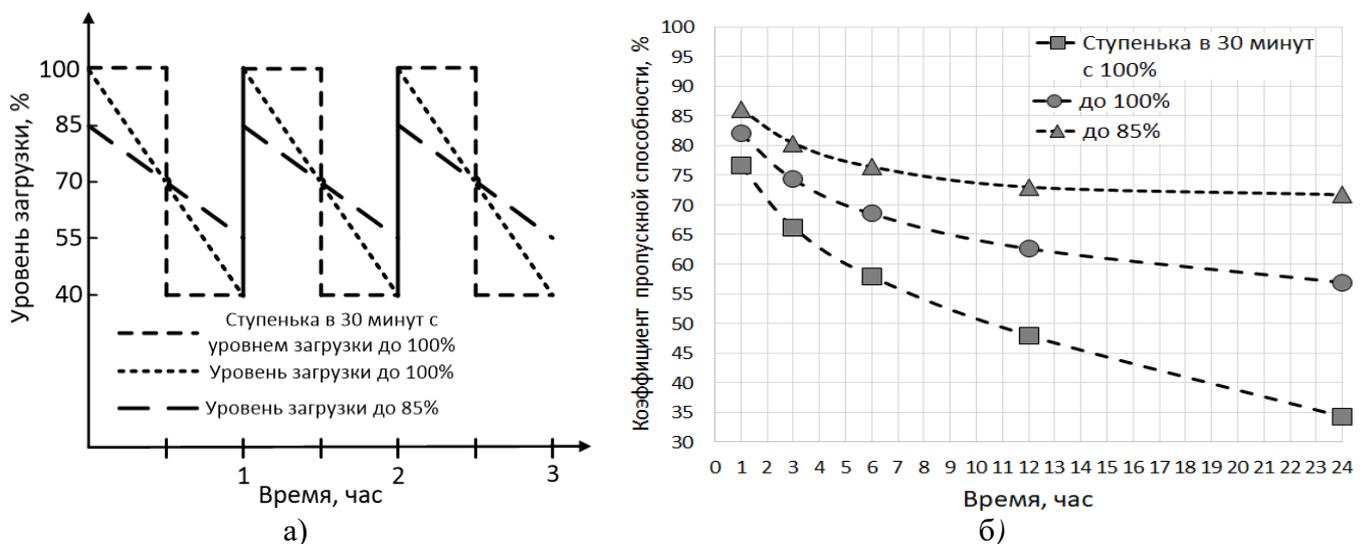


Рисунок 7. Графики изменения значений уровня загрузки сетевого соединения (а) и соответствующих изменений значений КПС (б)

Значения КПС на рисунке 7 рассчитаны с использованием однопорогового метода формирования значений интегрального показателя и характеризуют долю пакетного трафика, который был передан через сетевое соединение в условиях возникновения перегрузок сетевого соединения. Графики изменения значений КПС в зависимости от величины и длительности перегрузки на рисунке 7б соответствуют графику изменения значений QoE от степени ухудшения значений QoS, представленному на рисунке 3, что указывает на наличие оценки влияния ухудшения качества передачи трафика на качество предоставления услуг связи.

На рисунке 8 представлен пример графика уровня сброса пакетов данных для сетевого соединения. Использование представленных на рисунках 9 и 10 графиков изменения во времени значений ККНО и КПС для данного сетевого соединения позволяет выявить причину сброса пакетов и сформировать решение по улучшению качества передачи данных.

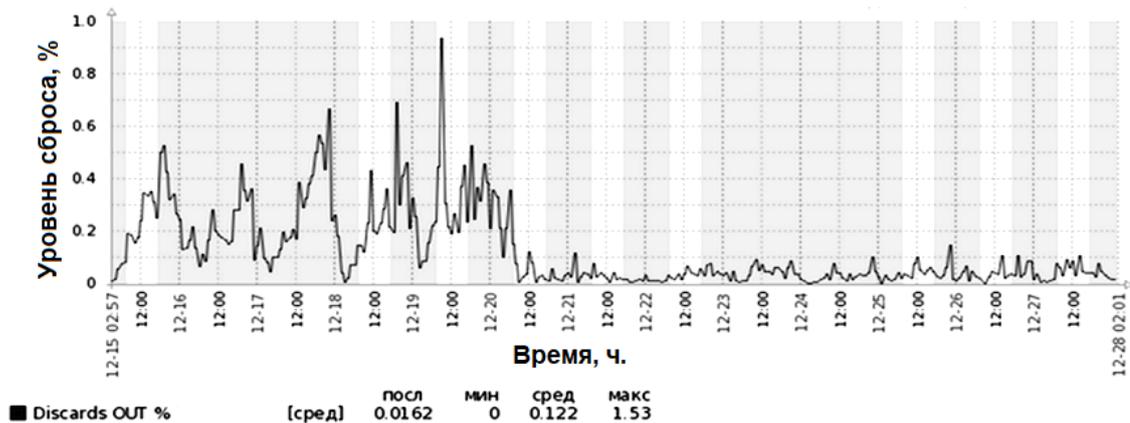


Рисунок 8 - График изменения значений уровня сброса пакетов данных

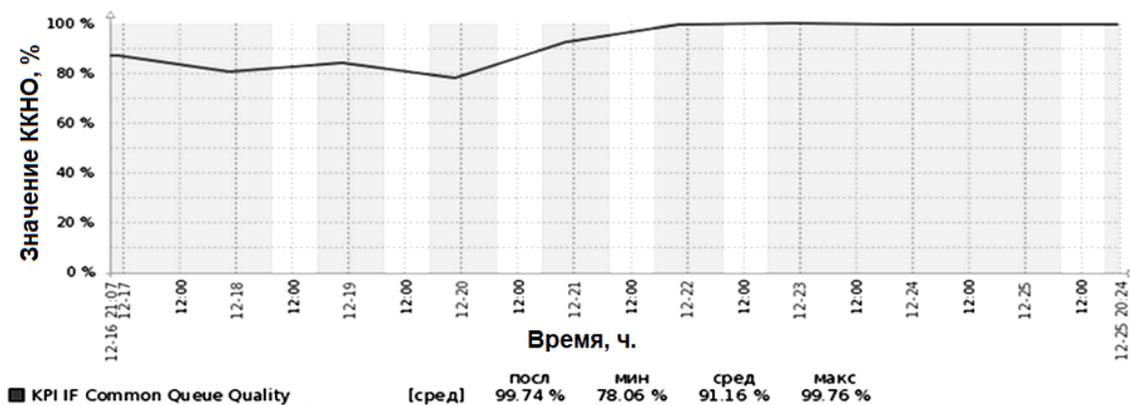


Рисунок 9 - График изменения значений коэффициента качества неприоритетных очередей

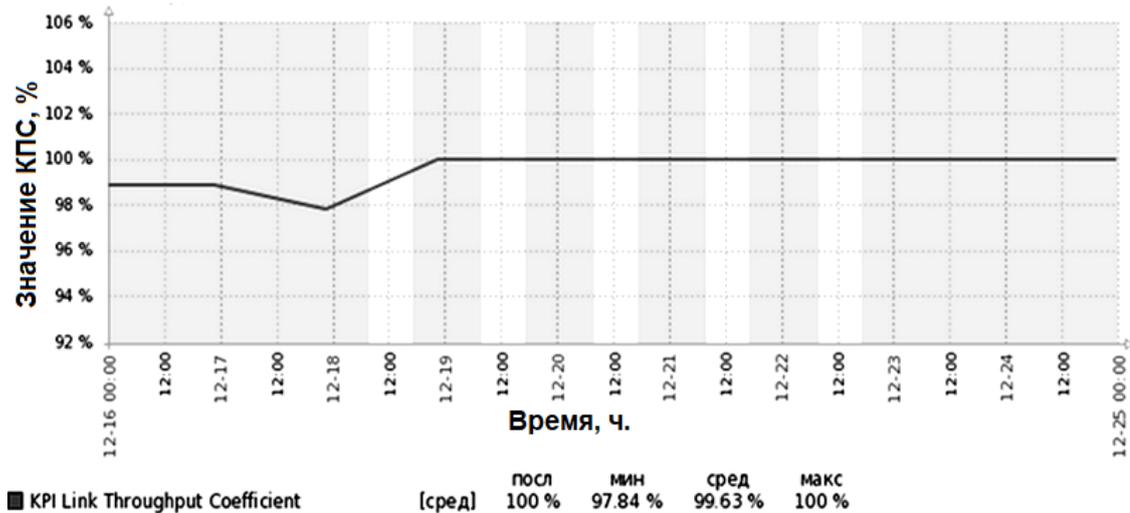


Рисунок 10 - График изменения значений коэффициента пропускной способности

Из анализа графиков на рисунках 9 и 10 видно, что причиной возрастания уровня сброса пакетов данных на рисунке 8 с 15 по 22 декабря (формат даты – месяц.день) выше порогового значения 0,1% исходно было возрастание уровня загрузки сетевого соединения свыше установленного порогового значения. Данный факт свидетельствует о необходимости расширения пропускной способности сетевого соединения. При этом с 19 по 22 декабря при уменьшении уровня загрузки сетевого соединения ниже порогового значения наблюдались значения ККНО ниже 100%, что свидетельствует о необходимости корректировки настроек пакетных буферов для низкоприоритетного трафика. Корректировка размеров пакетных буферов позволила привести значения уровня сброса пакетов в область допустимых значений начиная с 22 декабря и «сгладить всплески» интенсивности пакетного трафика, обеспечив отсутствие превышения значениями уровня загрузки установленного порогового значения.

На рисунке 11 представлен пример графика изменения значений уровня ошибок сетевого соединения.

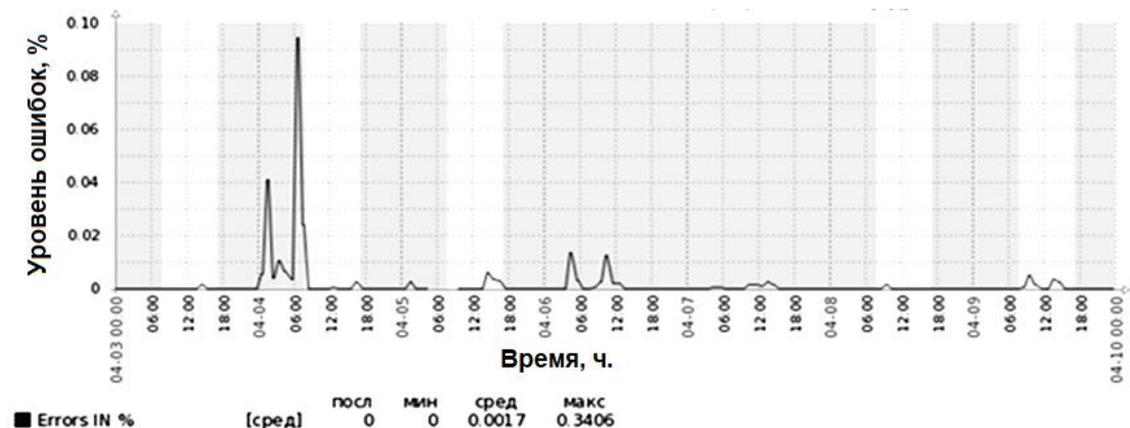


Рисунок 11 - График изменения значений уровня ошибок

На рисунке 12 представлены соответствующие графику на рисунке 11 графики изменений значений ККСС при формировании многопороговой оценки степени пригодности сетевого соединения для передачи трафика реального времени, трафика данных высокого и низкого приоритетов (пороговые значения для уровня ошибок равны 0,0001% для передачи данных реального времени, 0,1% для передачи данных с высоким приоритетом, 1% для передачи данных с низким приоритетом).

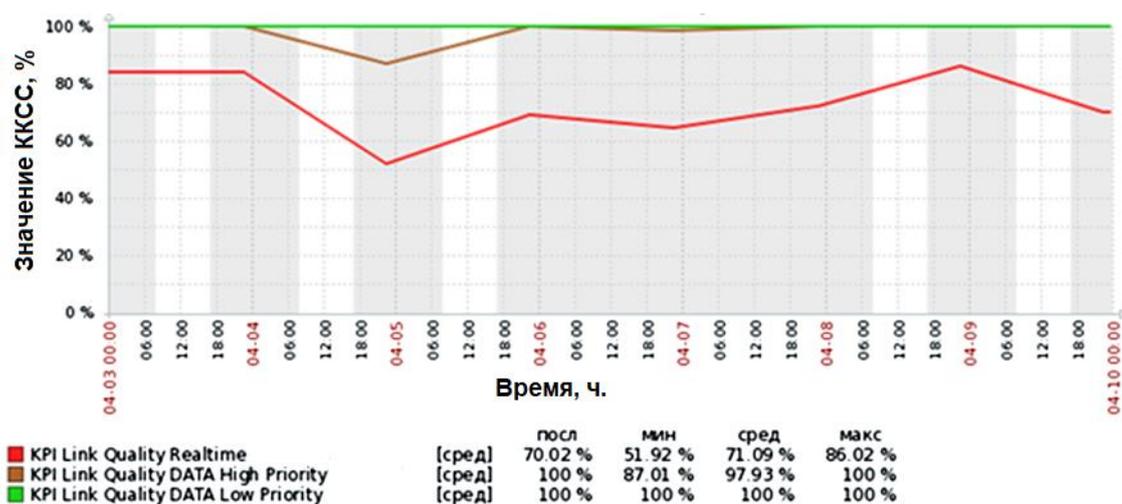


Рисунок 12 - Графики изменения значений коэффициентов качества сетевого соединения для различных классов пакетного трафика во времени

Из анализа графиков ККСС на рисунке 12 видно, что сетевое соединение непригодно для передачи трафика реального времени, но может быть использовано для передачи пакетного трафика данных низкого приоритета и в случае острой необходимости для передачи трафика данных высокого приоритета. Использование данной информации при маршрутизации трафика соответствующего типа и класса позволяет улучшить качество передачи трафика по сети связи.

Поддержание значений интегральных показателей качества равными 100% позволяет примерно в 1,2 раза увеличить объем данных, переданный по сетевому соединению с обеспечением необходимых значений показателей NP.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения диссертационной работы проведены исследования существующих методов контроля качества работы пакетной сети с точки зрения их наиболее полного соответствия задаче контроля качества работы пакетной мультисервисной сети связи с учетом особенностей работы технологий пакетной коммутации. При этом уделялось внимание

возможности получения оценки влияния качества работы сетевых соединений пакетной сети на формирование результатов пользовательской оценки качества услуги связи (QoE), в интересах которой по сетевым соединениям передается пакетный трафик, и возможности контроля выполнения соглашений о качестве предоставляемых услуг связи для конечных пользователей в виде выполнения требований соглашений по качеству обслуживания (SLA). Основные результаты диссертационного исследования состоят в следующем:

1. Исследование работы пакетных сетей связи показало необходимость интегрального контроля качества работы сетевых соединений на интервале времени предоставления услуг или интервале времени, соответствующего периодам использования услуг со стороны конечных пользователей. Существующие нормативные показатели качества формируют значения оценки качества на интервалах времени, которые, как правило, не соответствуют вышеуказанным интервалам времени.

2. Основным показателем качества передачи данных по сетевому соединению в пакетной сети является уровень загрузки физического или логического сетевого соединения и пакетного буфера на оборудовании связи. При этом для уровня загрузки основными параметрами являются величина уровня загрузки и длительность времени превышения значением уровня загрузки установленного порогового значения, которые оказывают влияние на результаты применения функций полисинга и шейпинга к пакетному трафику, оказывающих в свою очередь влияние на значения нормативных показателей качества.

3. Определены показатели качества работы сетей с коммутацией пакетов, используемые в сетях операторов связи и подлежащие замене или модернизации.

4. Сформирована математическая модель и получены расчетные формулы для получения значений интегральных показателей качества с учетом профиля пакетного трафика и пороговых значений нормативных показателей качества для различных услуг связи (классов и типов пакетного трафика). Формирование интегральных показателей качества производится с учетом методов статистической оценки качества и учитывает (обеспечивает преимущество) значения нормативных показателей качества для различных услуг связи.

5. Значения интегральных показателей качества позволяют производить сравнительную оценку качества работы сетевых соединений в сети с коммутацией пакетов и формирование на основании результатов сравнительной оценки организационно-технических мероприятий по изменению конфигураций сетевого оборудования, развитию или модернизации сети связи. Поддержание значений интегральных показателей качества равными 100% позволяет увеличить в среднем в 1,2 раза объем данных, переданный по сетевому соединению с обеспечением необходимых требований к качеству передачи пакетного трафика, по сравнению с использованием традиционных показателей NP.

6. Результаты многопороговой оценки качества работы сетевых соединений в отношении передачи трафика различных классов и типов могут использоваться для маршрутизации пакетного трафика в целях обеспечения наилучшего качества передачи для трафика соответствующего типа и класса.

7. Значения интегральных показателей позволяют оценивать влияние качества работы сетевых соединений в сети с коммутацией пакетов на формирование результатов пользовательской оценки качества услуг связи (QoE) и обеспечивают возможность контроля выполнения соглашений о качестве предоставляемых услуг связи для конечных пользователей (SLA).

8. На основании результатов исследования разработана и введена в эксплуатацию система мониторинга производительности сетевых соединений в сети с коммутацией пакетов в компании МТС с использованием интегральных показателей качества.

9. Результаты исследования использованы при создании измерительного аппаратно-программного комплекса «Вектор-2019», который позволяет измерять параметры работы сетей с коммутацией пакетов, определенные приказами Минкомсвязи РФ. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11.09.2020 № 1506 измерительный комплекс «Вектор-2019» включен в перечень типов средств измерений.

10. Результаты исследования использованы при подготовке приказа Минкомсвязи РФ от 19.12.2019 № 870 «Об утверждении Перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и выполняемых при обеспечении целостности и устойчивости функционирования сети связи общего пользования, и обязательных метрологических требований к ним, в том числе показателей точности измерений».

### **Список публикаций по теме диссертации**

#### **Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:**

1. Бабкин, В. А. Оценка уровня утилизации каналов / В. А. Бабкин // Вестник связи. - 2018. - № 7. - С. 6-8.
2. Бабкин, В. А. Формирование граничных условий для оценки показателей при мониторинге качества сети связи / В. А. Бабкин, Е. П. Строганова // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. - № 8. – С. 36-41.
3. Бабкин, В. А. Граничные условия качественных показателей сети связи / В. А. Бабкин // Вестник связи. – 2018. - № 9. – С. 13-17.
4. Бабкин, В. А. Интегральная оценка уровня утилизации канала связи / В. А. Бабкин // Вестник связи. – 2018. - № 11. - С. 6-11.

5. Бабкин, В. А. Методы оценки качества передачи данных в пакетных сетях связи / В. А. Бабкин, Е. П. Строганова // Т-Comm. - 2019. - № 11. - С. 25-31.
6. Бабкин, В. А. Формирование модели производительности сетевого соединения для сетей с коммутацией пакетов / В. А. Бабкин, В. Т. Еременко, Н. Г. Пеньков // Информационные системы и технологии. – 2020. - № 4. - С. 99-106.

**Статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных:**

7. Babkin, V. A. Effective Criterias for Communication Networks Monitoring / V. A. Babkin, E. P. Stroganova // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO 2018) / Belarusian State Academy of Communications. – Belarus, Minsk, 2018. - DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456949.
8. Babkin, V. A. Principles of Indicators Formation for Quality of Communication Networks Monitoring / V. A. Babkin, E. P. Stroganova // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2018) / State University of Aerospace Instrumentation. – Russia, St. Petersburg, Russia, 2018. - DOI: 10.1109/WECONF.2018.8604371.
9. Babkin, V. A. Evaluation and optimization of virtual private network operation quality / V. A. Babkin, E. P. Stroganova // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO 2019) / P.G. Demidov Yaroslavl State University. - Russia, Yaroslavl, 2019. - DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813962.
10. Babkin, V. A. Integral quality control of service profile of traffic / V. A. Babkin, E. P. Stroganova // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (SOSG 2019) / MTUCI. - Russia, Moscow, 2019. - DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706778.
11. Babkin, V.A. Integral Quality Indicators of Modern Communication Network Functioning / V. A. Babkin, E. P. Stroganova // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO 2020) / Kaliningrad State Technical University. - Russia, Svetlogorsk, 2020. - DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166051.

**Публикации в материалах конференций:**

12. Бабкин, В. А. Интегральная оценка уровня утилизации канала связи / В. А. Бабкин // Труды международной научной конференции «Технические и естественные науки» / ГНИИ «Нацразвитие». – С-Петербург, 2018. - С.175-179.
13. Бабкин, В. А. Интегральный контроль качества сервисного профиля трафика / В. А. Бабкин, Е. П. Строганова // Труды XIII международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» / МТУСИ. - Москва, 2019. – Т.1. - С.103-106.
14. Бабкин, В. А. Пороговые значения показателей качества пакетных сетей / В. А. Бабкин // Труды XIV международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» / МТУСИ. - Москва, 2020. - С.79-81.