

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ

---

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Строганова Елена Петровна

Москва — 2021 г.

## Оглавление:

Введение.....	4
Раздел 1. Обеспечение качества работы сетей с коммутацией пакетов.....	13
1.1. Введение.....	13
1.2. Виды оценок качества в сетях связи .....	15
1.3. Методы получения значений показателей качества в сетях связи .....	22
1.4. Показатели качества работы сетей связи с коммутацией пакетов .....	24
1.5. Обзор научных публикаций по теме проводимого исследования .....	44
1.6. Требования к оценке качества работы сетевого соединения .....	46
1.7. Выводы по разделу 1 .....	48
Раздел 2. Интегральный метод оценки производительности сетевых соединений	50
2.1. Оценка производительности сетевых соединений с использованием нормативных показателей .....	50
2.2. Однопороговая интегральная оценка качества работы сетевого соединения .....	66
2.3. Учет нелинейного характера работы систем передачи пакетного трафика .	72
2.4. Многопороговая интегральная оценка качества работы сетевого соединения .....	76
2.5. Дискретная интегральная оценка качества работы сетевого соединения ....	81
2.6. Оценка качества услуг связи со стороны пользователя.....	82
2.7 Выводы по разделу 2 .....	90
Раздел 3. Интегральные показатели качества .....	92
3.1. Формирование интегральных показателей качества работы сетевых соединений.....	92

3.2. Формирование пороговых значений для расчета интегральных показателей качества .....	101
3.2.1. Формирование пороговых значений для коэффициента пропускной способности .....	102
3.2.2. Формирование пороговых значений для коэффициентов качества приоритетных и неприоритетных очередей и сетевого соединения .....	105
3.3. Выводы по разделу 3 .....	113
Раздел 4. Результаты практических исследований .....	115
4.1. Введение .....	115
4.2. Оценка пропускной способности сетевых соединений .....	116
4.3. Оценка качества работы пакетных очередей .....	139
4.4. Оценка качества работы сетевых соединений .....	152
4.5. Практические примеры решения задач по обеспечению производительности сетевых соединений .....	156
4.5.1. Обеспечение максимальной скорости передачи пользовательского трафика для сотовой сети связи .....	156
4.5.2. Контроль за уровнем потерь пакетов данных при передаче трафика для сотовой сети связи .....	158
4.6. Выводы по разделу 4 .....	164
Заключение .....	166
Список использованной литературы: .....	169
Приложение 1. Акты о внедрении результатов диссертации .....	183

## Введение

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время имеет место конвергенция мультисервисных услуг связи на единой транспортной инфраструктуре сетей связи, построенных по технологии коммутации пакетов [1, 2, 3]. Наиболее распространенными для передачи пакетного трафика на сетевом и канальном уровнях модели взаимодействия открытых систем (OSI) [4] являются протоколы IP [5] и Ethernet [6].

Качество передачи данных при предоставлении услуг связи оказывает влияние на общую оценку качества услуг связи со стороны пользователей (Quality of Experience - QoE) [7] и формируемые за время предоставления услуг связи значения субъективных и расчетных оценок качества услуг связи [8, 9, 10, 11]. Качество предоставления услуг связи на технологическом уровне определяется понятием качества сервиса (Quality of Service - QoS) [7]. Влияние характеристик передачи трафика услуг связи на уровне сети на обеспечение QoS выражается показателями сетевой производительности (Network Performance - NP) [12]. Управление QoS на уровне сети связи осуществляется управлением значениями показателей NP [13]. Перечень показателей NP и области их допустимых значений в зависимости от класса обслуживаемого трафика определены в виде пороговых значений в соответствующих нормативных документах [14, 15, 16, 17] 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 [15, 16, 17], 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 [16,

17]. 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 [18, 19, 20]. 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 имеющихся мест 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 [21, 22] следует иметь в виду, что превышение значениями показателей NP установленных пороговых значений не означает обязательное прекращение предоставления услуг связи [23].

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 [24], Б.С. Гольдштейн и Г.Г. Яновский [25, 26], А.Е. Кучерявый [26, 27, 28], С.Н. Степанов [29], В.И. Битнер [30, 31], В.П. Шувалов [32], В.А. Нетес [33], Г.В. Попков [34], Г.П. Башарин, К.Е. Самуйлов, Ю.В. Гайдамака [35] и др.) и зарубежных (J.D. McCabe [36], В. Claise [37], R. Ackerley [38], R.G. Cole [39] 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) [40, 41] 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 [42]. С другой стороны, существует ряд нормативных документов [14, 15, 16] 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 [42].

**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 [4, 43].

**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 [44].

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.

**Работа соответствует паспорту специальности 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»** в части формулы специальности и пунктов 1, 4, 6 и 12 области исследований.

#### **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 NR.

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 в использование 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 приложения) 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.

# **Раздел 1. Обеспечение качества работы сетей с коммутацией пакетов**

## **1.1. Введение**

Отрасль связи является одной из наиболее динамично развивающихся областей в инфраструктуре современного общества. При этом огромными темпами растет проникновение услуг связи в повседневную жизнь на различных уровнях человеческой деятельности: государственное и муниципальное управление, промышленность и услуги, общественная и личная жизнь. Зачастую скорость той или иной деятельности определяется скоростью обмена данными, необходимыми для достижения требуемого результата. И все эти необходимые данные передаются по сетям связи. В связи с этим качество передачи данных по сети связи выходит на одно из ведущих мест в жизни общества и методы оценки качества работы сетей связи должны обеспечивать максимальное удовлетворение потребностей пользователей при использовании услуг связи путем обеспечения поддержания качества услуг связи на должном уровне.

При предоставлении услуг связи актуальным вопросом является обеспечения качества предоставляемых услуг (в английском варианте - service). Обеспечение надлежащего качества услуг связи (Quality of Service - QoS) является важным вопросом обеспечения конкурентного преимущества для операторов связи.

В общем случае под понятием «Качество» понимается степень соответствия совокупности присущих характеристик объекта требованиям. Под требованием понимается потребность или ожидание, которое установлено, обычно предполагается или является обязательным. Еще одной из оценок качества

является удовлетворенность потребителя услуги - восприятие потребителем степени выполнения его ожиданий [45].

В отрасли связи используются следующие определения качества со стороны МСЭ:

- Суммарный эффект показателей службы, определяющий степень удовлетворенности пользователя обслуживанием [41].

- Совокупность параметров, которые описываются в терминах, понятных как службе, так и пользователю и не зависят от структуры сети. Параметры ориентированы по преимуществу на эффект, воспринимаемый пользователем, должны быть гарантированы пользователю службой и поддаваться объективному измерению в точке доступа к услуге [12].

В отношении обеспечения качества связи нормативными документами Российской Федерации установлены следующие определения [46]:

- Качество услуг связи - степень соответствия присущих услугам связи характеристик требованиям, установленным нормативными документами.

- Качество работы сети электросвязи - совокупность показателей (параметров сети электросвязи), характеризующих качество производства услуг электросвязи на различных участках сети и по сети электросвязи в целом (от абонента до абонента) в соответствии с техническими требованиями к оборудованию и каналам связи, а также уровню технической эксплуатации этих средств.

- Уровень качества услуги связи - относительная характеристика качества услуги связи, основанная на сравнении фактических значений показателей ее качества с нормативными значениями этих показателей.

- Показатель качества услуги связи - количественная характеристика потребительского свойства услуги связи, позволяющая давать оценку выполнения требований к услуге связи и ожиданий потребителя.

Качество обслуживания пользователя при предоставлении услуги связи в общем случае определяется не только показателями работы самой сети, но и зависит от внешних факторов, схематически это представлено на рисунке 1.1.

Часть показателей качества обслуживания характеризует качество работы технических элементов сети связи и при этом присутствуют показатели, которые не относятся непосредственно к работе сети, но характеризуют качество обслуживания пользователя услуги связи со стороны оператора связи [41, 47].

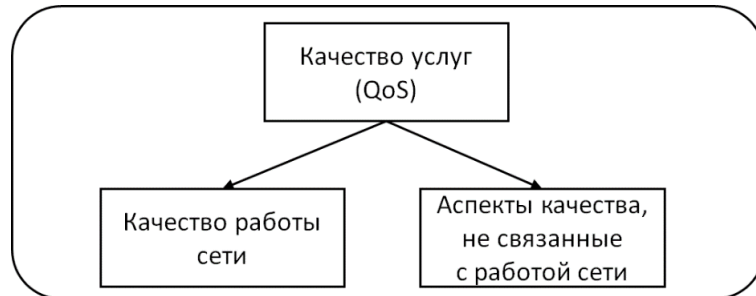


Рисунок 1.1 - Общий состав показателей качества обслуживания

В ходе дальнейшего рассмотрения вопроса обеспечения качества услуг связи производится рассмотрение только технической и технологической составляющих данного вопроса.

В работе рассматриваются вопросы обеспечения качества работы сетей, построенных по технологии коммутации пакетов. Технология коммутации пакетов в настоящее время получила очень широкое распространение при построении различных сетей связи, т.к. является достаточно универсальной конвергентной технологией передачи данных. В связи с этим вопросы обеспечения эффективного использования и обеспечения высокой производительности сетей связи, построенных по технологии коммутации пакетов, являются актуальными народно-хозяйственными задачами.

## 1.2. Виды оценок качества в сетях связи

Вопросы качества услуг связи в общем виде были сформулированы в рекомендации ITU-T E.800 [41], которая претерпела значительные изменения с времени своего первого появления в 1988 году. До появления рекомендации E.800

многие требования по качеству при передаче цифровых данных при предоставлении услуг связи и способы проведения оценки качества услуг существовали в отдельном разобранном виде. В рекомендации установлены важные определения для обеспечения качества обслуживания (QoS) в сети связи. Указано, что QoS на пути передачи трафика между пользователями услуги связи определяется вкладами сетевых компонентов на пути передачи трафика. Схематическое представление компонентов QoS приведено на рисунке 1.2.

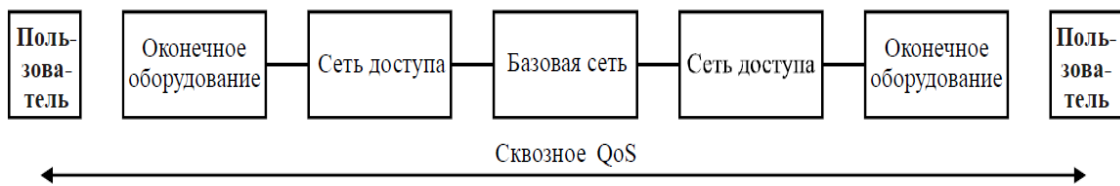


Рисунок 1.2 - Схематическое представление компонентов сквозного QoS

Соответственно, при наличии оценки качественных показателей сетевых компонентов в отдельности, возможно формирование сквозного значения показателя качества из значений показателей качества сетевых компонентов вдоль пути прохождения пользовательского трафика.

В виду большого количества компонентов сети связи, задействованных в обеспечении качества услуги связи на рисунке 1.2, выполнено выделение составляющих QoS, которые зависят непосредственно от качества работы сети связи, качества работы оконечного сетевого оборудования и установленного на нем ПО и отделена субъективная составляющая пользовательской оценки качества услуги связи. Разделение оценок QoS на составляющие со стороны МСЭ в зависимости от уровня модели OSI, на котором происходит обеспечение QoS, представлено на рисунке 1.3 [48].



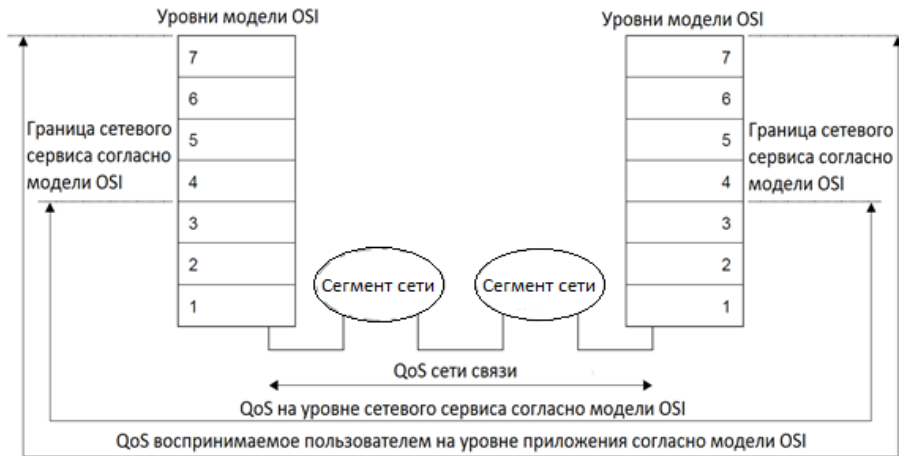


Рисунок 1.3 - Показатели QoS для публичной сети связи

Сетевой сервис сети связи описывается параметрами работы оборудования связи на 1-3 уровнях модели OSI [49]. Для исключения путаницы в понятиях QoS введены уточняющие наименования для оценок качества, представленные на рисунке 1.4, в соответствии с границами их действия [12]:

- Качество функционирования сети (Network Performance - NP) – как способность сети или ее участка/сегмента обеспечить выполнения функций связи, т.е. обеспечение сетевого сервиса на 1-3 уровнях модели OSI [12],
- Качество предоставления услуги/сервиса (Quality of Service - QoS) – характеристика телекоммуникационного сервиса, как степень удовлетворения пользователя услугой связи [7, 41, 50],
- Качество восприятия услуги (Quality Of Experience - QoE) – результат суждения о восприятии общей сущности относительно желаемого восприятия прикладного сервиса с точки зрения конечного пользователя [7, 50, 51, 52].

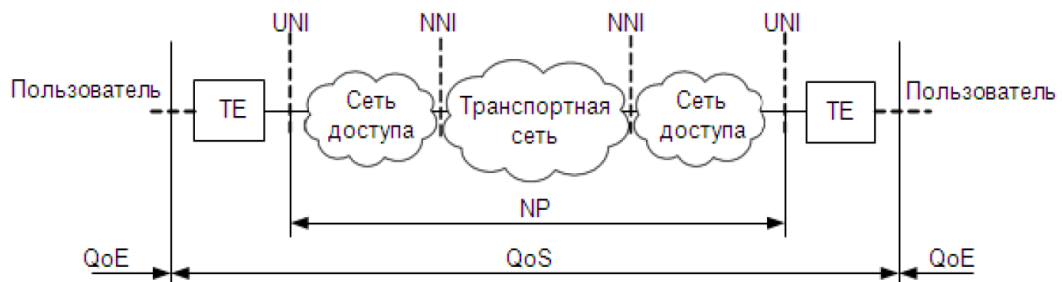


Рисунок 1.4 - Области действия групп показателей качества услуги связи

Перечень отличий NP от QoS представлен в таблице 1.1 [12].

Таблица 1.1 - Перечень отличительных особенностей QoS и NP

<b>Качество обслуживания (QoS)</b>	<b>Характеристики сети (NP)</b>
Ориентировано на пользователя	Ориентированы на оператора сети
Описывается атрибутами услуги	Описываются атрибутами элемента соединения
Ориентировано на эффект, воспринимаемый пользователем	Ориентированы на разработку, проектирование, эксплуатацию и техническое обслуживание
Измеряется между точками (в точках) доступа к услуге	Описывают возможности элементов соединения или сквозных соединений

Формирование значений оценки качества работы сетевых соединений для показателей QoS и NP производится на фиксированных интервалах времени от нескольких секунд до нескольких суток в зависимости от поставленной задачи [15, 16, 17, 19, 53, 54, 55]. Наиболее распространенными интервалами времени для формирования значений показателей QoS и NP являются интервалы времени длительностью 1 час и 5 минут.

Формирование значений оценки качества работы сети связи по предоставлению услуг связи на основании значений оценки QoE производится на интервале времени использования услуги связи со стороны пользователей, который никак не ограничен и может состоять из длительности нескольких сеансов предоставления услуг связи. Значение оценки QoE представляет из себя интегральное значение оценки качества за период времени пользования услугой связи [56]. Наиболее распространенным интервалом времени формирования пользовательской оценки качества является суточный интервал времени, как период цикличности использования услуг связи [19, 53]. Для приведения субъективной пользовательской оценки к некоторым единым результатам оценки разработаны различные математические модели формирования пользовательской

оценки [10]. Данные методы, несмотря на всю их математическую основу, формируют некоторую усредненную пользовательскую оценку качества услуги связи, не позволяют сформировать оценку QoE в отношении конкретного пользователя и не учитывают атрибуты оценки со стороны человека, показанные на рисунке 1.5. Различие в результатах значений оценки QoE с использованием различных математических методов показано на рисунке 1.6.

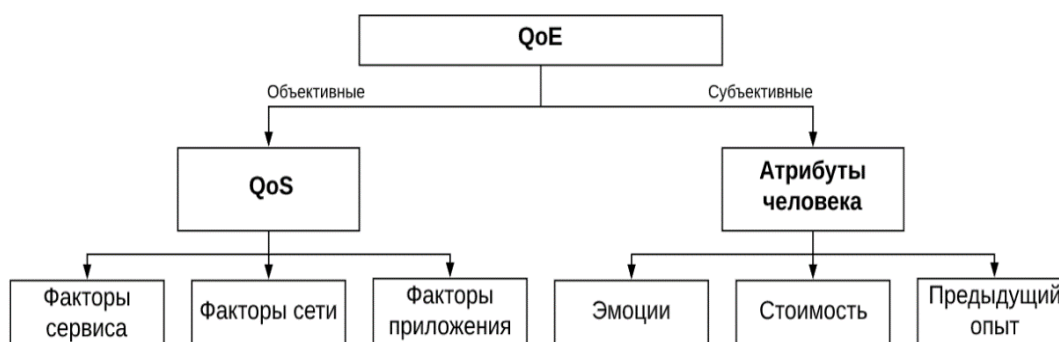


Рисунок 1.5 - Составляющие оценки QoE

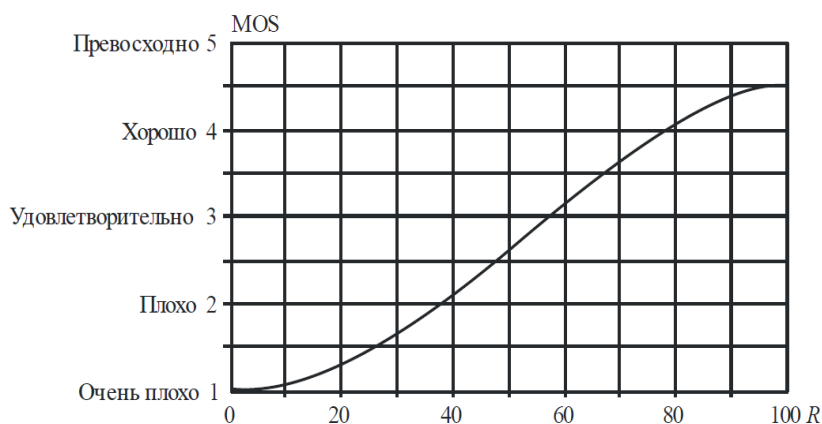


Рисунок 1.6 - Соответствие оценок QoE по значениям MOS и R-фактор

По своей функциональности значение показателя QoE является компромиссной функцией между обеспечением качества услуги связи и затратами на это обеспечение [56]. Взаимосвязь значений QoS и QoE с экономическими показателями работы сети связи подтверждает важность вопроса обеспечения QoS для услуг связи на сети оператора. В современных сетях связи оценка

качества услуг связи производится с использованием сквозной оценки качества, представленной на рисунке 1.7 [57].

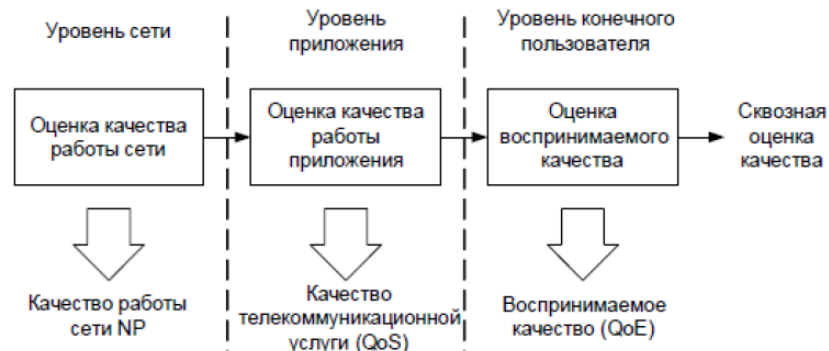


Рисунок 1.7 - Оценка сквозного качества услуги связи

Сквозная оценка качества услуг связи требует необходимости проведения оценки качества работы сети в совокупности для всех систем, задействованных в предоставлении услуг связи в соответствии с моделью 4-х рынков, представленной на рисунке 1.8 [42]. Модель четырех рынков предназначена для выявления компонентов, влияющих на качество услуги связи.

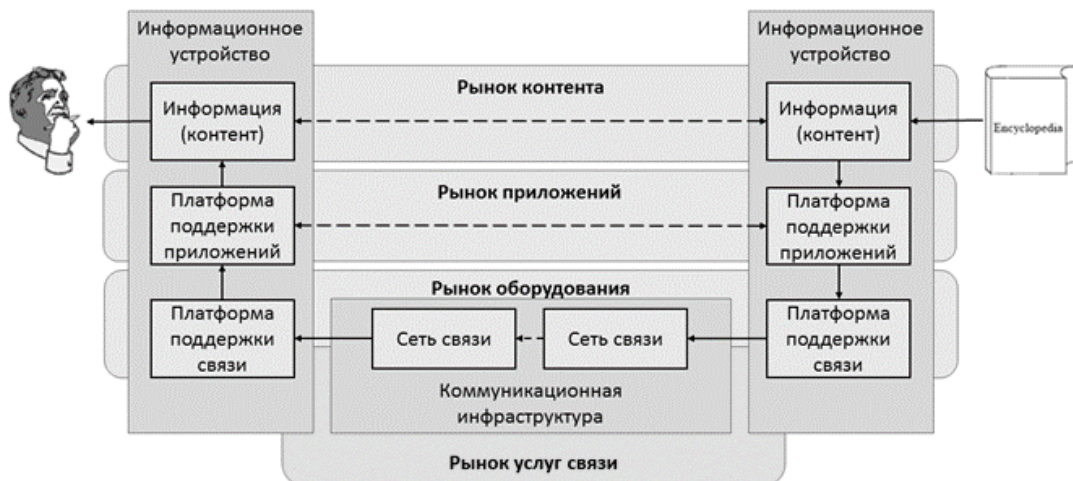


Рисунок 1.8 - Модель четырех рынков

Распределение показателей NP, QoS и QoE по уровням оценки качества услуг связи показано на рисунке 1.9.

Оценка качества предоставления услуг связи на уровнях модели OSI выше сетевого уровня описывается соответствующими нормативными документами [58]. При этом для оценки качества отдельных услуг связи с учетом особенностей их предоставления присутствуют отдельные нормативные документы [59, 60, 61, 62, 63].



Рисунок 1.9 - Распределение показателей качества услуг связи по технологическим системам

В конечном итоге работа современных сетей, пользовательского оборудования и сервисных систем при предоставлении услуг связи может быть представлена в виде, показанном на рисунке 1.10 [64].

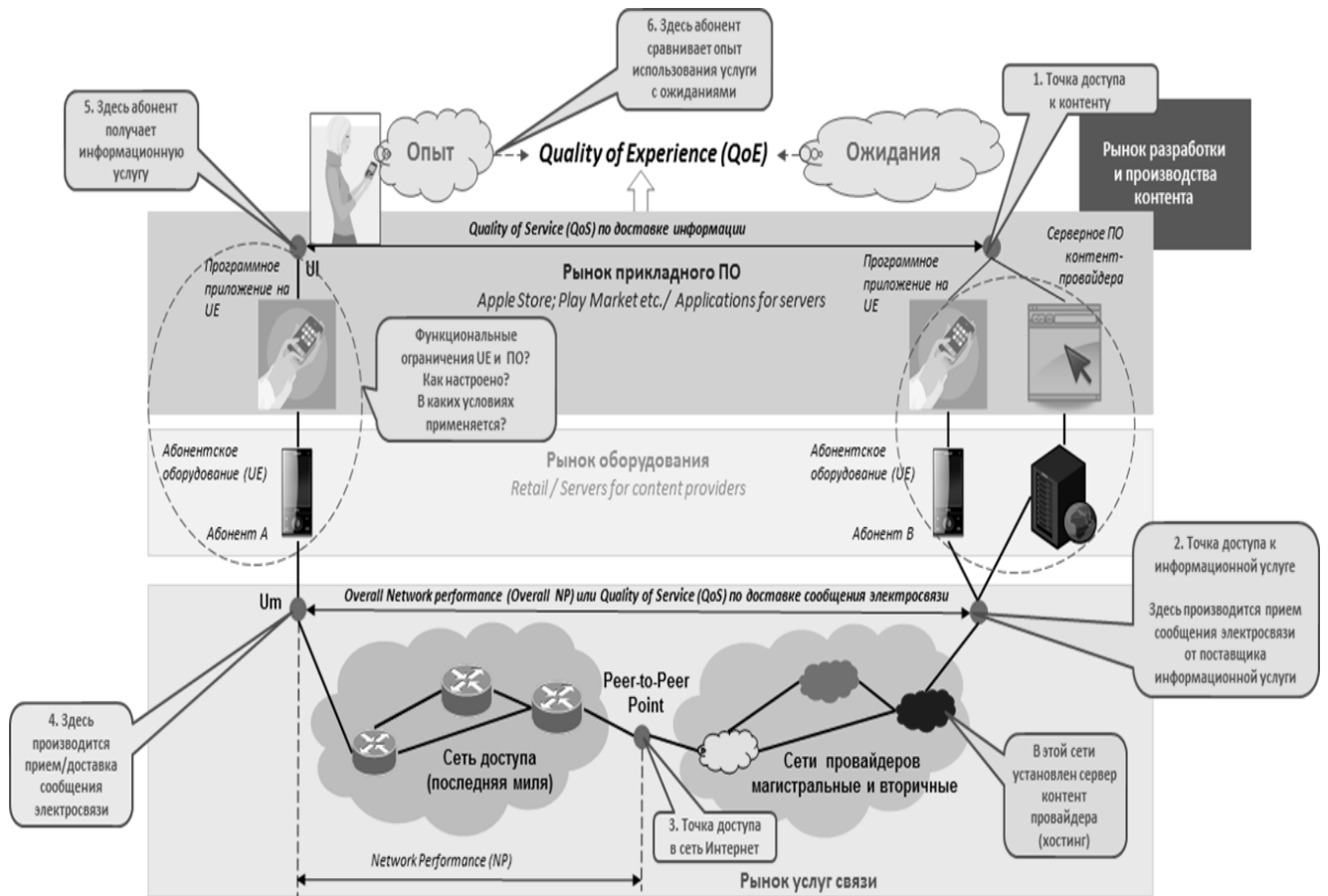


Рисунок 1.10 - Иллюстрация работы сети и пользовательского оборудования при предоставлении услуг связи

### 1.3. Методы получения значений показателей качества в сетях связи

При проведении измерений в сетях связи [17, 42] выделяют интрузивные и неинтрузивные методы проведения измерений [65].

Интрузивные измерения проводятся на сгенерированном для тестирования конкретном трафике и при этом может осуществляться проверка практически всех качественных показателей работы сети связи [66, 67, 68]. Недостатком интрузивных измерений является добавление в канал связи тестового трафика, что влечет за собой увеличение нагрузки на оборудование связи, через которое проходит тестовый трафик. В некоторых случаях

интрузивные измерения требуют использования специального оборудования и программного обеспечения при проведении измерений. Еще одним недостатком интрузивных методов является сложность их использования в сети с высокой интенсивностью изменений в маршрутизации трафика, особенно на высокоскоростных интерфейсах (со скоростями 10 Гбит/с. и более). В таких сетях на интервалах времени между посылкой тестовых пакетов может происходить изменение маршрутов передачи трафика. В результате маршруты тестовых пакетов и пакетов пользовательского трафика могут достаточно сильно различаться. Это может быть причиной недостоверности значений показателей качества по отношению к реальному пользовательскому пакетному трафику [69]. При проведении интрузивных измерений следует использовать рекомендации по проведению измерений на соответствующих уровнях модели OSI [70].

Для неинтрузивных измерений используется текущий сетевой трафик, что не вносит искажений в профиль сетевой нагрузки, однако может не позволить произвести измерение всех необходимых показателей качества. Для проведения неинтрузивных измерений наиболее часто используются специальные счетчики, встроенные в оборудование связи, данные с которых наиболее часто получают с использованием протокола SNMP [71]. Использование счетчиков, опрашиваемых по протоколу SNMP, позволяет выполнять мониторинг работы оборудования связи на 1-3 уровнях модели OSI. К недостаткам использования протокола SNMP можно отнести тот факт, что рост количества SNMP-запросов на оборудование связи с ростом количества тестов различного типа может привести к лишней дополнительной нагрузке на центральный процессор сетевого оборудования и, в худшем случае, к блокировке «перегружающих» SNMP-запросов [72, 73].

В условиях текущей эксплуатации сети связи наиболее актуально использование неинтрузивных измерений, т.к. в результате такого подхода получаем следующие преимущества:

- производится оценка реального состояния сети связи с использованием реального трафика услуг связи, что повышает достоверность проводимых измерений,

- не вносятся искажения в существующий профиль трафика и не нарушается качество предоставления услуг связи,

- измерения менее затратны в виду отсутствия необходимости использования дополнительного измерительного оборудования.

Использование интрузивных методов измерения качественных показателей оправдано в случаях, когда:

- необходим контроль значений показателей качества, которые требуют проведения временных измерений,

- необходимо контролировать качество работы сети связи, которая административно находится под управлением другой организации и, соответственно, нет возможности получить значение SNMP-счетчиков с оборудования сети.

В виду генерации пакетного трафика, аналогичного трафику предоставляемых услуг связи, внутри тех же сетевых соединений, где непосредственно передается трафик услуг связи, интрузивные методы рекомендуется использовать для периодического [74] или временного контроля значений показателей качества. При использовании интрузивных методов измерения рекомендуется производить контроль стабильности маршрутной информации для используемых в сети протоколов маршрутизации.

#### **1.4. Показатели качества работы сетей связи с коммутацией пакетов**

Качество обслуживания пользователя со стороны сетевой инфраструктуры характеризуется способностью сети быстро, без ошибок и без потерь передать данные между необходимыми для пользователя системами, подключенными к сети связи.

Показатели качества работы сети связи должны отражать возможности сети по качественному обслуживанию пользователя с учетом особенностей работы



сети в плане используемых технологий передачи данных. В тоже время показатели качества должны быть универсальными в плане оценки качества работы сети независимо от типа используемого оборудования и сетевой топологии. В настоящее время в сетях связи широкое распространение имеют две основные технологии передачи данных: коммутация каналов и коммутация пакетов. В таблице 1.2 представлен сравнительный анализ работы сетей связи, построенных с использованием обеих технологий.

Таблица 1.2 - Сравнительный анализ сетей с коммутацией каналов и пакетов

<b>Сетевая функция</b>	<b>Сети с коммутацией каналов</b>	<b>Сети с коммутацией пакетов</b>
Установление соединения	Необходимо предварительно устанавливать соединение	Отсутствует этап установления соединения (дейтаграммный способ)
Порядок выделения ресурсов	Ресурсы предоставляются в соответствие с порядком поступления запроса	Ресурсы предоставляются одновременно по всем запросам при условии, что требуемая для них суммарная полоса пропускания не превосходит возможности канала связи
Передача адреса получателя	Адрес требуется только на этапе установления соединения	Адрес и другая служебная информация передаются с каждым пакетом
Доступность сетевого обслуживания для пользователя	Сеть может отказать пользователю в установлении соединения	Сеть всегда готова принять данные от пользователя
Гарантия пропускной способности	Гарантированная пропускная способность	В общем случае пропускная способность сети для абонентов заранее неизвестна, возможно гарантированное выделение полосы пропускания

Продолжение таблицы 1.2

Сетевая функция	Сети с коммутацией каналов	Сети с коммутацией пакетов
Процедура выделения полосы пропускания для трафика пользователя	Статическая	Динамическая (в общем случае), с возможностью статического выделения
Маршрут передачи пакетного трафика	Данные передаются согласно маршрута прокладки канала внутри сети связи	Решение о дальнейшем маршруте передачи пакета данных принимается отдельно для каждой точки коммутации трафика на пути от отправителя к получателю, в рамках передачи одного информационного сообщения, состоящего из нескольких пакетов данных, каждый пакет может быть передан различным путем
Задержка в передаче трафика в канале связи	Задержка определяется временем прохождения электромагнитного сигнала по каналу связи	Величина задержки зависит от задержки в пакетных очередях/буферах на узлах сети и носит случайный характер
Потери трафика на узлах сети	Практически отсутствуют	Возможны потери данных из-за переполнения пакетных очередей/буферов
Эффективность использования канала связи	Низкая (в общем случае)	Высокая

Продолжение таблицы 1.2

<b>Сетевая функция</b>	<b>Сети с коммутацией каналов</b>	<b>Сети с коммутацией пакетов</b>
Наилучший тип трафика	С фиксированной скоростью, при передаче пульсирующего трафика значительная часть зарезервированной пропускной способности каналов не используется	Пульсирующий, возможно выделение полосы под трафик с фиксированной скоростью
Приоритезация трафика	Отсутствует	Путем установления признака приоритета и организации различных буферов/очереди для трафика с различным значением признака приоритета
Завершение соединения	Происходит «разбор» соединения с высвобождением ресурсов сети	Не требуется
Обеспечение соединения другому набору пользователей услуг связи	Передача высвобожденных сетевых ресурсов для организации соединения в интересах других пользователей услуг связи	Возможно установление соединения в «параллельном» режиме при наличии сетевых ресурсов, удовлетворяющих требованиям запроса пользователя или динамическое перераспределение сетевых ресурсов при отсутствии жестких требований к сетевым ресурсам со стороны уже установленных соединений

Из анализа информации, представленной в таблице 1.2, можно сделать следующие выводы [75]:

- Сети, построенные по технологии коммутации пакетов, обладают большей эффективностью при их использовании, чем сети, построенные по технологии коммутации каналов, т.к. обладают большей живучестью, возможностями по

предотвращению перегрузок и дифференцированного обслуживания пользовательского трафика в соответствии с его приоритетом.

- Сети, построенные по технологии коммутации пакетов, при необходимости могут эмулировать работу сетей с коммутацией каналов.

- Для сетей, построенные по технологии коммутации пакетов, требуются показатели качества, которые описывают только процесс передачи трафика. Для сетей, построенных по технологии коммутации каналов, дополнительно требуются показатели, описывающие процесс установления соединений и разбора соединения после передачи данных. При этом для сетей, построенные по технологии коммутации пакетов, при описании процесса передачи данных требуются показатели, отражающие качество работы пакетных очередей/буферов и влияние возможности изменения маршрута передачи пакетов данных от отправителя к получателю.

Для оценки QoS и NP определены следующие базовые параметры, которые определяют возможность доступа одного сетевого устройства к другому для целей передачи или получения данных [12]:

- скорость доступа (передачи данных/информации),
- точность обеспечения доступа,
- надежность доступа (вероятность отказа в доступе),
- скорость передачи данных,
- точность передачи данных/информации (безошибочность при передаче данных/информации),
- надежность передачи данных/информации (потери при передаче данных/информации),
- скорость разъединения (между устройствами отправителя и получателя данных/информации),
- точность разъединения,
- надежность разъединения.

Из указанных 9 параметров формируется матрица, представленная на рисунке 1.11, которая используется для оценки QoS и NP сетевого соединения.



Рисунок 1.11 - Матрица для оценки QoS и NP сетевого соединения

Как было сказано ранее, для сетей с коммутацией пакетов рассматриваются параметры, описывающие только процесс передачи данных и с использованием таких параметров формируются показатели сетевой производительности.

С учетом того, что в нормативных документах и литературе отрасли связи достаточно часто чередуется использование терминов «данные» и «информация», необходимо сделать уточнение, что под информацией понимается результат преобразования данных, содержащий для получателя данных значимые сведения и в общем случае по сети связи передаются данные, которые становятся информацией по результатам обработки данных на стороне получателя. В дальнейшем в работе будем считать употребление терминов «информация» и «данные» эквивалентными.

Для сетей с коммутацией пакетов активное сетевое оборудование разделяется на 2 основные категории с учетом выполнения ими функций по передаче пакетных данных согласно модели OSI: коммутаторы и маршрутизаторы [76]. Коммутаторы и маршрутизаторы работают на 2 и 3 уровнях модели OSI соответственно с использованием для передачи данных соответствующих уровням модели OSI протоколов передачи данных. Процесс передачи данных между отправителем и получателем данных с использованием в качестве

оборудования в сети связи коммутаторов и маршрутизаторов представлен на рисунке 1.12 [77].

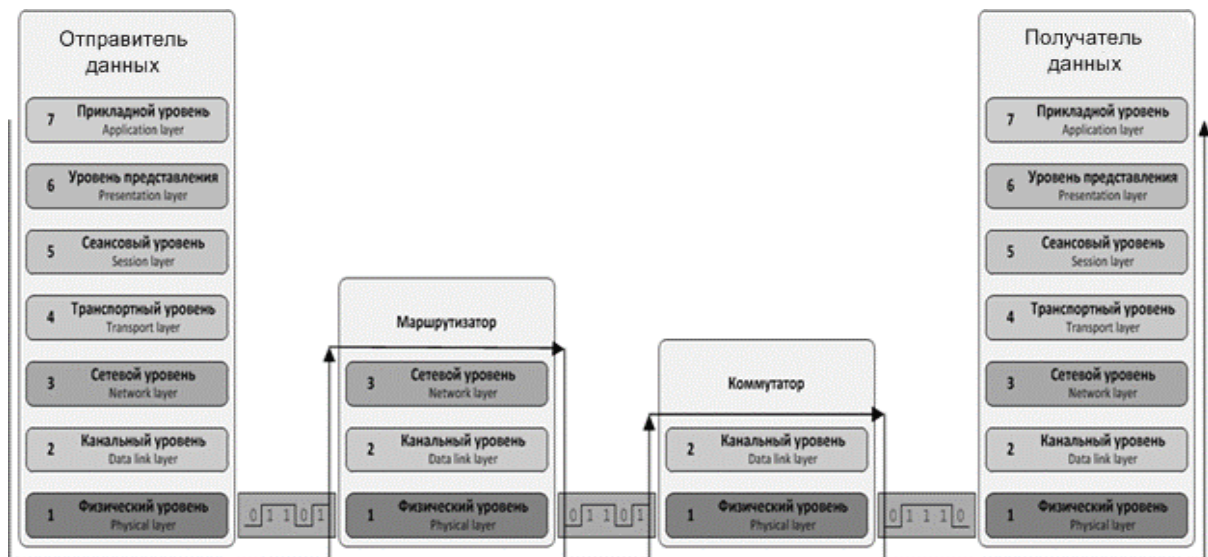


Рисунок 1.12 - Обработка пакетного трафика по уровням модели OSI на маршрутизаторах и коммутаторах

С учетом того, что показатели NP относятся к элементу сетевого соединения (являются его атрибутами) оценка NP должна производиться на уровне работы сетевого элемента в сети передачи данных. В виду того, что основными сетевыми элементами являются коммутаторы и маршрутизаторы, то оценка качества передачи пакетов данных в сети с коммутацией пакетов должна проводиться для маршрутизаторов на сетевом уровне и для коммутаторов на канальном уровне. Также необходимо учесть, что широко распространенная в современных сетях с коммутацией пакетов технология MPLS занимает в иерархии модели OSI промежуточное положение между 2 и 3 уровнями и относится к уровню 2,5 в модели OSI [78]. В связи с этим к набору показателей NP предъявляется требование обладать возможностью применения на уровнях модели OSI, обеспечивающих передачу пакетов данных между отправителем и получателем.

Проблемой при формировании оценки сетевой производительности для сетей с коммутацией пакетов является использование технологий

туннелирования, которые «отрывают» сетевой уровень с точки зрения пользователя услуги связи от сетевого уровня с точки зрения оператора. В современных сетях с коммутацией пакетов достаточно широко присутствуют технологии для туннелирования пакетов пользовательских данных внутри пакетов данных, передаваемых непосредственно в сети операторов связи. В частности, технология туннелирования пользовательских пакетов данных используется при обеспечении взаимодействия между дата-центрами и в сотовых сетях связи. На рисунках 1.13 и 1.14 представлено туннелирование пользовательских данных при обеспечении обмена данными между дата-центрами с использованием технологии VxLAN [79] и туннелирование при передаче пользовательского трафика в сети оператора сотовой связи с использованием GTP-туннеля [80, 81]. Основной особенностью вышеуказанных технологий туннелирования является использование заголовков транспортного уровня модели OSI для разделения сетевых заголовков пользовательского пакета данных и сетевого заголовка, используемого в сети оператора связи.

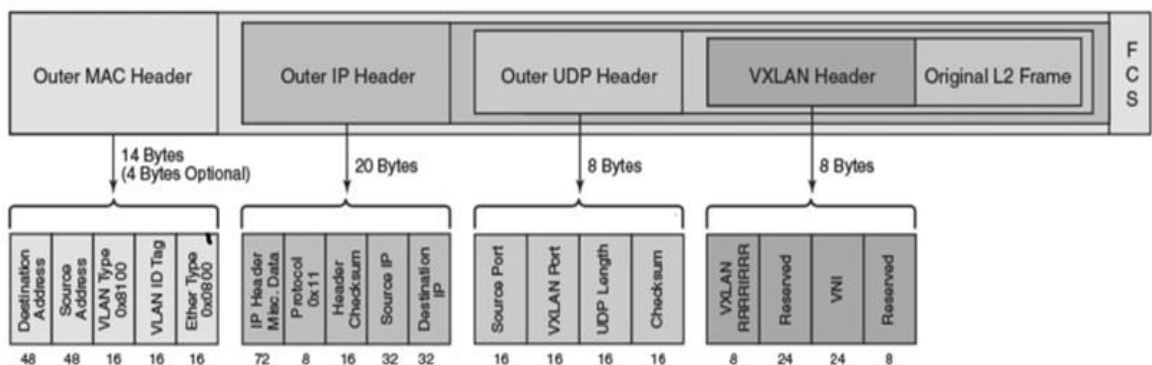


Рисунок 1.13 - Формат сетевого кадра при туннелировании кадров дата-центров через внешние IP-сети с использованием технологии VxLAN

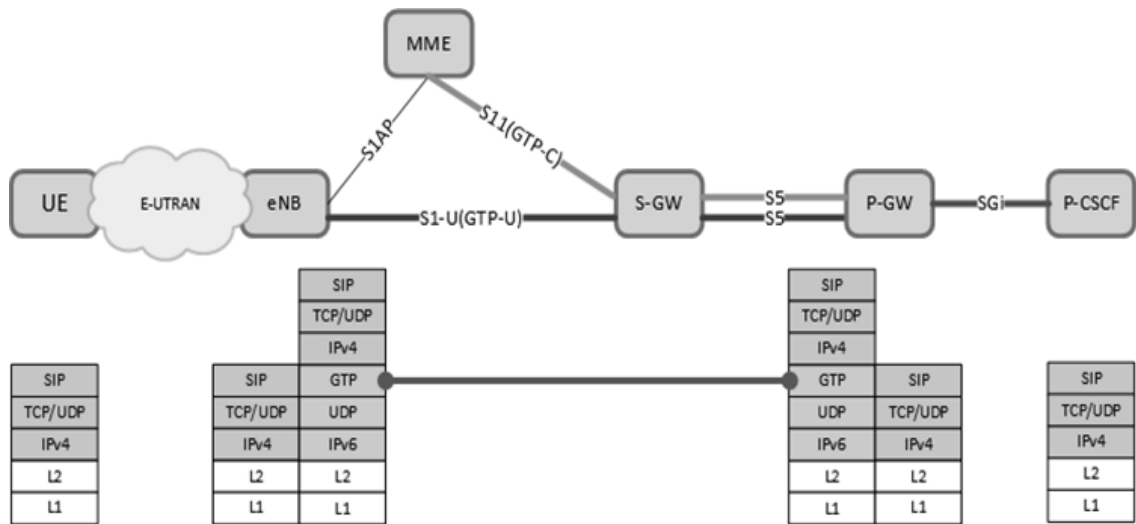


Рисунок 1.14 - Туннелирование пользовательских пакетов данных через сеть сотового оператора

С учетом представленной ранее на рисунке 1.3 границей сетевого сервиса и представленных на рисунке 1.15 моделях ISO/OSI, TCP/IP и NGN (модель сетей связи следующих поколений) [1, 3] граница между сетевым и транспортным уровнем разделяет уровни модели OSI на 2 основных уровня: уровень услуг и транспортный уровень [82]. Уровень услуг относится к работе пользовательского устройства или сервисного устройства, для которых предоставляет транспортный сервис для передачи данных. Использование технологий туннелирования, аналогичных вышеуказанным, позволяет производить оценку качества передачи трафика на сетевом уровне только между конечными точками туннеля без возможности формирования сквозной оценки QoS между пользовательскими устройствами, как показано на рисунке 1.2. Таким образом, в сетях с коммутацией пакетов оценка сетевой производительности производится только для транспортного уровня модели NGN и сети с коммутацией пакетов в общем случае именуется транспортными сетями.



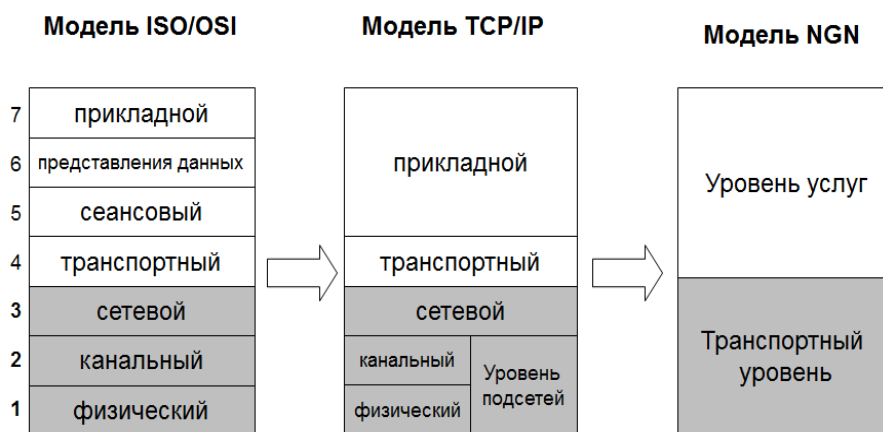


Рисунок 1.15 - Сравнительный анализ моделей ISO/OSI, TCP/IP и NGN

В настоящее время наиболее распространенными протоколами для обеспечения передачи пакетов данных в сетях с коммутацией пакетов стали протоколы IP (на сетевом уровне) и Ethernet (на канальном уровне). При этом в иерархии модели OSI протокол IP занимает ключевое положение в плане обеспечения обмена данными между отправителем и получателем, т.к. передача пакетов данных происходит на основании адресной информации, содержащейся в IP-заголовке. Передача пакетов данных на основании адресной информации канального уровня осуществляется только в рамках широковещательных доменов и относится к технологии локальных сетей, которые являются частным случаем при построении сегментов глобальных сетей связи. Иллюстрация ключевого положения протокола IP и его связующей роли представлена на рисунке 1.16 в виде так называемой «модели песочных часов» (HourGlass-model) [83].

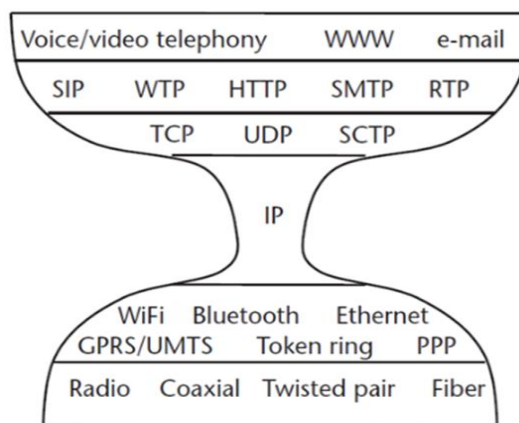


Рисунок 1.16 - Иерархия протоколов сети с коммутацией пакетов

Исходя из ключевого положения протокола IP со стороны МСЭ разработаны показатели QoS и NP для сетей передачи данных, построенных с использованием IP-протокола [15]. Показатели NP условно делятся на 2 категории: качественные и количественные (объемные). К качественным показателям NP для контроля качества передачи данных между отправителем и получателем относятся:

- Величина времени задержки при передаче пакета IP (IP-packet Transfer Delay - IPTD),
- Вариация величины времени задержки (джиттер) передачи пакетов IP (IP-packet Delay Variation - IPDV),
- Уровень ошибок (доля переданных с ошибкой) пакетов IP (IP-packet Error Ratio - IPER),
- Уровень потерь (доля потерянных) пакетов IP (IP-packet Loss Ratio - IPLR),
- Уровень нарушения порядка (доля с нарушением порядка следования) пакетов IP (IP-packet Reordering Ratio - IPRR),
- Уровень дублирования пакетов IP (IP-packet Duplicate Ratio – IPDupR).

С учетом особенностей работы сетевых устройств сети с коммутацией пакетов для оценки производительности пакетных очередей/буферов используется специальный показатель NP [17]:

- Уровень сброса (доля сброшенных/отказанных в обработке) на сетевом устройстве/эlemente пакетов IP (IP-packet Discard Ratio - IPDR).

В качестве количественных (объемных) показателей NP при передаче данных между двумя соседними сетевыми устройствами, обеспечивающими передачу данных на сетевом уровне модели OSI, рассматриваются [15]:

- Емкость IP-секции (IP-layer Section Capacity), как наибольшее количество бит, которое может быть передано на сетевом уровне за определенный интервал времени, достаточно часто именуется как полоса пропускания сетевого соединения на сетевом уровне,
- Используемая емкость IP-секции (IP-layer Used Section Capacity), как количество бит, которое передано на сетевом уровне за определенный интервал

времени, достаточно часто именуется как интенсивность пакетного трафика на определенном интервале времени,

- Уровень загрузки IP-секции (IP-layer Section Utilization), как относительная величина, равная отношению используемой емкости IP-секции к емкости IP-секции,

- Пакетная скорость при передаче IP-пакетов (IP Packet Rate - IPPR),

- Байтовая скорость при передаче IP-пакетов (Octet-based IP packet Rate - IPOR).

Следует иметь в виду, что количественные (объемные) показатели NP разделены по зонам ответственности между оператором и пользователем услуг связи. Оператор связи должен гарантировать полосу пропускания сетевого соединения (емкость IP-секции). Пользователь услуги связи при передаче или получении пакетного трафика не должен допускать, чтобы интенсивность пакетного трафика (используемая емкость IP-секции) превосходила полосу пропускания сетевого соединения. Объем трафика, превышающий емкость секции, может быть сброшен или задержан (включая изменение поля приоритетов обработки пакетов данных) со стороны сети оператора связи без отнесения данных потерь на оценку качества работы сетевого соединения [54].

В связи с отсутствием процедур установления и разбора соединения в сетях с коммутацией пакетов доступность сетевого сервиса (Percent IP-service Availability - PIA) трактуется как передача пакетов данных на сетевом уровне с уровнем потерь (IPLR), не превышающим установленного порогового значения. При этом уровень доступности IP-сервиса (Percent IP service availability - PIA) трактуется как процент общего времени предоставления IP-сервиса, в течение которого значение IPLR не превышало установленного порогового значения [15].

С учетом вышеизложенного, при оценке доступности по значению уровня потерь необходимо использовать граничное условие по значению уровня загрузки, т.е. не учитывать при оценке производительности сетевого соединения значения уровня потерь при значении уровня загрузки равном 100%. Аналогичный подход к определению показателей NP в отношении услуги/сервиса

передачи данных присутствует в российских нормативных документах и при этом определены следующие показатели качества [14, 84].

В некоторых случаях достаточно сложно определить объемные показатели трафика при предоставлении услуг связи. Такие случаи относятся к предоставлению мультимедийных услуг связи, которые образованы путем комбинации некоторого набора базовых услуг связи. Под базовыми услугами связи понимаются такие услуги, которые традиционно существовали в виде отдельных услуг связи, выраженных одним классом трафика, и были объединены в рамках одной мультимедийной услуги в виду развития инфокоммуникационных технологий. В качестве примера базовых услуг могут выступать услуги передачи голоса, видео и данных. Пример образования новых мультимедийных услуг связи с использованием базовых услуг представлен на рисунке 1.17. Для мультимедийных услуг связи объемные показатели трафика могут изменяться в пределах от наименьшего объема одной из базовых услуг до максимального суммарного объема всех составляющих мультимедийной услуги связи.

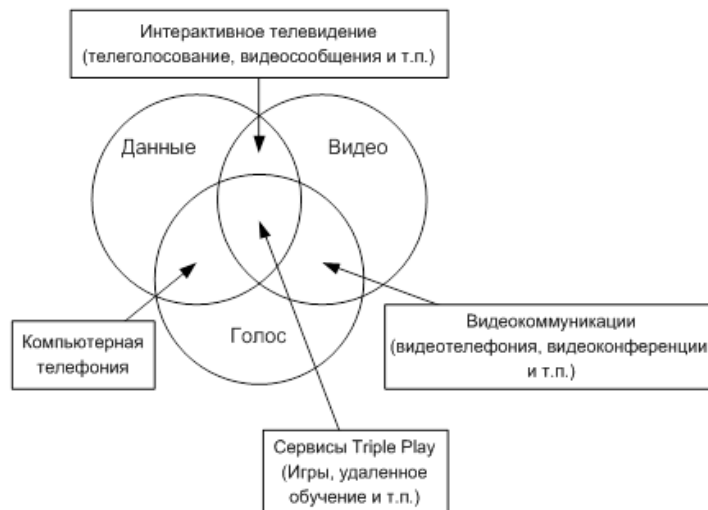


Рисунок 1.17 - Образование новых мультимедийных услуг на основе базовых услуг связи

Каждая из базовых услуг связи в зависимости от необходимости передачи трафика того или иного типа в конкретный момент времени предъявляет в этот

момент времени соответствующие требования по качеству обслуживания к сети связи, которые могут быть описаны в виде набора пороговых значений для показателей NP. Поскольку момент предъявления того или иного требования имеет случайный характер, то показатели NP для обеспечения работы соответствующей мультимедийной услуги должны контролироваться на соответствие наиболее «жестким» требованиям в соответствии с классом трафика, который передается или принимается пользовательским устройством в сети связи. Основными показателями NP при передаче мультимедийного трафика между отправителем и получателем являются показатели сквозного QoS [23].

Показатели NP для сетевого уровня могут быть применены для оценки производительности сетевых соединений на уровнях модели OSI ниже сетевого уровня, т.к. протоколы от уровня 1 до уровня 3 модели OSI могут также считаться частью сети IP [15] и сетевые сегменты равнозначны доменам операторов и могут включать сетевые архитектуры доступа с использованием протокола IP [85, 86]. При этом для значений показателей NP на уровнях модели OSI ниже сетевого уровня могут быть установлены свои пороговые значения с учетом особенностей функционирования соответствующих протоколов передачи данных. Существуют нормативные документы по вопросам оценки производительности сетевых соединений, построенных с использованием протокола Ethernet [87, 88, 89] и технологии MPLS [90]. В виду того, что при передаче пакетного трафика между отправителем и получателем могут быть использованы сетевые сегменты, построенные с использованием различных технологий и протоколов передачи данных и принадлежащие различным операторам связи, существуют отдельные нормативные документы, определяющие порядок взаимодействия между собой таких сетевых сегментов [91, 92, 93, 94] и обеспечения межоператорского взаимодействия [54, 95, 96]. Значения показателей NP рассчитываются по значениям соответствующих счетчиков на оборудовании связи или тестовом оборудовании за некоторый заранее predetermined интервал времени. Длительность интервалов времени может иметь различную величину [16, 19, 53, 54, 55]. От сетей с коммутацией каналов исторически унаследовано

использование метода оценки значений показателей NP в час наибольшей нагрузки (ЧНН) на суточном интервале времени [18, 20]. К сетям с коммутацией пакетов метод оценки NP по значениям показателей NP в ЧНН неприменим по следующим причинам:

- Оценка сетевой производительности производится по 1 часу из 24, ситуация в остальные 23 часа неизвестна. В связи с этим сетевые соединения с разными изменениями величин показателей NP в течение суток могут быть оценены одинаковым образом. Пример такой оценки по уровню загрузки в ЧНН представлен на рисунке 1.18.

- Отсутствует правило использования понятия ЧНН при наличии нескольких часовых интервалов времени с одинаковыми значениями уровня загрузки сетевого соединения в течение суток, особенно, если одинаковые значения уровня загрузки формируются в различные интервалы времени трафиком различных услуг связи.

- В сетях с коммутацией пакетов присутствуют очень короткие сеансы связи, сопоставимые с длительностью передачи одного пакета.

- В виду возможности «одновременной» передачи трафика нескольких пользователей в сетях с коммутацией пакетов могут возникать очень короткие перегрузки большой величины, приводящие к резкому ухудшению значений показателей NP. Для контроля таких перегрузок требуется периодичность контроля с длительность интервалов времени значительно менее часа.

- Усреднение значений показателей NP на часовом интервале времени сильно искажает результаты оценки. Пример влияния длительности интервала времени для формирования значений показателей NP на результаты общей оценки показан на рисунке 1.19 [97]. Из анализа представленных на рисунке графиков видно, что определение ЧНН нуждается во многих уточнениях.

- Наличие в сетях с коммутацией пакетов механизма буферизации и приоритезации трафика изменяет характер загрузки сетевого соединения и длительность интервала времени обслуживания пользователя (услуги связи), что приводит к появлению ряда одновременных оценок нагрузки по группам классов

трафика в соответствии с применяемыми к пакетам данных соответствующего класса правилами буферизации и приоритезации. При этом интервалы времени наибольшей нагрузки по соответствующим классам трафика могут быть существенно разнесены во времени.

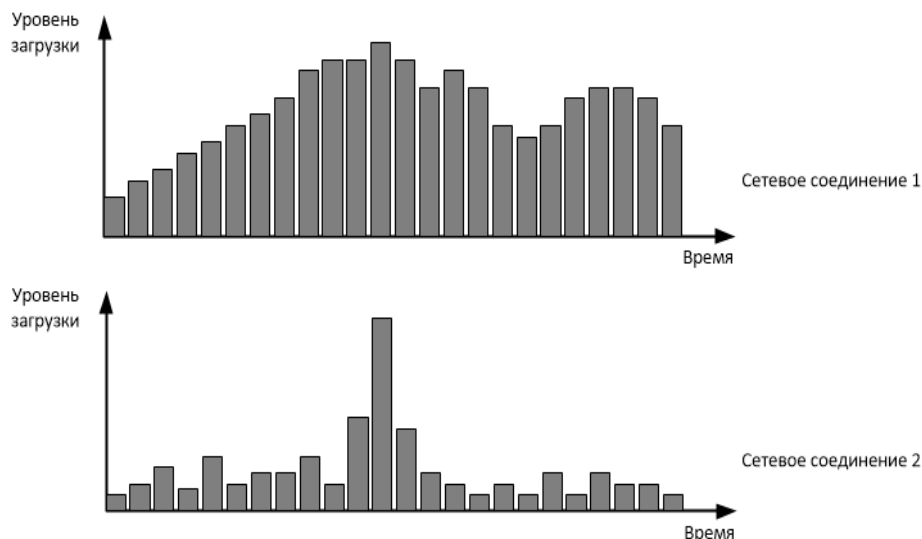


Рисунок 1.18 - Пример различных суточных профилей трафика с одинаковым значением уровня загрузки в ЧНН

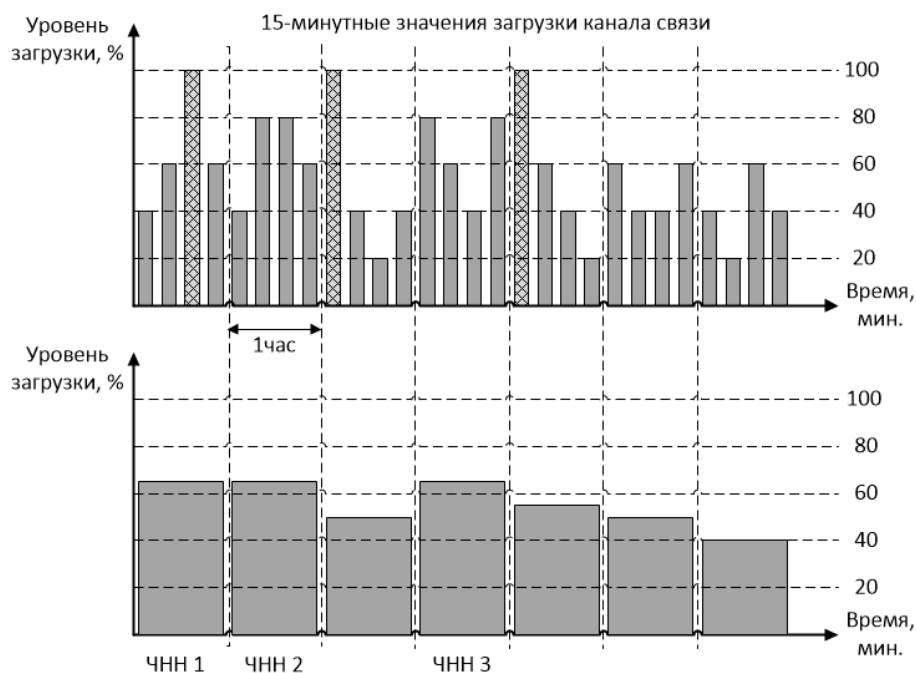


Рисунок 1.19 - Пример различных часовых профилей трафика с одинаковым средним значением уровня загрузки в качестве кандидатов в ЧНН

Считается, что трафик современных пакетных сетей связи и сети Интернет в частности обладает свойством самоподобия (масштабной инвариантностью и неизменностью значения коэффициента корреляции при масштабировании). Однако, для самоподобного трафика методы расчета характеристик сетей связи (пропускная способность, размер буферов и т.п.) с использованием марковских моделей и формул Эрланга, которые успешно применялись при расчете сетей связи с коммутацией каналов, приводят к некорректной оценке загрузки каналов/линий связи и выдают неоправданные оптимистические результаты [98]. Использование показателей самоподобия (показателей Херста) к оценке работы реальных сетей связи требует достаточной осторожности и обязательного учета значений других показателей работы сети связи [99]. Статистическое мультиплексирование, представленное на рисунке 1.20, возможно только в случае наличия достаточно широкой полосы сетевого соединения и большой емкости пакетных буферов при отсутствии применения к исходному трафику до мультиплексирования и суммарному трафику в процессе мультиплексирования правил обработки, содержащих в своей основе использование полисинга или шейпинга, т.е. фактически при использовании для передачи трафика каналов связи неограниченной пропускной способности и буферной емкости по отношению к величине интенсивности передаваемого трафика.

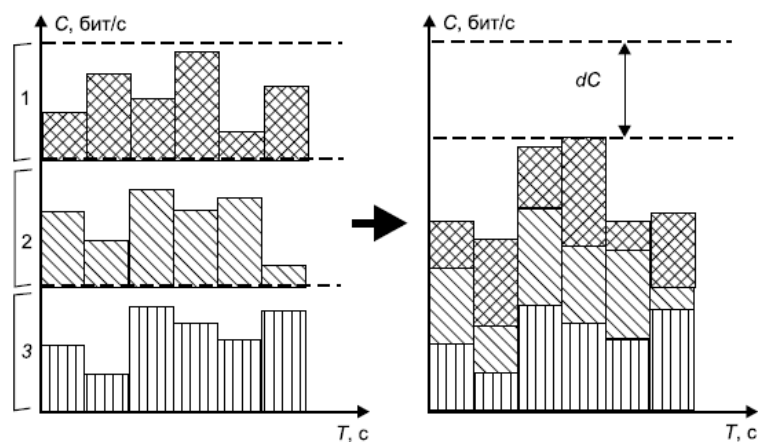


Рисунок 1.20 - Пример статистического мультиплексирования трафика в канале/линии связи



Однако, на практике ширина полосы и емкость буферов ограничены, что приводит к использованию функций полисинга и шейпинга к передаваемому пакетному трафику. Для передачи пакетного трафика без потерь, включая потери/отбрасывание пакетов на приемной стороне, вызванные высокими значениями времени задержки, пропускная способность канала/линии должны соответствовать пиковым значениям скоростей передачи пакетов данных. Это является причиной неэффективного использования полосы пропускания сетевого соединения, т.к. средняя скорость передачи пакетов обычно невелика по сравнению с пиковыми значениями [100].

В нормативной документации [16, 17] пороговые значения показателей NP для сетей с коммутацией пакетов установлены из предположения стационарности и ординарности процесса передачи пакетного трафика с отсутствием последствия. В связи с этим при анализе значений показателей NP для сетевых соединений на интервале времени проведения оценки различными системами сетевого мониторинга используются понятия минимального, максимального и среднего значений показателей за данный интервал времени [15, 16, 20, 87, 101]. Использование такого подхода при анализе значений показателей NP не позволяет получить сопоставимых между собой оценок качества работы сетевых соединений для проведения сравнительного анализа их производительности. Это связано с тем, что:

- В общем случае процесс изменения величины показателя качества во времени не является стационарным, т.к. вероятность поступления на обработку определенного числа пакетов данных зависит интенсивности использования услуг связи со стороны пользователей и не имеет равномерного распределения по времени.

- Отсутствует ординарность потока пакетов данных в виду наличия конкуренции при передаче пакетов данных различных потоков трафика в зависимости от установленного значения приоритета передаваемых пакетов данных для услуг связи [102].

- Присутствует влияние последствий в виду использования в качестве составной части сетевых соединений в сетях с коммутацией пакетов различных буферов для пакетов с разным значением приоритета при наличии вариации размеров пакетов, имеющих одинаковое значение приоритета. При этом интенсивность поступления пакетов данных на вход буфера может сильно изменяться во времени и ее значение носит случайный характер. Размер пакетов данных, помещаемых в буфер, также может быть различным. Пакеты данных могут быть переданы из буфера с задержкой в различные последующие интервалы времени в дополнение к поступившим на обработку пакетам или вместо пакетов с более низким приоритетом [103, 104].

- Присутствует просеивание потока пакетов данных, результаты которого определяют потери пакетов данных в виде сброса пакетов в виду их искажения при передаче (несоответствие контрольных сумм), сброса в виду отсутствия свободного места в пакетной очереди или ограничения по количеству пакетов определенного типа от определенного отправителя (например, отправленных с конкретного IP-адреса и/или порта). Соответственно, поток пакетов до просеивания не эквивалентен потоку после просеивания [105]. Операция просеивания пакетов данных работает с учетом уровня приоритета пакетов данных. Вероятность поступления пакетов определенного типа от конкретного отправителя определяется активностью отправителя и носит случайный характер.

Данные факты не позволяют получить корректной сопоставимой оценки качества работы сетевых элементов сетей с коммутации пакетов с использованием вышеуказанных статистических методов.

Следующей особенностью использования установленных в нормативных документах показателей NP для сетей с коммутацией пакетов является тот факт, что при изменении значений показателей NP в пределах областей допустимых значений качество услуг связи для конечных пользователей остается на необходимом для пользователей уровне. В этом случае использование усреднения значений показателей NP привести к получению значения показателя, которое не превосходит установленного порогового значения в среднем (значение показателя

NP находится в области допустимых значений), но на отдельных временных интервалах проведения измерений значение показателя NP превышает установленное пороговое значение (находится вне области допустимых значений).

Исходя из вышеизложенного, наиболее лучше задаче поддержания качества работы сетевых соединений на должном уровне соответствует контроль отклонений значений показателей NP от областей допустимых значений (выход за пределы пороговых значений) по величине и длительности времени отклонения. При этом исключается влияние на результаты оценки качества изменений значений показателей качества в областях допустимых значений. Такой подход к контролю производительности сетевых соединений позволяет оценивать производительность сети по передаче пакетов данных и достаточно близко соответствует существующим методам контроля качества предоставления услуг связи конечному пользователю, так как позволяет оценить степень ухудшения производительности сетевого соединения не только за интервал времени проведения измерений значений показателей NP, но и за произвольный интервал времени, в том числе за интервал времени предоставления услуги связи. Это позволяет оценивать влияние значений показателей QoS на формирование значений показателей QoE, т.к. степень удовлетворенности пользователя от использования услуги связи является психологической оценкой, которая в свою очередь определяется величиной и длительностью «раздражающего фактора» (ухудшения качества передачи данных при предоставлении услуги связи). При этом воспринимаемое со стороны пользователя качество услуги связи имеет первостепенное значение для оптимизации доходов и ресурсов поставщика услуг, т.е. является критическим для бизнеса значением [42].

## 1.5. Обзор научных публикаций по теме проводимого исследования

В ходе проведения исследования в нормативных документах не обнаружено наличие единой модели оценки качества работы сети с коммутацией пакетов, которая бы учитывала синергетичность показателей качества. Наличие такой модели позволяет обеспечить формирование единых требований к качеству работы мультисервисных сетей связи на этапах проектирования и эксплуатации, позволяет производить планирование физической и логической архитектуры сети связи, обеспечивающей формирование сетевых соединений различного вида в соответствии с требованиями предоставляемых на сети услуг связи [42]. При этом присутствуют нормативные документы, указывающие на наличие нелинейных взаимосвязей между значениями показателей сетевой производительности [106].

По результатам анализа научных публикаций по теме проводимого исследования помимо стандартных оценок по максимальным, минимальным и средним значениям показателей можно выделить следующие методы формирования оценки качества работы сети связи с учетом полученных/измеренных значений показателей качества:

- оценка степени отклонения полученного/измеренного значения показателя от минимального или максимального значения на заданном интервале значений [107],

- статистическая оценка плотности распределения значений показателей качества, полученных на интервале времени проведения измерений [108],

- в виде суммарного значения некоторой постоянной составляющей и набора слагаемых, уточняющих итоговое значение оценки в зависимости от величины изменения значений показателей на интервале времени проведения измерений [109],

- формирование комплексного показателя из набора значений показателей качества (значений пропускной способности сетевого соединения и времени задержки в передаче пакетов данных), которые в свою очередь сформированы с

использованием значений перцентилей по набору значений соответствующих показателей качества, полученных на интервале времени проведения измерений [110],

- использование специальных протоколов и тестового трафика для проведения измерений и формирования значений оценки качества [111],

- многопороговая оценка значений показателей качества с выделением приоритетного для обслуживания трафика [112],

При этом в рассмотренных в ходе анализа научных публикациях указывается на необходимость определения пороговых значений для уровня загрузки сетевого соединения [113], учета влияния технологий построения сетевого соединения на качество передачи пакетов данных [114], обеспечения контроля значений показателей качества работы сетей передачи данных, включая использование программно-управляемых (SDN) виртуализированных (NFV) сетевых элементов, для обеспечения необходимых значений оценок QoE при предоставлении услуг связи [115], учета взаимосвязи скорости передачи пакетов данных и размера пакетного буфера при обеспечении качества передачи пакетного трафика [116], возможность формирования значений QoE для услуги связи с использованием значений показателей качества работы сетевого соединения [117].

Также в рассмотренных публикациях описаны сопоставления показателей QoS и NP для IP-сетей [118], уравнения взаимосвязи значений QoE и QoS [119].

К недостаткам описанных выше в научных публикациях методов формирования оценки качества работы сети связи можно отнести следующее:

- отсутствует учет длительности времени отклонения значений показателей качества от заранее определенных значений на интервале времени проведения измерений,

- не учитывается длительность занятия сетевого соединения для передачи трафика при предоставлении услуги связи (учет наличия на интервале времени проведения измерений интервалов времени снятия статистики с нулевыми

значениями параметров работы сетевого соединения в виду отсутствия использования услуги связи),

- отсутствует учет вклада в формирование оценки качества значений показателей, не попавших под критерий рассмотрения в силу тех или иных условий/ограничений,

- влияние сформированной модели статистической оценки на точность получаемой оценки качества,

- влияние сформированной модели взаимосвязи значений показателей качества на значение полученного комплексного показателя качества,

- влияние нагрузки, созданной тестовым трафиком, на качество работы оцениваемого сетевого соединения и искажение результатов оценки (значения показателей качества с учетом дополнительной нагрузки могут быть отличными от значений показателей качества в отсутствии дополнительной нагрузки),

- маршрут тестового трафика может не совпадать с маршрутом пользовательского трафика при использовании маршрутизации по условиям (Policy Based Routing), что приведет к оценке качества работы другого объекта и созданию дополнительной нагрузки на другое сетевое соединение.

Указанные недостатки учтены в ходе проведения диссертационного исследования.

## **1.6. Требования к оценке качества работы сетевого соединения**

При формировании математической модели для оценки качества работы сетевого соединения на основании вышеизложенного необходимо учесть следующие требования:

- Оценка качества должна производиться на интервале времени произвольной длительности (интервале времени использования сетевого соединения для передачи трафика в интересах предоставляемых услуг связи). Это

позволяет проводить сравнительный анализ производительности сетевых соединений с учетом нестационарности и неординарности процесса передачи пакетных данных при наличии последствий.

- Должно быть установлено пороговое значение для уровня доступности сетевого соединения при передаче трафика за интервал времени формирования оценки качества. Данное пороговое значение может определяться соглашением о качестве предоставления услуг связи (SLA) с пользователями услуг связи.

- Должно быть установлено пороговое значение по уровню загрузки сетевого соединения с учетом типа передаваемого трафика (размера пакета данных).

- Оценка качества должна формироваться с учетом требований к значениям показателей NP на соответствующем уровне модели OSI. Уровень модели OSI определяется уровнем предоставления транспортного сервиса сети передачи данных.

С учетом описанных требований имеем многомерную оценку качества работы сетевого соединения, состоящую из уровня загрузки, длительности времени доступности, значений показателей NP на соответствующем уровне модели OSI. Многомерность оценки качества может быть уменьшена путем оставления для рассмотрения только показателей NP, критичных для предоставления услуги связи в отношении которой оценивается качество работы сетевого соединения по передаче трафика соответствующего класса и типа.

Вероятностно-статистические методы должны быть учтены в объеме, необходимом при проведении исследования. При этом следует учесть тот факт, что методы статистического анализа с учетом теорий вероятностей наиболее востребованы при проведении планирования развертывания сети связи с целью оценки потребностей в сетевых ресурсах. Результаты исследования направлены на оценку дефицита сетевых ресурсов (производительности) уже существующей сети связи с учетом требований со стороны предоставляемых или планируемых к предоставлению услуг связи к значениям показателей NP для сетевых

соединений, по которым передается или будет передаваться пакетный трафик в интересах услуг связи.

Для обеспечения единых требований к архитектуре и качеству работы сети связи, поддержания производительности сети на максимально возможном уровне в течение срока эксплуатации [120, 121] существует необходимость в разработке единой модели оценки качества работы сети, описывающей взаимосвязь и взаимное влияние между показателями NP.

### **1.7. Выводы по разделу 1**

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для оценки качества передачи пакетного трафика в интересах предоставляемой услуги связи на основе значений показателей качества на интервале времени произвольной длительности необходимо формирование показателя качества, обладающего следующими свойствами:

1. Показатель должен иметь интегральное значение с возможностью формирования значения показателя для интервала времени проведения оценки произвольной длительности, в отличие от используемых в настоящее время показателей качества, формируемых на интервале времени фиксированной длительности.

2. Интегральный показатель должен учитывать наличие нелинейной взаимосвязи между значениями показателей сетевой производительности.

3. Измерения, проводимые для получения значений показателей качества, должны носить неинтрузивный характер и выполняться на основе реального пользовательского трафика.

4. Значения интегрального показателя качества должны формироваться для каждого сетевого элемента с возможностью оценки сквозного значения QoS в



зависимости от пути прохождения пользовательского трафика через конкретный набор сетевых элементов.

5. Значения интегрального показателя качества должны формироваться по алгоритмам, максимально близким к алгоритмам формирования оценок QoE для оценки влияния показателей функционирования сети связи (NP) на качество восприятия услуг связи со стороны пользователей (QoE). Необходимо обеспечить формирование показателей NP, обеспечивающих в конечном итоге поддержание значений QoE на уровне приложений в области допустимых значений.

## Раздел 2. Интегральный метод оценки производительности сетевых соединений

### 2.1. Оценка производительности сетевых соединений с использованием нормативных показателей

Согласно нормативной документации производительность - это свойство системы, которое указывает на точность и скорость, с которой система выполняет свои задачи при определенных эксплуатационных условиях [122]. При этом производительность оценивается с точки зрения таких показателей как:

- точность,
- время реакции,
- мощность информационная.

Информационная мощность определена как свойство производительности системы, которое указывает на максимальное число передачи информации установленной функции передачи информации, которую система способна выполнить в течение определенного периода времени без негативного воздействия на какие-либо другие возможности системы [123]. Информационная мощность определяется формулой

$$\text{Информационная мощность} = \text{базовая нагрузка} + \text{рабочая нагрузка} + \text{резервная информационная мощность.}$$

Система находится в максимальной загрузке, когда резервная информационная мощность отсутствует. Перегрузка системы происходит когда

определенные потребителем задачи не работают в предусмотренном промежутке времени в результате ресурсных ограничений.

С учетом требований к сетевым соединениям, основанных на использовании протоколов IP и Ethernet [14, 16, 17, 124] можно установить следующие соответствия точности, времени реакции и мощности информационной с показателями сетевой производительности:

- точность – уровень потерь, уровень ошибок, уровень сброса и т.п.
- время реакции – время задержки и джиттер,
- мощность информационная – в общем виде это пропускная способность сетевого соединения за определенный интервал времени,
- рабочая нагрузка – в общем виде это средняя интенсивность трафика услуг связи внутри сетевого соединения за определенный интервал времени,
- базовая нагрузка – в качестве такой нагрузки можно рассматривать нагрузку, создаваемую работой различных протоколов маршрутизации и коммутации по формированию и поддержанию в актуальном состоянии таблиц маршрутизации и коммутации, а также работой других систем и протоколов за определенный интервал времени.

Отношение суммы базовых и рабочих нагрузок к информационной мощности называется уровнем загрузки сетевого соединения.

Области допустимых значений показателей NP определены для различных требований со стороны услуг связи в виде разделения трафика услуг связи по различным классам и установления для каждого класса трафика индивидуальных требований к диапазону допустимых значений показателей NP [125]. В таблицах 2.1 и 2.2 даны определения классов трафика для протоколов IP и Ethernet. В таблицах 2.3 и 2.4 приведены пороговые значения для показателей сетевой производительности, установленные соответствующими нормативными документами [16, 124, 126]. Показатели NP, определенные в нормативной документации, будем именовать далее нормативными показателями.

Таблица 2.1 - Классы QoS на сетевом уровне для IP-протокола согласно Y.1541

Класс QoS	Приложения (примеры)	Узловые механизмы	Сетевые технологии
0	Реального времени, чувствительные к дрожанию, с повышенной степенью взаимодействия (VoIP, VTC)	Отдельная очередь с привилегированным уровнем обслуживания, обслуживание трафика	Ограниченные маршрутизация и дистанция
1	Реального времени, чувствительные к дрожанию, интерактивные (VoIP, VTC)		Менее ограниченные маршрутизация и дистанция
2	Данные транзакций, с повышенной степенью интерактивности (сигнализация)	Отдельная очередь, пониженный приоритет	Ограниченные маршрутизация и дистанция
3	Данные транзакций, интерактивные приложения		Менее ограниченные маршрутизация и дистанция
4	Только с низкими потерями данных (короткие транзакции, массовая передача данных, потоки видео)	Длинная очередь, пониженный приоритет	Любой маршрут/путь
5	Традиционные приложения стандартных сетей IP	Отдельная очередь (самый низкий приоритет)	Любой маршрут/путь
6	Временный класс для услуг с повышенной степенью взаимодействия на основе протокола TCP	Отдельная очередь с привилегированным уровнем обслуживания, обслуживание трафика	Ограниченные маршрутизация и дистанция
7	Временный класс для интерактивных услуг на основе протокола TCP		Менее ограниченные маршрутизация и дистанция

Таблица 2.2 - Классы трафика на канальном уровне модели OSI согласно MEF 22.3

Класс трафика	Распределение типов трафика по классовым моделям			
	4х классовая модель	3х классовая модель	2х классовая модель	2х классовая модель
Очень высокий	Синхронизация			
Высокий	Разговорный, сигнализация, управление сетью и контроль	Синхронизация, разговорный, сигнализация, управление сетью и контроль	Синхронизация, разговорный, сигнализация, контроль сетевого управления и потоковое мультимедиа	Синхронизация, разговорный, сигнализация, контроль сетевого управления и потоковое мультимедиа
Средний	Потоковое мультимедиа	Потоковое мультимедиа		Интерактивный и фоновый
Низкий	Интерактивный и фоновый	Интерактивный и фоновый	Интерактивный и фоновый	

Таблица 2.3 - Пороговые значения для показателей сетевой производительности для IP-протокола согласно Y.1541

Показатели сетевой производительности	Классы QoS							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Задержка доставки пакета IP (IPTD), мс	≤100	≤400	≤100	≤400	≤1000	Н	≤100	≤400
Вариация задержки пакета IP (IPDV), мс	≤50	≤50	Н*	Н*	Н*	Н*	≤50	≤50
Уровень потерь пакетов IP (IPLR), отн. ед	≤1E-3	≤1E-3	≤1E-3	≤1E-3	≤1E-3	Н*	≤1E-5	≤1E-5
Уровень ошибок пакетов IP (IPER), отн. Ед	≤1E-4	≤1E-4	≤1E-4	≤1E-4	≤1E-4	Н*	≤1E-6	≤1E-6
Уровень нарушения порядка пакетов IP (IPRR), отн. ед	Н*	Н*	Н*	Н*	Н*	Н*	≤1E-6	≤1E-6

\*Н – не нормировано

Таблица 2.4 - Пороговые значения для показателей качества канального уровня согласно MEF 22.3

Класс трафика	Профиль трафика	Задержка при передаче кадров (FD)	Джиттер при передаче кадров (IFDV)	Уровень потерь при передаче кадров (FLR)
Очень высокий	$CIR^{*}>0, EIR^{**}=0$	$\leq 1$ мс	$\leq 0,3$ мс	$\leq 0,001\%$ (1E-5)
Высокий	$CIR>0, EIR\geq 0$	$\leq 1$ мс	$\leq 0.3$ мс	$\leq 0,01\%$ (1E-4)
Средний	$CIR>0, EIR\geq 0$	$\leq 2,9$ мс	$\leq 0.9$ мс	$\leq 0,01\%$ (1E-4)
Низкий	$CIR\geq 0, EIR\geq 0$	$\leq 10$ мс	$\leq 2.8$ мс	$\leq 0,1\%$ (1E-3)

\* - гарантированная скорость передачи данных,

\*\* - величина превышения гарантированной скорости передачи данных.

В таблицах 2.3 и 2.4 приведены обобщенные требования к значениям показателей NP, которые должны обеспечить качество передачи пакетного трафика в интересах различных услуг связи. По факту, со стороны каждой из услуг связи присутствуют свои требования к значениям показателей NP. Примеры различия требований со стороны услуг связи к значениям уровня потерь пакетов и времени задержки в передаче пакетов между отправителем и получателем, изложенные в нормативной документации МСЭ [23], представлены на рисунке 2.1.

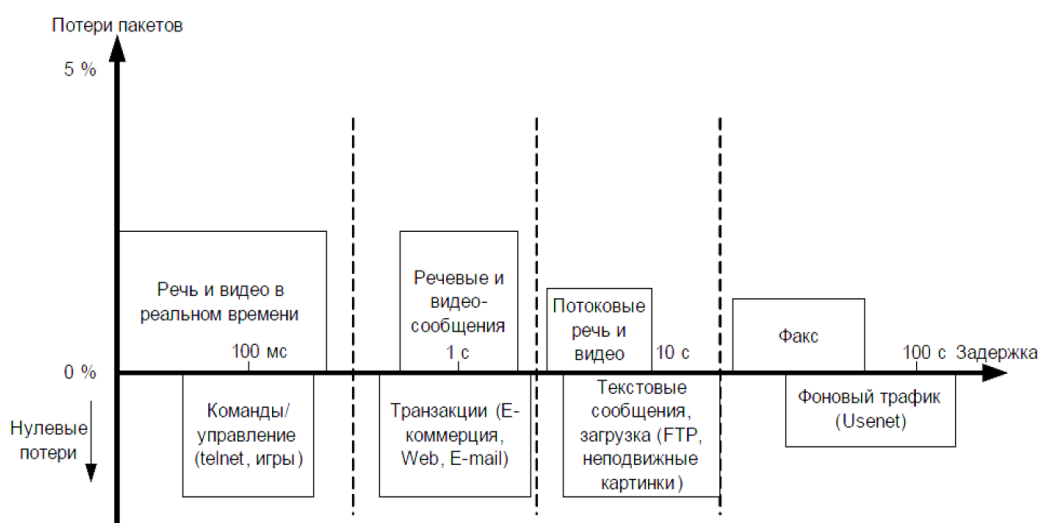


Рисунок 2.1 - Различные требования к показателям сетевой производительности со стороны услуг связи

Аналогично рекомендациям МСЭ в рекомендациях Metro Ethernet Forum (MEF) предложены свои пороговые значения для показателей NP при передаче трафика различных услуг связи с использованием протокола Ethernet. В таблице 2.5 представлены пороговые значения для показателей NP на канальном уровне при использовании протокола Ethernet в зависимости от типа различных пользовательских приложений и типов трафика, используемых пользователями для доступа к услугам связи [127].

Таблица 2.5 - Пороговые значения показателей качества канального уровня для пользовательских приложений

Приложения	Задержка при передаче кадров (FD)	Уровень потерь при передаче кадров (FLR)	Джиттер при передаче кадров (FDV)
Голос поверх IP (VoIP)	125 мс предпочтительно, 375 мс предельный лимит	3E-2	40 мс
Видеоконференции	125 мс предпочтительно, 375 мс предельный лимит	1E-2	40 мс
Сигнализация VoIP и видеоконференций	Не определено	1E-3	Не определено
Сервис IPTV	12 мс	1E-3	40 мс
Управление IPTV	Не определено	1E-3	Не определено
Потоковое вещание видео	Не определено	1E-2	1,5 с
Интерактивные игры	50 мс	1E-3	8 мс
Эмуляция каналов	25 мс	1E-6	10 мс
Видео-конференции	120 мс	2,5E-4	10 мс
Торговые площадки	Не определено	1E-5	Не определено
Кабельное телевидение	150 мс (для MPEG-4)	1E-2	Не определено
Сети доступа к базам данных	5 мс	1E-5	Не определено
Доступ к базам данных через Интернет	50 мс	1E-5	Не определено
Взаимодействие клиент-сервер	Не определено	1E-3	Не определено
Работа сетевых хранилищ	5 мс	1E-4	1 мс

В виду того, что конвергентные услуги связи в сетях с коммутацией пакетов в настоящее время предоставляются с использованием протокола IP на 3 уровне модели OSI, то в качестве показателей качества выбираются показатели, указанные в нормативных документах отрасли связи по оценке качества работы сети на 3 уровне модели OSI [14, 15, 16, 17]. Обеспечение в сети связи единых правил обслуживания пакетов данных определяется путем установления соответствия между классами QoS на сетевом и канальном уровнях модели OSI, а также промежуточном уровне 2,5, который представлен технологией MPLS [128], на основе значений кодов маркировки класса/приоритета пакетов данных в заголовках соответствующего уровня, которые представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Значения маркировки приоритетов для пакетов данных на транспортных уровнях модели NGN по классам QoS

Класс QoS пакетной сети	Описание	Маркировка пакетов 3-го уровня: DSCP (код дифференцированной услуги)	Маркировка пакетов 2-го уровня		Приложения
			MPLS (класс обслуживания)	Ethernet (код приоритета)	
0, 1	Чувствительность к дрожанию	EF (срочная переадресация)	5	5 (по умолчанию) или 6	Телефония
2, 3, 4	Низкая задержка	AF (гарантированная переадресация)	4, 3, 2	4, 3, 2	Сигнализация, интерактивные приложения, данные
5	Максимальные усилия	DF (переадресация по умолчанию)	0	0	Просмотр страниц в интернете, электронная почта



Со стороны пользовательских сетевых приложений, работающих на уровне услуг с точки зрения модели сетей связи следующего поколения (NGN), существуют свои требования к значениям показателей качества безотносительно уровня модели OSI, на котором осуществляется предоставление услуг связи в сети оператора связи. Примеры работы таких сетевых приложений показаны на рисунках 1.13 и 1.14. В таком случае, значения показателей NP для сетевых соединений, через которые осуществляется передача трафика сетевых приложений, должны соответствовать установленным со стороны сетевых приложений требованиям по значениям показателей NP. С точки зрения обеспечения качества, например, для сетей сотовой связи, показатели сервисного уровня (уровня услуг) и их пороговые значения в зависимости от типа и класса трафика на примере рекомендаций ETSI и 3GPP [129] приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Разделение услуг связи сотовой сети по классам трафика и пороговым значениям для показателей качества

Класс трафика сотовой сети (QCI)	Тип ресурса сети	Пороговое значение времени задержки	Уровень ошибок и потерь	Пример сервиса
1	Гарантированная скорость	100 мс	1E-2	Голосовая телефония
2		150 мс	1E-3	Видеотелефония
3		50 мс	1E-3	Игры реального времени
4		300 мс	1E-6	Потоковое видео
5	Негарантированная скорость	100 мс	1E-6	Сигнальный трафик
6		300 мс	1E-6	Веб-серфинг, чаты, электронная почта, обмен файлами и т.п. (с использованием протокола TCP)
7		100 мс	1E-3	Передача голоса, видео, интерактивные игры
8		300 мс	1E-6	Буферизированное видео (с использованием протокола TCP)
9		300 мс	1E-6	Закачка файлов (с использованием протокола TCP)

Нормативные документы, помимо определения пороговых значений показателей сетевой производительности, при превышении которых начинается деградация качества передачи пакетов данных, устанавливают предельные/максимальные значения показателей сетевой производительности, при достижении которых сетевое соединение становится полностью непригодным/недоступным для предоставления услуг связи. В таблице 2.8 представлены такие пороговые значения уровня потерь для сетевого соединения [15, 54, 87, 90] на соответствующем уровне модели OSI для принятия решения о недоступности сетевого соединения для предоставления услуг связи.

Таблица 2.8 - Пороговые значения уровня потерь для оценки уровня доступности сетевого соединения

Пороговое значение уровня потерь	Уровень согласно модели OSI	Протокол/Технология	Нормативный документ
0,25	3	IP	Y.1543
0,2	3	IP	Y.1540
0,03 - 0,2	3	IP	Y.1540 (трафик реального времени)
0,5	2,5	MPLS	Y.1561
0,5	2	Ethernet	Y.1563

Пакет может считаться потерянным, если время его задержки при передаче между определенными точками в сети связи превысит некоторое допустимое значение, т.к. его «воспроизведение» нарушит естественный порядок предоставления данных конечному пользователю [130, 131]. К потерянным пакетам в сетевых соединениях на основе IP-протокола могут быть отнесены пакеты, для которых время задержки при их передаче от отправителя к получателю превышает 10 секунд [54]. Влияние величины времени задержки в передаче пакета на качество предоставления услуг связи реального времени согласно рекомендации МСЭ [62] представлено на рисунке 2.2.

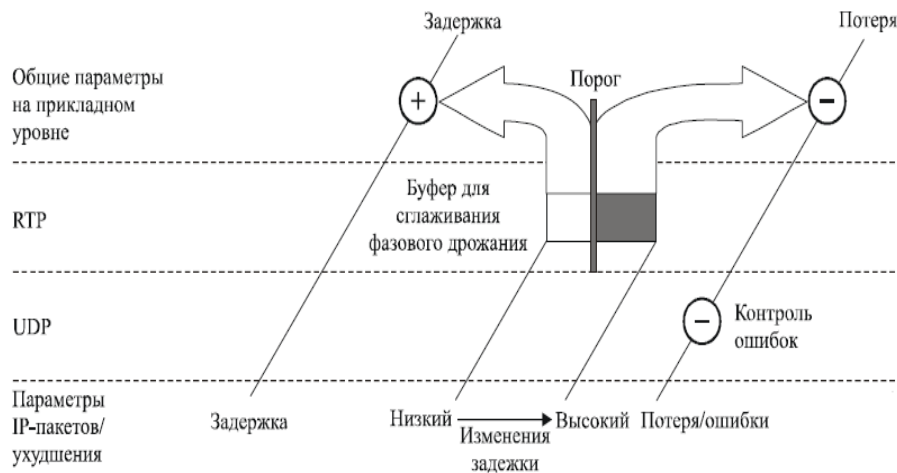


Рисунок 2.2 - Оценка потерь пакетов данных для услуг связи реального времени

В отношении пороговых значений для показателей NP с учетом вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Требования к пороговым значениям показателей NP для различных услуг связи имеют различное значение. Соответственно, возможны ситуации, когда в зависимости от значений показателей NP сетевых соединений, задействованных в передаче трафика услуг связи, часть услуг связи будет оказываться с необходимым качеством и часть услуг будут иметь пониженное качество или не будут предоставляться совсем.

2. Установленные на сетевом и канальном уровнях требования к значениям показателей NP в виде пороговых значений могут иметь различное значение. В виду того, что услуги связи могут оказываться с использованием сетевых соединений на сетевом и канальном уровнях, то необходимо при оценке качества работы сетевого соединения руководствоваться значениями показателей сетевой производительности на уровне предоставления услуги связи.

3. Существуют пороговые значения, определяющие область допустимых значений показателей NP сетевого соединения, при которых все услуги связи, передающие трафик по данному сетевому соединению, предоставляются с необходимым качеством.

4. Существуют пороговые значения, определяющие область недопустимых/запрещенных значений показателей NP сетевого соединения, при которых все услуги связи, передающие трафик по данному сетевому соединению, не могут предоставляться совсем.

5. Существует область значений показателей NP сетевого соединения, представленная на рисунке 2.3 (между областями допустимых и запрещенных значений, границы которых определены пороговыми значениями  $P_{thres1}$  и  $P_{thres2}$ ), в которой происходит деградация качества предоставления набора услуг связи, передающих трафик по общему сетевому соединению.



Рисунок 2.3 - Области значений показателя сетевой производительности (NP)

Данная область деградации значений показателей NP подлежит особому контролю, т.к. изменение значений показателей NP от области допустимых значений до области недопустимых значений позволяет оценить величину/степень деградации качества работы сетевого соединения по соответствующим показателям NP [36, 104, 132, 133].

Величина отклонения значений показателей NP от области допустимых значений в область деградации значений показателей NP и время нахождения

значений показателей NP в области деградации определяют степень ухудшения производительности сетевого соединения на интервале времени проведения оценки/мониторинга  $T_m$  и может быть выражена определенным значением [134].

Для услуг различного типа принадлежащих одному классу критичными могут быть значения различных показателей сетевой производительности. Пример критичности значений показателей сетевой производительности для различных услуг связи представлен в таблице 2.9 [25, 135, 136, 137]. Соответственно, степень пригодности сетевого соединения к предоставлению услуг связи должна оцениваться, в первую очередь, согласно значений наиболее критичных показателей сетевой производительности.

Таблица 2.9 - Чувствительность различных типов приложений к сетевым характеристикам

Тип трафика	Уровень чувствительности к сетевым характеристикам			
	Полоса пропускания	Потери	Задержки	Джиттер
Речь	Средний	Средний	Высокий	Высокий
Электронная коммерция	Низкий	Высокий	Высокий	Низкий
Транзакции	Низкий	Высокий	Высокий	Низкий
Электронная почта	Низкий	Высокий	Низкий	Низкий
Поиск в сети (случайный)	Низкий	Средний	Средний	Низкий
Поиск в сети (постоянный)	Средний	Высокий	Высокий	Низкий
Пересылка файлов	Высокий	Высокий	Низкий	Низкий
Видеоконференция	Высокий	Средний	Высокий	Высокий
Широковещательный трафик	Высокий	Высокий	Высокий	Высокий

Временные интервалы проведения измерений для получения значений показателей сетевой производительности в различных нормативных документах определены в диапазоне от нескольких секунд до нескольких минут. Значения интервалов времени для проведения измерений, согласно рекомендаций МСЭ, представлены в таблице 2.10 [15, 16, 54, 55].

Таблица 2.10 - Интервалы времени проведения измерений для получения значений показателей сетевой производительности

Интервал времени проведения измерений	Регламентирующий документ	Примечание
10-20 секунд	Y.1541	Для услуги «Телефония»
1 минута	Y.1541, E.500	Рекомендуемое значение
5 минут	Y.1540, Y.1543, E.800 Supplement 8, E.502, E.492, E.500	
Несколько минут	Y.1541	Допустимое значение
15 минут	E.502, E.492	
30 минут	E.502	
1 час	E.492, E.500, Q.544	
24 часа	E.502, E.492, E.500	

В таблице 2.11 представлена многоуровневая классификация услуг связи в зависимости от длительности времени предоставления услуг связи [138].

В большинстве случаев производители телекоммуникационного оборудования и систем мониторинга в качестве интервала времени для получения статистических данных для расчета показателей сетевой производительности используют интервал времени длительностью 300 секунд (5 минут). Данный интервал времени имеет рекомендованную длительность согласно информации, представленной в таблице 2.10 и в соответствии с таблицей 2.11 позволяет осуществлять контроль сетевой производительности для большинства типов услуг связи. Услуги связи типа 0 и частично типа 1 соответствуют услугам Интернета вещей (IoT) и для контроля сетевой производительности обслуживающих данные услуги сетевых соединений возможно использование интервалов времени получения статистических данных соответствующей длительности.

Таблица 2.11 - Классификация услуг связи по длительности их предоставления

Тип услуг	Тип 0	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
Длительность времени предоставления	Менее 1 секунды	От 1 секунды до 10 минут	От 10 до 30 минут	От 30 минут до 1 часа	Свыше 1 часа
Характеристика услуги	Мгновенная передача данных (например, сигналов датчика), как правило, влияет на работу сетей только в случае перегрузок, вызванных внезапным скачком объема данных.	Используется для традиционных услуг электросвязи (голосовая телефония, факсимильная связь и передача сообщений). В основном используются двунаправленные симметричные услуги связи. В данный тип включены также однонаправленные услуги связи, например, музыкальные сервисы.	Как правило, используется для веб-услуг, но включает также голосовую и видео-телефонию.	Используется главным образом для услуг передачи потокового видео (контентом являются обычные ТВ-программы длительностью менее 1 часа). Включены также услуги аудио- и видео-конференций.	Используется главным образом для услуг передачи потокового видео (контентом являются HD и/или 3D-фильмы длительностью свыше одного часа). Этот тип включает также новые появляющиеся виды услуг, такие как дистанционная хирургия и т. д.
Примеры услуг	Простые данные датчика, текстовые данные датчика (SMS).	Данные датчика, MMS, голосовая телефония/сообщения, передача видео-сообщений, музыка высокого качества, видео-телефония, передача видео-сообщений и клипов в HD, обмен видео-сообщениями в 3D.	Голосовая телефония, видео-телефония/конференц-связь низкого качества, передача файлов, видео-телефония и конференц-связь в HD, веб-контент на основе 3D.	Голосовая телефония, голосовая конференц-связь, Интернет-TV, Интернет-вещание, IPTV, сетевые игры, видео-конференции, 3D TV, 3D-теле-присутствие.	Голосовая конференц-связь, TV и вещание через Интернет, теле-и видео-наблюдение, IPTV, сетевые игры, видео-конференции, приложения электронного здраво-охранения.

Для расчета значений показателей сетевой производительности за интервал времени снятия статистики используются, по факту, усредненные за данный интервал времени значения параметров работы сетевого соединения. Увеличение длительности интервала времени снятия статистики приводит к большему сглаживанию изменений значений параметров и не позволяет выявить и учесть в полной мере величины «всплесков» значений параметра на интервале времени снятия статистики. Для того, чтобы усреднения значений параметров работы сетевых соединений вносили примерно одинаковые «искажения» в виде сглаживания значений параметров в результате усреднения их значений, рекомендуется для формирования значений показателей сетевой производительности сетевых соединений использовать одинаковые интервалы времени снятия статистики.

В отношении интервалов времени для расчета значений показателей NR можно сделать следующие выводы:

1. Используемые со стороны производителей телекоммуникационного оборудования временные интервалы получения статистических данных равные 300 секунд соответствуют рекомендованным в нормативной документации интервалам времени для расчета значений показателей NR.

2. Интервалы времени для расчета значений показателей NR длительностью 300 секунд удовлетворяют возможностям оценки производительности сетевых соединений для предоставления основных типов услуг связи.

3. Для обеспечения формирования сопоставимых значений сравнительных оценок NR для сетевых соединений необходимо использовать для расчета значений показателей NR одинаковые интервалы времени снятия статистики.

Соответственно, оценка производительности сетевых соединений за интервал времени, который значительно превышает по длительности интервал времени получения статистических данных для расчета единичных значений показателей NR, должна формироваться с учетом всех единичных значений показателей NR за данный интервал времени. Интервал времени для оценки



производительности сетевых соединений должен определяться цикличностью использования сетевых соединений для передачи трафика услуг связи. В общем случае таким циклическим интервалом времени является суточный интервал времени. Таким образом, интегральная оценка производительности сетевых соединений на суточном интервале времени является адекватной оценкой производительности сетевых соединений по передаче трафика услуг связи.

С учетом вышеизложенного можно определить следующие требования к функции интегральной оценки качества работы сетевого соединения:

1. Функция интегральной оценки качества работы сетевого соединения должна учитывать величину отклонения значений оцениваемого показателя качества от области допустимых значений на интервале времени проведения измерений и суммарную продолжительность отклонений. Особое внимание следует уделить значениям оцениваемого показателя качества, находящихся в области деградации качества работы сетевого соединения.

2. Значение функции интегральной оценки качества работы сетевого соединения для отражения снижения качества должно быть убывающим с ростом величины и суммарной продолжительности отклонений значения показателя качества от области допустимых значений.

3. Для учета значительных ухудшений качества передачи трафика, имеющих достаточно длительное время последствий по сравнению с длительностью «всплесков» значений показателей качества, являющихся причиной таких ухудшений и вызванных «всплеском» интенсивности пакетного трафика, необходимо чтобы функция интегральной оценки качества работы сетевого соединения обладала достаточной чувствительностью к выявлению таких одиночных «всплесков» значений показателей качества.

4. Для обеспечения наблюдаемости «всплеска» значений показателя качества интервал времени получения статистических данных с оборудования связи должен соответствовать или быть максимально приближен по длительности времени к длительности времени такого «всплеска».

5. С ростом количества «всплесков» интенсивности пакетного трафика или «всплесков» ухудшения значений показателей качества должна ухудшаться интегральная оценка качества работы сетевого соединения.

6. Функция интегральной оценки качества работы сетевого соединения должна иметь нелинейный характер для учета работы нелинейных алгоритмов обработки пакетного трафика в сети связи (например, при настройке уровней сброса пакетных очередей в зависимости от класса обслуживаемого трафика).

7. Функция интегральной оценки качества работы сетевого соединения должна обладать экспоненциальной зависимостью с учетом наличия такой зависимости между значениями показателей качества и интенсивностью пакетного трафика, описанной в нормативной документации и технической литературе.

8. С целью повышения чувствительности функции интегральной оценки качества работы сетевого соединения к одиночным «всплескам» значений показателей качества на интервале времени проведения оценки функция должна нелинейно убывать в первой половине интервала времени и может быть линейной во второй половине интервала времени в виду того, что с ростом длительности времени ухудшения качества работы сетевого соединения оценка качества передачи трафика в интересах предоставляемой услуги связи изменяется незначительно [149].

## **2.2. Однопороговая интегральная оценка качества работы сетевого соединения**

Как было указано ранее, при формировании оценки качества работы сетевого соединения на произвольном интервале времени в качестве параметров для формирования значения интегральной оценки выступает набор значений нормативных показателей  $NP$  данного сетевого соединения, полученных на

интервале времени проведения оценки. Исходя из этого с учетом сделанных ранее выводов в отношении возможных значений нормативных показателей NP формируется метод расчета значения интегрального показателя NP.

Предполагается, что оцениваемый на определенном временном интервале с заранее predetermined длительностью  $T_m$  параметр работы сетевого соединения  $P$  имеет диапазон возможных значений  $[0, P_{max}]$  и одно пороговое значение  $P_{thres}$ . При нахождении значений параметра в диапазоне  $[0, P_{thres}]$  сетевое соединение обеспечивает должное качество при передаче пакетного трафика. При нахождении значений параметра в диапазоне  $(P_{thres}, P_{max}]$  сетевое соединение не обеспечивает должное качество при передаче пакетного трафика и наблюдается постепенная деградация уровня качества от 100% (обеспечивается должное качество при передаче любых типов пакетного трафика для любых сервисов) при значении параметра равного  $P_{thres}$  до 0% (полное прекращение предоставления любых сервисов) при значении параметра равного  $P_{max}$ . Суммарное время превышения значением параметра порогового значения  $T_{thres}$  за время проведения оценки  $T_m$  определяется как сумма интервалов времени  $dt$ , в которые значение параметра превосходят пороговое значение  $P_{thres}$

$$T_{thres} = \sum_{i=1}^n dt(i), \quad (2.1)$$

где  $n$  – количество интервалов времени превышения параметром порогового значения за время  $T_m$ ,

$dt$  – длительность интервала времени для расчета единичного значения параметра (равняется длительности временного интервала для расчета единичного значения показателя качества).

Значение формируемого интегрального показателя качества  $Q_p$  показывает степень ухудшения качества предоставления сервиса/услуги в отношении оцениваемого параметра и описывается отношением общей площади под кривой

графика изменения значений параметра выше уровня  $P_{thres}$  (области  $S_{par}$  на рисунке 2.4) к общей площади возможных значений параметра выше значения  $P_{thres}$  (область  $S_{thres}$  на рисунке 2.4) за время проведения оценки [134].

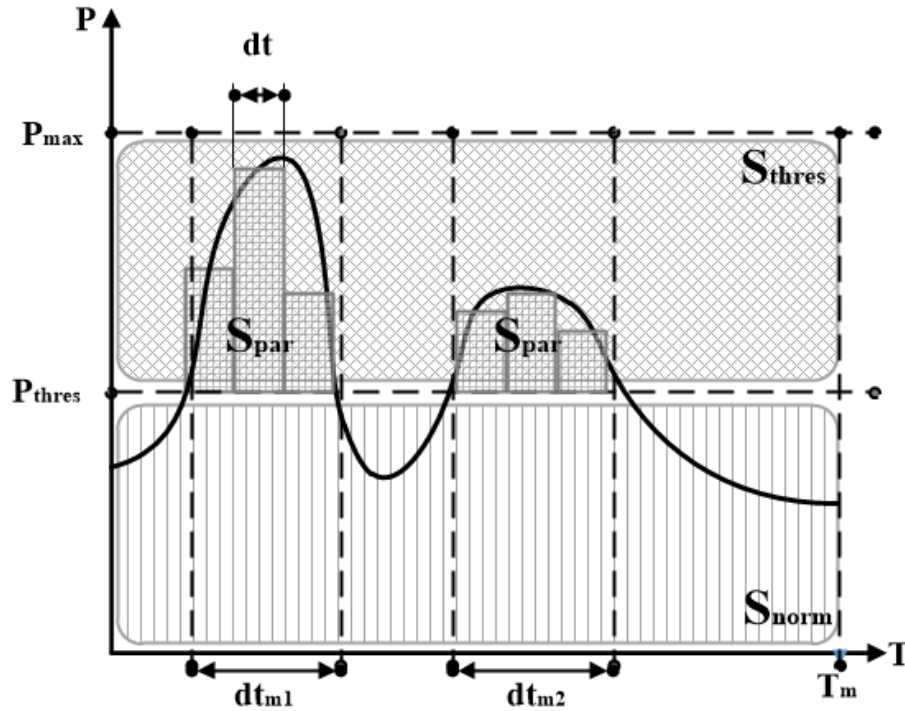


Рисунок 2.4 - Формирование оценки параметра с учетом профиля графика значений параметра за время проведения оценки

Площадь каждой области  $S_{par}$  состоит из набора элементарных площадей, образованных произведением величины превышения значением оцениваемого параметра установленного порогового значения на длительность единичного интервала времени, используемого для формирования единичного значения оцениваемого параметра

$$S_{par} = \int_0^{T_m} (P(t) - P_{thres}(t)) dt. \quad (2.2)$$

При этом значение оцениваемого параметра  $P(t)$  в (2.2) определяется следующим образом

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

Общая площадь  $S_{thres}$  определяется следующей формулой

$$S_{thres} = \int_0^{T_m} (P_{max}(t) - P_{thres}(t)) dt. \quad (2.3)$$

По физическому смыслу значение  $S_{thres}$  описывает величину максимального ухудшения производительности сетевого соединения за время  $T_m$  по оцениваемому параметру, значение  $S_{par}$  описывает достигнутую величину ухудшения производительности сетевого соединения по оцениваемому параметру за время  $T_m$ . Итоговая формула для получения значения интегрального показателя, оценивающего степень ухудшения качества работы сетевого соединения по оцениваемому параметру на интервале времени проведения оценки, с учетом (2.2) и (2.3) имеет следующий общий вид

$$Q_p = \left(1 - \frac{S_{par}}{S_{thres}}\right) * 100\%. \quad (2.4)$$

В случае, если значения оцениваемого параметра не превышают пороговое значение на всем интервале времени проведения оценки, то значение формируемого интегрального показателя равно 100%.

В виду того, что площадь под графиком изменения значений параметра малой амплитуды и большой длительности может совпадать с площадью под графиком изменения значений параметра большой амплитуды и малой длительности, необходим дополнительный критерий для различия полученных в таких случаях значений  $Q_p$ . В качестве такого дополнительного критерия

используется суммарная длительность времени превышения значениями параметра порогового значения за время проведения оценки. В виду того, что для интервала наибольшей интенсивности нагрузки, равного трем часам, используют понятие периода наибольшей нагрузки (ПНН) [139], то суммарную длительность времени превышения значениями параметра порогового значения за время проведения оценки  $T_{thres}$  предлагается именовать временем наибольшей нагрузки (ВНН). Значение ВНН может выражаться в абсолютных и относительных значениях. Относительное значение ВНН рассчитывается относительно длительности времени проведения оценки

$$T_{nno} = \frac{T_{thres}}{T_m}. \quad (2.5)$$

Относительная величина ВНН используется для «выравнивания» интервалов времени проведения оценок при проведении сравнительных оценок для каналов связи, имеющих различную длительность времени работы (обеспечения оказания услуг связи) на общем интервале времени проведения оценки. Например, это может быть вызвано расписанием работы потребителя услуг связи. Связка значений  $Q_p$  с  $T_{thres}$  (2.1) или  $Q_p$  с  $T_{nno}$  (2.5) позволяет организовать сравнительный анализ качества работы сетевых соединений по величине переданного объема трафика или на интервале времени заданной длительности. В случае необходимости возможно установление порогового значения для значения ВНН на интервале времени проведения оценки. Например, в соглашениях об уровне предоставления услуг связи (SLA) достаточно часто указывается максимально допустимая длительность времени ухудшения качества предоставляемых услуг связи в абсолютных или относительных значениях. Таким образом, интегральная оценка качества работы сетевого соединения выступает в качестве показателя выполнения соглашений об уровне предоставления услуг связи.

Аналогичная оценка качества работы сетевых соединений может производиться в сторону уменьшения значений параметра при задании

порогового значения по минимальному значению оцениваемого параметра («зеркальное» отображение вышеописанного метода расчета значения интегрального показателя).

В виду того, что интегральная оценка качества работы сетевого соединения представляет собой функцию, зависящую от значений 2-х параметров (величина превышения порогового значения и длительность времени превышения порогового значения), то значение интегральной оценки является двумерной функцией и возможные варианты значений оценочной функции образуют в пространстве некоторую поверхность [38, 140] представленную на рисунке 2.5. Существующие ограничения по значениям параметров оценочной функции образуют граничную плоскость в пространстве. Точка, в которой соприкасаются граничная плоскость и поверхность значений оценочной функции должна рассматриваться как критическая.

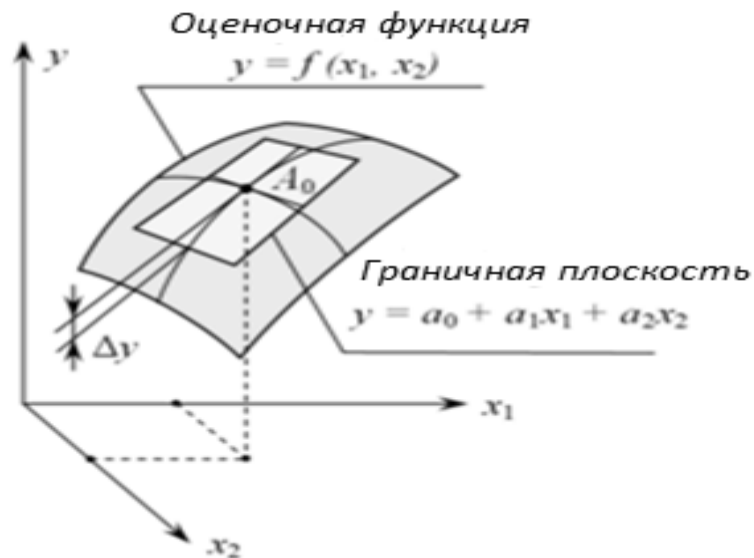


Рисунок 2.5 - Оценочная функция и граничная плоскость

### 2.3. Учет нелинейного характера работы систем передачи пакетного трафика

Системы связи, обеспечивающие передачу пакетного трафика, имеют свойство слабо реагировать на ухудшение значений показателей  $NP$  на начальном этапе. Это обусловлено наличием очередей/буферов для временного хранения пакетов данных и особенностями работы используемых протоколов передачи пакетов данных. Однако, при продолжающемся ухудшении значений показателей  $NP$  на определенном этапе происходит резкое ухудшение значений показателей  $NP$  по экспоненциальному закону с ростом значений таких нормативных показателей, как время задержки и джиттер, уровень потерь при передаче пакетов между отправителем и получателем [141, 142, 143]. Данная особенность сетей связи с коммутацией пакетов отражена в нормативной документации отрасли связи [106] и представлена на рисунке 2.6.

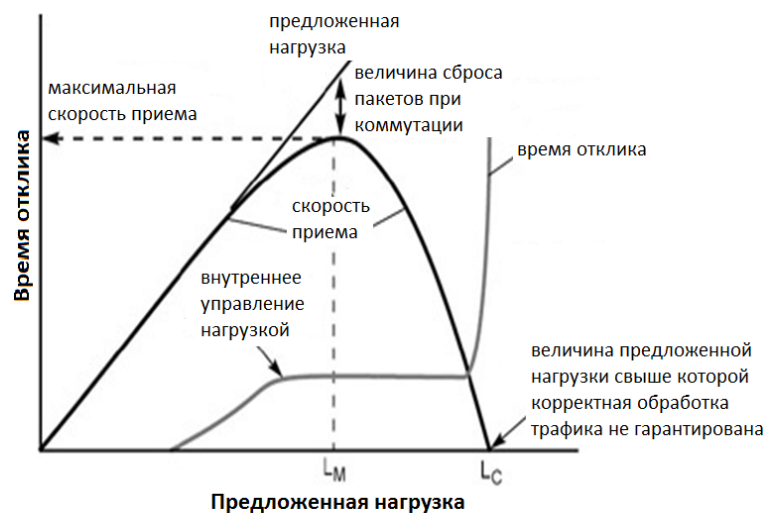


Рисунок 2.6 - Изменение значений показателей качества пакетной сети в зависимости от уровня нагрузки на сетевое устройство

При этом политики обработки пакетного трафика в современных сетях с коммутацией пакетов обычно используют нелинейные алгоритмы обработки потоков пакетов данных в соответствии с значением поля приоритета/важности



пакета данных [144, 145]. В технической литературе также приводятся аналогичные описания ухудшения значений показателей NP пакетной сети в зависимости от уровня нагрузки на сеть. На рисунке 2.7 представлена зависимость показателя использования сети в зависимости от уровня нагрузки при использовании для передачи данных протокола Ethernet [146, 147].



Рисунок 2.7 - Зависимость показателя использования сети от величины полезной нагрузки

При этом показатель использования сети может рассматриваться как некоторый обобщенный показатель качества [148], т.к. для различных сервисов при передаче трафика по сети связи наиболее критичными являются значения разных нормативных показателей качества [23].

В качестве нелинейного параметра можно рассматривать тот факт, что доступность значений показателя на интервале времени проведения оценки не всегда 100%. Достаточно часто встречаются ситуации, когда отсутствуют данные по значениям оцениваемого параметра на некоторых интервалах времени в течение интервала времени проведения оценки. Этот факт изменяет количество значений показателя на интервале времени проведения оценки при проведении повторяющихся оценок. В общем случае количество значений показателя за интервал времени оценки является случайной величиной, которая стремится к величине, равной длительности временного интервала проведения оценки

деленной на длительность интервала времени получения единичного значения показателя. Сумма интервалов времени, за которые доступны значения параметра, является временем доступности статистических данных по работе сетевого соединения  $T_{av}$ . Расчет значения интегрального показателя качества, соответственно, должен опираться на время доступности данных по значениям параметра на интервале времени проведения оценки.

Для учета нелинейного влияния длительности времени превышения значением оцениваемого параметра установленного порогового значения на общий результат оценки производительности сетевого соединения и учета нелинейной взаимосвязи по времени реакции (запаздыванию) между показателями NP подобрана экспоненциальная оценочная функция, имеющая достаточно резкое изменение значений при достаточно коротких интервалах времени превышения значениями параметра порогового значения и линейный характер изменения значений при длительности интервалов времени превышения значениями параметра порогового значения, сопоставимой с временем проведения оценки. График оценочной функции представлен на рисунке 2.8 [134].

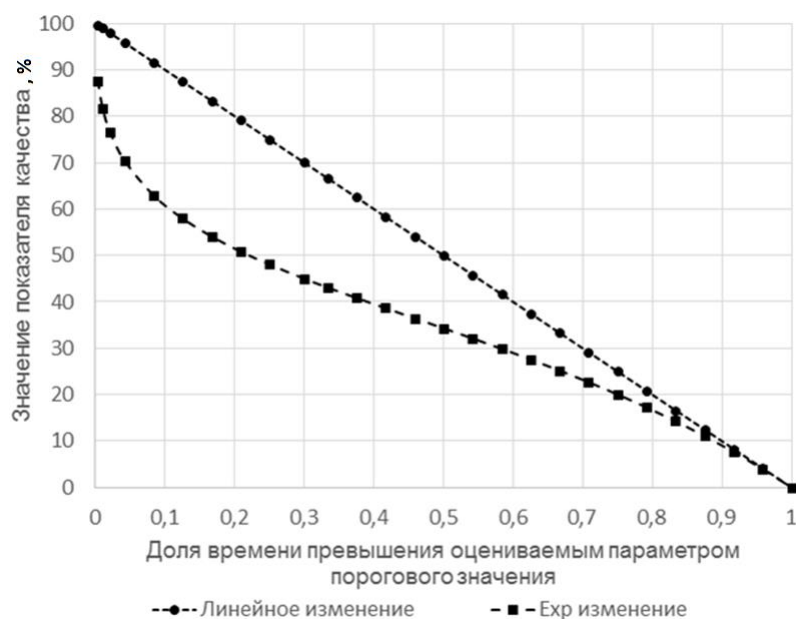


Рисунок 2.8 - Графики линейной и экспоненциальной оценочных функций для показателя качества

Формула для расчета значения интегрального показателя (2.4) за время доступности значений оцениваемого параметра с учетом времени превышения значениями параметра порогового значения и при использовании экспоненциальной оценочной функции будет иметь вид

$$Q_p = \left( 1 - \left( \frac{S_{par}}{S_{thres}} \right)^{e^{-(1-T_{thres}/T_{av})}} \right) * 100\%. \quad (2.6)$$

При этом значения длительности временных интервалов соотносятся следующим образом

$$0 \leq T_{thres} \leq T_{av}, T_{av} \leq T_m.$$

Значение показателя положительно на всем интервале времени проведения оценки. При использовании вышеуказанной расчетной формулы для расчета значения интегрального показателя значение интегрального показателя резко изменяется на начальном интервале времени превышения значением оцениваемого параметра установленного порогового значения и далее стремится к линейному изменению значений по мере увеличения времени превышения порогового значения внутри интервала времени доступности значений оцениваемого параметра, что исключает деградацию значения формируемого интегрального показателя по времени. При  $T_{thres} = T_{av}$  формула расчета значения показателя (2.6) принимает вид

$$Q_p = \left( 1 - \frac{S_{par}}{S_{thres}} \right) * 100\%.$$

Для определения степени достоверности полученной интегральной оценки качества используется коэффициент достоверности, который характеризует долю значений параметра из максимально возможного их количества на интервале

времени проведения оценки, использованных для расчета значения интегрального показателя качества. Формула расчета коэффициента достоверности  $K_t$  имеет вид

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

При значении коэффициента достоверности менее заданной величины полученный результат интегральной оценки производительности имеет малую степень достоверности и его использование не рекомендуется.

Таким образом, имеем интегральный показатель, который позволяет характеризовать качество работы сетевого соединения на интервале времени проведения оценки с учетом полноты сбора значений оцениваемого параметра на интервале времени проведения оценки качества.

#### **2.4. Многопороговая интегральная оценка качества работы сетевого соединения**

Со стороны различных услуг связи присутствуют различные требования к значениям показателей качества [16, 17]. Соответственно, одно и то же сетевое соединение в определенный интервал времени может быть пригодно для передачи трафика в интересах одних услуг связи и непригодно для передачи трафика в интересах других услуг связи. Это приводит к тому, что в течение суточного интервала времени суммарная длительность времени, когда сетевое соединение было пригодно для передачи трафика определенной услуги связи может быть различным. В таких случаях при оценке качества работы сетевого соединения по передаче пакетного трафика необходимо использование нескольких пороговых значений (2 пороговых значения и более). При этом многопороговая оценка может быть использована в следующих видах:

- по величине превышения значением параметра порогового значения - оценка превышения различных пороговых значений оцениваемого параметра в виду наличия различных требований к целевым диапазонам значений параметра при передаче пакетного трафика различных классов (оценка по областям значений параметра  $S_{thres1}$  и  $S_{thres2}$  на рисунке 2.9),

- по «производительности» передачи пакетного трафика по диапазонам значений параметра - оценка качества передачи однотипного пакетного трафика при различных требованиях к значениям показателей качества (оценка по областям значений параметра  $S_{thres1}$  и  $S_{thres2}$  на рисунке 2.10).

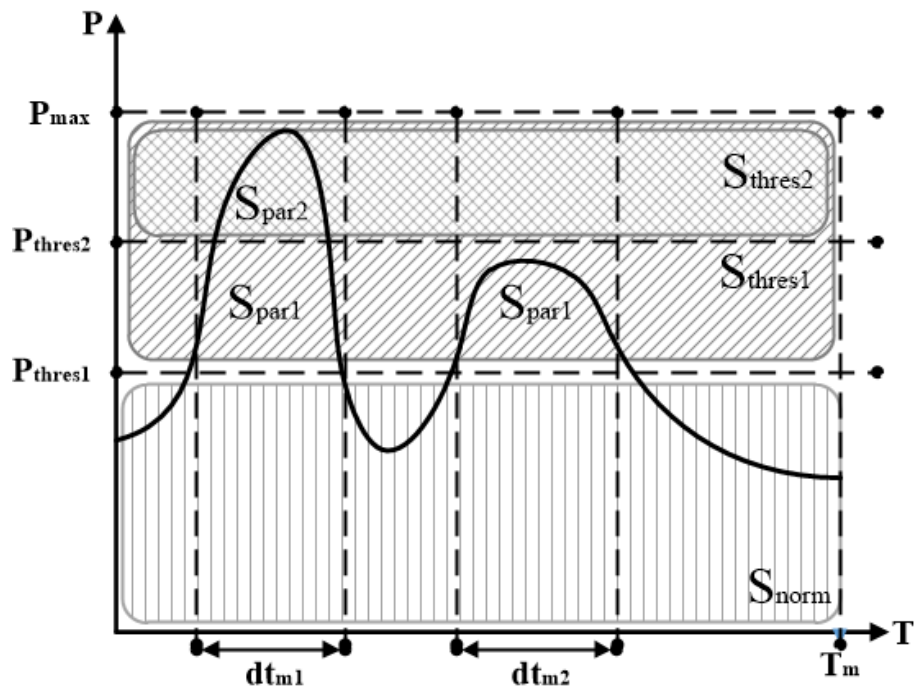


Рисунок 2.9 - Оценка качества сетевого соединения по величине значения параметра

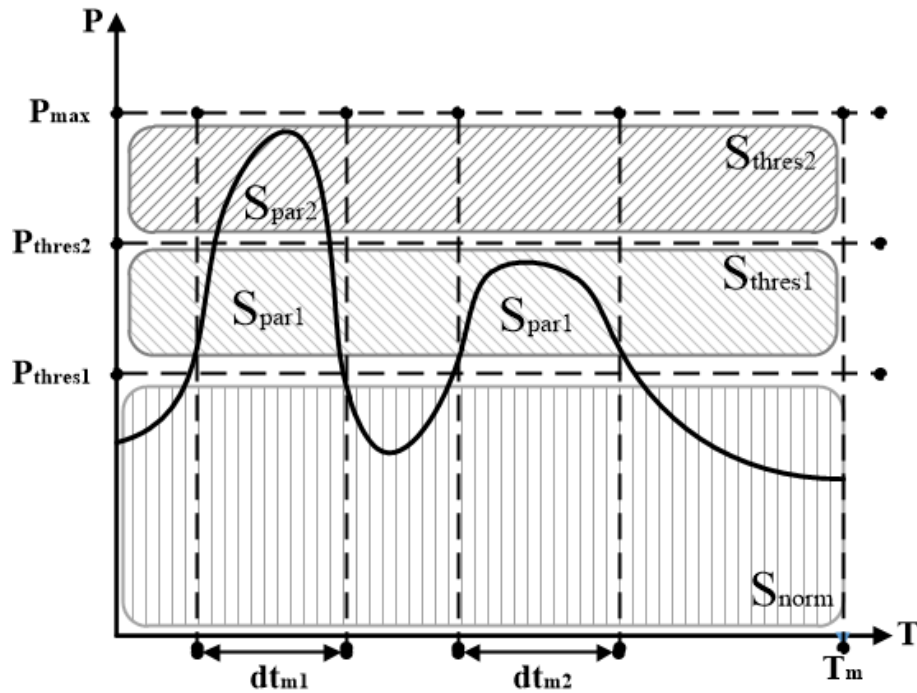


Рисунок 2.10 - Оценка «производительности» сетевого соединения в межпороговых интервалах значений параметра

Получаемые значения показателя степени ухудшения качества работы сетевого соединения для различных классов трафика при проведении оценки по величине превышения значением параметра порогового значения будут вычисляться согласно рисунка 2.9 по формулам

$$S_{thres1} = \int_0^{T_m} (P_{max}(t) - P_{thres1}(t))dt, \quad (2.7)$$

$$S_{thres2} = \int_0^{T_m} (P_{max}(t) - P_{thres2}(t))dt, \quad (2.8)$$

для  $P_{thres2} < P(t) \leq P_{max}$

$$S_{par2} = \int_0^{T_m} (P(t) - P_{thres2}(t))dt, \quad (2.9)$$

для  $P_{thres1} < P(t) \leq P_{max}$

$$S_{par1} = \int_0^{T_m} (P(t) - P_{thres1}(t))dt, \quad (2.10)$$

Значения формируемых показателей качества (2.6) с учетом (2.7), (2.8), (2.9), (2.10) рассчитываются по формулам

$$Q_{p1} = \left( 1 - \left( \frac{S_{par1}}{S_{thres1}} \right)^{e^{-(1-T_{thres1}/T_{av1})}} \right) * 100\%, \quad (2.11)$$

$$Q_{p2} = \left( 1 - \left( \frac{S_{par2}}{S_{thres2}} \right)^{e^{-(1-T_{thres2}/T_{av2})}} \right) * 100\%. \quad (2.12)$$

Получаемые значения показателя степени ухудшения качества работы сетевого соединения для различных классов трафика при проведении оценки по «производительности» передачи пакетного трафика по диапазонам значений параметра будут вычисляться согласно рисунка 2.10 по формулам

$$S_{thres1} = \int_0^{T_m} (P_{thres2}(t) - P_{thres1}(t))dt, \quad (2.13)$$

$$S_{thres2} = \int_0^{T_m} (P_{max}(t) - P_{thres2}(t))dt, \quad (2.14)$$

для  $P_{thres2} < P(t) \leq P_{max}$

$$S_{par2} = \int_0^{T_m} (P(t) - P_{thres2}(t))dt, \quad (2.15)$$

для  $P_{thres1} < P(t) \leq P_{thres2}$

$$S_{par1} = \int_0^{T_m} (P(t) - P_{thres1}(t)) dt. \quad (2.16)$$

Значения формируемых показателей качества (2.6) с учетом (2.13), (2.14), (2.15), (2.16) рассчитываются по формулам

$$Q_{p1} = \left( 1 - \left( \frac{S_{par1}}{S_{thres1}} \right)^{e^{-(1-T_{thres1}/T_{av1})}} \right) * 100\%, \quad (2.17)$$

$$Q_{p2} = \left( 1 - \left( \frac{S_{par2}}{S_{thres2}} \right)^{e^{-(1-T_{thres2}/T_{av2})}} \right) * 100\%. \quad (2.18)$$

Оценка по «производительности» передачи пакетного трафика по диапазонам значений параметра позволяет выполнять анализ и оценку величин «всплесков» значений параметра в областях допустимых значений и определять необходимость степени модернизации сетевых соединений в плане расширения или перераспределения классов трафика по сетевым соединениям Коэффициент модернизации определяется формулой

$$K_m = \frac{Q_{p2}}{Q_{p1}}.$$

Чем больше значение  $K_m$ , тем более быстрее требуется модернизация сетевого соединения. Анализ роста значения  $K_m$  для сетевого соединения по величине изменения и длительности времени, за которое произошло изменение, позволяет строить прогноз по длительности оставшегося времени до полной непригодности сетевого соединения для передачи трафика любых классов. Данный функционал



обеспечивает реальную экономическую эффективность для операторов связи в плане своевременности планирования технических мероприятий для поддержания производительности сети на должном уровне.

При использовании для оценки качества сетевого соединения нескольких пороговых значений будем иметь некоторый набор значений  $Q_p$ . При этом наиболее критичным является минимальное значение  $Q_p$ , как определяющее степень наибольшей деградации качества сетевого соединения для передачи трафика различных классов. В этом случае с учетом (2.11), (2.12) и (2.17), (2.18) итоговое значение  $Q_p$  определяется формулой

$$Q_p = \text{MIN}(Q_{p1}, Q_{p2}, \dots, Q_{pn}),$$

где  $n$  – количество пороговых значений (максимальное значение соответствует количеству классов трафика, передаваемых по сетевому соединению).

Аналогичная многопороговая оценка качества работы сетевых соединений может производиться в сторону уменьшения значений параметра при задании пороговых значений по минимальному значению оцениваемого параметра («зеркальное» отображение вышеописанной многопороговой оценки).

## **2.5. Дискретная интегральная оценка качества работы сетевого соединения**

В случае дискретной оценки превышения значением параметра порогового значения интерес представляет сам факт превышения порогового значения без учета величины превышения. В этом случае имеем вырожденную ситуацию вышеописанного однопорогового метода, когда имеются данные только о длительности превышения порогового значения по времени и отсутствует величина превышения значением оцениваемого параметра порогового значения. В такой ситуации формула для получения значения интегрального показателя

степени ухудшения качества работы сетевого соединения на интервале времени проведения оценки (2.6) имеет следующий общий вид

$$Q_p = \left(1 - \frac{T_{thres}}{T_m}\right) * 100\%.$$

Дискретная оценка требуется в случае, когда пороговое значение разделяет между собой области целевых и недопустимых значений оцениваемого параметра.

## **2.6. Оценка качества услуг связи со стороны пользователя**

Интегральный показатель качества позволяет характеризовать качество работы сетевого соединения на интервале времени проведения оценки с учетом изменения профиля значений оцениваемого параметра, наличия нелинейной составляющей в изменении значений оцениваемых параметров (нормативных показателей качества) и с учетом статистической достоверности данных о значениях параметра за время проведения оценки. Такой подход к формированию интегральной оценки качества работы сетевого соединения аналогичен подходу к формированию значения восприятия качества услуги связи со стороны пользователя (QoE) согласно рекомендации МСЭ [51] и рекомендации Broadband Forum (BBF) [149]. Зависимость значений QoE от значений QoS в наиболее часто используемом в научной литературе виде представлена на рисунке 2.11.

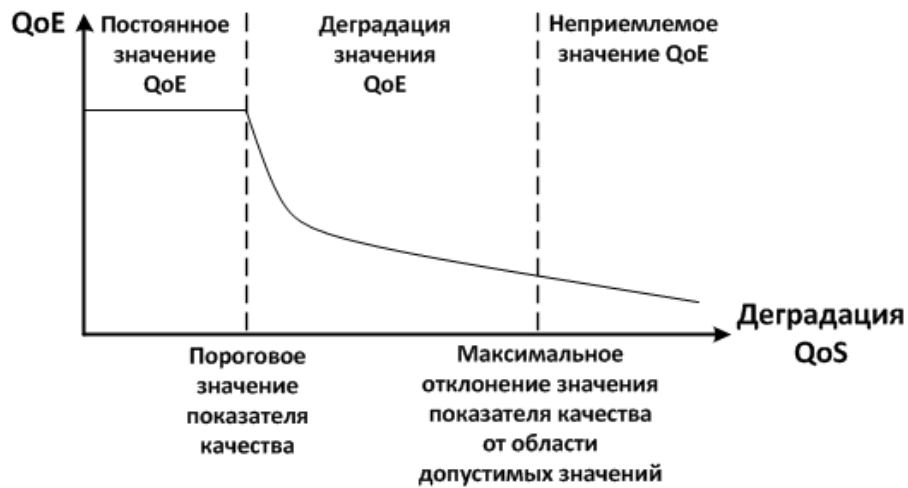


Рисунок 2.11 - График зависимости значений QoS и QoE

Область с постоянным значением QoE обеспечивает удовлетворенность пользователей качеством предоставляемых услуг связи. Область с деградацией значений QoE относится к области возникновения недовольств со стороны пользователей качеством предоставляемых услуг связи и по мере ухудшения значений QoE увеличивается вероятность отказа пользователей от услуг оператора связи. При неприемлемых значениях QoE пользователи начинают отказываться от услуг связи со стороны оператора в массовом порядке.

В ходе проведения исследований в рамках данной диссертационной работы получена расширенная интерпретация зависимости значений QoE от значений QoS, которая представлена на рисунке 2.12. Представленная на рисунке 2.12 зависимость QoE от QoS описывает наиболее часто встречающиеся в сети оператора связи распределения таких значений по указанным в договорах уровнях предоставления услуг связи (SLA), нормативным значениям показателей QoS, уровням пользовательских ожиданий. Из анализа представленной зависимости можно сделать вывод, что основной задачей обеспечения QoS для сетевых соединений на сети связи является совмещение значений нормативных ограничений по значениям показателей QoS с неприемлемым для пользователей значением показателей QoS. В идеале, неприемлемое для пользователей значение показателей QoS должно быть более установленных в нормативных документах пороговых значений показателей QoS.

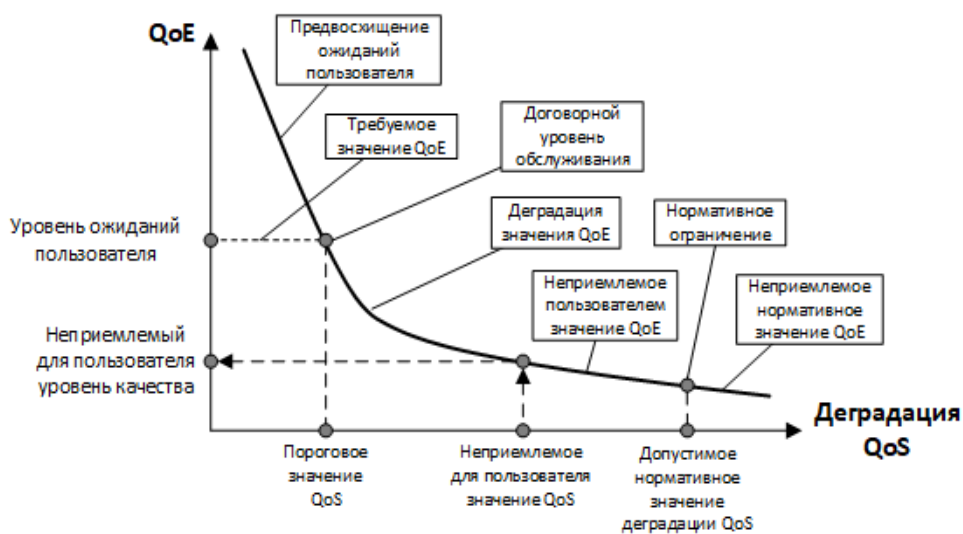


Рисунок 2.12 - Взаимосвязь показателей QoE и QoS в сетях операторов связи

Согласно рекомендации ITU-T [41] в сети связи существует несколько значений QoS, представленных на рисунке 2.13.

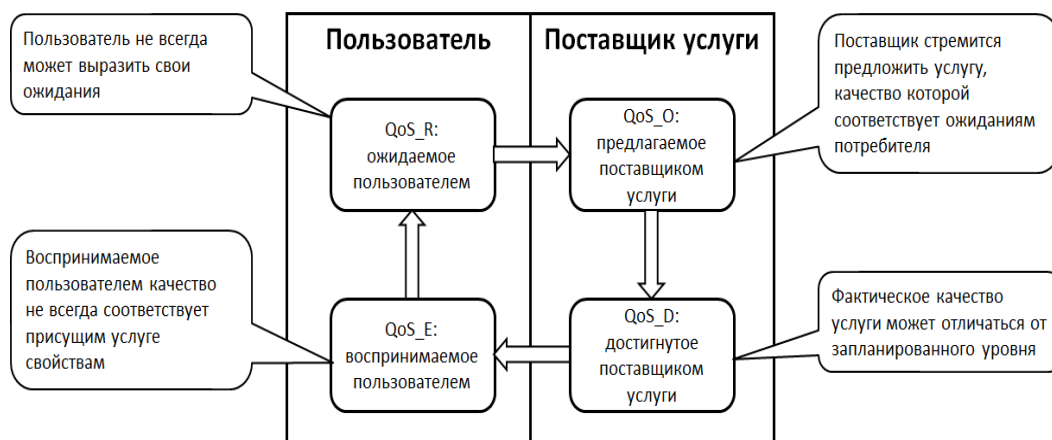


Рисунок 2.13 - Значения QoS в сети связи

В соответствии с рекомендацией ITU-T [150] значение QoE со стороны пользователя можно определить следующим образом

$$QoE = \frac{QoS_E}{QoS_R}$$

а значение QoE со стороны оператора можно представить в виде

$$QoE = \frac{QoS_D}{QoS_O},$$

где  $QoS_E$  – воспринимаемое пользователем значение QoS,  
 $QoS_R$  – требуемое/ожидаемое пользователем значение QoS,  
 $QoS_D$  – достигнутое оператором значение QoS,  
 $QoS_O$  – предлагаемое оператором связи значение QoS.

Вполне очевидно, что качество услуги связи в первую очередь определяется качеством работы сети связи. В дальнейшем качество может быть улучшено некоторым образом на уровне приложения на стороне пользователя или сервисной подсистемы. Однако эти улучшения ограничены величинами ухудшения качества со стороны сети связи. Так, например, высокий уровень потерь в сети связи может быть скомпенсирован путем повторной передачи пакетов данных, но возможные ограничения на длительность времени передачи пакета могут не позволить выполнить необходимое количество повторных передач пакета данных. В результате, в математической модели можно предположить, что качество услуги связи на основании пользовательской оценки (QoE) меньше или равно значения оценки качества передачи данных по сети  $\alpha$  в интересах услуги связи. Величину возможного улучшения или ухудшения качества предоставления услуги связи со стороны пользовательского приложения можно определить в виде некоторого коэффициента  $\gamma$ , который будет описывать взаимосвязь значений оценки качества услуги связи на уровнях сети и пользовательских ощущений. Взаимосвязь значений показателей QoE с показателями QoS на примере времени задержки [59] представлена на рисунке 2.14.

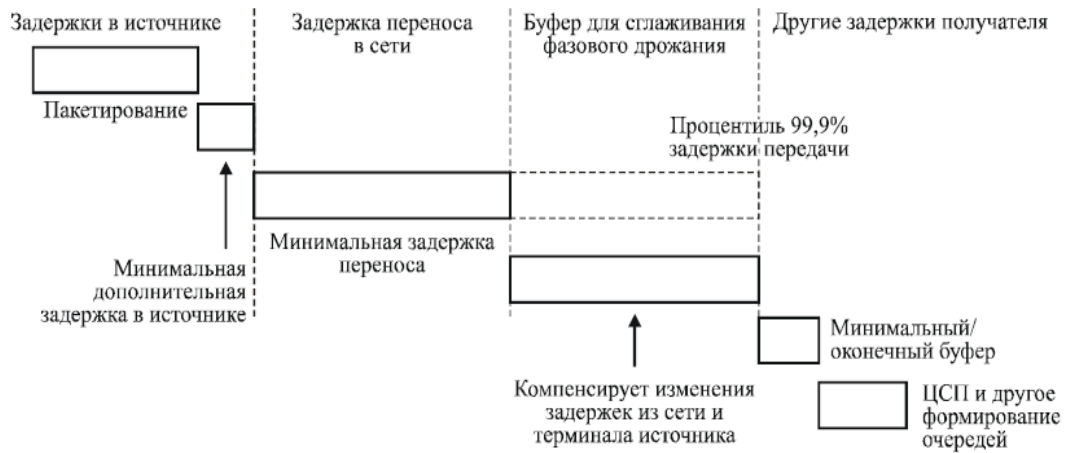


Рисунок 2.14 - Общее время задержки передачи пакетов данных при предоставлении услуг связи

Уровень потерь с точки зрения пользовательских систем определяется следующим образом [62]

$$SDL = 1 - \frac{(TPS - NL - ECL - DBD - RD)}{TPS},$$

где  $SDL$  – суммарное значение потерь,

$TPS$  – общее количество переданных пакетов данных,

$NL$  – количество пакетов, потерянное при передаче в сети связи,

$ECL$  – количество пакетов, потерянное в результате ошибок при передаче пакетов,

$DBD$  – количество пакетов, сброшенное в буфере, предназначенном для компенсации джиттера при передаче пакетов,

$RD$  – количество пакетов с нарушением порядка следования.

Переход от показателей сетевой производительности сети с коммутацией пакетов, работающей с использованием для передачи пакетов данных IP-протокола, к общим показателям качества при передаче пакетов данных представлен в таблице 2.12 [62].

Таблица 2.12 - Обзор показателей NP для IP-сети и их отображение в общие показатели при предоставлении услуг связи

<b>Показатель в IP-сети</b>	<b>Переход к общему показателю</b>	<b>Общий показатель</b>
Задержка передачи (IPTD, средняя)	IPTD + задержка на стороне передачи + задержка на стороне приема	Средняя задержка пользователь–пользователь
Изменения задержки (IPDV, процентиль 99,9% минус минимум)	Объединить с распределением изменения задержки на стороне передачи	Влияет на задержку на стороне приема или потерю аудиокадров
Скачок задержки (возможно зарегистрированный, например в RFC 3393)	Может вызываться изменением трассы/устройства в сети или может появляться только на выходе буфера, сглаживающего фазовое дрожание	Неоднородность временной шкалы аудиокадров
Ошибочные пакеты (заголовки)	Потери на сетевом уровне (IPErr) + потери на транспортном уровне (UDPErr + RTPErr)	Потеря аудиокадров (отбрасывание пакета или кадра кодека)
Перестроенный пакет (Добавление VII/Y.1540)	(может считаться потерянным)	Потеря аудиокадров
Потерянный пакет	Потеря IP-пакета + (все аудиодефекты)	Потеря аудиокадров (предварительное маскирование)
Жесткая блокировка потерь IP-пакетов (IPSLB)	(зависит от длительности блока)	Отключение соединения
Потерянные комбинации (например, RFC 3357)	Потеря/поступление полного потока	Длина пачки/потеря последующего пакета
Скорость пакетов (получена из других системных характеристик)	Разность между генераторами АЦП и ЦАП терминалов источника и получателя	Смещение частоты системы (относительно получателя)

В математическом виде зависимость значений QoE от значений QoS можно описать следующим образом [119]

$$\frac{\partial QoE}{\partial QoS} = -\gamma * (\alpha - QoE), \quad (2.19)$$

где  $\alpha$  – качество класса сервиса на сетевом уровне,  
 $\gamma$  – параметр взаимосвязи значений QoS и QoE.

В результате функциональную зависимость QoE от QoS (2.19) можно описать в виде

$$QoE(QoS) = \alpha - \beta * \exp(-\gamma * QoS), \quad (2.20)$$

где  $\beta$  – параметр класса сервиса.

Для конкретных показателей QoS выражение (2.20) для оценки зависимости QoE от показателей сетевой производительности принимает вид

$$\begin{aligned} QoE(PLR) &= \alpha - \beta * \exp(-\gamma * PLR), \\ QoE(Delay) &= \alpha - \beta * \exp(-\gamma * Delay), \\ QoE(Jitter) &= \alpha - \beta * \exp(-\gamma * Jitter), \end{aligned}$$

где  $PLR$  – уровень потерь пакетов данных.

Если описать влияние параметров сетевой производительности в виде вектор-параметра  $X$ , определяемого значениями уровней загрузки  $U$  и потерь  $L$ , величинами задержки  $D$ , джиттера  $J$  и полосы пропускания  $B$ , получим следующее выражение зависимости QoE от QoS [151]

$$QoE(QoS(X)) = Q_r * (1 - QoS(X))^{\left(\frac{QoS(X) * A}{R}\right)}, \quad (2.21)$$

где  $Q_r$  – коэффициент влияния значения QoS на значение QoE,

$A$  – константа, описывающая класс трафика,

$R$  – константа, описывающая структуру трафика соответствующего класса.



Сравнив между собой метод формирования значений интегральных показателей качества (2.6) и методы формирования взаимосвязи значений QoE и QoS (2.21), описанные выше, можно заметить, что они имеют общий подход к формированию оценок качества. Соответственно, интегральные показатели качества позволяют оценить влияние показателей сетевой производительности на оценку качества восприятия услуг связи со стороны пользователей (QoE), что подразумевает возможность косвенного управления значением QoE путем управления значениями сетевой производительности (NP), как это описано в соответствующих рекомендациях МСЭ [10, 11, 152, 153, 154].

В качестве примеров взаимосвязи значений QoE и QoS можно рассмотреть следующие ситуации. На рисунке 2.15 представлена зависимость обеспечения величины полосы канала связи для пользователя от используемой технологии передачи данных и длины линии связи от узла связи до места размещения пользовательского оборудования.

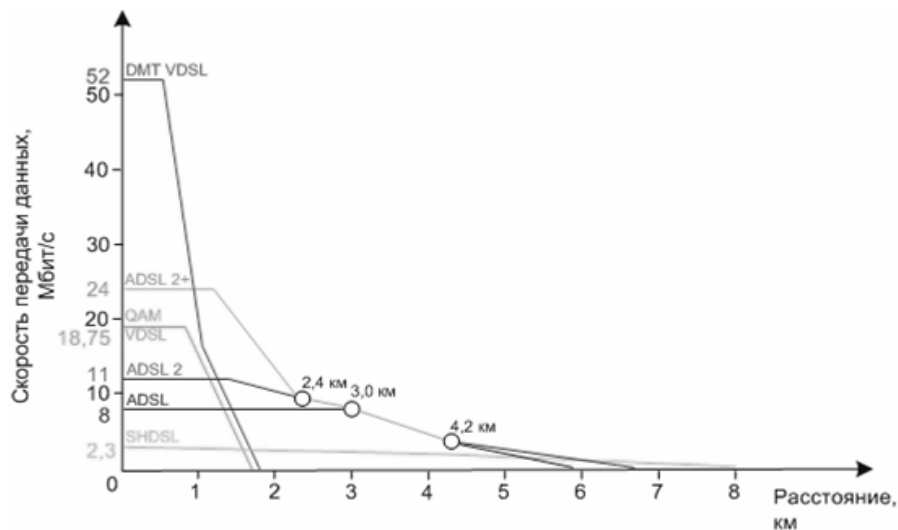


Рисунок 2.15 - Зависимость величины полосы канала связи для пользователя от используемой технологии передачи данных и длины линии связи до места размещения пользовательского оборудования

Величина полосы канала связи определяет перечень доступных для пользователя услуг связи (пользователь не может получать услуги связи с

требованиями к полосе канала более, чем доступна для пользователя) или время, необходимое для передачи/приема определенного объема данных пользователем.

На рисунке 2.16 представлено влияние скорости работы сервисных систем, в частности сервера со службой DNS и WEB-сервера, на время получения WEB-страницы пользователем, согласно рекомендации ITU-T [57]. При этом пользовательской оценкой времени получения WEB-страницы будет время, сформированное с учетом длительности времени обработки запроса сервером DNS и длительности времени подготовки WEB-страницы к отправке пользователю со стороны сервера.

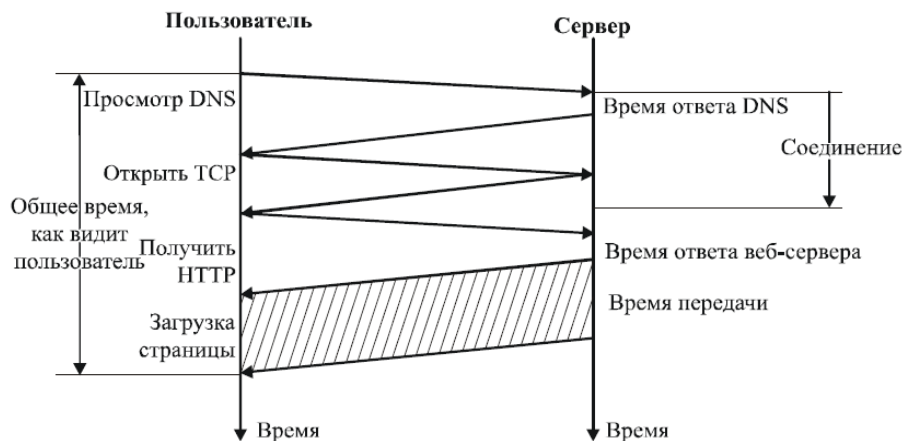


Рисунок 2.16 - Влияние скорости работы сервисных систем на время загрузки WEB-страницы пользователем

## 2.7 Выводы по разделу 2

На основании вышеописанного можно сделать вывод, что интегральные методы оценки производительности сетевых соединений позволяют решать следующие практические задачи:

1. Формировать оценку качества работы сетевых соединений за произвольное количество временных интервалов расчета нормативных

показателей качества (интервалы времени для съема статистических данных при расчете значений показателей сетевой производительности). Это позволяет формировать оценку качества работы сетевых соединений за время предоставления услуг связи.

2. Формировать оценку качества работы сетевых соединений с учетом технологических требований конкретной услуги связи или их набора. Это позволяет распределять трафик по сетевым соединениям с учетом степени их пригодности/соответствия для предоставления услуг связи или их набора [155].

3. Нелинейность оценочной функции на начальном участке позволяет выявлять кратковременные отклонения значений показателей качества от области допустимых значений. Линейность оценочной функции на длительных интервалах времени позволяет исключить деградацию качества для процессов с длительным и квазистабильным превышением значениями показателей качества установленного порогового значения.

4. Величина отклонения значений показателя качества от области целевых значений и длительность временного интервала таких отклонений напрямую влияет на значение оценки качества со стороны пользовательского опыта (QoE) [60, 61]. Следовательно, относительная оценка качества с помощью интегральных показателей вносит свой вклад в контроль обеспечения поддержания значения QoE на соответствующем уровне.

5. Сопоставимость методов формирования значений оценок QoS и QoE позволяет выполнять оценку степени влияния значений показателей сетевой производительности на качество предоставления услуги связи для пользователей в целом.

6. Значение величины относительной оценки качества сетевого соединения позволяет выполнять приоритезацию проблемы влияния качества работы сетевого соединения на качество работы сети и обеспечивает более высококачественное планирование работ по поддержанию качества работы сети связи в целом. Это является прямым экономическим эффектом для оператора связи.

## Раздел 3. Интегральные показатели качества

### 3.1. Формирование интегральных показателей качества работы сетевых соединений

На основании анализа нормативной документации, описывающей показатели NP для сетей на основе IP-протокола [15, 16, 17, 126, 129] можно выделить следующие основные показатели:

- Уровень доступности сервиса передачи данных,
- Уровень загрузки сетевого соединения,
- Вариация величины времени задержки (джиттер) передачи пакетов,
- Уровень ошибок (доля переданных с ошибкой) пакетов,
- Уровень потерь (доля потерянных) пакетов,
- Уровень сброса (доля сброшенных / отказанных в обработке) на сетевом устройстве / элементе пакетов,
- Уровень нарушения порядка (доля с нарушением порядка следования) пакетов,
- Уровень дублирования пакетов.

Вполне очевидно, что между показателями NP существует определенная взаимосвязь, которая обеспечивает их синергетическое взаимодействие. Значение уровня потерь складывается из значений уровня ошибок и уровня сброса пакетов/кадров (в зависимости от уровня модели OSI, на котором осуществляется сброс) [156], пакеты с значением времени задержки свыше некоторого установленного порога считаются потерянными на приемной стороне [62]. Значение уровня доступности может быть улучшено введением резервирования сетевых соединений в сети связи. Значение уровня загрузки сетевого соединения может быть уменьшено путем перераспределения пакетного трафика между

несколькими сетевыми соединениями (в результате использования функции агрегирования сетевых соединений для передачи пакетного трафика). Величина времени задержки может быть уменьшена путем использования более высокоскоростных сетевых соединений или выбором пути передачи трафика с меньшим количеством вносящих задержку в обработку трафика активных сетевых элементов. На величину времени задержки и джиттер оказывает влияние размер пакетного буфера/очереди в виде широко известной проблема «buffer bloat», которая может быть решена настройкой оптимального размера буфера с учетом размеров помещаемых в него пакетов и частоты их следования. Значение уровня ошибок может быть уменьшено путем использования более качественных систем передачи пакетного трафика. Значение уровня нарушения порядка пакетов может быть уменьшено или отказом от балансировки трафика между несколькими сетевыми соединениями, особенно имеющих разные скорости передачи трафика, или использованием функции балансировки пакетного трафика по нескольким сетевым соединениям с учетом IP-адресов отправителя и получателя. Значение уровня дублирования пакетов, определяемое повторами в передаче пакетов на 4-5 уровнях модели OSI (функция оконечных/сервисных систем) в следствие потерь (ошибок, сбросов) и задержек пакетов, может быть уменьшено путем корректировки значений соответствующих показателей сетевой производительности. На значение уровня загрузки оказывает влияние дополнительный трафик, который является следствием повторной передачи пакетов, т.к. с точки зрения сетевого уровня каждый вновь поступивший пакет рассматривается как новый [16].

На рисунке 3.1 представлены графики, описывающие зависимость значений показателей качества услуги связи от уровня загрузки сетевого соединения, по которому осуществляется передача пакетного трафика при предоставлении услуги связи [138]. При этом требования со стороны пользовательских систем при предоставлении услуги связи могут ограничивать уровень загрузки сетевого соединения [157].

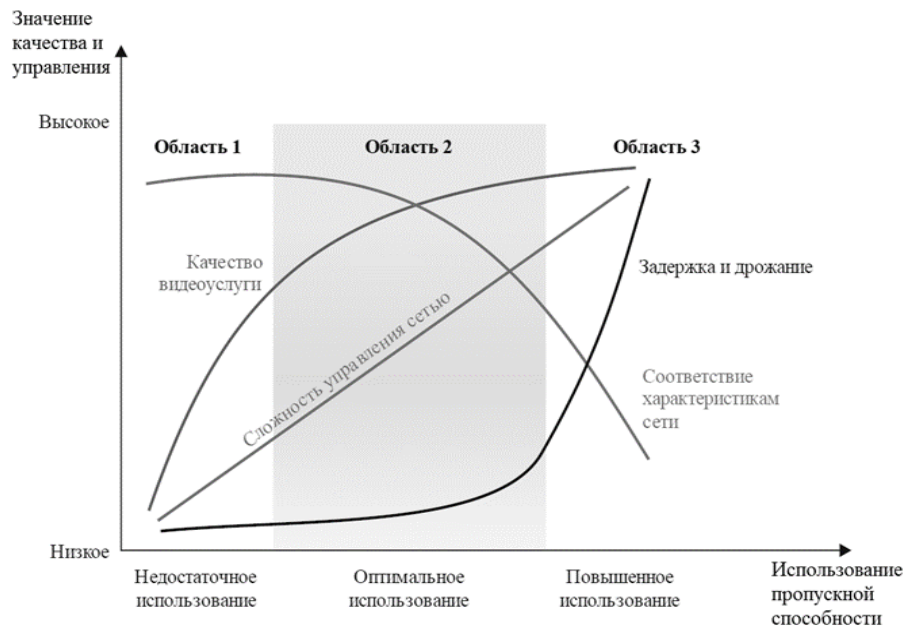


Рисунок 3.1 - Изменение значений показателей качества услуги связи в зависимости от уровня загрузки сетевого соединения

На основании проведенных исследований нормативной и технической документации и с учетом выявленных взаимосвязей между нормативными показателями сетевой производительности сформирована модель взаимосвязи показателей сетевой производительности для сетей с коммутацией пакетов, представленная на рисунке 3.2 [158]. В предложенной модели взаимосвязи показателей сетевой производительности показатели производительности разделены на следующие категории в зависимости от типа оцениваемых характеристик сети связи:

- количественные показатели – оценивают количественные параметры передаваемых пакетов данных в плане отсутствия или наличия искажений при передаче пакетов данных по сети связи, а также учет недоставленных пакетов данных,

- временные показатели – оценивают значения интервалов времени при доставке пакетов данных от отправителя к получателю и величины изменений длительности таких интервалов времени, а также общую длительность интервала времени, когда сеть была готова обслужить передачу пакетов данных за интервал времени проведения наблюдений/измерений,

- топологические/архитектурные показатели – оценивают параметры работы сети связи, которые напрямую связанные с организацией физической или логической топологии сети, обязательность и способ контроля данных показателей определяется с учетом используемой транспортной технологии.

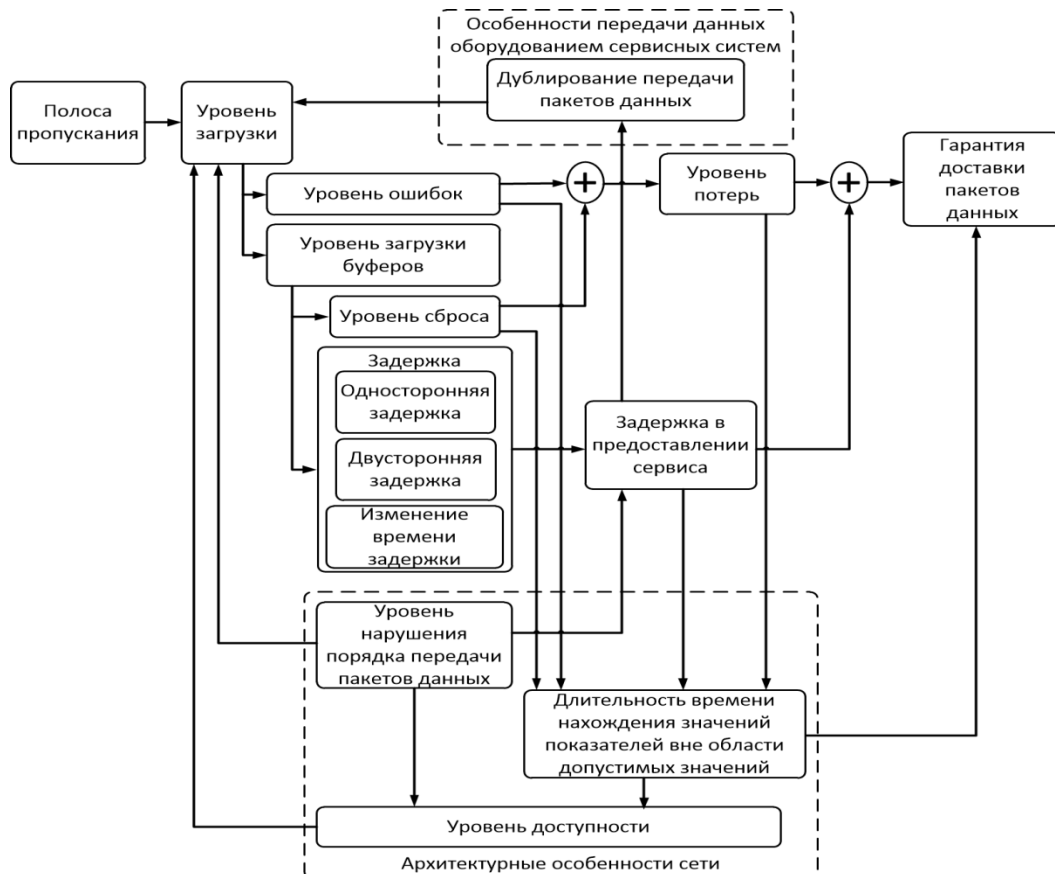


Рисунок 3.2 - Модель взаимосвязи показателей сетевой производительности для сетей с коммутацией пакетов

Особенностью предложенной модели взаимосвязи показателей сетевой производительности для сетей с коммутацией пакетов является следующее:

- описание взаимосвязи между собой нормативных показателей качества,
- возможность проведения единого анализа требований к сетевым ресурсам со стороны предоставляемых на сети услуг связи с формированием в итоге суммарных требований к качеству работы сетевой инфраструктуры, которые могут быть использованы при формировании технического задания на разработку решений по построению и модернизации сети или ее сегментов,

- возможность проведения технической диагностики работы сети при назначении в соответствии с предложенной моделью пороговых значений и весовых коэффициентов к показателям качества в соответствии с требованиями со стороны услуг связи (составлении шаблонной матрицы качества услуги), благодаря чему обеспечивается выявление услуг с деградацией качества их предоставления в соответствии с изменениями во времени показателей качества для принятия соответствующих мер организационно-технического характера для устранения возникающих деградации качества,

- модель представляет собой описание «дерева отказов» (Fault Tree Analysis - FTA) при перегрузке канала связи или изменении значений нормативных показателей качества по ходу диаграммы модели.

Классический вид дерева отказов представлен на рисунке 3.3. Путем логических сопоставлений можно заметить, что модель оценки качества работы сети и дерево отказов полностью сопоставимы. Например, высокая интенсивность пакетного трафика может привести к переполнению пакетных буферов на сетевом устройстве с возникновением высокой задержки (для приоритетного трафика) или прекращением дальнейшей передачи пакетов (для низкоприоритетного трафика) на сетевом устройстве и отказу в предоставлении услуг связи в конечном итоге.

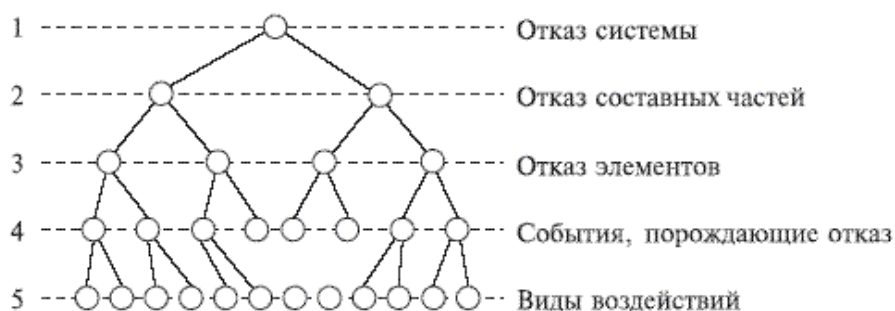


Рисунок 3.3 - Дерево отказов

На итоговое значение показателей сетевой производительности может оказывать влияние используемое в сети оборудование, архитектура/топология построения сети и параметры работы сервисных подсистем, обеспечивающих



предоставление непосредственно услуг связи. Для обеспечения качества предоставления услуг связи необходимо следить за значениями показателей качества на уровне сетевого оборудования и сервисных подсистем, а также использовать на физическом или логическом уровне соответствующую архитектуру/топологию сети, наиболее приемлемые при предоставлении соответствующих услуг связи. В таблице 3.1 представлено влияние со стороны сетевого оборудования, архитектуры сети и сервисных подсистем услуг связи на качество предоставления услуг связи на основе IP-протокола [15, 17].

Таблица 3.1 - Влияние на значение показателей сетевой производительности на основе IP-протокола со стороны сетевого оборудования, архитектуры сети и сервисных подсистем услуг связи

<b>Показатели сетевой производительности</b>	<b>Сетевое оборудование</b>	<b>Архитектура сети</b>	<b>Сетевые подсистемы сервисных систем</b>
PIA	Да	Да	Да
IPSU	Да	Да	Да
IPTD	Да	Да	Да
IPDV	Да	Да	Да
IPER	Да	Нет	Да
IPLR	Да	Нет	Да
IPDR	Да	Нет	Да
IPRR	Нет	Да	Нет
IPDupR	Нет	Нет	Да

С учетом того факта, что на уровнях модели OSI с 1 по 3, на которых происходит в основном функционирование сети связи и которые относятся к сетевому/транспортному уровню в модели сетей связи следующих поколений (NGN) отсутствуют в структуре заголовков пакетов поля с временными метками, временные показатели сетевой производительности не рассматриваются в рамках проводимого исследования.

Топологические/архитектурные показатели не рассматриваются в рамках исследования в виду того, что вопросы исследования топологий пакетных сетей требуют отдельного и масштабного исследования.

В рамках исследования разработаны интегральные показатели качества для количественных нормативных показателей. В качестве интегральных показателей сетевой производительности предложены следующие показатели:

Коэффициент пропускной способности *КПС* - позволяет проводить оценку производительности сетевого соединения по запасу пропускной способности используемых физических или логических портов. В качестве параметра при расчете используется уровень загрузки порта сетевого соединения

$$КПС = \left( 1 - \left( \frac{S_U}{S_{Ut}} \right)^{e^{-(1-T_{thres}/T_{av})}} \right) * 100\%, \quad (3.1)$$

где  $S_U$  – фактическое интегральное значение оценки уровня загрузки сетевого соединения,

$S_{Ut}$  – возможное интегральное значение оценки уровня загрузки сетевого соединения.

Коэффициент качества приоритетных очередей *ККПО* - позволяет проводить оценку уровня потерь пакетов приоритетного трафика. В качестве параметра при расчете используется уровень сброса пакетов в очередях (буферах) портов сетевого соединения или значение уровня потерь при отсутствии данных по значениям уровня сброса

$$ККПО = \left( 1 - \left( \frac{S_{PQ}}{S_{PQt}} \right)^{e^{-(1-T_{thres}/T_{av})}} \right) * 100\%, \quad (3.2)$$

где  $S_{PQ}$  – фактическое интегральное значение оценки уровня потерь в приоритетной очереди,

$S_{PQt}$  – возможное интегральное значение оценки уровня потерь в приоритетной очереди.

Коэффициент качества неприоритетных очередей  $KKHO$  - позволяет проводить оценку уровня потерь пакетов неприоритетного трафика. В качестве параметра при расчете используется уровень сброса пакетов в очередях (буферах) портов сетевого соединения или значение уровня потерь при отсутствии данных по значениям уровня сброса

$$KKHO = \left( 1 - \left( \frac{S_{CQ}}{S_{CQt}} \right)^{e^{-(1-T_{thres}/T_{av})}} \right) * 100\%, \quad (3.3)$$

где  $S_{CQ}$  – фактическое интегральное значение оценки уровня потерь в неприоритетной очереди,

$S_{CQt}$  – возможное интегральное значение оценки уровня потерь в неприоритетной очереди.

Коэффициент качества сетевого соединения  $KKCC$  - позволяет 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

$$KKCC = \left( 1 - \left( \frac{S_{LQ}}{S_{LQt}} \right)^{e^{-(1-T_{thres}/T_{av})}} \right) * 100\%, \quad (3.4)$$

где  $S_{LQ}$  – фактическое интегральное значение оценки уровня ошибок,

$S_{LQt}$  – возможное интегральное значение оценки уровня ошибок.

На рисунке 3.4 показана взаимосвязь нормативных показателей качества с ключевыми показателями эффективности (КПЭ) сети связи.

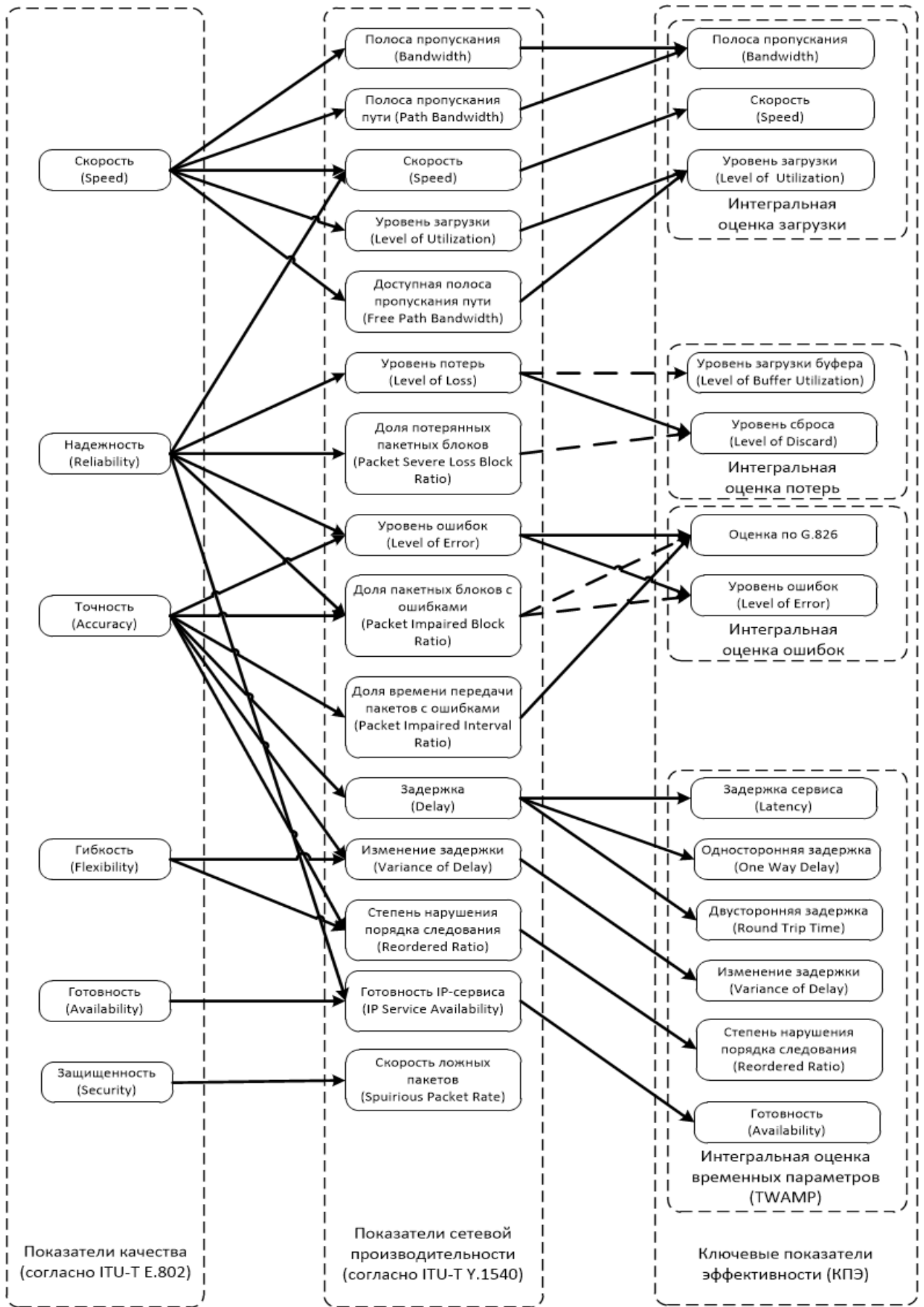


Рисунок 3.4 - Взаимосвязь нормативных показателей качества с ключевыми показателями эффективности сети связи

При этом в качестве значений КПЭ могут быть использованы предложенные интегральные показатели сетевой производительности:

- *КПС* – для интегральной оценки загрузки сетевого соединения,
- *ККПО* и *ККНО* – для интегральной оценки потерь при передаче пакетов через сетевое соединение,
- *ККСС* – для интегральной оценки ошибок при передаче пакетов через сетевое соединение.

Предложенные интегральные показатели могут быть успешно использованы при оценке качества работы сетевых соединений с использованием специальных протоколов, разработанных для оценки качества работы сетевых соединений. В частности, интегральные показатели могут быть сформированы на основании полученных результатов оценки качества работы сетевых соединений с использованием протокола TWAMP [67].

### **3.2. Формирование пороговых значений для расчета интегральных показателей качества**

Для расчета значений *ККПО* (3.2), *ККНО* (3.3), *ККСС* (3.4) необходимо установить пороговые  $P_{thres}$  и максимальные  $P_{max}$  значения для нормативных показателей качества. В качестве значений  $P_{thres}$  и  $P_{max}$  необходимо соответственно использовать наиболее строгое и наименее строгое значения нормативных показателей качества [15, 16, 54, 87, 90] или требований со стороны услуг связи [129] в отношении трафика мультисервисных услуг, передаваемого по сетевому соединению. При этом необходимо учитывать требования по уровням модели OSI, на которых предоставляется услуга связи [124, 127], требования по типам сегментов сети в соответствии с сетевой архитектурой [17] и требования по влиянию значений нормативных показателей на уровень доступности услуг связи

[15, 54, 87, 90] с учетом синергетичности показателей качества. Иллюстрация принципа формирования значений  $P_{thres}$  и  $P_{max}$  представлена на рисунке 3.5.

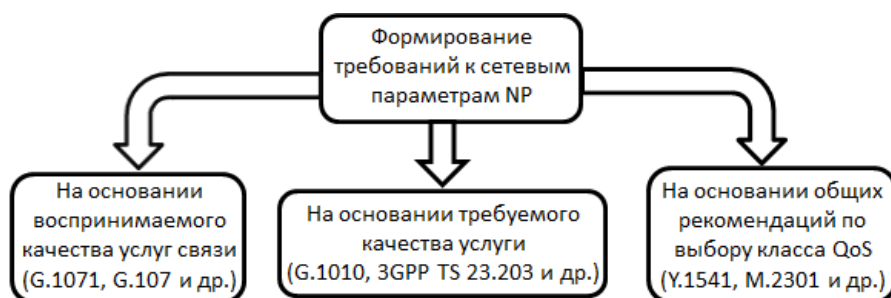


Рисунок 3.5 - Формирование требований к пороговым значениям нормативных показателей качества работы сети с коммутацией пакетов

### 3.2.1. Формирование пороговых значений для коэффициента пропускной способности

В соответствии с нормативной документацией [66, 88, 159, 160, 161] для протокола Ethernet уровень загрузки сетевого соединения изменяется от 76% до 99% в зависимости от размера используемых для передачи данных размеров сетевых кадров. Такое изменение уровня загрузки обусловлено тем фактом, что при использовании для передачи данных протокола Ethernet в сетевом соединении на канальном уровне с каждым пакетом данных передается дополнительный блок служебных данных протокола Ethernet [162, 163, 164, 165, 166]. Размер блока служебных данных имеет фиксированный размер, что приводит к росту вклада передаваемых блоков служебных данных в формирование уровня загрузки сетевого соединения при уменьшении размера блока полезных данных внутри пакета. Иллюстрация влияния размеров используемых сетевых кадров на уровень загрузки сетевого соединения представлена на рисунке 3.6.

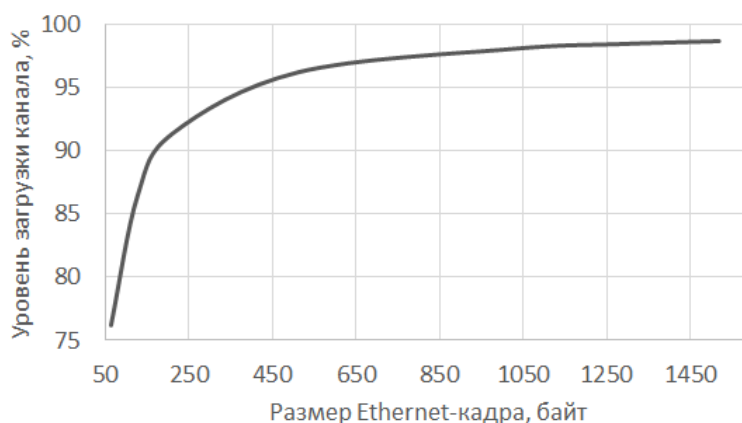


Рисунок 3.6 - Влияния размеров используемых сетевых кадров на уровень загрузки сетевого соединения

Согласно рекомендации МСЭ Y.1541 для высокоприоритетного и чувствительного к временным задержкам трафика значение джиттера установлено равным половине времени задержки передачи пакета данных (допустимая величина времени задержки может изменяться в 2 раза). Согласно теории массового обслуживания, время задержки пакета  $T_d$  в очереди типа M/M/1 определяется по формуле [39]

$$T_d = \frac{U}{(1 - U)} * T_{avg},$$

где  $U$  – уровень загрузки сетевого соединения,

$T_{avg}$  – среднее время обработки пакета в очереди.

Для случая изменения размера обрабатываемых пакетов для очереди типа M/G/1 время задержки пакета  $T_d$  определяется по формуле

$$T_d = \frac{U * V}{(1 - U)} * T_{avg},$$

где  $V$  – коэффициент вариации размера пакета.

График изменения времени обработки пакета в очереди на активном оборудовании связи в зависимости от уровня загрузки сетевого соединения представлен на рисунке 3.7.

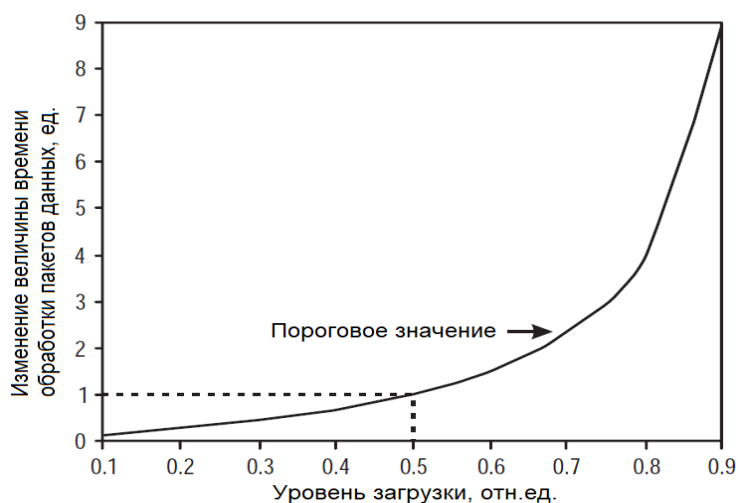


Рисунок 3.7 - График изменения времени обработки пакета в очереди в зависимости от уровня загрузки сетевого соединения

С учетом приведенных формул и согласно теории СМО время обработки пакетов данных в сетях с коммутацией пакетов возрастает в 2 раза при уровне загрузки равном примерно 67%.

С учетом наличия суточных миграций пользователей услуг связи на территории обслуживания оператора связи нагрузка по передаче пакетного трафика на элементы сети изменяется по квазигармоническому закону, что позволяет аппроксимировать изменения уровня загрузки сетевых соединений по синусоидальному закону и при обеспечении в качестве максимума интенсивности трафика 100% уровня загрузки сетевого соединения среднее значение уровня загрузки составляет 70%.

С учетом вышеописанного можно сделать вывод, что выбор в качестве порогового значения при использовании для передачи данных протоколов IP и Ethernet уровня загрузки 70% является оптимальным значением [44] с учетом следующих обстоятельств:



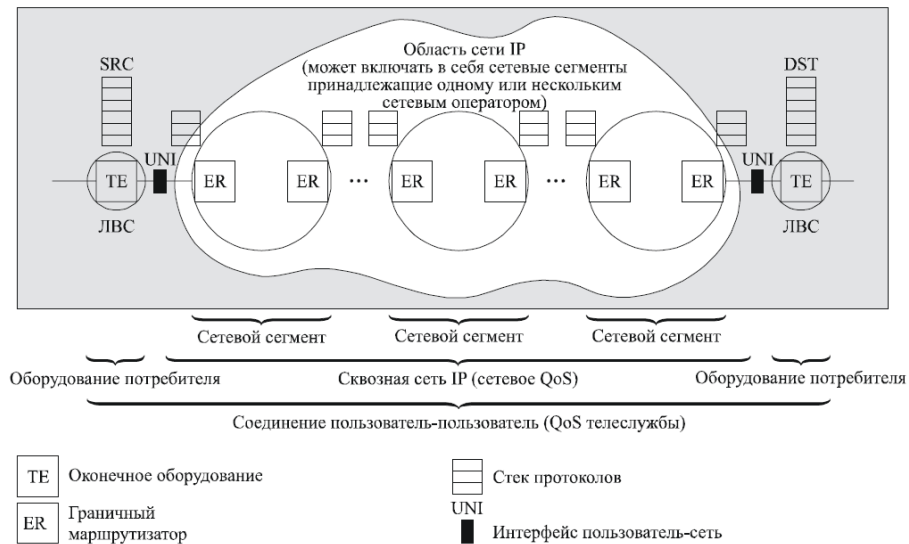
- позволяет выявить приближение к уровню загрузки 77%, который является предельным уровнем загрузки при использовании Ethernet-кадров минимального размера 64 байта,

- указывает на достижение уровня загрузки, при котором время задержки в пакетных очередях/буферах возрастает в 2 раза по сравнению с временем передачи пакетов данных на незагруженных каналах связи (в режиме передачи пакетов данных по каналу связи от одиночного источника трафика),

- позволяет выявить достижение уровнем загрузки максимального значения для квазипериодического изменения уровня загрузки.

### **3.2.2. Формирование пороговых значений для коэффициентов качества приоритетных и непериприоритетных очередей и сетевого соединения**

Согласно нормативной документации [16] для целей оценки сетевой производительности (QoS) при передаче данных между отправителем и получателем в сети с коммутацией пакетов сетевое соединение может быть представлено в виде, изображенном на рисунке 3.8. В нормативной документации [14, 16] установлены требования к показателям сетевой производительности при оценке качества передачи пакетов данных между отправителем и получателем. Такие пороговые значения для показателей сетевой производительности определяют качество работы сети в целом. Количество сетевых сегментов (сетевых устройств), через которые осуществляется передача трафика, может быть различным для разных пользователей и различных услуг связи для одного и того же пользователя. В качестве сетевого сегмента могут выступать сегменты доступа и другие сегменты сети оператора связи, сеть одного из операторов при прохождении трафика между отправителем и получателем по сетям нескольких операторов и т.п.



ПРИМЕЧАНИЕ. – Оборудование потребителя (затененная область) отображено только для наглядности.

Рисунок 3.8 - Сетевое соединение между отправителем и получателем для целей оценки требований к сетевому QoS

Для оценки качества работы сетевых соединений в рамках сетевых сегментов, сетей операторов связи и т.п. существуют пороговые значения показателей качества, установленные соответствующими нормативными документами [17]. С точки зрения оценки качества предоставления конечных сервисов существуют свои требования к значениям показателей качества [129], указанные в соответствующих документах. С учетом вышеперечисленного формируется следующая система уравнений

$$\begin{cases} Q_E = \sum_{i=1}^n Q_{Ei}, \\ Q_E \leq Q_N \leq Q_S, \end{cases}$$

где  $Q_{Ei}$  – значение показателя сетевой производительности в виде уровня потерь, сбросов или ошибок отдельного сетевого элемента,  
 $n$  – количество сетевых элементов, через которые проходит трафик между отправителем и получателем,

$Q_E$  – общая оценка уровня потерь, сбросов или ошибок вдоль пути передачи пакетного трафика,

$Q_N$  – допустимое значение уровня потерь, сбросов или ошибок для сети в целом,

$Q_S$  – допустимое значение уровня потерь, сбросов или ошибок для сервиса в целом.

Вполне очевидно, что значения показателей производительности на уровне сервиса включают в себя суммарную оценку со стороны показателей производительности сетевого соединения и показателей производительности используемого сетевого приложения. В общем виде значение показателя на уровне сервиса должно соответствовать выражению

$$Q_E + Q_A \leq Q_S,$$

где  $Q_A$  – допустимое значение уровня потерь, сбросов или ошибок для сетевого приложения.

Сложность использования вышеуказанного подхода с использованием значений показателей сетевой производительности сетевых элементов состоит в следующем:

- В сети связи может существовать достаточно большое количество вариантов построения маршрутов передачи пакетов данных между отправителем и получателем и текущий вариант маршрута определяется текущим состоянием таблицы маршрутизации трафика. Таблица маршрутизации трафика обладает высокой динамичностью, что приводит к наличию определенной частоты изменения маршрутов в сети связи. При изменении маршрута прохождения трафика необходимо пересчитать значения соответствующих показателей сетевой производительности с учетом показателей производительности для нового набора сетевых элементов на маршруте передачи трафика между отправителем и получателем.

- Показатели сетевой производительности обычно учитывают работу только сетевых портов и связанных с ними систем промежуточного хранения пакетов данных в виде пакетных очередей/буферов. Показатели производительности систем коммутации и т.п. достаточно часто не учитываются в виду отсутствия возможности сбора таких данных на сетевых элементах, т.е. возможность мониторинга сетевой производительности не сетевом элементе зависит от функциональных возможностей по мониторингу работы сетевого элемента.

Одним из наиболее распространенных вариантов решения вышеуказанных проблем и обеспечения качества передачи трафика в интересах конкретного набора отправителей и получателей является использование виртуальных сетевых соединений в виде туннелей, проходящих через некоторый набор сетевых элементов. При этом виртуальный туннель может проходить через сегмент сети, сеть оператора или набор сетей операторов. Примеры использования туннелей для передачи трафика между отправителем и получателем представлены на рисунках 3.9 – 3.11.

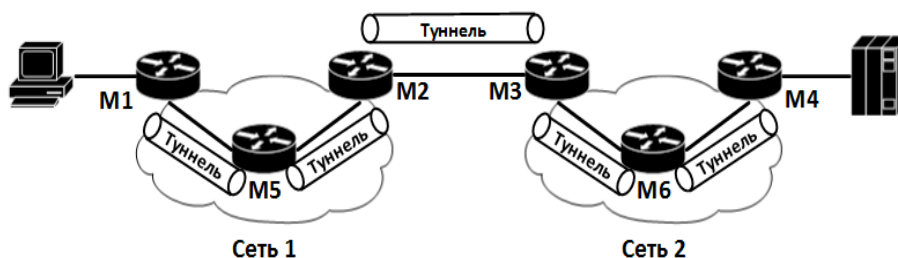


Рисунок 3.9 - Использование виртуальных соединений внутри существующих линий связи

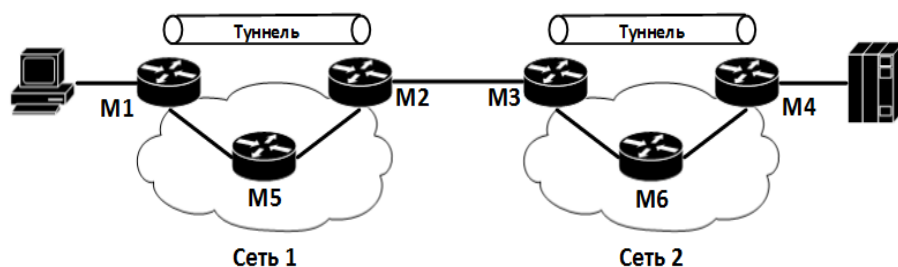


Рисунок 3.10 - Использование виртуальных соединений внутри сети оператора связи

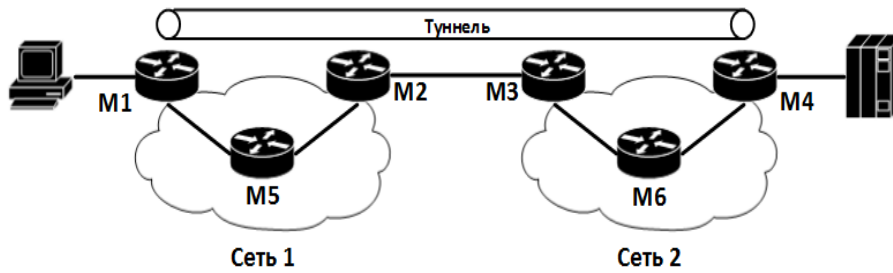


Рисунок 3.11 - Использование виртуальных соединений через сети нескольких операторов связи

При оценке производительности виртуального туннеля автоматически оценивается качество работы всех сетевых элементов, через которые проходит данный туннель, при передаче трафика данного туннеля [167]. На рисунке 3.12 представлен виртуальный туннель, предназначенный для передачи пакетного трафика с использованием технологии многопротокольной коммутации по меткам (MPLS) с использованием протокола Ethernet (EoMPLS) [168].

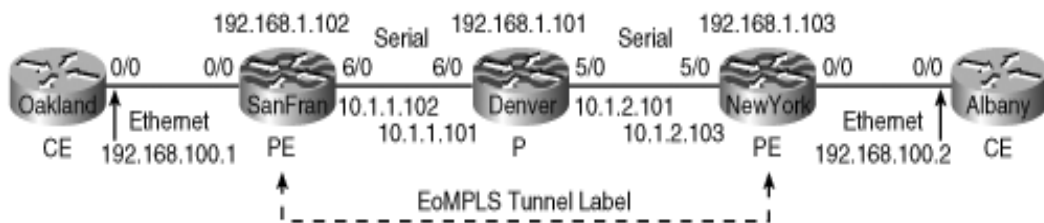


Рисунок 3.12 - Построение виртуального туннеля по технологии EoMPLS

Ниже приведен пример вывода диагностического сообщения на маршрутизаторе SanFran в отношении схемы туннеля, представленной на рисунке 3.12. В разделе статистики работы виртуального туннеля (VC statistics) представлена информация о параметрах работы туннеля, на основании которой могут быть рассчитаны значения показателей сетевой производительности:

```
SanFran#show mpls l2transport vc 100 detail
```

```
Local interface: Et0/0 up, line protocol up, Ethernet up
```

```
Destination address: 192.168.1.103, VC ID: 100, VC status: up
```

.....

*VC statistics:*

*packet totals: receive 16, send 27*

*byte totals: receive 2506, send 3098*

*packet drops: receive 0, seq error 0, send 0*

При этом при выборе пороговых значений для показателей качества виртуального туннеля необходимо руководствоваться требованиями к значениям показателей качества пакетной сети связи с учетом функциональности туннеля и его топологической принадлежности, например:

- если туннель обеспечивает непосредственное соединение сетевых устройств отправителя и получателя, то в качестве пороговых значений необходимо использовать значения, указанные в рекомендации МСЭ Y.1541,

- если туннель обеспечивает соединение сетевых устройств на границах сети оператора, то в качестве пороговых значений необходимо использовать значения, указанные в рекомендации МСЭ M.2301,

- если туннель проходит через сети нескольких операторов связи, то итоговое пороговое значение показателей качества будет формироваться путем суммирования значений показателей качества для сети каждого оператора связи, т.е. получаем ситуацию, аналогичную суммарной оценке качества передачи трафика через несколько сетевых элементов, которая была описана ранее и приведена в рекомендации МСЭ [169].

Через один порт или туннель может проходить трафик нескольких сервисов. При этом каждый из сервисов может иметь свои собственные требования к значениям показателей сетевой производительности. При отсутствии возможности в разнесении трафика разных сервисов по отдельным физическим или логическим портам, разным туннелям необходимо в качестве пороговых значений для каждого порта или туннеля использовать наиболее «строгое» требование к пороговому значению со стороны сервисов, трафик которых передается через порт или туннель

$$\begin{cases} Q_{thres}(L) = MIN(Q_{S1}(L), \dots, Q_{Sn}(L)), \\ Q_{thres}(D) = MIN(Q_{S1}(D), \dots, Q_{Sn}(D)), \\ Q_{thres}(E) = MIN(Q_{S1}(E), \dots, Q_{Sn}(E)), \end{cases}$$

где  $Q_{thres}$  – пороговое значение показателя качества по соответствующему параметру,

$Q_{Sn}$  – пороговое значение показателя качества для конкретного сервиса, трафик которого передается через конкретный порт или туннель,

$n$  – количество сервисов, трафик которых передается через конкретный порт или туннель,

$L, D, E$  – параметры качества, потери, сбросы и ошибки соответственно.

Максимальное значение показателя подразумевает достижение таких значений показателей, когда сетевое соединение становится непригодным для предоставления любых сервисов, трафик которых проходит через обслуживающий сетевое соединение порт или туннель. Соответственно, в качестве максимального значения показателя качества порта или туннеля выбирается максимальное значение показателя качества обслуживаемых сервисов

$$\begin{cases} Q_{thres}(L) = MAX(Q_{S1}(L), \dots, Q_{Sn}(L)), \\ Q_{thres}(D) = MAX(Q_{S1}(D), \dots, Q_{Sn}(D)), \\ Q_{thres}(E) = MAX(Q_{S1}(E), \dots, Q_{Sn}(E)). \end{cases}$$

Для обеспечения максимального возможного качества предоставления услуг связи в сетях с коммутацией пакетов необходимо при оценке качества работы конкретного сетевого соединения использовать набор (диапазон) значений показателей качества, соответствующих требованиям услуг связи в интересах которых осуществляется передача пакетов данных по сетевому соединению.

Пороговые и максимальные значения показателей сетевой производительности для разных сетевых соединений могут иметь различное значение в виду того, что по сетевым соединениям передается трафик различных

услуг связи с разными требованиями к значениям показателей качества. Интегральные показатели качества позволяют оценить степень пригодности сетевых соединений для передачи трафика конкретных услуг связи. Это позволяет несмотря на различные значения текущих показателей качества работы сетевых соединений получить оценки качества, обеспечивающие сравнение качественных показателей по степени соответствия функциональной задаче каждого канала. Такой подход позволяет обеспечивать качественное предоставление услуг связи с минимизацией затрат на обеспечение качества работы сети со стороны оператора связи.

При использовании вдоль маршрута/пути передачи трафика между отправителем и получателем различных транспортных технологий передачи данных необходимо учитывать показатели сетевой производительности каждой транспортной технологии на каждом участке маршрута/пути [169]

$$Q_N = \sum_{i=1}^n Q_{Ti},$$

где  $Q_N$  – допустимое значение уровня потерь, сбросов или ошибок для сети в целом,

$Q_T$  – допустимое значение уровня потерь, сбросов или ошибок для каждого сегмента/участка маршрута/пути передачи трафика с учетом использованной на данном сегменте/участке маршрута/пути транспортной технологии,

$n$  – количество сегментов/участков маршрута/пути передачи трафика между отправителем и получателем.

При предоставлении услуги связи на транспортном уровне модели сетей следующих поколений (NGN) необходимо учитывать уровень модели OSI (сетевой или канальный), на котором фактически происходит предоставление сетевого соединения при предоставлении услуги связи и использовать для оценки



качества работы сетевого соединения соответствующие пороговые значения для показателей качества.

Формирование значений интегральных показателей проводится отдельно на сетевом и канальном уровнях модели OSI в зависимости от уровней передачи пакетного трафика в интересах обслуживаемых услуг связи. В случае отсутствия технической возможности получения значения интегральной оценки для какого-либо нормативного показателя качества на сетевом или канальном уровнях допускается использование значения интегральной оценки, сформированной на другом уровне модели OSI.

### **3.3. Выводы по разделу 3**

С учетом вышеизложенного можно сделать вывод, что предложенная логическая модель взаимосвязи показателей сетевой производительности, интегральные показатели сетевой производительности и пороговые значения для нормативных показателей качества, сформированные с учетом технологических требований со стороны услуг связи по передаче пакетного трафика и архитектурно-технологических возможностей сети связи по обеспечению данных требований, позволяют улучшить качество работы сети связи с коммутацией пакетов:

1. Предложенная логическая модель взаимосвязи показателей сетевой производительности обеспечивает единый анализ технологических требований со стороны услуг связи к сетевой инфраструктуре и сетевым подсистемам подключаемого к сети оборудования пользователей услуг связи и сервисных систем услуг связи. Это позволяет использовать предложенную модель для обеспечения качества передачи пакетного трафика в интересах услуг связи, формирования технических заданий на построение и модернизацию сети связи или ее сегментов. В ходе эксплуатации сети предложенная модель обеспечивает

выявление проблем с качеством передачи пакетного трафика, т.к. представляет собой «дерево отказов» при перегрузке сетевого соединения или изменении значений нормативных показателей качества.

2. Предложенные интегральные показатели качества обеспечивают оценку степени влияния изменений значений нормативных показателей качества на качество предоставления услуг связи, обеспечивают выявление показателей качества, оказывающих наибольшее влияние на ухудшение качества передачи пакетного трафика в интересах предоставляемых услуг связи.

3. Совместно логической моделью взаимосвязи показателей сетевой производительности предложенные интегральные показатели качества позволяют определять необходимые архитектурно-технологические изменения в сети связи для обеспечения качества передачи трафика в интересах предоставляемых услуг связи.

4. Предложенный метод формирования пороговых значений для нормативных показателей качества в отношении сетевых соединений учитывает комплекс технологических требований со стороны услуг связи, классов и типов трафика, возможностей используемых протоколов и технологий передачи данных по уровням модели OSI с учетом архитектуры построения технологических сегментов сети. Это позволяет проводить оценку качества работы сетевых соединений с учетом ресурсно-сервисных моделей предоставления услуг связи и обеспечивает сопоставление показателей качества работы различных технологических сегментов сети связи вдоль пути передачи трафика для формирования итоговой оценки качества передачи пакетного трафика.

5. Определение роли и функциональности элементов сети и виртуальных туннелей по отношению к предоставляемой услуге связи позволяет определить перечень показателей сетевой производительности и их пороговые значения, которые должны контролироваться в целях обеспечения качества предоставления услуги связи. Роль и функциональность элементов сети и виртуальных туннелей должна определяться путем синергетической оценки физической и логической топологии сети связи.

## Раздел 4. Результаты практических исследований

### 4.1. Введение

В данной главе приводятся результаты практического применения разработанных интегральных показателей сетевой производительности для анализа работы сетевых соединений в сети связи с коммутацией пакетов на уровнях доступа, агрегации и ядра [145] и обеспечения поддержания качества работы сети оператора связи. На уровне ядра сети используются кабельные линии связи на основе оптических волокон. На уровнях доступа и агрегации в сети связи используются 2 технологии построения линий связи:

- кабельные линии связи на основе оптических волокон и медных проводных соединений,
- цифровые радиорелейные линии пакетной связи.

Приведенные ниже графики представляют собой информацию, полученную из системы мониторинга производительности сети с коммутацией пакетов. Значения нормативных показателей NP рассчитываются на интервале времени 5 минут [16, 54]. Значения интегральных показателей NP рассчитываются на суточном интервале времени (24 часа). При анализе зависимости значений показателей NP используется усреднение значений на часовом и недельном (7 суток) интервалах времени. Усреднение значений нормативных показателей NP на часовом интервале времени используется для сопоставления значений показателей сети с коммутацией пакетов с показателями производительности обслуживаемой сотовой сети связи, которые классически рассчитываются на часовом интервале времени как показатели качества работы услуги телефонной связи и используют значения показателей в ЧНН. Усреднение значений на недельном интервале времени обусловлено тем, что отчет по производительности

сети с коммутацией пакетов формируется за недельный интервал времени. Недельный интервал времени выбран для формирования отчета в виду того, что описывает производительность работы сети с учетом цикличности предоставления услуг в сети оператора связи, обусловленных суточными и недельными колебаниями интенсивности пакетного трафика в сети связи.

#### **4.2. Оценка пропускной способности сетевых соединений**

При практическом использовании коэффициента пропускной способности (КПС) для мониторинга производительности сетевых соединений значение КПС рассчитывается на суточном интервале времени проведения измерений с использованием вышеописанной однопороговой методики расчета интегральных показателей качества. По физическому смыслу значение КПС показывает среднюю величину доли полосы пропускания сетевого соединения выше установленного порогового значения уровня загрузки, не задействованную для передачи пакетного трафика в течение времени проведения измерений. Значение КПС является обратным значением в плане описания величины степени перегрузки сетевого соединения свыше установленного порогового значения уровня загрузки за интервал времени проведения измерений. В плане управления производительностью сетевого соединения значение КПС является показателем расхода ресурсов сетевого соединения [170], обеспечивающих передачу пакетного трафика в условиях возникновения перегрузок в работе сетевого соединения. При отсутствии расхода соответствующих ресурсов значение КПС равно 100%. При полном израсходовании соответствующих ресурсов значение КПС равно 0%.

Регулирующее воздействие значения КПС при использовании для оценки качества работы сетевых соединений в сетях с коммутацией пакетов состоит в следующем:

- Значения КПС, как и нормативный показатель качества в виде уровня загрузки, позволяет выявлять сетевые соединения с уровнем загрузки выше установленного порогового значения на интервале времени снятия статистических данных.

- Значения КПС зависят от объема трафика, переданного с уровнями загрузки сетевого соединения выше установленного порогового значения, т.е. в условиях, когда производительность сетевого соединения была не оптимальна. Максимальные и средние значения уровня загрузки сетевого соединения не позволяют выполнить оценку объема трафика, переданного с неоптимальными значениями производительности сетевого соединения, особенно в условиях наличия интервалов времени без передачи пользовательского трафика через сетевое соединение (при уровнях загрузки равных или имеющих значение около 0% на интервалах времени съема статистических данных).

- Значения КПС, особенно в связке с значениями ВНН, позволяют выявлять наиболее критичные в плане обеспечения необходимой производительности сетевые соединения и выполнять их ранжирование по степени срочности/важности устранения проблем с производительностью в виду наличия оценки профиля трафика (графика изменения значений уровня загрузки на интервале времени проведения оценки), передаваемого по сетевому соединению. Максимальные и средние значения уровня загрузки сетевого соединения не позволяют выполнить оценку профиля трафика в сетевом соединении.

- С ростом значения уровня загрузки следует уменьшать длительность интервала времени для получения значений нормативных показателей качества. В оптимальном случае длительность интервалов времени для получения значений нормативных показателей качества необходимо делать минимально возможной [16]. При этом следует иметь в виду, что при уменьшении длительности интервалов времени для съема статистических данных увеличивается частота получения данных с оборудования связи, что может послужить причиной перегрузки оборудования связи в плане формирования и отправки таких данных и повлиять на качество работы сети в целом. Частое получение с оборудования

связи статистических данных о значениях параметров качества допускается в режимах отладки или поиска и устранения неисправностей на коротких временных интервалах.

- КПС позволяет обеспечить поддержание сетевого соединения в неперегруженном состоянии для обеспечения максимизации объема пакетных данных, переданных с минимальными значениями времени задержки и уровня потерь.

Для поддержания значения КПС равным 100% необходимо обеспечение дополнительной полосы пропускания для сетевого соединения  $B_{add}$

$$B_{add} = (B_{nc} - B_{thres}) * \frac{(100 - \text{КПС})}{100},$$

где  $B_{nc}$  – полоса пропускания сетевого соединения,

$B_{thres}$  – пороговое значение для полосы пропускания сетевого соединения.

На рисунке 4.1 представлен сформированный по результатам еженедельного отчета график зависимости средних значений КПС от средних значений максимального уровня загрузки сетевого соединения. Размер выборки для построения графика составляет 1000 сетевых соединений. Усреднение значений КПС и максимального значения уровня загрузки производится на недельном временном интервале, т.е. по 7 значениям уровней загрузки и КПС. Наличие усреднения значений уровня загрузки и КПС объясняет тот факт, что на рисунке 4.1 уменьшение значений КПС начинается не точно после 70% (пороговое значение для расчета КПС) максимального уровня загрузки сетевого соединения, а при немного меньших значениях уровня загрузки.

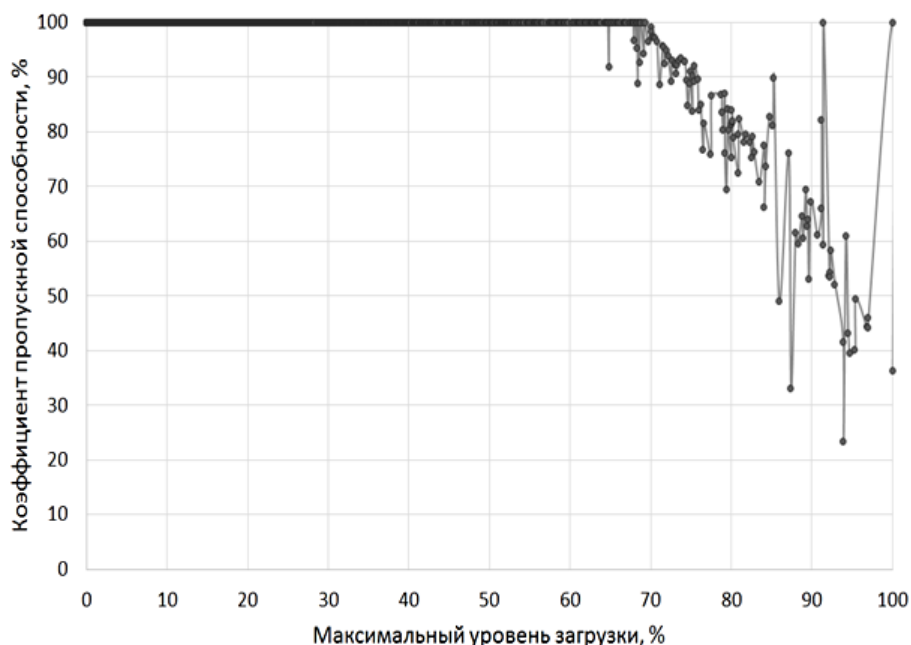


Рисунок 4.1 - Зависимость значений коэффициента пропускной способности от величины уровня загрузки сетевого соединения на 5-минутных интервалах времени

При рассмотрении графика на рисунке 4.1 можно заметить, что с ростом максимального значения уровня загрузки наблюдается возрастание колебаний значений КПС. Такие колебания значений КПС объясняются наличием в сети оператора сетевых соединений:

- с достаточно короткими по длительности интервала времени, но высокими по абсолютным значениям уровня загрузки «всплесками» интенсивности пакетного трафика, признаками которых являются высокие значения КПС при высоких максимальных значениях уровня загрузки,

- с «высокими» значениями уровня загрузки в течение достаточно длительного суммарного интервала времени в течение суток, признаками которых являются низкие значения КПС при высоких максимальных значениях уровня загрузки.

График изменения значений КПС от уровня загрузки отдельного сетевого соединения, в отличие от средних, максимальных и минимальных значений уровня загрузки, позволяет:

- определить значения уровня загрузки, имеющие максимальную длительность в течение интервала времени проведения измерений по минимальному значению КПС,

- определить стабильность загрузки сетевого соединения по суточным интервалам времени (суточный интервал времени является универсальным интервалом времени периодичности использования услуг связи) по частоте нахождения значений КПС в определенной области значений уровня загрузки,

- определить стабильность работы сетевого соединения при соответствующих уровнях загрузки по величине значений КПС (величине разброса значений КПС) при соответствующих значениях уровня загрузки сетевого соединения.

Если рассмотреть график на рисунке 4.1 в качестве примера изменения значений КПС в зависимости от уровня максимальной загрузки одиночного сетевого соединения, то можно сделать следующие выводы по величине пакетного трафика при перегрузке сетевого соединения (уровнях загрузки свыше 70%):

- максимальный уровень загрузки сетевого соединения иногда достигает 100%, наиболее часто максимальный уровень загрузки сетевого соединения не превышает 75%,

- начиная с максимального уровня загрузки на интервале времени снятия статистических данных примерно 85% имеет место нестабильное значение уровня загрузки сетевого соединения,

- имеет место длительное время работы сетевого соединения при уровне загрузки примерно 94%,

- уровни загрузки сетевого соединения на интервалах времени съема статистических данных редко достигают значений более 92%, при этом превышение значений уровня загрузки 92% может быть кратковременным, в виде «всплеска» интенсивности пакетного трафика, так и достаточно длительным в некоторых единичных случаях,



- максимальные значения уровня загрузки до 85% имеют место достаточно часто и объем передаваемых данных через сетевые соединения при таких уровнях загрузки достаточно стабилен, что позволяет считать сетевое соединение пригодным для передачи пакетного трафика в сети оператора связи в большинстве случаев [157],

- должен быть обязательно рассмотрен вопрос расширения полосы пропускания сетевого соединения в виду наличия превышений значениями уровня загрузки не только порогового значения (70%), но и наличия периодического превышения значения уровня загрузки 85% (наличие группы близких по величине значений КПС в области значений максимального уровня загрузки около 90%) [157].

На рисунке 4.2 представлен пример графика изменения значений уровня загрузки сетевого соединения.

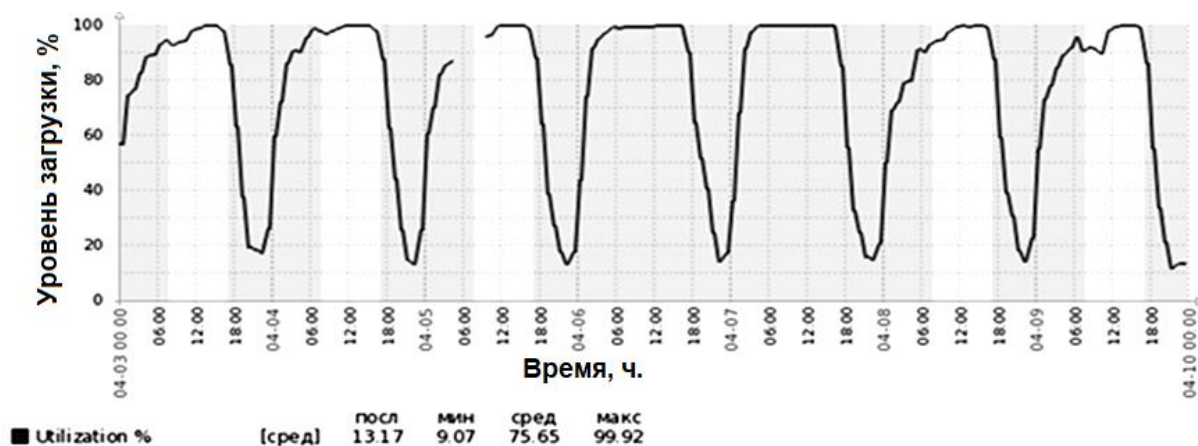


Рисунок 4.2 - Пример графика изменения уровня загрузки сетевого соединения

На рисунке 4.3 представлены графики КПС и времени наибольшей нагрузки (ВНН), соответствующие графику изменения уровня загрузки сетевого соединения на рисунке 4.2, формируемые системой мониторинга оператора связи. В приводимых здесь и далее графиках из системы мониторинга уровень загрузки сетевого соединения обозначен как «Utilization %», значения КПС обозначены как «KPI Link Throughput Coefficient», значения ВНН обозначены как «KPI LTC Duration».

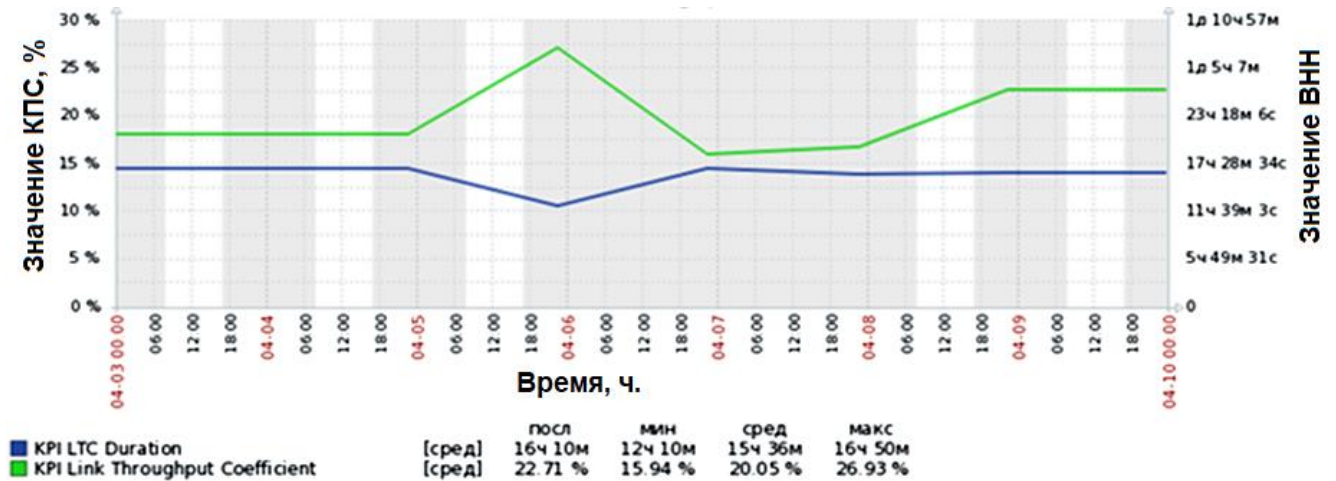


Рисунок 4.3 - Примеры графиков изменения значений коэффициента пропускной способности и времени наибольшей нагрузки

На рисунках 4.4 – 4.6 представлены примеры графиков уровней загрузки сетевых соединений для различных значений КПС. Из анализа представленных на рисунках 4.4 – 4.6 графиков уровней загрузки сетевого соединения видно, что значение КПС уменьшается по мере увеличения величины превышения уровнем загрузки значения 70% и увеличения длительности времени, когда уровень загрузки превышал значение 70%. Уменьшение значения КПС указывает, что возрастает объем трафика, переданный через сетевое соединение в состоянии перегрузки.

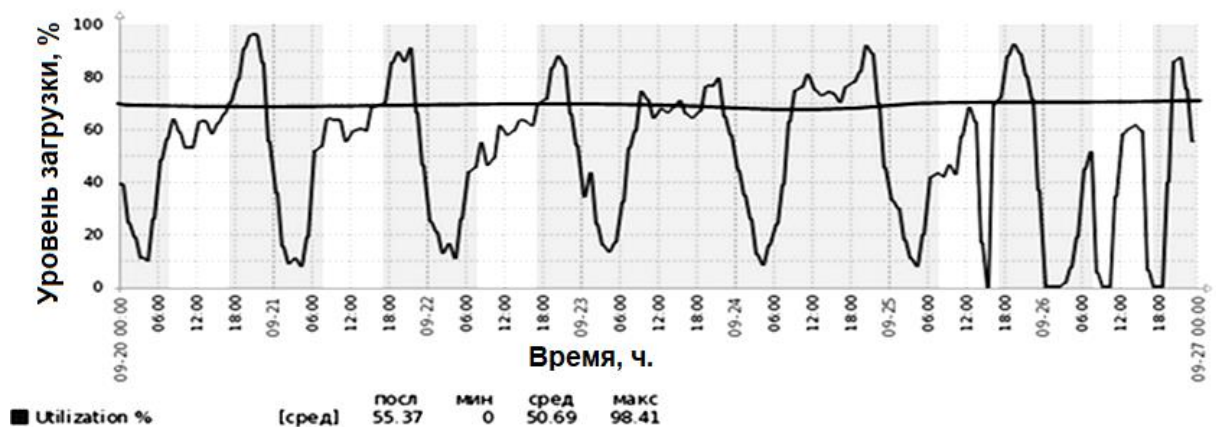


Рисунок 4.4 - Вид графика уровня загрузки сетевого соединения при значениях коэффициента пропускной способности  $\approx 90\%$

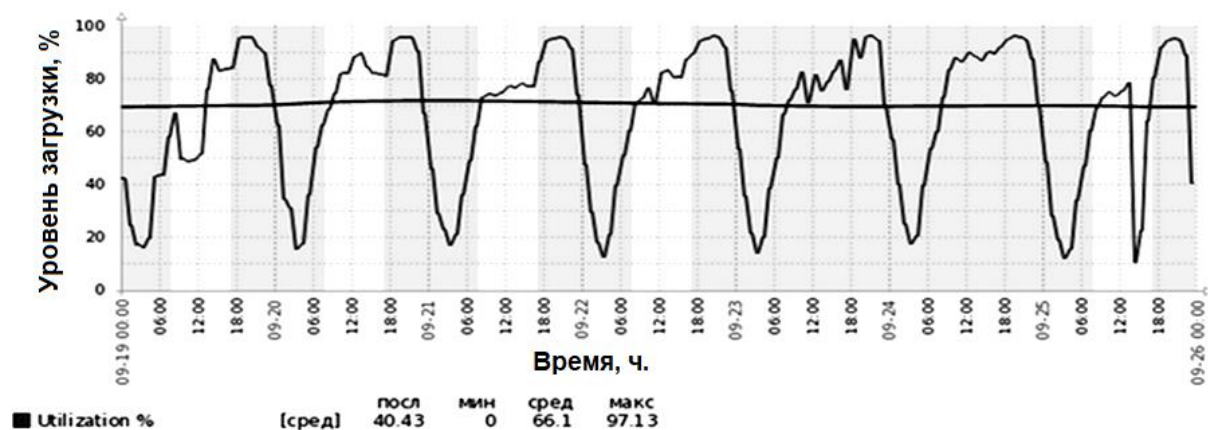


Рисунок 4.5 - Вид графика уровня загрузки сетевого соединения при значениях коэффициента пропускной способности  $\approx 70\%$

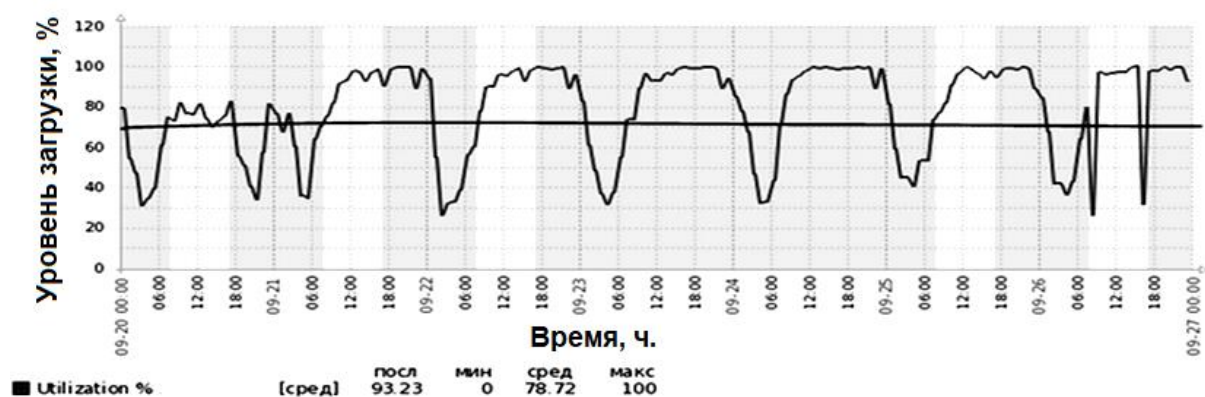


Рисунок 4.6 - Вид графика уровня загрузки сетевого соединения при значениях коэффициента пропускной способности  $\approx 50\%$

Среднее значение уровня загрузки сетевого соединения не отражает фактически достигнутые значения уровня загрузки за интервал времени расчета среднего значения. С учетом того, что в качестве минимального интервала времени для расчета значений нормативных показателей  $NP$  принимается длительность интервала времени съема статистических данных [16, 54], то увеличение длительности времени для расчета значений показателей  $NP$  свыше длительности интервала времени съема статистических данных вносит искажения в значения показателей  $NP$ , полученных на таких интервалах времени. Значения КПС позволяют выявлять превышение уровнем загрузки сетевого соединения

установленного порогового значения на интервале времени съема статистики. На рисунке 4.7 представлены различные графики изменения уровня загрузки сетевого соединения (профиля пакетного трафика) на часовом интервале времени со средним часовым значением уровня загрузки 70%. Из анализа представленных на рисунке графиков видно, что на часовом интервале времени при одном и том же среднем часовом значении уровня загрузки в условиях перегрузки и с возросшим временем задержки при обработке пакетов данных могут быть переданы различные объемы данных [134].

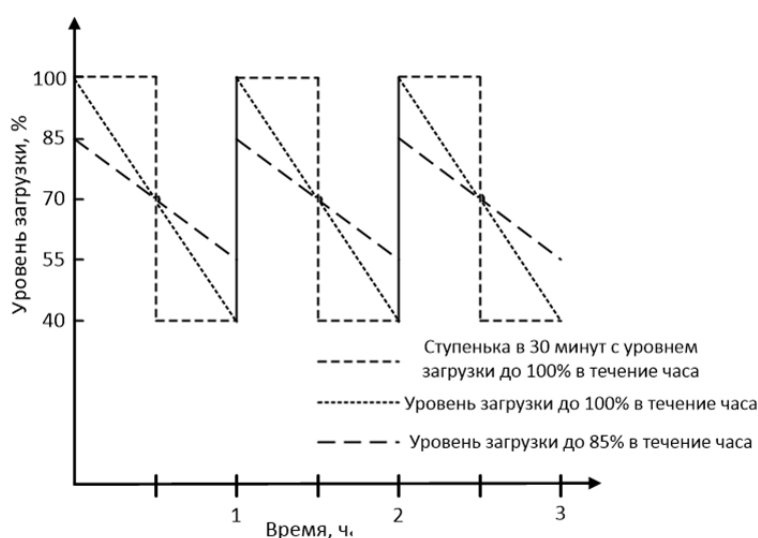


Рисунок 4.7 - Графики изменения уровня загрузки сетевого соединения на интервале времени съема статистики с одинаковым средним часовым значением уровня загрузки

Графики изменения значения КПС при различных профилях пакетного трафика с разными величинами и длительностями превышения значениями уровня загрузки установленного порогового значения 70% представлены на рисунке 4.8. Значения графиков «до 85%», «до 100%» и «ступенька в 30 минут с 100%» соответствуют профилям трафика, представленным на рисунке 4.7 [171].

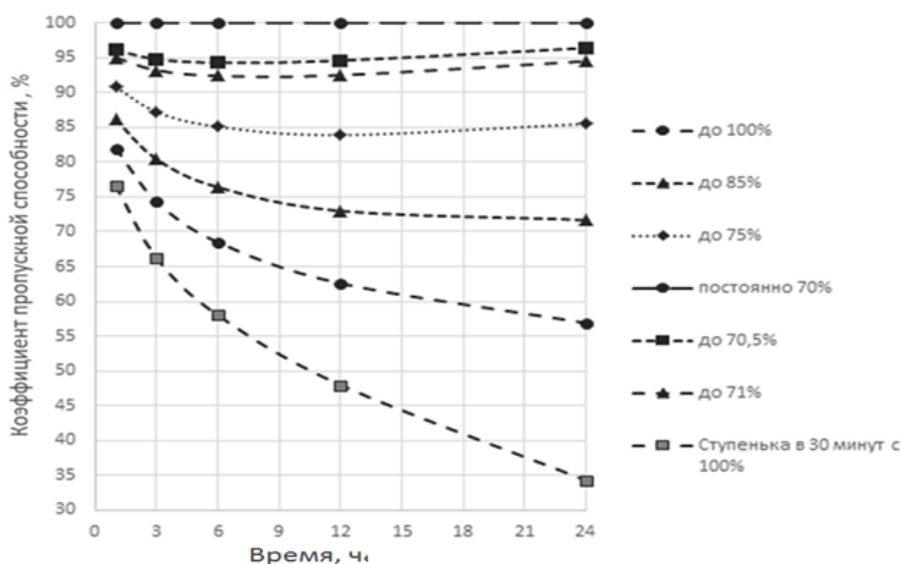


Рисунок 4.8 - Зависимость значений коэффициента пропускной способности от величины и длительности превышения уровнем загрузки установленного порогового значения

Графики изменения значений КПС зависимости от величины и длительности превышения значениями уровня загрузки установленного порогового значения позволяют выполнять ранжирование сетевых соединений по величине и длительности их перегрузки пакетным трафиком. Из анализа графиков на рисунке 4.8 можно заметить, что до достижения уровня загрузки сетевого соединения 76% (максимальный уровень загрузки канала связи с использованием Ethernet-протокола при передаче кадров минимального размера 64 байта) наблюдается улучшение значения КПС с ростом длительности превышения значениями нормативных показателей качества установленных пороговых значений. Такое поведение интегрального показателя свидетельствует об улучшении значения оценки сетевой производительности в виду выявления стабильности нахождения уровня загрузки сетевого соединения в диапазоне от 70% до 76%, т.е. при выявлении трафика с квазистационарным уровнем загрузки сетевых соединений, не превышающим пороговое значение уровня загрузки сетевого соединения при передаче Ethernet-кадров минимального размера. Дальнейший рост уровня загрузки свидетельствует о возникновении проблем с обеспечением качества передачи пакетов данных для услуг связи согласно модели взаимосвязи

показателей сетевой производительности сетей с коммутацией пакетов, представленной на рисунке 3.2. Если происходит сброс (потеря) пакетов данных, которые не могут быть помещены в пакетную очередь, обслуживающую сетевое соединение, в виду ограниченного размера пакетной очереди, то это приводит к одному из 2-х возможных последствий:

- повтору передачи пакета данных, если передача пакетов обеспечивается протоколом, гарантирующим доставку пакета (например, TCP или SCTP), что в свою очередь ведет к увеличению времени задержки при получении пакета данных на приемной стороне и возрастанию загрузки сетевого соединения, т.к. вновь передаваемый пакет данных воспринимается сетью связи как новый пакет данных [16],

- фиксации потери пакета данных на приемной стороне, если истекло время ожидания пакета при использовании для передачи пакетов данных протоколов, не гарантирующих доставку пакетов данных, что приводит в свою очередь к искажению передаваемых данных на приемной стороне и ухудшению качества предоставления услуги связи [62].

Соответственно, в качестве порогового значения уровня загрузки сетевого соединения должно выступать такое значение уровня загрузки, при превышении которого должны начать возрастать значения уровня сброса (потери) пакетов данных. На рисунках 4.9 и 4.10 приведены примеры графиков уровня загрузки и интенсивности сбросов пакетов данных в пакетных очередях для сетевого соединения с использованием РРЛ в течение суточного интервала времени.

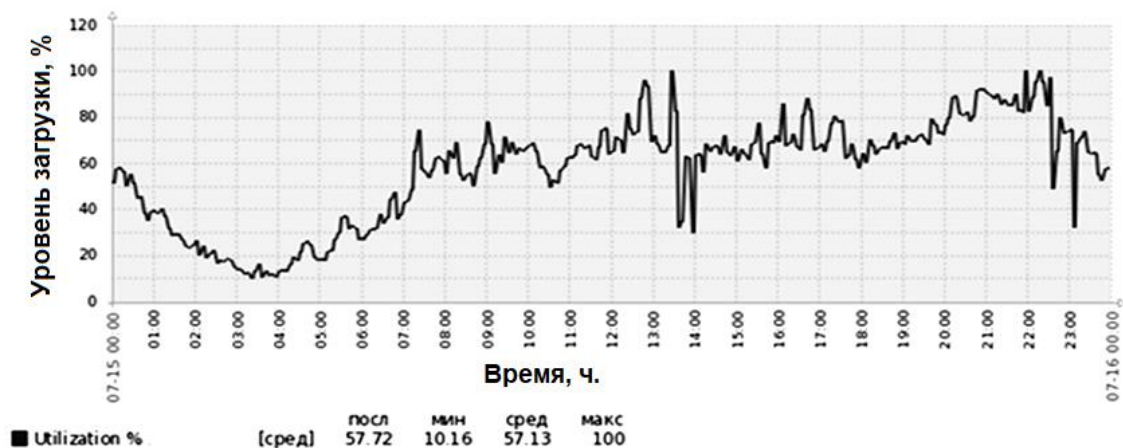


Рисунок 4.9 - График уровня загрузки сетевого соединения с использованием РРЛ



Рисунок 4.10- График интенсивности сброса пакетов данных в пакетной очереди сетевого соединения с использованием РРЛ

На рисунках 4.11 и 4.12 приведены аналогичные графики для сетевого соединения на основе оптической линии связи. Из анализа графиков на рисунках 4.9-4.12 видно, что появление и возрастание интенсивности сбросов пакетов данных происходит при превышении значением уровня загрузки сетевого соединения значения примерно равного 70%.

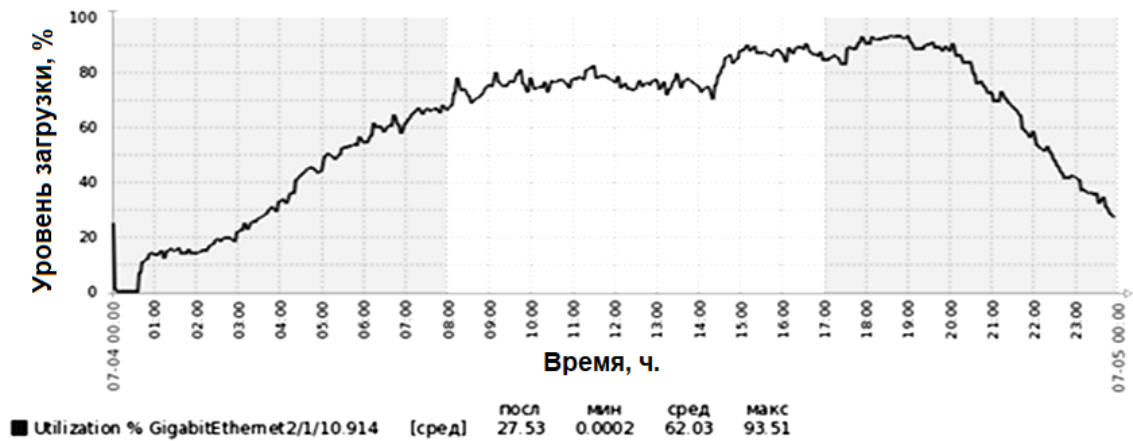


Рисунок 4.11 - График уровня загрузки сетевого соединения с использованием оптической линии связи

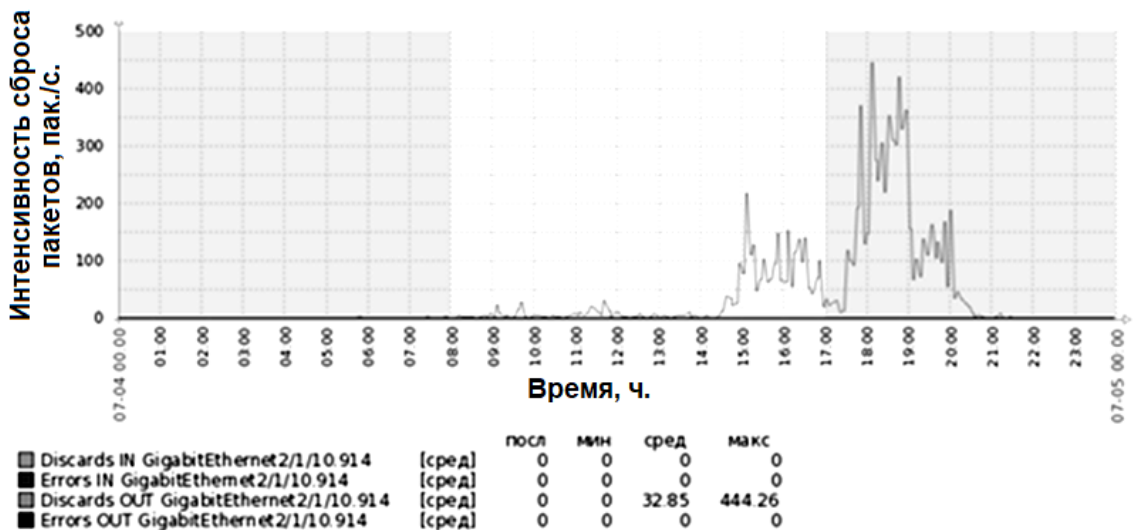


Рисунок 4.12 - График уровня сброса пакетов данных в пакетной очереди сетевого соединения с использованием РРЛ

Для исключения влияния единичных значений на выбор порогового значения уровня загрузки на рисунках 4.13 и 4.14 приведены графики зависимости средних значений количества потерь пакетов данных в единицу времени на недельном интервале времени от значений уровней загрузки сетевых соединений для оптических линий связи и РРЛ при использовании для передачи пакетов данных протоколов IP и Ethernet и полиномиальные линии тренда для соответствующих графиков. Для получения графиков использованы выборка из 300 оптических соединений и 300 РРЛ на уровне агрегации сетевой архитектуры сети связи [145].



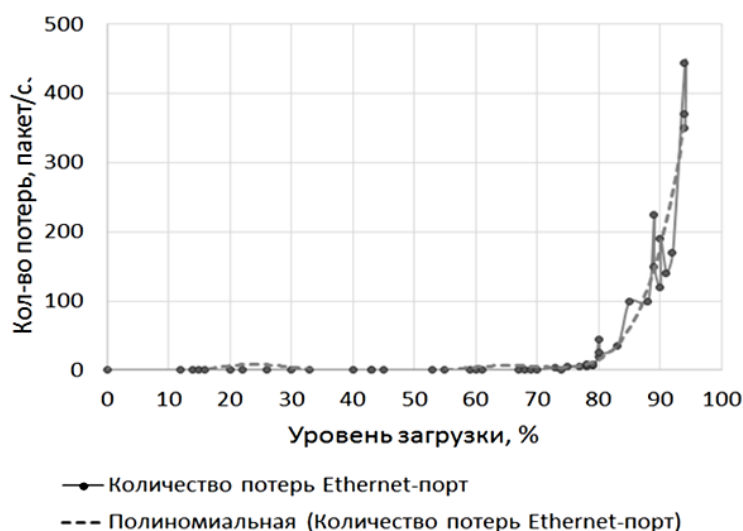


Рисунок 4.13 - Зависимость среднего значения количества потерь пакетов данных в зависимости от уровня загрузки порта маршрутизатора

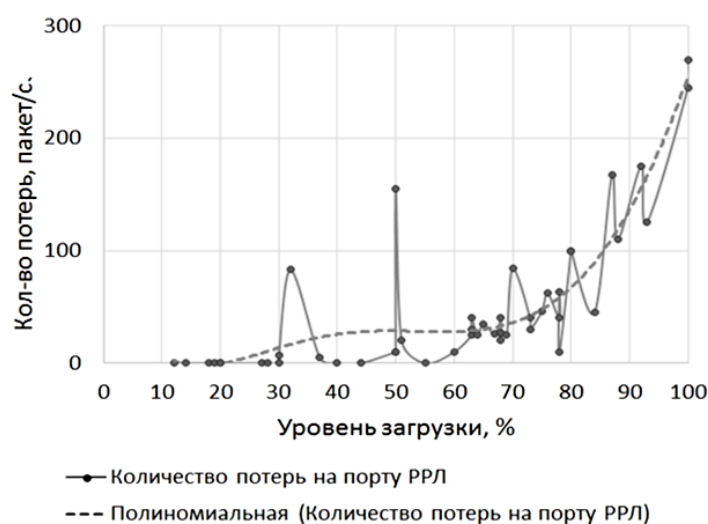


Рисунок 4.14 - Зависимость среднего значения количества потерь пакетов данных в зависимости от уровня загрузки порта радиоканала оборудования РРЛ

Из анализа графиков на рисунках 4.13 и 4.14 видно, что серьезное возрастание количества потерь пакетов данных в единицу времени начинается при превышении значениями уровня загрузки сетевого соединения значения 70%. Наличие «всплесков» потерь пакетов при уровнях загрузки сетевого соединения менее 60% объясняется достаточно высоким значением коэффициента пачечности [100] пакетного трафика при соответствующих значениях уровня загрузки. Из анализа графика на рисунке 4.13 можно заметить, что возрастание количества

потерь пакетов данных в единицу времени происходит при уровнях загрузки оптических линий в диапазоне от 16% до 32% и начиная с уровня загрузки примерно 70%. При этом начиная с уровня загрузки примерно 77% начинается резкое возрастание количества потерь. Уровень загрузки 76% является предельным уровнем загрузки сетевого соединения при передаче Ethernet-кадров минимального размера 64 байта [88, 160]. На рисунке 4.14 возрастание количества потерь пакетов начинается с уровня загрузки 20% и с уровня загрузки 45% до уровня загрузки 69% количество потерь пакетов данных в единицу времени имеет достаточно стабильное значение. Такое поведение значения количества потерь пакетов данных в единицу времени объясняется наличием интервалов времени с ошибками при передаче пакетов данных по радиоканалу [172] и рассматривается далее в разделе, посвященном описанию интегральных показателей ККПО и ККНО. Дополнительно влияние на количество потерь пакетов данных в единицу времени оказывает наличие изменений полосы пропускания радиоканала в зависимости от внешних условий и помех, представленное на рисунке 4.15. Начиная с уровня загрузки 69% начинается резкое возрастание количества потерь в единицу времени с ростом уровня загрузки радиоканала.

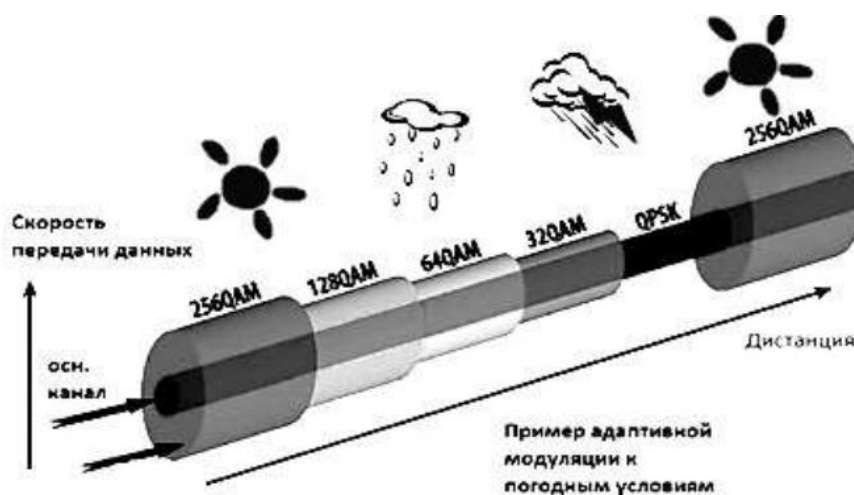


Рисунок 4.15 - Изменение методов модуляции в радиоканале для радиорелейного оборудования в зависимости от внешних погодных условий

Исходя из анализа графиков зависимостей количества потерь пакетов данных в единицу времени в зависимости от уровня загрузки сетевых соединений, представленных на рисунках 4.13 и 4.14, можно сделать вывод, что использование в качестве порогового значения уровня загрузки сетевого соединения 70% для расчета значений КПС является оптимальным для большинства сетевых соединений и при использовании различных технологий организации физического канала связи.

При рассмотрении эффективности использования значений КПС для оценки производительности сетевых соединений проведено практическое сравнение изменения значений уровней загрузки сетевых соединений в ЧНН и соответствующих им значений КПС. Величина выборки составила 10000 сетевых соединений. При проведении сравнительного анализа сетевые соединения были разделены на группы по диапазонам изменения максимальных уровней загрузки, полученных за интервалы времени съема статистики в следующих диапазонах значений:

- 70% – 85%,
- 85% - 95%,
- 95% - 100%.

Диапазоны изменения максимальных уровней загрузки уменьшаются по мере достижения полной загрузки сетевого соединения с целью более точного анализа изменения уровня загрузки по мере приближения к предельному значению загрузки сетевого соединения. В виду того, что длительность интервала времени, в течение которого были доступны статистические данные по параметрам работы сетевых соединений на суточном интервале времени, может иметь различную величину (различное время доступности сетевых соединений -  $T_{av}$ ), то величина времени превышения значениями уровня загрузки порогового значения уровня загрузки 70% (ВНН) представлена в виде относительной длительности данной величины времени по отношению к интервалу времени доступности значений параметров работы сетевых соединений ( $T_{av}$ ). Графики

диапазонов изменения значений уровней загрузки сетевых соединений в ЧНН представлены на рисунках 4.16 – 4.18.

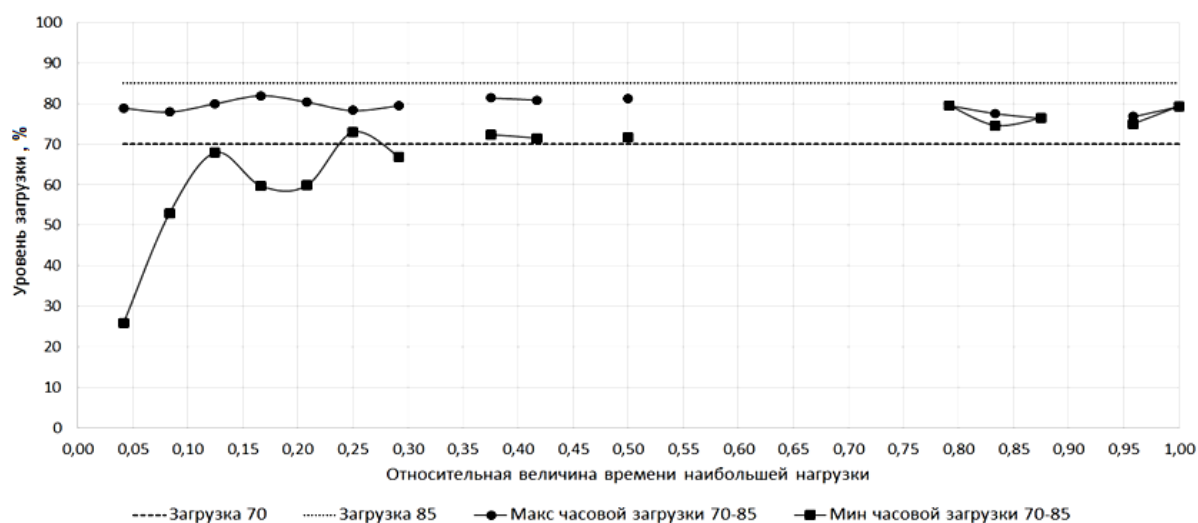


Рисунок 4.16 - Диапазоны изменения значений уровней загрузки сетевых соединений в ЧНН в зависимости от относительной длительности времени наибольшей нагрузки для максимальных уровней загрузки в диапазоне 70%-85%

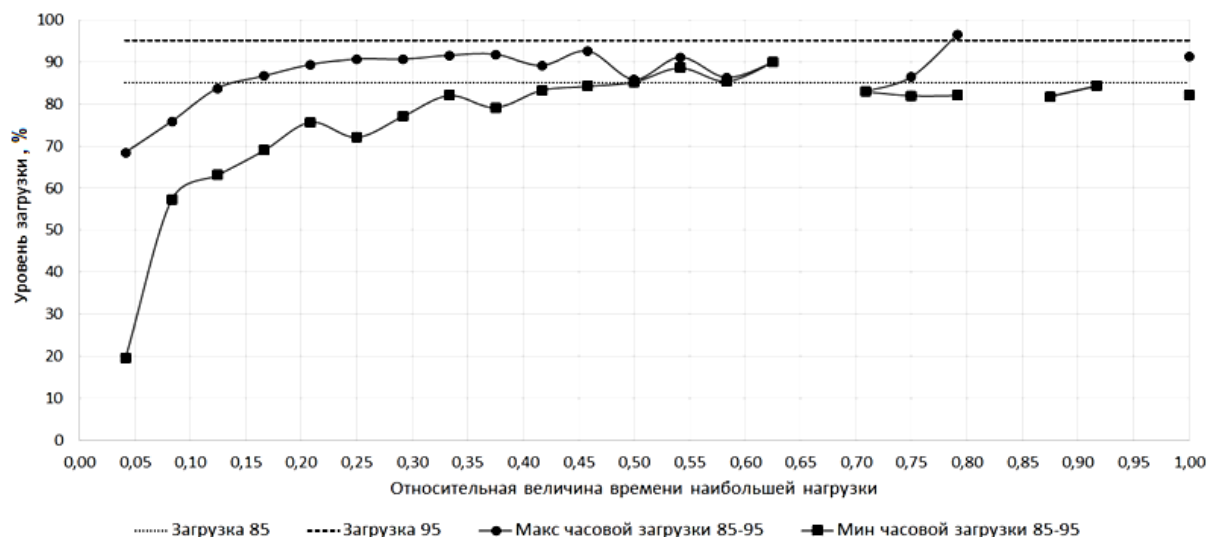


Рисунок 4.17 - Диапазоны изменения значений уровней загрузки сетевых соединений в ЧНН в зависимости от относительной длительности времени наибольшей нагрузки для максимальных уровней загрузки в диапазоне 85%-95%

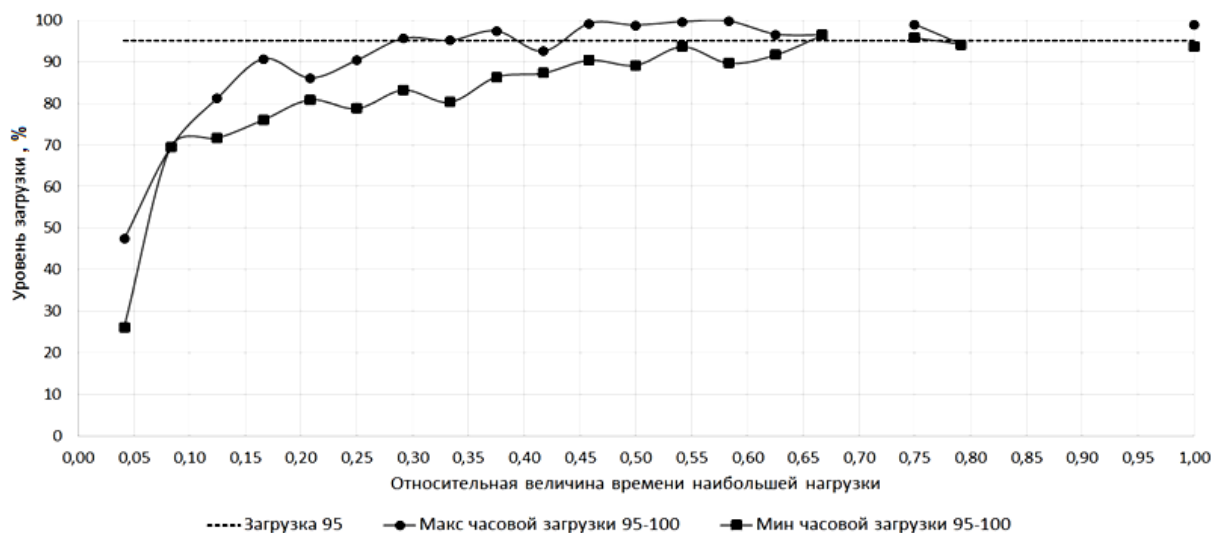


Рисунок 4.18 - Диапазоны изменения значений уровней загрузки сетевых соединений в ЧНН в зависимости от относительной длительности времени наибольшей нагрузки для максимальных уровней загрузки в диапазоне 95%-100%

Из анализа представленных на рисунках 4.16 – 4.18 графиков можно заметить, что:

- минимальные значения уровней загрузки сетевых соединений в ЧНН достигают установленных диапазонов значений максимальных уровней загрузки при значениях ВНН, равных нескольким десяткам интервалов времени съема статистических данных,

- максимальные значения уровней загрузки сетевых соединений в ЧНН могут сразу находиться в заданных диапазонах значений максимальных уровней загрузки или достигать их спустя некоторое время,

- с увеличением значений максимальных уровней загрузки, средние значения уровней загрузки сетевых соединений в ЧНН достигают заданных значений максимальных уровней загрузки через все более продолжительное время.

На графиков на рисунках 4.16 – 4.18 можно сделать вывод, что:

- использование значений уровней загрузки сетевых соединений в ЧНН для выявления «всплесков» значений уровней загрузки длительностью значительно

менее часа, что характерно для современных сетей связи, не позволяет своевременно выявлять проблемы с полосой пропускания сетевых соединений,

- сложность выявления проблем с полосой пропускания сетевых соединений при использовании значений уровней загрузки сетевых соединений в ЧНН возрастает с ростом величины «всплесков» значения уровня загрузки и уменьшения их длительности,

- для увеличения оперативности и точности контроля возникновения проблем с пропускной способностью сетевых соединений необходим переход на анализ значений уровней загрузки на интервалах времени максимально приближенных по длительности к допустимой длительности времени проблем с полосой пропускания сетевых соединений.

На рисунках 4.19 – 4.21 приведены графики зависимостей значений КПС сетевых соединений от относительного значения ВНН. Данные графики соответствуют приведенным на рисунках 4.16 – 4.18 графикам зависимостей значений уровней загрузки сетевых соединений в ЧНН от относительного значения ВНН.

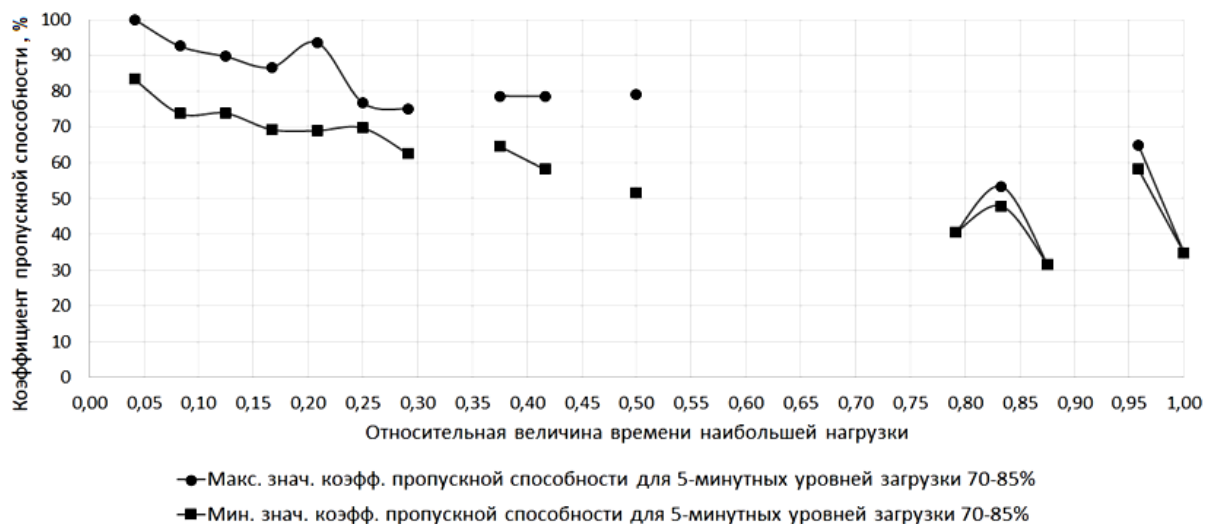


Рисунок 4.19 - Изменение значений коэффициента пропускной способности в зависимости от относительной длительности времени наибольшей нагрузки для максимальных уровней загрузки в диапазоне 70-85%

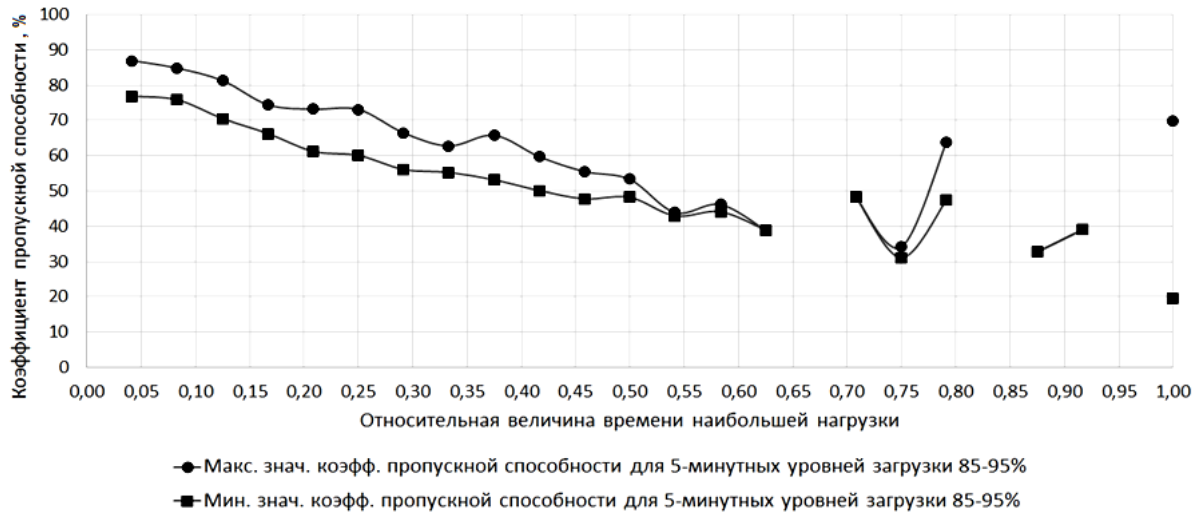


Рисунок 4.20 - Изменение значений коэффициента пропускной способности в зависимости от относительной длительности времени наибольшей нагрузки для максимальных уровней загрузки в диапазоне 85-95%

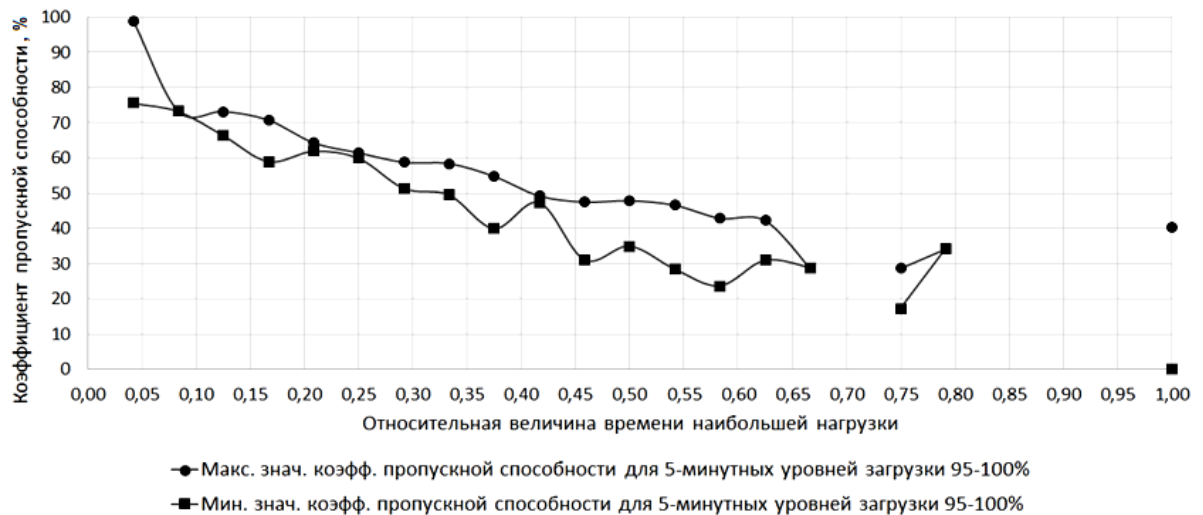


Рисунок 4.21 - Изменение значений коэффициента пропускной способности в зависимости от относительной длительности времени наибольшей нагрузки для максимальных уровней загрузки в диапазоне 95-100%

Значения КПС определяются объемом трафика, переданного с превышением установленного порогового значения уровня загрузки сетевого соединения за интервал времени проведения оценки (по умолчанию – 24 часа). Из анализа графиков на рисунках 4.19 – 4.21 можно заметить, что значение КПС позволяет разделять сетевые соединения по величине объема трафика,

переданного с превышением порогового значения уровня загрузки. Вполне очевидно, что сетевые соединения с более высокими значениями КПС имеют более стабильный трафик и обладают более стабильной производительностью, чем сетевые соединения с меньшими значениями КПС. При выполнении технических мероприятий по повышению производительности сети связи в первую очередь необходимо уделять внимание вопросам улучшения производительности сетевых соединений с меньшими значениями КПС.

На рисунках 4.22 и 4.23 представлены графики зависимостей значений КПС от абсолютной и относительной (относительно суточного интервала времени) величин ВНН. Представленные графики описывают один и тот же набор сетевых соединений. Анализ графиков показывает, что большинство сетевых соединений исследуемой сети связи имеет значения ВНН не более 3-4 часов при максимальной длительности ВНН в 16,5 часов. При этом относительное значение ВНН, определяемое как отношение суммарной длительности превышения значениями уровня загрузки сетевого соединения порогового значения 70% за время наличия статистических данных на суточном интервале времени достигает 100%, что свидетельствует о наличии постоянного превышения уровнем загрузки значения 70% на всем интервале времени передачи данных по сетевому соединению.

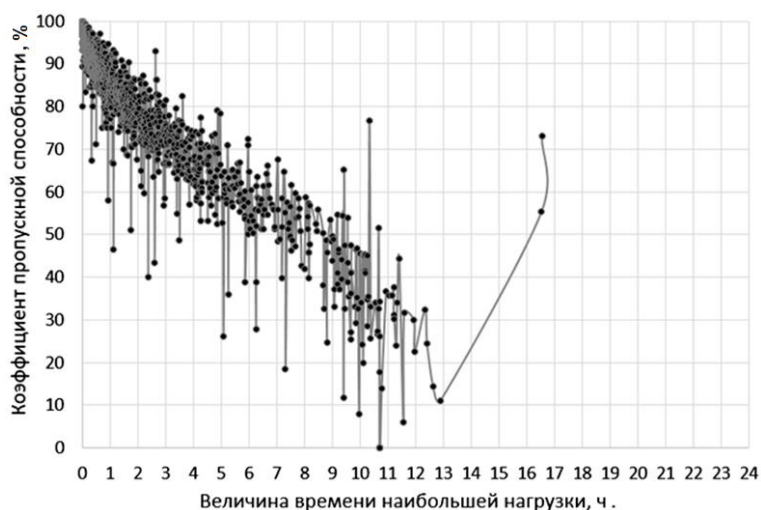


Рисунок 4.22 - Зависимость значений коэффициента пропускной способности от абсолютной величины времени наибольшей нагрузки



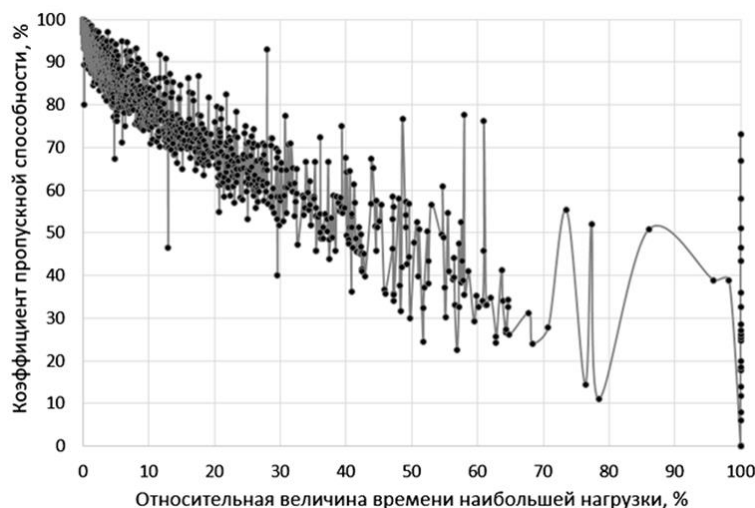


Рисунок 4.23 - Зависимость значений коэффициента пропускной способности от относительной величины времени наибольшей нагрузки

Использование относительных значений ВНН обусловлено тем, что такие значения позволяют решить следующие задачи:

- проводить сравнительную оценку качества работы сетевых соединений, у которых фактическое время работы/использования сетевого соединения для передачи трафика может быть любым в зависимости от потребностей со стороны пользователей услуг связи,

- получать сопоставимые значения КПС и ВНН для сетевых соединений вне зависимости от фактической абсолютной величины времени использования сетевого соединения для передачи пакетного трафика.

Как было указано ранее, график изменения значений КПС отдельного сетевого соединения позволяет определить стабильность загрузки сетевого соединения по суточным интервалам времени. Использование значений КПС и ВНН позволяет более удобно выполнять анализ качества работы сетевых соединений за достаточно длительный интервал времени. На рисунке 4.24 представлен график изменения интенсивности пакетного трафика для сетевого соединения за 3 месяца. Очевидно, что анализ качества работы сетевого соединения с использованием такого графика достаточно затруднен.

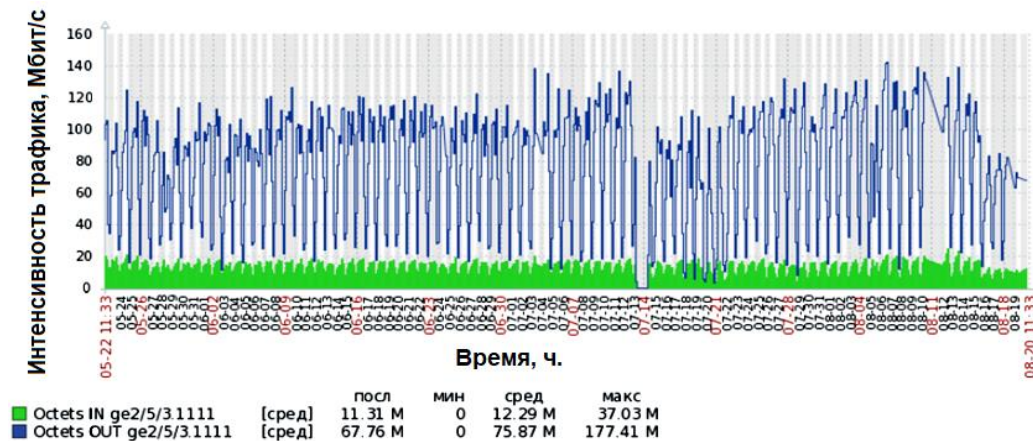


Рисунок 4.24 - График изменения интенсивности трафика сетевого соединения

На рисунке 4.25 представлен график изменения значений КПС и ВНН для того же сетевого соединения на том же интервале времени.

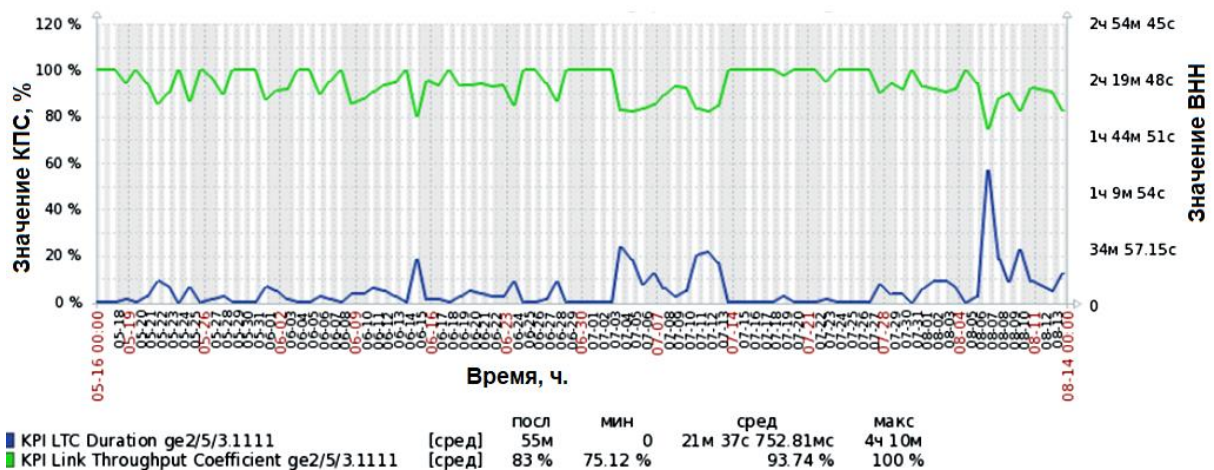


Рисунок 4.25 - Графики изменения значений коэффициента пропускной способности и времени наибольшей нагрузки для сетевого соединения

Представленный на рисунке 4.25 график изменения значений КПС и ВНН позволяет более наглядно, быстро и удобно оценить качество работы сетевого соединения в плане наличия перегрузок сетевого соединения, величины и длительности таких перегрузок за длительный интервал времени, выбрать для дальнейшего более детального анализа наиболее заслуживающие внимания или вызывающие интерес интервалы времени.

### 4.3. Оценка качества работы пакетных очередей

Качество работы сетевых соединений на суточном интервале времени оценивается с использованием следующих интегральных показателей:

- коэффициент качества приоритетных очередей (ККПО),
- коэффициент качества непероритетных очередей (ККНО).

Значение ККПО и ККНО являются показателями для оптимизации потерь сетевого соединения при передаче пакетов данных [170], где величины превышения значениями уровня сброса пакетов данных установленного порогового значения на интервале времени съема статистических данных характеризуют величину динамических потерь пакетов данных за интервал времени съема статистики при обработке трафика в пакетных очередях.

Значения ККПО ККНО формируются в виде единичных значений, полученных за суточный интервал времени проведения измерений с использованием однопороговой методики расчета интегральных показателей.

На рисунках 4.26 и 4.27 представлены примеры графиков изменения значений ККПО и уровня сброса пакетов данных для порта, обслуживающего сетевое соединение, полученные из системы мониторинга производительности сетевых соединений оператора связи. Значение ККПО обозначено на графике как «KPI IF Priority Queue Quality». Значения уровня сброса, на основании которых рассчитывается значение ККПО, обозначено как «Network Queue Packet Drop %». При расчете значений ККПО пороговое значение для уровня сброса пакетов равно 0,0001% (1E-6).

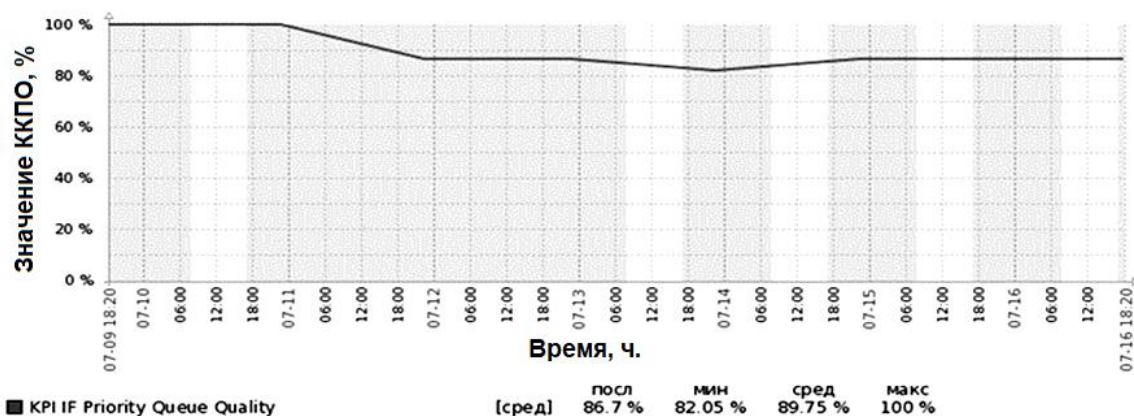


Рисунок 4.26 - Пример графика изменения значений коэффициента качества приоритетных очередей

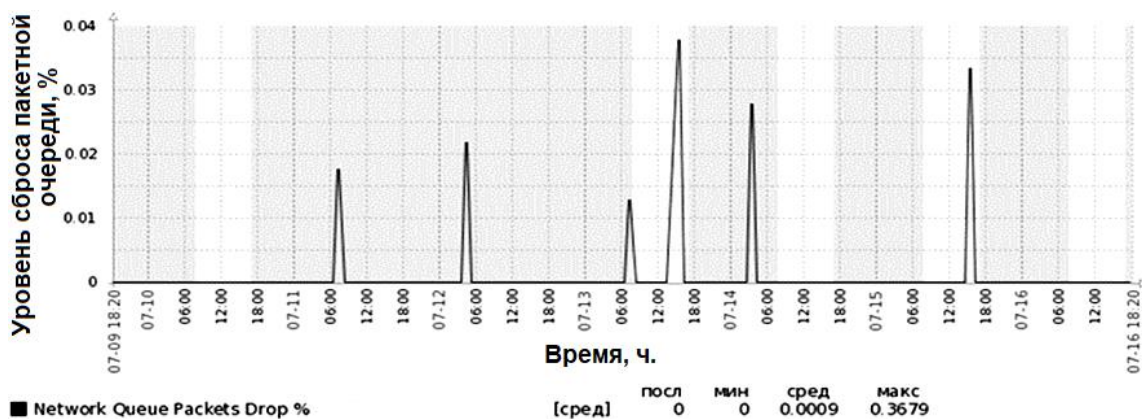


Рисунок 4.27 - Пример графика изменения значений уровня сброса для приоритетной пакетной очереди

На рисунках 4.28 и 4.29 представлены примеры графиков изменения значений ККНО и уровня сброса пакетов данных для порта, обслуживающего сетевое соединение, полученные из системы мониторинга производительности сетевых соединений оператора связи. Значение ККНО обозначено на графике как «KPI IF Common Queue Quality». Значения уровня сброса, на основании которых рассчитывается значение ККНО, обозначено как «Network Queue Packet Drop %». При расчете значений ККНО пороговое значение для уровня сброса пакетов равно 0,1% (1E-3).

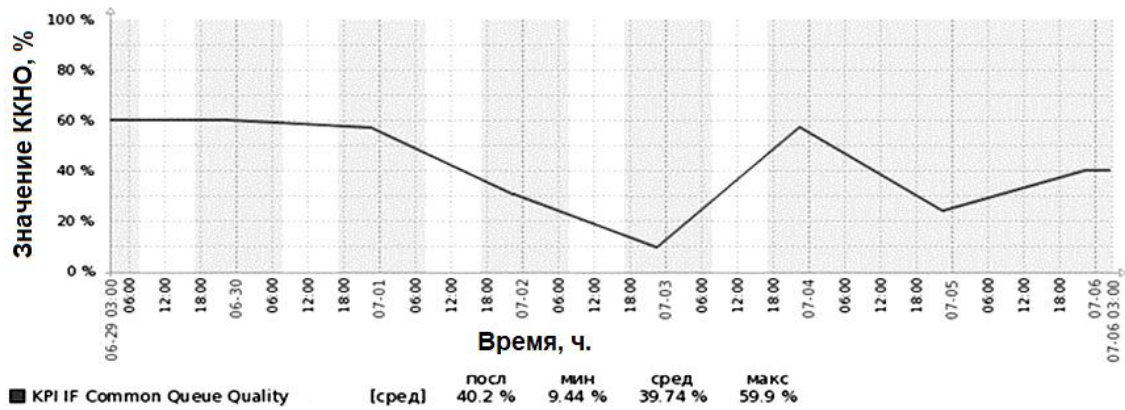


Рисунок 4.28 - Пример графика изменения значений коэффициента качества неприоритетных очередей

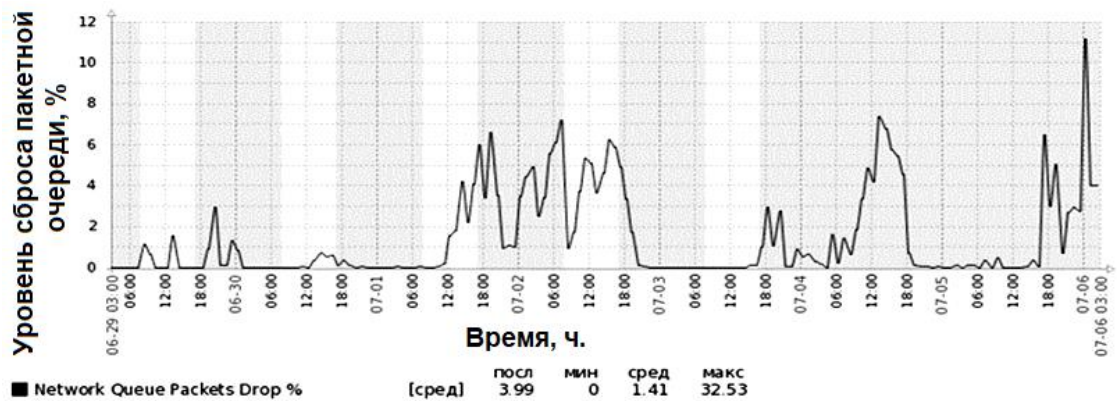


Рисунок 4.29 - Пример графика изменения значений уровня сброса для неприоритетной пакетной очереди

Графики изменения значений ККПО и ККНО позволяют выявлять суточные интервалы времени, в которые значения уровня сброса пакетного трафика выходили за пределы допустимых значений и выполнять относительную оценку объема сброшенного трафика по интервалам времени формирования значений ККПО и ККНО. В виду того, что расчет значений ККПО и ККНО производится по окончании суточного интервала времени проведения измерений значений уровня сброса, графики изменения значений ККПО и ККНО выглядят смещенным относительно значений уровня сброса на одни сутки.

На рисунках 4.30 и 4.31 представлены график изменения среднего значения уровня сброса пакетов в пакетных очередях от уровня загрузки сетевого

соединения в ЧНН и график изменения максимального значения уровня сброса пакетов в пакетных очередях (значение уровня сброса за интервал времени съема статистических данных) от уровня загрузки сетевого соединения в ЧНН.

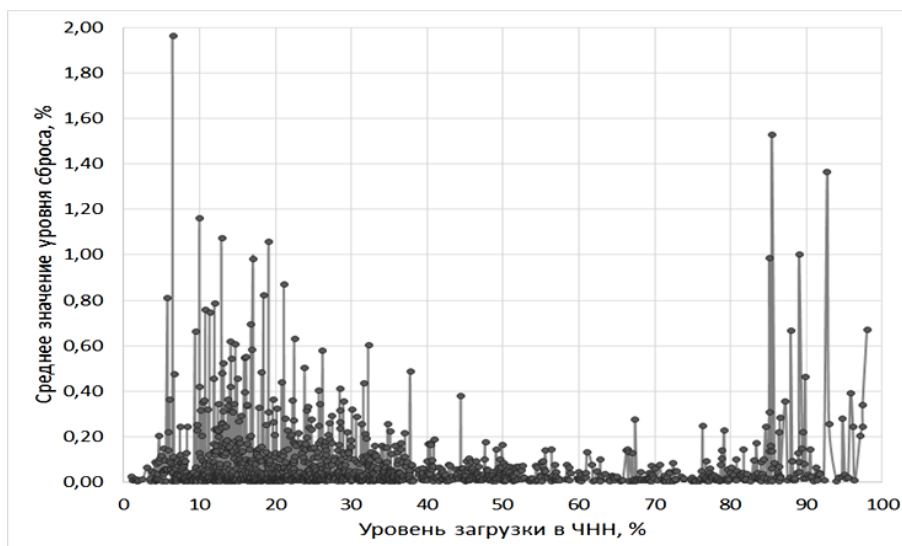


Рисунок 4.30 - Зависимость среднего значения уровня сброса пакетов от уровня загрузки в ЧНН

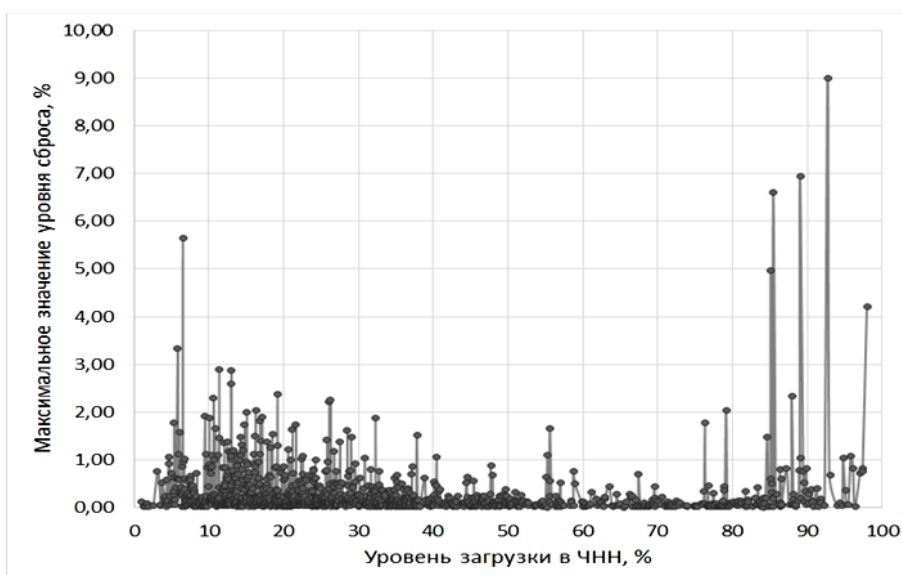


Рисунок 4.31 - Зависимость максимального значения уровня сброса пакетов от уровня загрузки в ЧНН

Размер выборки составил 10000 сетевых соединений уровня доступа. Использование уровня загрузки в ЧНН для оценки уровня сброса обусловлено

необходимостью сопоставления средних и максимальных значений уровня сброса в условиях высокой загрузки сетевого соединения.

Из анализа графиков на рисунках 4.30 и 4.31 видно, что для сетевых соединений на уровне доступа характерно следующее:

- при передаче пакетного трафика через сетевое соединение наблюдаются 2 области значений уровня загрузки, от 5% до 40% и более 75%, в которых достаточно большое количество значений уровня сброса превосходит установленное пороговое значение 0,1%,

- наибольшие «всплески» значений уровня сброса пакетов находятся в области высоких значений уровня загрузки сетевого соединения,

- в среднем наибольшие значения уровня сброса пакетов приходятся на уровни загрузки менее 50%, что указывает на наличие в сетевых соединениях доступа и агрегации высоких значений коэффициента пачечности при низких уровнях загрузки,

- в области порогового значения уровня загрузки наблюдаются наименьшие по величине «всплески» значений уровня сброса,

- максимальные и средние значения уровня сброса не дают однозначной картины величины/объема сброса пакетов в сетевом соединении за интервал времени проведения измерений,

- значения уровня сброса менее установленного порогового значения не представляют интерес в виду того, что такие значения не оказывают влияние на качество передачи данных в интересах предоставляемых услуг связи.

С учетом вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- Для сравнения производительности сетевых соединений с одинаковыми максимальными, минимальными и средними значениями уровня сброса необходимо учитывать характер распределения значений уровня сброса между максимальным и пороговым значениями, т.е. производить оценку величины превышения значениями уровня сброса установленного порогового значения.

- Наилучшей оценкой распределения величин уровня сброса на интервале значений для проведения сравнительной оценки качества работы сетевых

соединений является сумма значений уровня сброса в соответствующем интервале значений для каждого сетевого соединения.

- Интервалы времени для формирования значений уровня сброса следует выбрать минимально возможными с учетом загрузки сетевого оборудования процессом выгрузки статистических данных для расчета значений нормативных показателей качества. Выбираемые интервалы времени должны по длительности превосходить минимальные интервалы времени, за которые происходит заполнение пакетных очередей передаваемыми пакетами данных для обеспечения обнаружения переполнения пакетной очереди. В настоящее время такие интервалы времени имеют рекомендованную длительность от нескольких секунд [16] до нескольких минут [54].

- Для формирования сопоставимых оценок сброса пакетов данных в сетевых соединениях необходимо использовать для оценки качества работы сетевых соединений сети связи единые интервалы времени для формирования значений нормативных показателей качества.

Таким образом, для проведения сравнительной оценки качества работы сетевых соединений в плане оценки величины сброса пакетов данных за интервал времени проведения измерений необходимо учитывать изменение значений уровня сброса выше установленного порогового значения, т.е. наиболее оптимально использование для данной цели значений ККПО и ККНО.

Достаточно серьезное превышение уровнем сброса пакетов порогового значения при низких значениях уровня загрузки характерно для сетевых соединений на уровнях доступа сети связи. Это обусловлено попытками со стороны пользовательского сетевого оборудования передать достаточно большое количество данных, которые полностью не помещаются в буфер пакетной очереди, за очень короткий интервал времени. Такое поведение со стороны сети пользователя характерно в случаях передачи данных для сервисов обмена короткими сообщениями (сервисы отправки СМС, Viber, WhatsUp и т.п.), а также для датчиковых систем, работающих в соответствии с концепцией Интернета Вещей [173]. Увеличение размера пакетной очереди свыше определенного



размера невозможно, т.к. это приведет к длительным задержкам пакетов данных в пакетной очереди сетевого порта и возрастанию в итоге общего времени задержки в передаче пакетов между отправителем и получателем свыше допустимого порогового значения.

Для уровней агрегации и ядра в сетевой архитектуре значения уровня сброса свыше порогового значения в основном наблюдаются при высоких значениях уровня загрузки сетевых соединений, т.к. «всплески» интенсивности пакетного трафика при низких значениях уровня загрузки уже «сглажены» пакетными очередями на сетевом оборудовании уровня доступа.

На рисунке 4.32 представлен график распределения значений ККНО от значения максимального уровня загрузки сетевого соединения, рассчитанного на интервале времени съема статистических данных за недельный период (интервал времени формирования отчета в системе мониторинга) для выборки из 10000 сетевых соединений уровня доступа сети связи и соответствующий графику на рисунке 4.31.

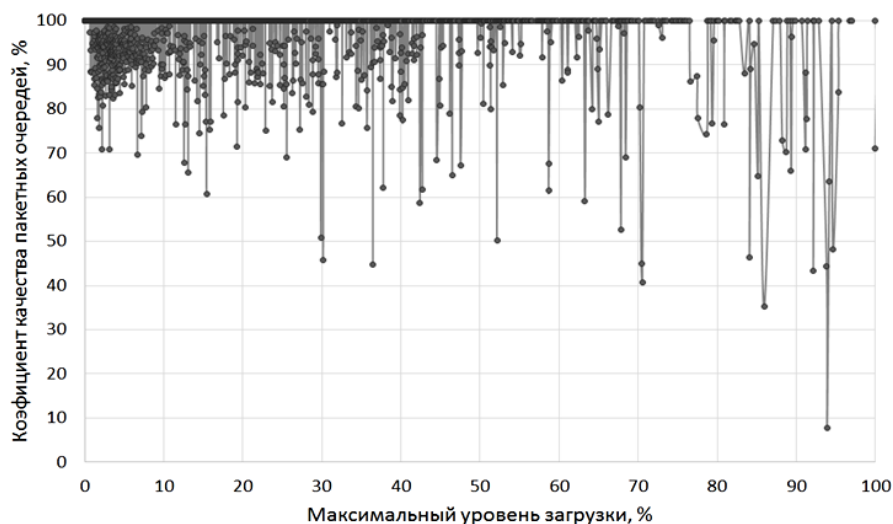


Рисунок 4.32 - Зависимость значений коэффициента качества пакетных очередей от максимального уровня загрузки портов сети

Из анализа графика на рисунке 4.32 видно, что наибольшая плотность значений ККНО <100% находится в области значений максимального уровня загрузки

сетевых соединений менее 15%, что свидетельствует о том, что в данном диапазоне значений уровня загрузки присутствуют «всплески» интенсивности пакетного трафика, превосходящие возможности пакетных очередей по обработке трафика соответствующей интенсивности. Если на графиках изменения интенсивности пакетного трафика отсутствуют «всплески» интенсивности при соответствующих уровнях загрузки сетевых соединений, то это свидетельствует о том, что длительность «всплеска» интенсивности значительно менее интервала времени съема статистики для расчета единичных значений интенсивности трафика. Такая ситуация наиболее характерна для сетевых соединений на уровне доступа. При этом значения ККНО < 100% позволяют выявлять конкретные сетевые соединения с высокими значениями потерь пакетного трафика в виде сброса пакетов данных для принятия необходимых мер по улучшению их производительности.

На рисунке 4.33 показан график изменения значений ККНО в зависимости от значений КПС, соответствующий графику изменения значений ККНО на рисунке 4.32.

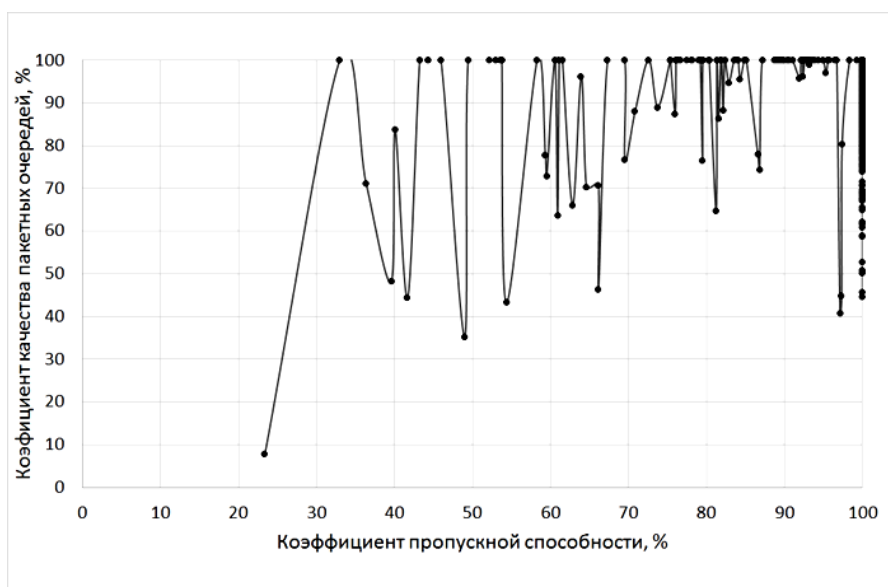


Рисунок 4.33 - График взаимосвязи коэффициента качества пакетных очередей с значением коэффициента пропускной способности

Из анализа графика на рисунке 4.33 можно заметить, что несмотря на колебание значений ККНО при уменьшении значений КПС присутствует общая закономерность в виде уменьшения значений ККНО при уменьшении значений КПС.

Для сетевых соединений уровня агрегации и ядра в архитектуре сети связи основные изменения значений КПС и ККНО происходят при средних и высоких значениях уровня загрузки сетевых соединений. На рисунке 4.34 представлены графики изменения значений КПС и ККНО и полиномиальных линий тренда показателей качества в зависимости от значения максимального уровня загрузки сетевого соединения для кабельных сетевых соединений (медные или оптические линии связи). Размер выборки составляет 1000 кабельных соединений.

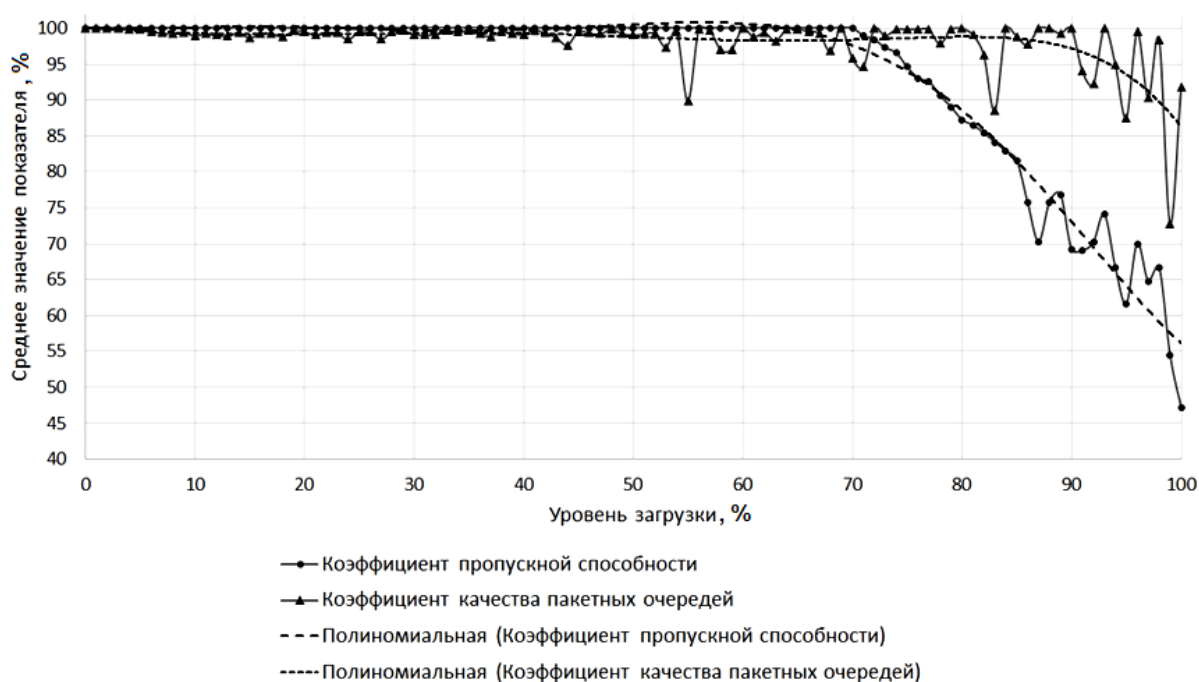


Рисунок 4.34 - Примеры графиков зависимости значений коэффициента качества неприоритетных очередей и коэффициента пропускной способности в зависимости от уровня загрузки кабельных сетевых соединений уровней агрегации и ядра

При низких значениях уровня загрузки присутствует постоянный сброс низкой интенсивности для некоторого количества пакетов данных, имеющий небольшое

возрастание в области средних значений уровня загрузки. Небольшие ухудшение значений ККНО в области низких и средних значений уровня загрузки обусловлены сбросами пакетов данных при агрегации потоков пакетного трафика от сетевых устройств уровня доступа и преагрегации на сетевом оборудовании уровня агрегации и агрегации потоков пакетного трафика от сетевых устройств уровня агрегации на сетевом оборудовании уровня ядра. При этом следует иметь в виду, что значение ККНО в данном случае показывают, настолько хорошо выполняется агрегация пакетного трафика на сетевых устройствах вдоль пути передачи пакетного трафика с учетом соответствующих настроек параметров работы пакетных очередей. Уменьшение значения ККНО свидетельствует о перегрузке выходного порта агрегируемыми потоками пакетного трафика.

В качестве примера перегрузки выходного порта агрегируемыми потоками пакетного трафика может быть рассмотрена работа РРЛ. Для РРЛ присутствует влияние уровней ошибок в радиоканале на скорость передачи пакетов данных по радиоканалу в виду присутствия интервалов времени с наличием ошибок в передаче пакетов данных в виде интервалов (errored second - ES) и периодов времени (severely errored second - SES) с ошибками, которые приводят к потере сигнала на приемной стороне [172]. Это приводит к тому, что при снижении скорости передачи пакетов по радиоканалу и сохранении при этом скорости поступления пакетов через кабельные линии связи возрастает уровень сброса пакетов в выходных очередях радио-портов.

На рисунке 4.35 представлен график изменения ККНО для РРЛ в зависимости от среднего значения уровня загрузки в ЧНН. Уровень загрузки в ЧНН используется в связи с тем, что используемое при проведении эксперимента оборудование РРЛ имеет минимальные интервалы времени съема статистических данных равные 15 минут, отличающиеся от стандартных интервалов времени съема статистических данных длительностью 5 минут и в связи с чем выбран компромиссный вариант в виде сравнения значений показателей качества по значениям уровня загрузки в ЧНН.

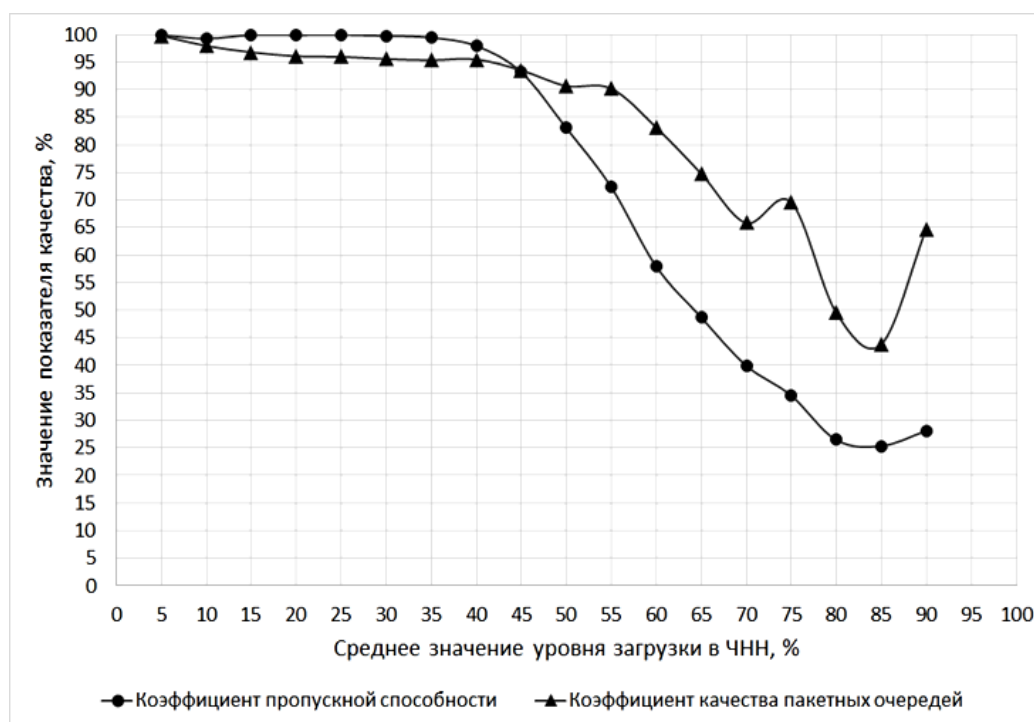


Рисунок 4.35 - Примеры графиков изменения значений коэффициента пропускной способности и коэффициента качества неприоритетных очередей для РРЛ в зависимости от среднего значения уровня загрузки в ЧНН

Значение ККНО на рисунке 4.35 начинает уменьшаться с значения уровня загрузки примерно 5% и остается стабильным в диапазоне значений уровня загрузки от 20% до 40%. При увеличении значения уровня загрузки свыше 40% значение ККНО начинает уменьшаться с возрастающей скоростью. Это обусловлено тем, что начинается постепенная перегрузка радио-порта, о чем свидетельствует уменьшение значения КПС тоже начиная с уровня загрузки РРЛ свыше 40%.

График зависимости значений ККНО от уровня загрузки сетевого соединения позволяет определить диапазон значений уровня загрузки сетевого соединения, в котором значения ККНО остаются достаточно стабильными. Для обеспечения качества работы сетевого соединения рекомендуется, чтобы максимальное значение уровня загрузки сетевого соединения не превышало максимального значения уровня загрузки, определенного для диапазона значений с стабильными значениями ККНО. Диапазон значений уровня загрузки с

стабильными значениями ККНО индивидуален для каждой РРЛ и определяется профилем трафика (графиком изменения интенсивности пакетного трафика), передаваемого через сетевое соединение. Профиль трафика в свою очередь определяется услугами связи, которые используют данное сетевое соединение для передачи трафика при предоставлении услуг связи. Тем не менее, присутствует общая закономерность, которая выражается в появлении нестабильности значений ККНО и уменьшении значений ККНО в общем случае при уменьшении значений КПС.

На рисунке 4.36 представлены графики изменения значений КПС и ККНО и полиномиальных линий тренда показателей качества в зависимости от среднего значения максимального уровня загрузки сетевого соединения для РРЛ. Размер выборки составляет 1000 РРЛ.

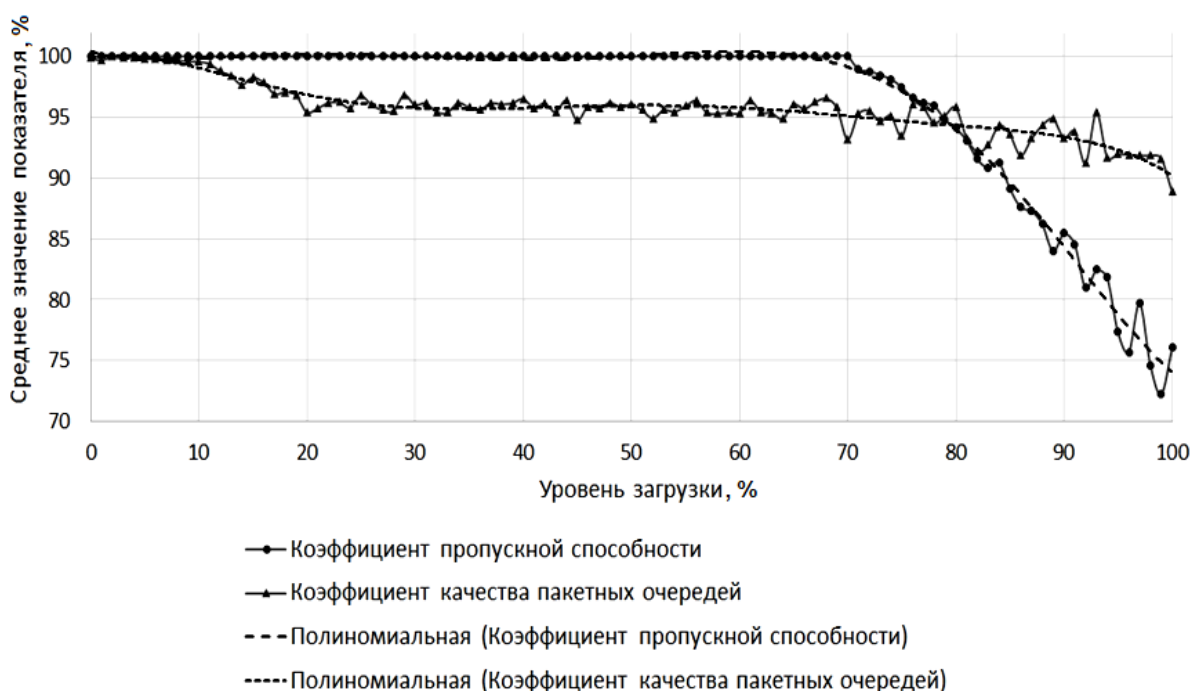


Рисунок 4.36 - Примеры графиков зависимости значений коэффициента качества непервоприоритетных очередей и коэффициента пропускной способности в зависимости от значения максимального уровня загрузки сетевого соединения для РРЛ

Из анализа графиков на рисунке 4.36 видно, что при средних значениях уровня загрузки РРЛ значение ККНО сохраняет почти постоянное значение с небольшими колебаниями значений. При этом величина значений ККНО в области средних значений уровня загрузки для РРЛ заметно меньше значений ККНО для тех же значений уровня загрузки при использовании кабельных линий связи, представленных на рисунке 4.34. В области высоких значений уровня загрузки возрастает колебание значений ККНО и наблюдается общее снижение значений ККНО. При этом уменьшение значений ККНО для РРЛ менее выражено, чем для кабельных линий связи. Это обусловлено тем, что в работе РРЛ присутствуют постоянные сбросы пакетного трафика в виду особенностей работы РРЛ [172], что в определенной мере «сглаживает» изменение ККНО в области высоких значений уровня загрузки.

Регулирующее воздействие значений ККПО и ККНО при использовании для оценки качества работы сетевых соединений в сетях с коммутацией пакетов состоит в следующем:

- оценка объема пакетов данных, сброшенных в пакетных очередях при передаче пакетного трафика через сетевое соединение, может быть использована при классификации сетевых соединений с целью выбора/маршрутизации для передачи критичного к потерям пакетного трафика наименее подверженного ошибкам сетевого соединения,
- классификация сетевых соединений для проведения мероприятий технического характера по улучшению качества работы сети связи,
- оценка качества работы сетевых соединений на логическом уровне (в плане передачи классифицированного по соответствующим правилам пакетного трафика на приоритетный и не приоритетный классы),
- оценка настройки параметров работы приоритетных и не приоритетных пакетных очередей по обработке «всплесков» интенсивности пакетного трафика, приводящего к перегрузке пакетных очередей,
- определение уровней загрузки сетевых соединений, обеспечивающих стабильное качество работы сетевых соединений.

#### 4.4. Оценка качества работы сетевых соединений

Коэффициент качества сетевого соединения (ККС) позволяет проводить оценку степени пригодности сетевого соединения для предоставления услуг связи различного типа в зависимости от величины уровня ошибок и длительности превышения значением уровня ошибок установленного порогового значения.

Значение ККС является показателем для оптимизации сбоев в работе канальной инфраструктуры сетевых соединений [170], где величины превышения значениями уровня ошибок при передаче пакетов данных установленного порогового значения на интервале времени съема статистических данных характеризуют величину динамической ошибки в работе канальной инфраструктуры по обработке передаваемых по каналу связи пакетных данных за интервал времени съема статистических данных.

В зависимости от требований услуг связи к уровням ошибок при передаче пакетного трафика в интересах данных услуг связи можно условно выделить следующие основные классы пакетного трафика:

- трафик передачи данных реального времени,
- трафик передачи данных с высоким приоритетом,
- трафик передачи данных с низким приоритетом.

Значения ККС для каждого класса трафика формируются в виде единичных значений, полученных за суточный интервал времени проведения измерений с использованием многопороговой методики расчета интегральных показателей. Суть многопороговой методики состоит в том, что полученные на интервале времени снятия статистических данных значения уровня ошибок оцениваются с использованием различных пороговых значений в зависимости от класса трафика. На рисунке 4.37 представлен пример графика изменения значений уровня ошибок, полученный из системы мониторинга производительности сетевых соединений оператора связи. График изменения значений уровня загрузки представлен на рисунке 4.37 в виде значений «Error IN %».



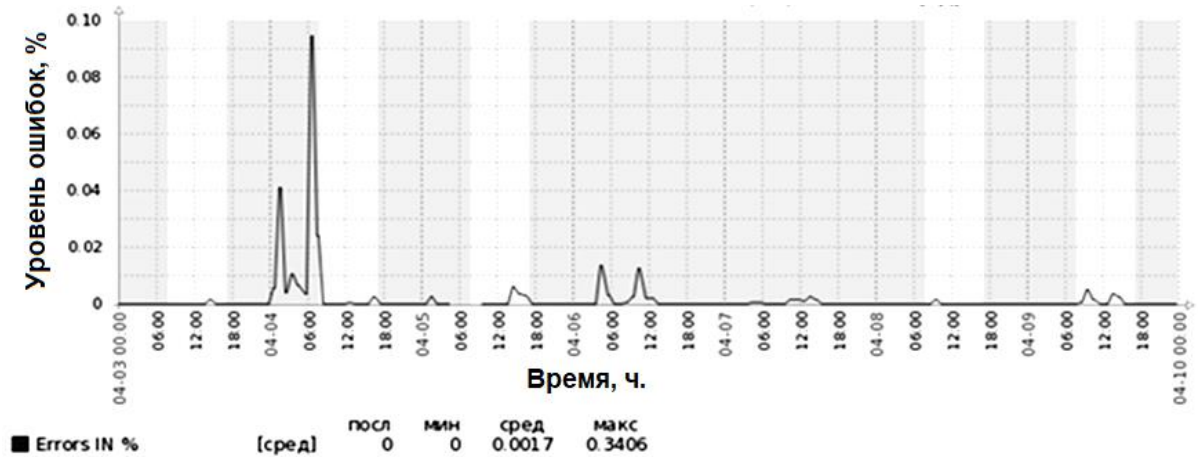


Рисунок 4.37 - Пример графика изменения значений уровня ошибок

На рисунке 4.38 представлены графики изменения значений ККСС для различных классов пакетного трафика по результатам оценки изменения значений уровня ошибок сетевого соединения в соответствии с графиком на рисунке 4.37, полученные из системы мониторинга производительности сетевых соединений оператора связи.

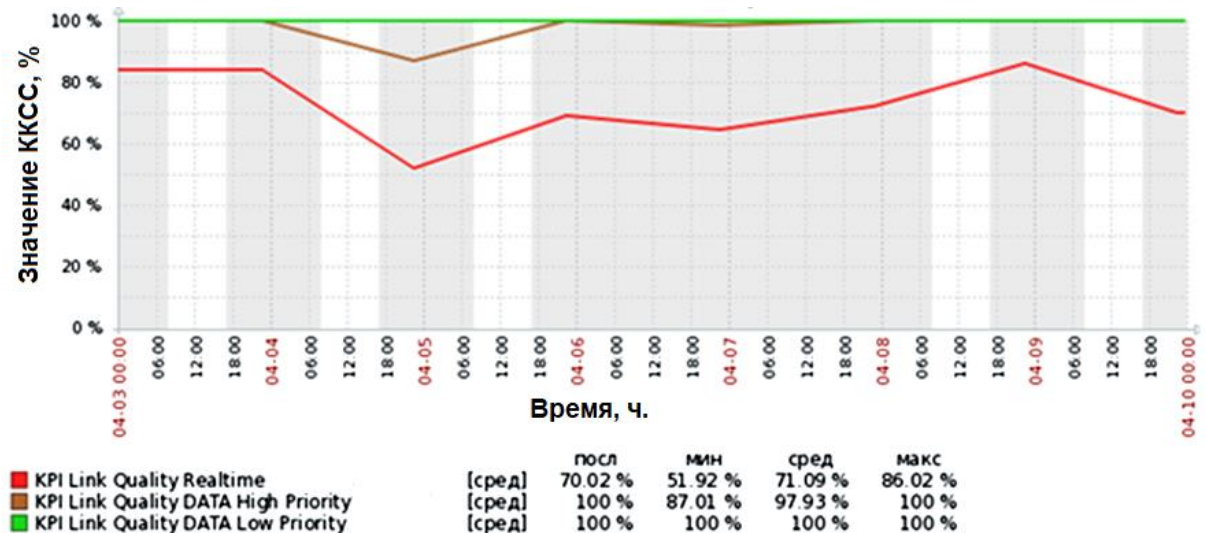


Рисунок 4.38 - Графики изменения значений коэффициента качества сетевого соединения для различных классов пакетного трафика

Значение ККСС для различных классов пакетного трафика обозначены на графике как: «KPI Link Quality Realtime» для трафика передачи данных реального

времени, «KPI Link Quality DATA High Priority» для трафика передачи данных с высоким приоритетом, «KPI Link Quality DATA Low Priority» для трафика передачи данных с низким приоритетом. При расчете значений ККСС пороговое значение для уровня ошибок равно 0,0001% ( $1E-6$ ) для трафика передачи данных реального времени, 0,1% ( $1E-3$ ) для передачи данных с высоким приоритетом, 1% ( $1E-2$ ) для передачи данных с низким приоритетом. Таким образом, по результатам измерения значений нормативного показателя качества за время проведения измерений выполняется оценка пригодности сетевого соединения для передачи пакетного трафика данных различных классов.

Для принятия итогового решения о качестве работы сетевого соединения на основании нескольких значений ККСС учитывается наличие передачи через сетевое соединение за интервал времени проведения измерений пакетного трафика соответствующего класса. Из анализа графиков значений ККСС на рисунке 4.38 видно, что сетевое соединение не пригодно для передачи трафика данных реального времени. При этом присутствует ухудшение качества работы сетевого соединения для случая передачи трафика данных с высоким приоритетом, т.е. сетевое соединение не желательно, но можно в случае необходимости использовать для передачи трафика данных с высоким приоритетом. В отношении передачи трафика данных с низким приоритетом сетевое соединение обладает 100% качеством. Если через сетевое соединение необходимо передавать трафик данных реального времени, то необходимо проводить мероприятия по улучшению качества работы сетевого соединения. Если через сетевое соединение необходимо передавать трафик данных с высоким приоритетом, то сетевое соединение становится в очередь по улучшению качества работы после сетевых соединений, имеющих проблемы с качеством при передаче трафика реального времени. Если через сетевое соединение осуществляется передача трафика данных с низким приоритетом, то повышать качество работы сетевого соединения не требуется. Анализируя изменение значений ККСС для соответствующего класса трафика данных за некоторый интервал времени можно принимать решение об использовании сетевого соединения для передачи через

него трафика данных соответствующего класса, т.е. использовать значение ККСС для политик управления маршрутизацией трафика в сети связи.

На рисунке 4.39 представлен график изменения значений уровня ошибок на приемном порту сетевого соединения в зависимости от уровня загрузки на интервале времени съема статистических данных. Пороговым значением для уровня ошибок является значение 0,01% (1E-4) [16]. Превышение значением уровня ошибок порогового значения начинается при превышении уровнем загрузки порогового значения 70%.



Рисунок 4.39 - Зависимость уровня ошибок от уровня загрузки

Некоторое снижение уровня ошибок с ростом значений уровня загрузки объясняется тем, что протокол Ethernet является асинхронным протоколом передачи данных для которого при передаче каждого следующего кадра происходит восстановление синхронизации между передатчиком и приемником путем передачи в начале каждого сетевого кадра специальной синхронизирующей последовательности (преамбулы). С ростом уровня загрузки уменьшаются длительности паузы между передачей двух соседних сетевых кадров и с уменьшением длительности пауз уменьшается вероятность рассинхронизации тактовых генераторов передатчика и приемника.

Регулирующее воздействие значения ККСС при использовании для оценки качества работы сетевых соединений в сетях с коммутацией пакетов состоит в следующем:

- оценка объема пакетов данных, потерянных при передаче через сетевое соединение в следствие ошибок в работе канальной инфраструктуры, который может быть использован при классификации сетевых соединений с целью выбора/маршрутизации для передачи критичного к потерям пакетного наименее подверженного ошибкам сетевого соединения,
- классификация сетевых соединений для проведения мероприятий технического характера по улучшению качества работы сети связи,
- оценка качества работы сетевых соединений на физическом уровне.

#### **4.5. Практические примеры решения задач по обеспечению производительности сетевых соединений**

##### **4.5.1. Обеспечение максимальной скорости передачи пользовательского трафика для сотовой сети связи**

При рассмотрении проблемы с уменьшением скорости передачи данных пользовательского трафика для базовых станций сотовой сети технологии 3G была установлена следующая зависимость скорости передачи пользовательских данных от уровня загрузки Iub-порта [174] в ЧНН, представленная на рисунке 4.40. Использование ЧНН обусловлено тем, что показатели качества работы IuV-порта рассчитываются для часового интервала времени. Задача состоит в необходимости установить причину снижения скорости передачи данных при превышении уровня загрузки IuV-порта более 35% и драматического снижения скорости при уровне загрузки более 80%, а также разработать методы оценки прогнозирования возникновения таких ситуаций.

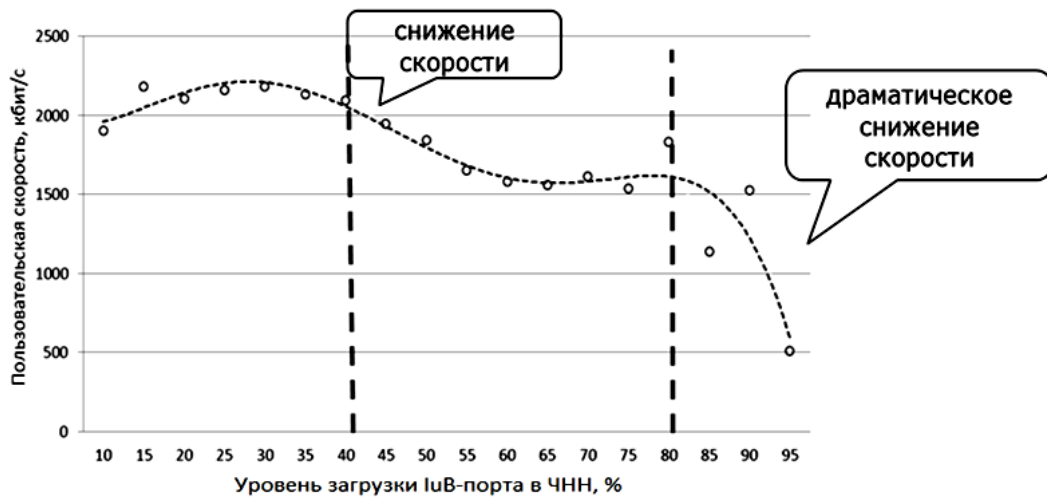


Рисунок 4.40 - Зависимость скорости передачи пользовательских данных от уровня загрузки IuV-порта

При решении задачи было продемонстрировано, что для проблемных IuV-портов наблюдается снижение значений КПС начиная с уровня загрузки в ЧНН более 35%, т.е. начиная с уровня загрузки в 35% появляются единичные всплески интенсивности пакетного трафика, приводящие к сбросу пакетов в пакетных очередях. Потери пакетов данных приводят к уменьшению скорости передачи данных через IuV-порт. График изменения значений КПС в зависимости от уровня загрузки в ЧНН представлен на рисунке 4.41.

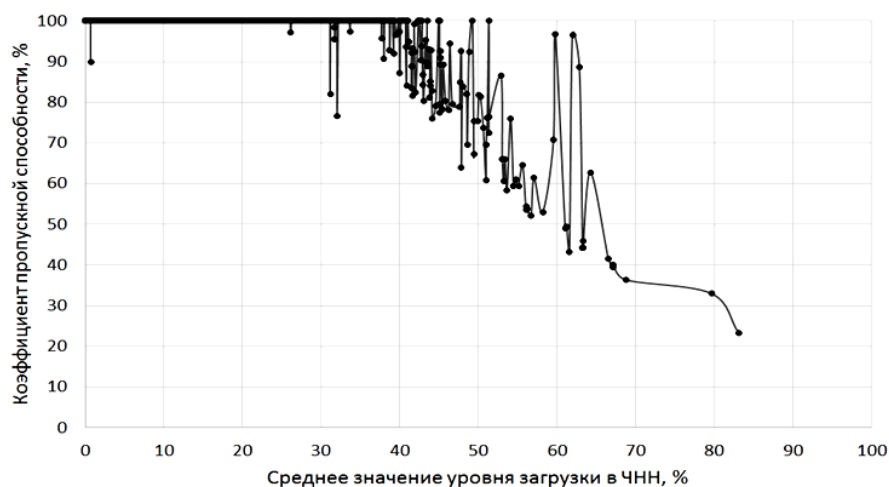


Рисунок 4.41 - Зависимость значений КПС от величины уровня загрузки сетевого соединения в ЧНН

Снижение скорости передачи данных при уровне загрузки более 80% обусловлено тем, что при размере пакета голосовых данных составляет 93 байта [175], что соответствует размеру Ethernet-кадра в 111 байт (размере голосового пакета 93 байта, плюс размер канального заголовка для Ethernet-кадра 18 байт, что в итоге дает размер голосового Ethernet-кадра 111 байт). При соответствующих размерах Ethernet-кадра максимальный уровень загрузки сетевого соединения составляет 82%. График изменения максимального уровня загрузки сетевого соединения в зависимости от размера Ethernet-кадра показан на рисунке 4.42.

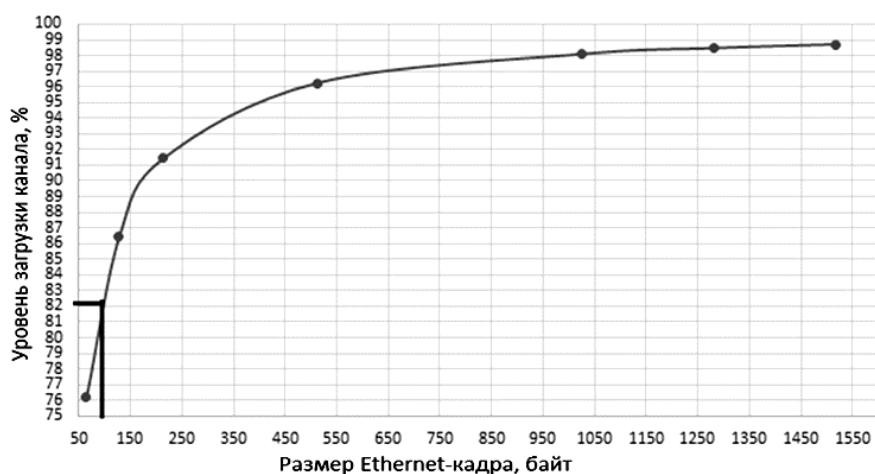


Рисунок 4.42 - Зависимость уровня загрузки сетевого соединения от размера Ethernet-кадра

#### 4.5.2. Контроль за уровнем потерь пакетов данных при передаче трафика для сотовой сети связи

Для обеспечения качества предоставления услуг связи для абонентов сотовой сети связи необходимо осуществлять контроль за уровнем потерь пакетов данных абонентского сервиса для порта, через который идет передача пользовательского трафика. Для технологии 3G таким портом между базовой станцией и контроллером сотовой сети является IuB-порт. На рисунке 4.43

представлен пример графика уровня потерь пользовательских пакетов данных для IuB-порта. Уровень потерь пользовательских пакетов для IuB-порта именуется как «Congestion IuB» и оценивается на интервале времени получения статистических данных с базовой станции сотовой сети длительностью 1 час.

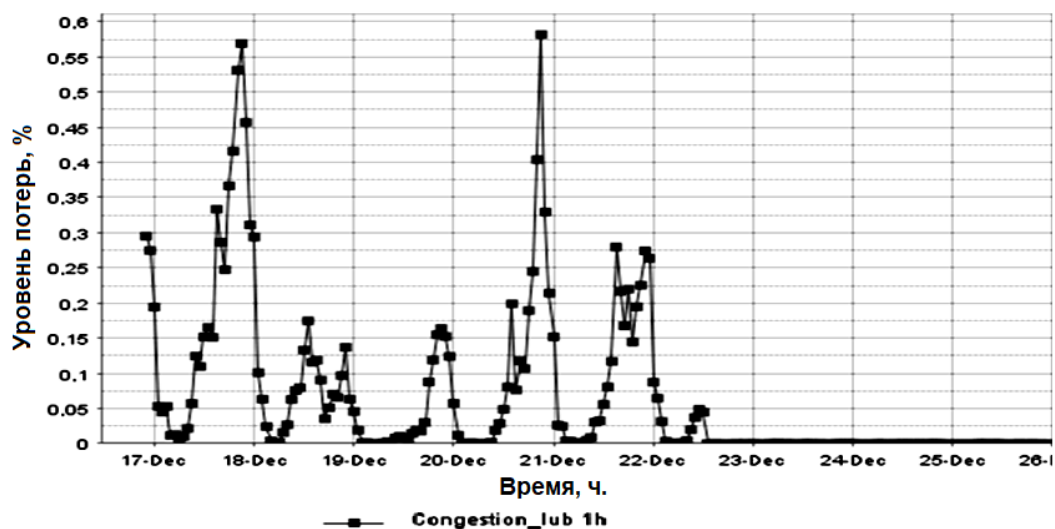


Рисунок 4.43 - Уровень потерь пользовательских пакетов данных для IuB-порта

Задача состоит в необходимости установить причину увеличения значений уровня потерь пакетов данных для пользователей сотовой сети связи свыше установленного порогового значения и выработать меры по устранению данных потерь.

Анализ ситуации показывает, что причиной потерь пользовательских пакетов для IuB-порта является потеря пакетов данных в сетевом соединении, обслуживающем IuB-порт базовой станции. График уровня потерь пакетов данных для сетевого соединения представлен на рисунке 4.44. Поскольку уровень потерь пакетов в сетевом соединении обусловлен сбросом пакетов данных при их передаче в направлении базовой станции, то соответствующие значения уровня потерь обозначены как «Discards OUT %».

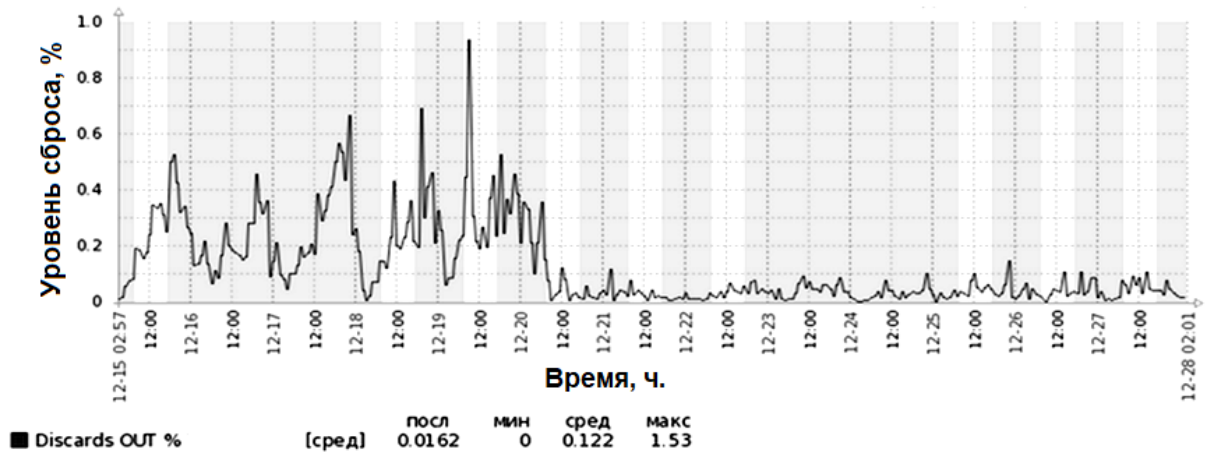


Рисунок 4.44 - График уровня сброса пакетов данных для сетевого соединения, обслуживающего передачу трафика для IuV-порта

Анализ интегральных показателей показывает, что при превышении уровня сброса пакетов данных наблюдалось для соответствующих интервалов времени уменьшение значения ККНО ниже 100%. Соответствующий график изменения значений ККНО представлен на рисунке 4.45. Уменьшение ККНО ниже 100% свидетельствует о наличии сбросов неперипоритетного пакетного трафика, что указывает на деградацию сервисов, которые обслуживаются путем передачи пакетов данных с низким приоритетом. Как правило, это сервисы доступа в сеть Интернет.

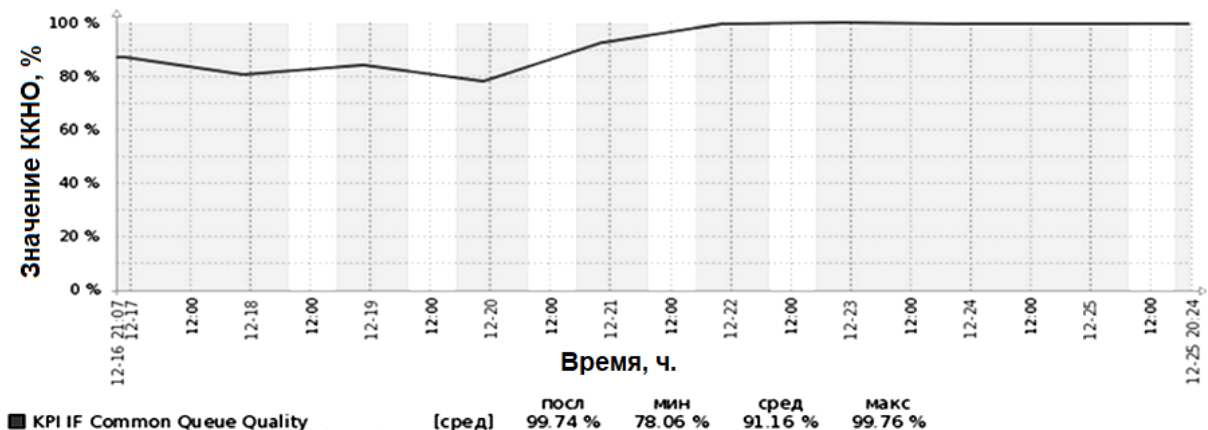


Рисунок 4.45 - График изменения значений коэффициента качества неперипоритетных очередей для сетевого соединения, обслуживающего передачу трафика для IuV-порта



График изменения значений КПС для сетевого соединения представлен на рисунке 4.46.

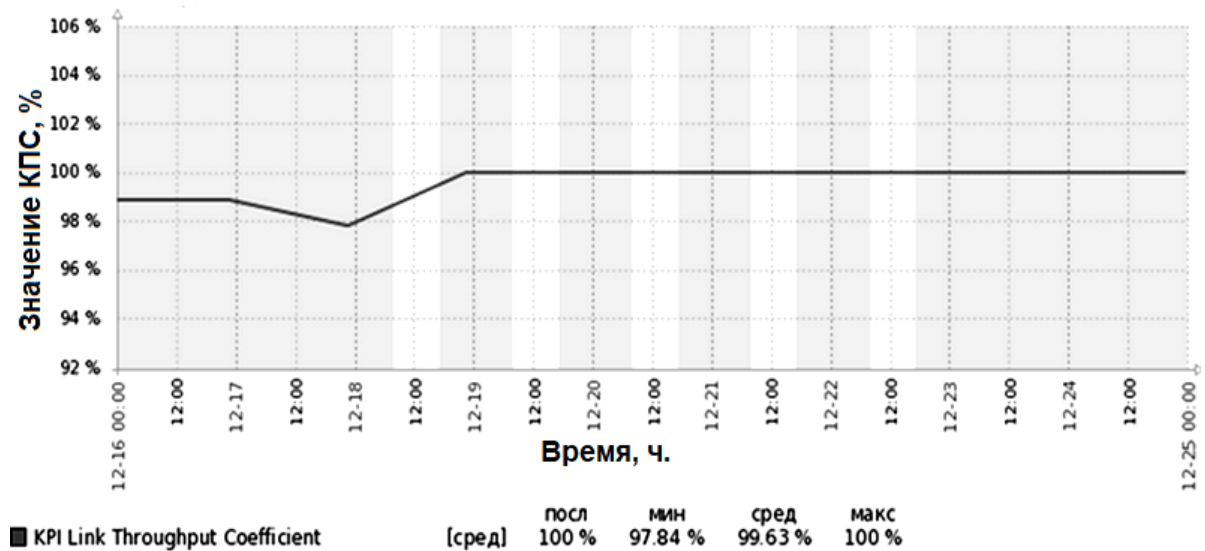


Рисунок 4.46 - График изменения значений КПС для сетевого соединения, обслуживающего передачу трафика для IuV-порта

При анализе графика изменения значений КПС для соответствующего сетевого соединения можно обнаружить, что в течение части времени деградации качества работы сетевого соединения значения КПС были менее 100%. Это указывает на то, что причиной сброса пакетов данных в пакетных очередях была перегрузка сетевого соединения низкоприоритетным пакетным трафиком. Совокупность фактов указывает на необходимость модернизации сетевого соединения путем увеличения его пропускной способности. При этом можно заметить, что в течение нескольких последних дней (по информации на графиках - с 19 по 23 декабря) значения КПС=100%. Это указывает на то, что уменьшился объем низкоприоритетного пакетного трафика для конкретной базовой станции (уровень загрузки сетевого соединения опустился ниже порогового значения), например, по причине «ухода» пользователей сотовой сети связи на базовые станции с более производительными сетевыми соединениями. При этом значения ККНО<100%, что указывает на периодические «всплески» пакетного трафика в

сетевом соединении, причиной которых могут быть попытки пользователей сотовой сети все же получить доступ к необходимым им сервисам. Наличие значений  $ККНО < 100\%$  при значениях  $КПС = 100\%$  указывает на необходимость оптимизации настроек пакетных очередей для неприоритетного трафика на оборудовании связи, обслуживающем данное сетевое соединение.

Для обеспечения наглядности в определении проблемных мест в сети передачи данных для системы мониторинга производительности сети передачи данных разработан графический интерфейс, указывающих для каких сетевых соединения наблюдается ухудшение значений интегральных показателей сетевой производительности. Вид графического интерфейса представлен на рисунке 4.47.

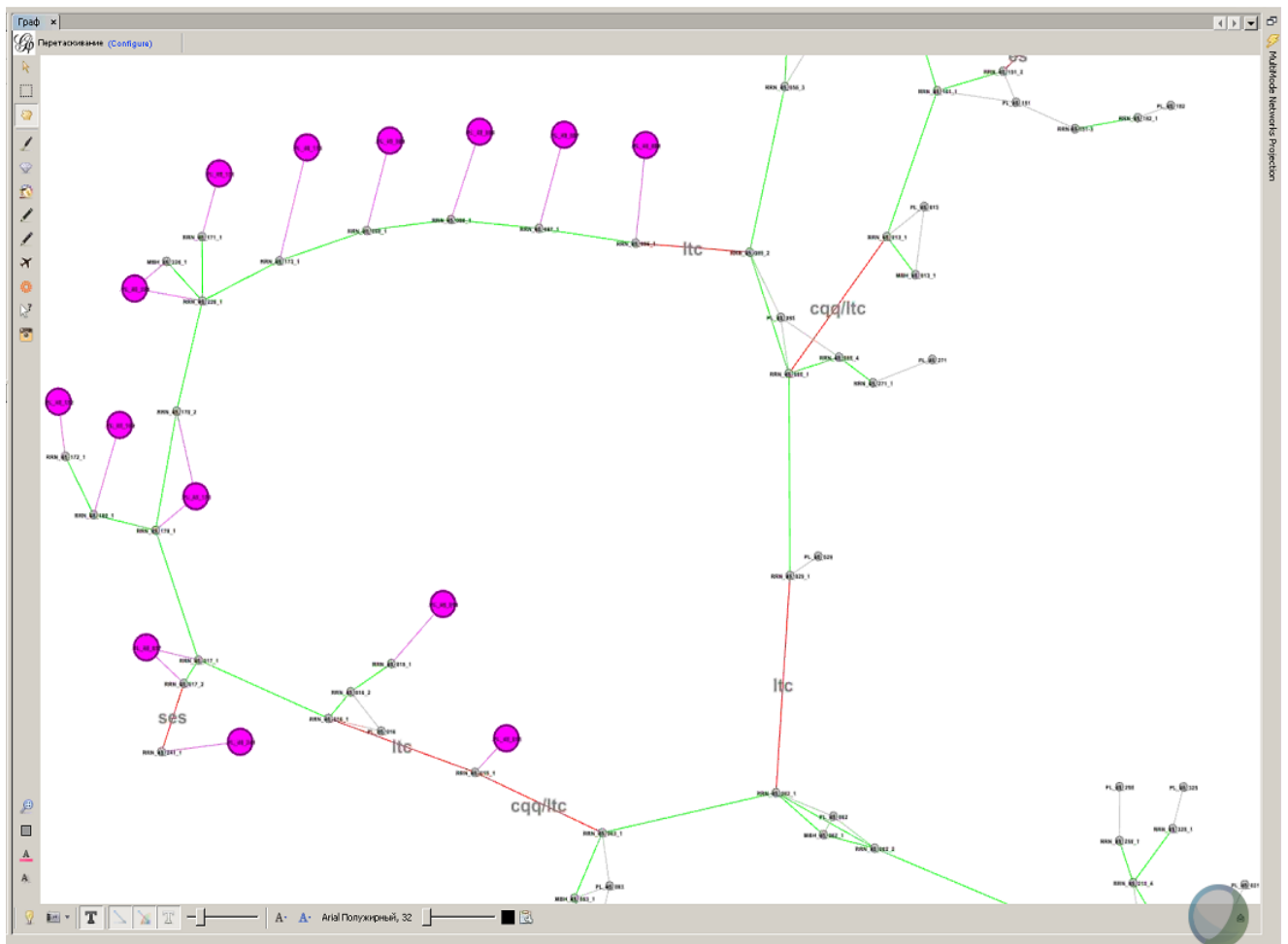


Рисунок 4.47 - Вид графического интерфейса с топологией сети передачи данных и наименованием интегральных показателей сетевой производительности, имеющих ухудшения значений

На рисунке 4.47 показатели КПС и ККНО обозначены как «lrc» и «sqc» соответственно. Сетевые соединения с ухудшениями значений КПС и ККНО показаны красным цветом. Фиолетовым цветом показаны окружности, обозначающие базовые станции сотовой сети связи, имеющие ухудшения значений сервисных показателей качества предоставления услуг связи.

Результаты использования разработанных интегральных показателей качества для повышения качества работы сети связи представлены в таблице 4.1 в виде информации об изменении объема данных, переданного через сетевое соединение за фиксированный интервал времени при наличии деградации качества работы сетевых соединений и после устранения деградации качества работы сетевых соединений согласно значений интегральных показателей качества. Для рассмотрения изменения объема данных в случайном порядке выбраны 10 абонентов сети связи.

Таблица 4.1 - Изменение объемов данных, переданных через сетевые соединения, после устранения деградаций качества работы сетевых соединений

<b>Условное наименование абонента</b>	<b>Объем данных за месяц при наличии деградации качества работы сетевого соединения, Мбайт</b>	<b>Объем данных за месяц после устранения деградации качества работы сетевого соединения, Мбайт</b>	<b>Прирост объема данных, отн.ед.</b>
Абонент 1	18492483,8	27731193,72	1,5
Абонент 2	3003069,27	5743479,87	1,91
Абонент 3	4709092,64	5318332,03	1,18
Абонент 4	8893488,39	10601340,15	1,19
Абонент 5	18723539,74	21080821,59	1,13
Абонент 6	6839398,65	8166696,54	1,19
Абонент 7	15604173,03	18070238,23	1,16
Абонент 8	5128350,43	6157787,28	1,2
Абонент 9	4327938,66	5743479,87	1,33
Абонент 10	1369331,23	1647104,79	1,2

Из анализа информации, представленной в таблице 4.1, можно сделать вывод, что использование интегральных показателей качества для обеспечения качества работы сетевых соединений позволяет в среднем в 1,2 раза увеличить объем данных, переданный по сетевому соединению с обеспечением необходимых значений показателей NP.

#### 4.6. Выводы по разделу 4

По результатам практического применения интегральных показателей качества для обеспечения качества передачи данных в мультисервисной сети связи можно сделать следующие выводы:

1. Интегральные показатели качества позволяют оценить степень ухудшения качества работы сетевых соединений в отношении передаваемых по сетевому соединению классов и типов трафика по значениям оцениваемых нормативных показателей качества на интервале времени проведения оценки.

2. Интегральные показатели качества позволяют выполнить сравнительный анализ качества работы сетевых соединений по однотипным нормативным показателям качества или по набору показателей качества.

3. Пороговое значение уровня загрузки в 70% определено достаточно корректно. При превышении данного значения уровня загрузки наблюдается возрастание ухудшения качества работы сетевых соединений по передаче пакетного трафика.

4. Зависимость значений интегральных показателей качества от уровня загрузки сетевого соединения позволяет определить уровни загрузки с стабильным качеством передачи пакетного трафика.

5. Многопороговая оценка качества работы сетевого соединения позволяет проводить сравнительную оценку качества работы сетевого соединения по передаче пакетного трафика различных классов и сервисов.

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. Набор значений интегральных показателей качества позволяет определить необходимые изменения в сети связи для улучшения качества передачи пакетного трафика или методы устранения возникших ухудшений качества передачи пакетного трафика.

## 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 технологии пакетной коммутации. При этом уделялось внимание возможности получения оценки влияния качества работы сетевых соединений пакетной сети на формирование результатов пользовательской оценки (QoE) качества услуги связи, в интересах которой по сетевым соединениям передается пакетный трафик, и возможности контроля выполнения соглашений о качестве предоставляемых услуг связи для конечных пользователей (выполнение требований 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 временным интервалам.

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 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 преемственность) 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 конфигурации 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 (QoE) качества услуги связи и возможности 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 в соответствии с требованиями федерального закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 № 102-ФЗ. 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 России 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», который определяет параметры целостности и устойчивости сетей связи.



**Список использованной литературы:**

1. Janevski, T. QoS for Fixed and Mobile Ultra-Broadband / T. Janevski. - John Wiley & Sons Ltd, 2019. - 326 p.
2. Recommendation ITU-T Y.2021. IMS for Next Generation Networks. - 2006.
3. Recommendation ITU-T Y.2011. General principles and general reference model for Next Generation Networks. - 2004.
4. Recommendation ITU-T X.210. Open System Interconnection Layer Service Definition Conventions. - 1988.
5. Recommendation ITU-T Y.1223. Interworking guidelines for transporting assured IP flows. - 2008.
6. Recommendation ITU-T G.8010/Y.1306. Architecture of Ethernet layer networks. - 2004.
7. Recommendation ITU-T P.10/G.100. Vocabulary for performance, quality of service and quality of experience. - 2017.
8. Recommendation ITU-T P.800.2. Mean opinion score interpretation and reporting. - 2016.
9. Recommendation ITU-T P.913. Methods for the subjective assessment of video quality, audio quality and audiovisual quality of Internet video and distribution quality television in any environment. - 2016.
10. Recommendation ITU-T G.107. The E-model: a computational model for use in transmission planning. - 2015.
11. Recommendation ITU-T P.862. Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs. - 2001.
12. Recommendation ITU-T I.350. General Aspect of Quality of Service and Network Performance in Digital Networks, including ISDNs. - 1993.

13. Recommendation ITU-T E.360.1. Framework for QoS routing and related traffic engineering methods for IP-, ATM-, and TDM-based multiservice networks. - 2002.
14. Об утверждении Требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования : Приказ Министерства информационных технологий и связи Российской Федерации от 27.09.2007 №113. - 2007.
15. Recommendation ITU-T Y.1540. Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters. - 2019.
16. Recommendation ITU-T Y.1541. Network performance objectives for IP-based services. - 2011.
17. Recommendation ITU-T M.2301. Performance objectives and procedures for provisioning and maintenance of IP-based networks. - 2002.
18. ГОСТ Р 56087.1-2014. Система национальных стандартов в области качества услуг связи. Методика проведения испытаний с помощью контрольных вызовов. - М. : Стандартинформ, 2014. - 9 с.
19. Recommendation ITU-T E.492. Traffic Reference Period - 1996.
20. Recommendation ITU-T E.500. Traffic Intensity Measurement Principles. - 1988.
21. Recommendation ITU-T Q.544. Digital Exchange Measurements. - 1993.
22. Recommendation ITU-T E.600. Terms and Definition of Traffic Engineering. - 1993.
23. Recommendation ITU-T G.1010. End-user multimedia QoS categories. - 2001.
24. Шнепс, М. А. Численные методы теории телетрафика / М. А. Шнепс. - М. : Связь, 1974. - 232 с.
25. Гольдштейн, Б. С. Сети связи : учебник для ВУЗов / Б. С. Гольдштейн, Г. Г. Яновский, Н. А. Соколов. - СПб. : БХВ-Петербург, 2010. - 400 с.
26. Гольдштейн, Б. С. Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. - СПб. : БХВ-Петербург, 2014. - 160 с.
27. Кучерявый, Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет / Е. А. Кучерявый. - СПб. : Наука и Техника, 2004. - 336 с.

28. Кучерявый, А. Е. Сети связи общего пользования: тенденции развития и методы расчета / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, Е. А. Кучерявый. - М. : ФГУП ЦНИИС, 2008. - 296 с.
29. Степанов, С. Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей / С. Н. Степанов. - М. : Эко-Трендз, 2010. - 392 с.
30. Битнер, В. И. Нормирование качества телекоммуникационных услуг : учебное пособие / В. И. Битнер, Г. Н. Попов ; под ред. профессора В. П. Шувалова. - М. : Горячая линия - Телеком, 2004. - 312 с.
31. Битнер, В. И. Принципы и протоколы взаимодействия телекоммуникационных сетей : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 210406 - "Сети связи и системы коммутации" / В. И. Битнер. - М. : Горячая Линия - Телеком, 2008. - 272 с.
32. Шувалов, В. П. Обеспечение показателей надежности телекоммуникационных систем и сетей / В. П. Шувалов, М. М. Егунов, Е. А. Минина. - М. : Горячая линия -Телеком, 2015. - 168 с.
33. Нетес, В. А. Основы теории надежности : учебное пособие для вузов / В. А. Нетес. - М. : Горячая Линия - Телеком, 2019. - 102 с.
34. Попков, Г. В. Математические основы моделирования сетей связи : учебное пособие для вузов / Г. В. Попков, В. К Попков, В. В. Величко. - М. : Горячая линия - Телеком, 2014. - 183 с.
35. Модели для анализа качества обслуживания в сетях связи следующего поколения: учеб. пособие / Г. П. Башарин, Ю. В. Гайдамака, К. Е. Самуйлов, Н. В. Яркина - М. : РУДН, 2008. - 137 с.
36. McCabe, J. D. Network Analysis, Architecture, and Design / J. D. McCabe - 3-ed. - USA, Burlington : Morgan Kaufmann, 2007. - 473 p.
37. Claise, B. Network Management: Accounting and Performance Strategies / B. Claise, R. Wolter. - USA, Indianapolis : Cisco Press, 2007. - 672 p.
38. Ackerley, R. Telecommunications Performance Engineering / R. Ackerley. - UK, London : Institution of Electrical Engineers, 2004. - 288 p.

39. Cole, R. G. Wide-Area Data Network Performance Engineering / R. G. Cole, R. Ramaswamy. - USA : Boston, Artech House, 2000. - 417 p.
40. ГОСТ Р 50779.11-2000. Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и определения. - М. : Госстандарт России, 2000. - 37 с.
41. Recommendation ITU-T E.800. Definitions of terms related to quality of service. - 2008.
42. Recommendation ITU-T E.802. Framework and methodologies for the determination and application of QoS parameters. - 2007.
43. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Часть 1. Базовая модель. - М. : Госстандарт России, 1999. - 57 с.
44. Конахович, Г. Ф. Сети передачи пакетных данных / Г. Ф. Конахович, В. М. Чуприн. - К. : «МК-Пресс», 2006. - 272 с.
45. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. - М. : Стандартиформ, 2015. - 30 с.
46. ГОСТ Р 53731-2009. Качество услуг связи. Термины и определения. - М. : Стандартиформ, 2011. - 4 с.
47. Recommendation ITU-T E.419. Business oriented key performance indicators for management of networks and services. - 2006.
48. Recommendation ITU-T X.140. General Quality of Service Parameters for Communication via Public Data Networks. - 1992.
49. Recommendation ITU-T X.213. Information technology – Open Systems Interconnection – Network service definition. - 2001.
50. Moller, S. Quality of Experience : Advanced Concepts, Applications and Methods / S. Moller, A. Raake. - Springer International Publishing, 2014. - 434 p.
51. Recommendation ITU-T G.1011. Reference guide to quality of experience assessment methodologies. - 2016.
52. Technical Report ETSI TR 102 643 V1.0.2 (2010-01). Human Factors (HF); Quality of Experience (QoE) requirements for real-time communication services. - 2010.

53. Recommendation ITU-T E.502. Traffic measurement requirements for digital telecommunication exchanges. - 2001.
54. Recommendation ITU-T Y.1543. Measurements in Internet protocol networks for inter-domain performance assessment. - 2018.
55. Recommendation ITU-T E.800 Supplement 8. Guidelines for inter-provider quality of service. - 2009.
56. Multimedia Quality of Experience (QoE): current status and future requirements / C. W. Chen, P. Chatzimisios, T. Dagiuklas, L. Atzori. - John Wiley & Sons Ltd, 2016. - 192 p.
57. Recommendation ITU-T G.1030. Estimating end-to-end performance in IP networks for data applications. - 2014.
58. Recommendation ITU-T Y.1562. Framework for higher-layer protocol performance parameters and their measurement. - 2007.
59. Recommendation ITU-T G.1031. QoE factors in web-browsing. - 2014.
60. Recommendation ITU-T G.1080. Quality of experience requirements for IPTV services. - 2008.
61. Recommendation ITU-T G.114. One-way transmission time. - 2003.
62. Recommendation ITU-T G.1020. Performance parameter definitions for quality of speech and other voiceband applications utilizing IP networks. - 2006.
63. ETSI Guide ETSI EG 202 009-2 V1.3.0 (2014-09). User Group; Quality of telecom services; Part 2: User related indicators on a service specific basis. - 2014.
64. Recommendation ITU-T Y.110. Global Information Infrastructure Principles and Framework Architecture. - 1998.
65. Бабкин, В. А. Методы оценки качества передачи данных в пакетных сетях связи / В. А. Бабкин, Е. П. Строганова // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. - 2019. - №11. - С. 25-31.
66. Recommendation ITU-T Y.1564. Ethernet service activation test methodology. - 2016.
67. RFC 5357. A Two-Way Active Measurement Protocol (TWAMP). - 2008.

68. RFC-6802. Ericsson Two-Way Active Measurement Protocol (TWAMP) Value-Added Octets. - 2012.
69. Sholomon, A. Enterprise Network Testing / A. Sholomon, T. Kunath. - USA, Indianapolis : Cisco Press, 2011. - 599 p.
70. Recommendation ITU-T O.211. Test and measurement equipment to perform tests at the IP layer. - 2006.
71. RFC 3416. Version 2 of the Protocol Operations for the Simple Network Management Protocol (SNMP). - 2002.
72. Мауро, Д. Основы SNMP / Д. Мауро, К. Шмидт ; пер. с англ. - 2-е издание - СПб. : Символ-Плюс, 2012. - 520 с.
73. Clemm, A. Network Management Fundamentals / A. Clemm. - USA, Indianapolis : Cisco Press, 2007. - 510 p.
74. RFC 3432. Network performance measurement with periodic streams. - 2002.
75. Гургенидзе, А. Т. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа / А. Т. Гургенидзе, В. И. Кореш. - СПб. : Наука и техника, 2003. - 400 с.
76. Ершов, В. А. Мультисервисные телекоммуникационные сети / В. А. Ершов, Н. А. Кузнецов. - М. : изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. - 432 с.
77. Олифер, В. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов / В. Олифер, Н. Олифер. - 5-е изд. - СПб. : Питер, 2016. - 992 с.
78. Буранова, М. А. Технологии обеспечения качества обслуживания в мультисервисных сетях: учебное пособие / М. А. Буранова, Н. В. Киреев. - Самара : ПГУТИ, 2016. - 194 с.
79. Santana, G. Data Center Virtualization Fundamentals / G. Santana. - USA, Indianapolis : Cisco Press, 2014. - 929 p.
80. Salmelin, J. Mobile backhaul / J. Salmelin, E. M. Metsala. - UK, Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2012. - 376 p.
81. Metsälä, E. M. LTE backhaul: planning and optimization / E. M. Metsälä, J. Salmelin. - UK, Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2016. - 284 p.
82. Recommendation ITU-T G.805. Generic functional architecture of transport networks. - 2000.

83. Akhshabi, S. The evolution of layered protocol stacks leads to an hourglass-shaped architecture / S. Akhshabi, C. Dovrolis.// In Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 Conference - 2011. - doi:10.1145/2018436.2018460.
84. ГОСТ Р 53728-2009. Качество услуги "Передача данных". Показатели качества. - М. : Стандартинформ, 2011. - 12 с.
85. Recommendation ITU-T E.651. Reference connections for traffic engineering of IP access networks. - 2000.
86. Recommendation ITU-T Y.1231. IP access network architecture. - 2000.
87. Recommendation ITU-T Y.1563. Ethernet frame transfer and availability performance. - 2009.
88. Technical Specification MEF 10.3. Ethernet Services Attributes Phase 3. - 2013.
89. MEF Position Paper. The Benefits of Multiple Classes of Service for Ethernet Mobile Backhaul. Version 1.0. - 2012. - 16 p.
90. Recommendation ITU-T Y.1561. Performance and availability parameters for MPLS networks. - 2004.
91. Recommendation ITU-T Y.1566. Quality of service mapping and interconnection between Ethernet, Internet protocol and multiprotocol label switching networks. - 2012.
92. Implementation Agreement MEF 23.1. Carrier Ethernet Class of Service – Phase 2. - 2012. - 96 p.
93. Recommendation ITU-T Y.2112. A QoS control architecture for Ethernet-based IP access networks. - 2007.
94. Recommendation ITU-T Y.2113. Ethernet QoS control for next generation networks. - 2009.
95. Technical Specification MEF 26.2. External Network Network Interfaces (ENNI) and Operator Service Attributes. - 2016.
96. Recommendation ITU-T Y.2173. Management of performance measurement for NGN. - 2008.
97. Бабкин, В. А. Оценка уровня утилизации каналов / В. А. Бабкин // Вестник связи. - 2018. - №7. - С. 6-8.

98. Петров, В. В. То, что вы хотели знать о самоподобных процессах, но стеснялись спросить / В. В. Петров. - М. : Радиотехника, 2003. - 112 с.
99. Бакланов, И. Г. Релятивизм в метрологии систем связи / И. Г. Бакланов. Екатеринбург : Издательские решения, 2016. - 436 с.
100. Битнер, В. И. Сети нового поколения – NGN : учебное пособие для вузов / В. И. Битнер, Ц. Ц. Михайлова. - М. : Горячая линия – Телеком, 2011. - 226 с.
101. Recommendation ITU-T Y.1544. Multicast IP performance parameters. - 2008.
102. Вегешна, Ш. Качество обслуживания в сетях IP / Ш. Вегешна ; пер. с англ. - М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. - 368 с.
103. RFC 3644. Policy Quality of Service (QoS) Information Model. - 2003.
104. Performance and Fault Management / P. L. Della Maggiora, C. E. Elliott, R. L. Ravone, K. J. Phelps, J. M. Thompson. - USA, Indianapolis : Cisco Press, 2000. - 608 p.
105. Климов, Г. П. Стохастические системы обслуживания / Г. П. Климов. - М. : Наука, 1966. - 243 с.
106. Recommendation ITU-T E.412. Network management controls. - 2003.
107. Gómez-Andrades, A. Automatic Root Cause Analysis for LTE Networks Based on Unsupervised Techniques / A. Gómez-Andrades, P. Pablo Muñoz, I. Serrano, R. Barco R. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. - 2016. - № 4.
108. Noordally, R. How long delays impact TCP performance for a connectivity from Reunion Island? / R. Noordally, X. Nicolay, Y. Gangat, P. Anelli. - 2017.
109. Talpur S., Kechadi T. A Forecasting Model for Data Center Bandwidth Utilization / S. Talpur, T. Kechadi // SAI Intelligent Systems Conference 2016. - UK, London, 2016.
110. Abbasloo, S. Bounding Queue Delay in Cellular Networks to Support Ultra-Low Latency Applications / S. Abbasloo, J. Chao - 2019.
111. Zaim, K. Performance Analysis of IP Network Using Two-Way Active Measurement Protocol (TWAMP) and Comparison with ICMP (Ping) Protocol in a Saturated Condition / K. Zaim, C. Cemal Kocak // 4th International Symposium on



- Innovative Technologies in Engineering and Science 2016 (ISITES2016). - Turkey, Alanya/Antalya, 2016.
112. Babu, D. A Multistage Queueing Model with Priority for Customers Become Fit / D. Babu, V. C. Joshua, A. Krishnamoorthy // Revised Selected Papers 22nd International Conference Distributed Computer and Communication Networks 2019 (DCCN 2019). - Russia, Moscow. 2019. - P. 223-233.
  113. Li X., Schelb R., Gorg G., and Timm-Giel A. Dimensioning of UTRAN Iub Links for Elastic Internet Traffic / X. Li, R. Schelb, G. Gorg, A. Timm-Giel // ITC19 Performance Challenges for Efficient Next Generation Networks. - 2019. - P. 415-424.
  114. Adewale A. A. A., Adagunodo E. R., John S. N., Ndujiuba C. A Comparative Simulation Study of IP, MPLS, MPLS-TE for Latency and Packet Loss Reduction over a WAN / A. A. Adewale, E. R. Adagunodo, S. N. John, C. Ndujiuba // International Journal of Networks and Communications. - 2016. - DOI: 10.5923/j.ijnc.20160601.01
  115. Barakabitze, A. A. QoE Management of Multimedia Streaming Services in Future Networks: A Tutorial and Survey / A. A. Barakabitze et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. - 2019.
  116. Calin, D. Packet Coloring for Intelligent Traffic Management In Wireless Networks / D. Calin, B. Kim, F. Bourriaud // IEEE ICC 2017 Communications QoS, Reliability, and Modeling Symposium. - 2017.
  117. Zhan, Y. A QoE Evaluation Method for RT-HDMV Based on Multipath Relay Service / Y. Zhan, W. Lei, Y. Guan // Symmetry. - 2019. - №11. - doi:10.3390/sym11091127
  118. Karamchati, S. Mapping Mechanism to Enhance QoS in IP Networks / S. Karamchati, S. Rawat, S. Yarram, G. P. Ramaguru // The 32nd International Conference on Information Networking 2018 (ICOIN 2018). - 2018.
  119. Fiedler, M. Quality of Experience-Related Differential Equations and Provisioning-Delivery Hysteresis / M. Fiedler, T. Hossfeld // IEICE, ITC-SS21. - 2010.

120. Recommendation ITU-T Y.1291. An architectural framework for support of Quality of Service in packet networks. - 2004.
121. Recommendation ITU-T Y.1315. QoS support for VPN services – Framework and characteristics. - 2006.
122. ГОСТ Р МЭК 61069-1-2017. Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Определение свойств системы с целью ее оценки. Часть 1. Терминология и общие концепции. - М. : Стандартинформ, 2017. - 32 с.
123. ГОСТ Р МЭК 61069-4-2017 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Определение свойств системы с целью ее оценки. Часть 4. Оценка производительности системы. - М. : Стандартинформ, 2017. - 23 с.
124. Implementation Agreement MEF 22.3. Transport Services for Mobile Networks. - 2018. - 129 p.
125. Бабкин, В. А. Пороговые значения показателей качества пакетных сетей / В. А. Бабкин // Сборник трудов XIV Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» / МТУСИ. - Москва, 2020. - С. 79–81.
126. Technical Specification MEF 10.1. Ethernet Services Attributes Phase 2. - 2006. - 59 p.
127. Implementation Agreement MEF 23.2. Carrier Ethernet Class of Service – Phase 3. - 2016. - 117 p.
128. Recommendation ITU-T Y.1545. Roadmap for the quality of service of interconnected networks that use the Internet Protocol. - 2013.
129. Technical Specification ETSI TS 123 203 V15.3.0 (2018-07). Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Policy and charging control architecture (3GPP TS 23.203 version 15.3.0 Release 15). - 2018.

130. Multimedia Networking Technologies, Protocols, and Architectures / I. Vidal, I. Soto, A. Banchs, J. Garcia-Reinoso, I. Lozano, G. Camarillo. - USA, Norwood : Artech House, 2019. - 332p.
131. Бабкин, В. А. Граничные условия качественных показателей сети связи / В. А. Бабкин // Вестник связи. - 2018. - №9. - С. 13-17.
132. Голиков, А. М. Транспортные и мультисервисные системы и сети связи : учебное пособие, часть 1 / А. М. Голиков. - Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2015. - 83 с.
133. Zhang, Y. Network Management in Cloud and Edge Computing / Y. Zhang Y., K. Ke Xu. - Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. - 138 p.
134. Бабкин, В. А. Интегральная оценка уровня утилизации канала связи / В. А. Бабкин // Вестник связи. - 2018. - №11. - С. 6-11.
135. RFC 4594. Configuration Guidelines for DiffServ Service Classes. - 2006.
136. Таненбаум, Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл. - 5-е изд. - СПб. : Питер, 2019. - 960с.
137. Одом, У. Официальное руководство Cisco по подготовке к сертификационным экзаменам CCENT/CCNA ICND1 640-822 / У. Одом ; пер. с англ. - 3-е изд. - М. : ООО «И.Д. Вильямс», 2013. - 720 с.
138. Recommendation ITU-T Y.3042. Smart ubiquitous networks – Smart traffic control and resource management functions. - 2013.
139. Методы и модели теории телетрафика: учебное пособие / В. Т. Еременко [и др.]. - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019. - 244 с.
140. 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.
141. Guichard, J. Definitive MPLS Network Designs / J. Guichard, F. Le Faucheur, J. P. Vasseur. - USA, Indianapolis : Cisco Press, 2005. - 552 p.
142. Held, G. Enhancing LAN Performance, Fourth Edition / G. Held. - 4th ed. - USA, Boca Raton : CRC Press LLC, 2004. - 480 p.

143. McConnell, J. Practical Service Level Management: Delivering High-Quality Web-Based Services / J. McConnell, E. Siegel. - USA, Indianapolis : Cisco Press, 2004. - 304 p.
144. Barreiros, M. QOS-Enabled Networks : Tools and Foundations / M. Barreiros, P. Lundqvist. - Second Edition. - UK, West Sussex : John Wiley & Sons Ltd, 2016. - 233 p.
145. Al-shawi, M. Designing for Cisco Network Service Architectures (ARCH) Foundation Learning Guide / M. Al-shawi, A. Laurent. - Fourth Edition. - USA, Indianapolis : Cisco Press, 2017. - 904 p.
146. Куин, Л. Fast Ethernet / Л. Куин, Р. Рассел. - К. : Издательская группа BHV, 1998. - 448 с.
147. Воловач, В. И. Учебно-методический комплекс по дисциплине "Сети ЭВМ и телекоммуникации" для студентов направления 230100.62 «Информатика и вычислительная техника» / В. И. Воловач, А.В. Савенко. - Тольятти : Поволжский государственный университет сервиса (ПВГУС), 2010. - 375 с.
148. ГОСТ 33889-2016. Электросвязь железнодорожная. Термины и определения. - М. : Стандартинформ, 2016. - 60 с.
149. DSL Forum Technical Report TR-126. Triple-play Services Quality of Experience (QoE) Requirements. - 2006.
150. Recommendation ITU-T G.1000. Communications quality of service: A framework and definitions. - 2001.
151. Stallings, W. Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud / W. Stallings. - USA, Indiana : Pearson Education Inc., 2016. - 538 p.
152. Recommendation ITU-T G.1071. Opinion model for network planning of video and audio streaming applications. - 2016.
153. Recommendation ITU-T P.863. Perceptual objective listening quality prediction. - 2018.
154. Recommendation ITU-T P.809. Subjective evaluation methods for gaming quality. - 2018.

155. RFC 3670. Information Model for Describing Network Device QoS Datapath Mechanisms. - 2004.
156. Recommendation ITU-T X.149. Performance of IP networks when supported by public Frame Relay data networks. - 2003.
157. Recommendation ITU-T E.811. Quality measurement in major events. - 2017.
158. 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.
159. IEEE Std 802.3-2018. IEEE Standard for Ethernet. - 2018.
160. Technical Specification MEF 33. Ethernet Access Services Definition. - 2012.
161. MEF. Understanding Carrier Ethernet Throughput. Am I getting the throughput I should be getting? Version 2. - 2010. - 22 p.
162. Руководство по поиску неисправностей в объединенных сетях / Cisco Systems [и др.] ; пер. с англ. - М. : Издательский дом «Вильямс», 2003 - 1040 с.
163. Амато, В. Основы организации сетей Cisco / В. Амато ; пер. с англ. - том 2, испр. изд. - М. : Издательский дом "Вильямс", 2004. - 464 с.
164. Кеннеди, К. Принципы коммутации в локальных сетях Cisco / К. Кеннеди, Г. Кевин ; пер. с англ. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. - 976с.
165. Held, G. Ethernet Networks: Design, Implementation, Operation, Management /G. Held. - USA, Georgia : John Wiley & Sons Ltd, 2003. - 589 p.
166. Spurgeon, C. E. Ethernet: The Definitive Guide / C. E. Spurgeon, J. Zimmerman. - Second Edition. - USA, Sebastopol : O'Reilly Media Inc., 2014. - 483 p.
167. 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. - DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813962.
168. Layer 2 VPN Architectures / W. Luo, C. Pignataro, D. Bokotey, A. Chan. - USA, Indianapolis : Cisco Press, 2005. - 623 p.

169. Recommendation ITU-T Y.1542. Framework for achieving end-to-end IP performance objectives. - 2010.
170. Шишмарев, В. Ю. Основы автоматического управления : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В. Ю. Шишмарев. - М. : Издательский центр «Академия», 2008. - 352 с.
171. Бабкин, В. А. Интегральная оценка уровня утилизации канала связи / В. А. Бабкин // Международная научная конференция «Технические и естественные науки» / ГНИИ «Нацразвитие». - С-Петербург, 2018. - С.175-179.
172. Recommendation ITU-T G.826. End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections. - 2002.
173. Recommendation ITU-T Y.2060. Overview of the Internet of things. - 2012.
174. Technical Report ETSI TR 125 902 V6.1.0 (2006-09). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Iub/Iur congestion control (3GPP TR 25.902 version 6.1.0 Release 6). - 2006.
175. Technical Report ETSI TR 126 937 V8.0.0 (2009-01). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Transparent end-to-end packet switched streaming service (PSS); Real-time Transport Protocol (RTP) usage model (3GPP TR 26.937 version 8.0.0 Release 8). - 2009.

## Приложение 1. Акты о внедрении результатов диссертации

**Утверждаю**  
 Директор департамента эксплуатации  
 конвергентных сетей и сервисов ПАО  
 «МТС»  
 Серегин А.В.  
 2021 г.



### АКТ

внедрения научных результатов,  
 полученных в диссертационной работе Бабкина В.А.  
 «Исследование и разработка методов мониторинга производительности  
 пакетной транспортной сети на основе анализа показателей качества»  
 в производственной деятельности ПАО «МТС»

По результатам проведения исследований в рамках разработки методов мониторинга производительности пакетной транспортной сети в производственную деятельность ПАО «МТС» внедрены следующие результаты исследований:

однопороговый и многопороговый методы формирования оценки качества работы сетевых соединений на основе значений интегральных показателей качества, позволяющие формировать оценку степени пригодности сетевых соединений для передачи пакетного трафика в интересах, предоставляемых и планируемых к предоставлению на сети услуг связи.

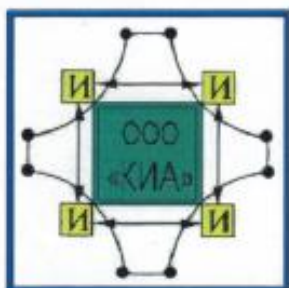
Использование оценок производительности сетевых соединений на основе интегральных показателей качества обеспечивает поддержание качества работы сети связи для предоставления услуг связи на должном уровне, обеспечивает планирование мероприятий по развитию и модернизации сети связи.

За время использования в производственной деятельности компании с 2018 года методы оценки производительности сети связи с использованием интегральных показателей показали свою эффективность в техническом и экономическом плане. Использование интегральных показателей качества для обеспечения качества работы сетевых соединений позволяет в среднем в 1,2 раза увеличить объем данных, переданный по сетевому соединению с обеспечением необходимых требований к качеству передачи пакетного трафика по сравнению с использованием традиционных показателей качества.

Начальник отдела методологии контроля  
 качества работы конвергентных  
 сетей и сервисов



Арбузов А.В.



**Общество с ограниченной ответственностью  
«Координационно-информационное агентство» (ООО «КИА»)**

Юридический и почтовый адрес: 109029, г. Москва,  
Сибирский проезд, д. 2, стр.11, этаж №1 комната №6  
ИНН/КПП 7701171409/770901001  
Тел./факс: (495) 283-00-16

Исх. № 24/08-20 от 24 августа 2020 г.

**Утверждаю**

Генеральный директор ООО КИА,  
кандидат технических наук

Зикулин В.Н.



**АКТ**

практического внедрения результатов,  
полученных в диссертационной работе Бабкина В.А.  
«Исследование и разработка методов мониторинга производительности пакетной  
транспортной сети на основе анализа показателей качества»  
по специальности 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Разработанный автором диссертации метод формирования диапазона пороговых значений для проведения оценки качества работы соединений сетей с коммутацией пакетов передаваемой информации внедрен и апробирован при производстве Комплексов измерительных ВЕКТОР-2019 (КБРД.468261.007ТУ «Комплексы измерительные ВЕКТОР-2019. Технические условия»). Алгоритм специального программного обеспечения Комплексов измерительных ВЕКТОР-2019 с помощью указанного метода позволяет учитывать различные требования к ресурсам сети со стороны набора услуг, трафик которых передается по сетевому соединению, на различных уровнях модели взаимодействия открытых систем, мониторинг которых может осуществляться измерительными комплексами подобного типа. Комплексы измерительные ВЕКТОР-2019 прошли испытания в целях утверждения их типа как средств измерений и рекомендованы к применению в сетях связи для мониторинга целостности и устойчивости их функционирования, а также контроля качество услуг связи.

Технический директор

Орлов А.В.