

На правах рукописи

Никульский Игорь Евгеньевич

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ
ШИРОКОПОЛОСНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ДОСТУПА**

05.12.13 – Системы, сети
и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

**САНКТ- ПЕТЕРБУРГ
2011**

Работа выполнена в Санкт-Петербургском филиале
ФГУП ЦНИИС – ЛО ЦНИИС.

**Научный
консультант:**

Доктор технических наук, профессор
Александр Иванович Осадчий

**Официальные
оппоненты:**

1. Доктор технических наук, профессор
Александр Ювенальевич Тропченко
2. Доктор технических наук, доцент
Андрей Константинович Канаев
3. Доктор технических наук, доцент
Сергей Александрович Ясинский

**Ведущая
организация:**

ЗАО «Институт телекоммуникаций»

Защита состоится « ____ » _____ 2011 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 219.004.02 при Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича по адресу: 191186 Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 61

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Отзыв на реферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 191186 Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 61

Автореферат разослан « ____ » _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

В.Х. Харитонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный этап общественного развития неразрывно связан с движением по пути построения глобального информационного общества. Данное направление в значительной мере обеспечивается за счет развития и совершенствования архитектуры сетей и систем телекоммуникаций, существенного улучшения их эксплуатационных характеристик, к которым прежде всего относятся характеристики качества обслуживания всех классов передаваемого в этих сетях трафика.

Если еще совсем недавно основной массовой услугой, предоставляемой широкому кругу абонентов сети передачи данных, был доступ к ресурсам глобальной сети Интернет, то в настоящее время эта популярная услуга часто дополняется услугами звукового и телевизионного вещания, IP-телефонии, высокоскоростного обмена данными между пользователями и рядом других. Внедрение этих услуг, предоставляемых через современные многофункциональные мультимедиатерминалы, сопровождается переходом к мультисервисной сетевой инфраструктуре нового типа, базирующейся на принципах сетей следующего поколения NGN (Next Generation Networks).

Важной частью этой пакетной сетевой инфраструктуры является широкополосная сеть доступа (ШСД), реализующая присоединение пользовательских терминалов и локальных сетей абонентов к узлам доступа.

На фоне интенсивного развития технологий транспортных сетей и систем коммутации, фиксированный сектор сетей доступа, потребовавший от традиционных операторов до 30% инвестиций, направляемых на развитие телекоммуникационной инфраструктуры, за всю свою более чем столетнюю историю, почти не подвергся существенным изменениям, связанным с заменой физической среды распространения. В последние годы ситуация начала меняться.

Постоянное расширение номенклатуры сетевых услуг, развитие технологий передачи, отображения видеоконтента, расширение пользовательской базы охваченной широкополосными услугами и многие другие факторы приводят к постоянной потребности в повышении скорости передачи данных на уровне доступа. Указанное обстоятельство способствует широкому внедрению в фиксированном секторе сети доступа (СД) широкополосных волоконно-оптических технологий. Инженерные достижения в сфере развития СД существенно опережают развитие научных методов анализа эксплуатационных характеристик этой части ЕСЭ.

В связи с этим представляются актуальными разработка научных основ и методов создания и внедрения оптических ШСД (ОШСД), их моделирование и теоретический анализ показателей качества обслуживания всех видов трафика, передаваемых посредством этого участка сети, а также разработка научных методов анализа и обеспечения надежности в таких сетях. Поскольку ОШСД представляют собой дорогостоящие сооружения, покрывающие обширные, в том числе, сельские территории, то представляется ак-

туальной разработкой научных методов и алгоритмов создания структур и топологий ОШСД оптимальных с точки зрения минимизации приведенных затрат на строительство этих сетей, но обеспечивающих при этом необходимый уровень эксплуатационных характеристик и, в частности, показателей надежности.

Объектом исследования диссертационной работы являются широкополосные оптические сети доступа, представляющие собой составную часть мультисервисной сетевой инфраструктуры.

Предметом исследования являются закономерности эволюционного развития СД и взаимосвязи характеристик СД с их основными параметрами, а также математические модели ОШСД.

Цель работы. Целью работы является решение фундаментальной научно-технической проблемы – разработки новых методов построения сетевой инфраструктуры доступа крупных телекоммуникационных операторов на основе массового внедрения широкополосных оптических технологий, ориентированных на реализацию сетей следующего поколения (NGN). Достижение поставленной цели предполагает решение трех классов взаимосвязанных научно-технических задач. К первому классу относятся задачи разработки методологии построения и модернизации инфраструктуры доступа крупных сетевых операторов на основе внедрения широкополосных волоконно-оптических технологий.

Ко второму классу относятся задачи математического моделирования, анализа и синтеза сегментов и участков волоконно-оптических ШСД с целью анализа характеристик качества обслуживания всех классов трафика, передаваемых через исследуемые участки пакетной сетевой инфраструктуры и показателей надежности, а также с целью оптимального по критерию минимума приведенных затрат синтеза структуры сетей доступа, обеспечивающих заданные значения эксплуатационных характеристик и показателей надежности.

К третьему классу относятся задачи, связанные с разработкой методик расчета эксплуатационных характеристик, а также оптимального проектирования создаваемых и реконструируемых сетей, базирующиеся на решении двух первых классов указанных задач.

Состояние проблемы и задачи исследования. Аналитическому моделированию телекоммуникационных сетей посвящены работы Г.П. Башарина, В.И. Неймана, С.И. Самойленко, В.М. Вишневого, А.Н. Дудина, О.И. Шелухина, Г.П. Захарова, О.С. Чугреева, Г.Г. Яновского, Б.С. Гольдштейна, А.Е. Кучерявого, Е.А. Кучерявого, Т.И. Алиева, Н.А. Соколова, L. Kleinrock, W. Vuk, W. Leland, M. Taggu, I. Norros и многих других авторов. Для большинства этих работ характерны обобщенные модели исследования сетей при воздействии на них различных моделей трафика. Вместе с этим, в настоящее время пока еще известно довольно мало работ, посвященных исследованию широкополосных оптических сетей доступа, принимающих во

внимание при составлении моделей особенности сетевых структур и механизмов, реализуемых на уровне доступа, учитывающих при оценке показателей качества обслуживания, (в частности – девиации задержки каждого из передаваемых классов трафика), влияние приоритетного обслуживания, а также учитывающих влияние видов топологий сети, как при оценке показателей качества обслуживания передаваемых классов трафика так и при оценке показателей надежности.

Описанию функционирования современных оптических сетей и технологий доступа посвящены работы Р.Р. Убайдуллаева, Н.Н. Слепова, И.Г. Бакланова и многих других авторов. В этих публикациях прежде всего приводится практический инженерный анализ, описание эволюции и принципов действия данного интенсивно развивающегося класса технологий. Вопросам математического моделирования участков сетей с целью оценки показателей качества обслуживания передаваемого трафика и надежности в указанных работах не уделяется внимания, а при рассмотрении вопросов построения оптимальных сетей не учитывается технико-экономическая природа целевого функционала.

Основным недостатком известных работ по рассматриваемой проблематике представляется отсутствие целостной концепции, охватывающей широкий круг вопросов разработки научно-технических основ создания ОШСД, разработки методов исследования, моделирования и проектирования структурно-сетевых решений и сетевых устройств, включающего анализ показателей их надежности и разработку путей улучшения этих показателей, а также вопросы синтеза структур и топологий сегментов оптической сети доступа, обладающих наилучшими технико-экономическими и эксплуатационными характеристиками.

В соответствии с указанной целью в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи.

1. Предложена и обоснована концептуальная модель иерархической мультисервисной сети, использующей волоконно-оптические технологии доступа покрывающие как городские, так и сельские районы. Предложены методы модернизации сетевой инфраструктуры доступа городских и сельских районов на основе технологий пассивных оптических сетей и иерархических кольцевых сетей.

2. Разработана методология математического моделирования сетей доступа на основе методов теории массового обслуживания с использованием аналитических и имитационных моделей систем и сетей массового обслуживания, с целью оценки показателей качества обслуживания всех классов трафика, передаваемого через сеть доступа, учитывающая приоритетный характер обслуживания и ориентированная на предоставление пакетированной услуги «Triple Play».

3. Предложены и обоснованы математические модели сегментов сети доступа, использующей технологии пассивных оптических сетей на основе

многофазных СМО и проведено численное исследование зависимостей показателей качества обслуживания от различных параметров процессов обслуживания трафика с тремя классами относительных приоритетов в разных фазах обслуживания, в нисходящем и восходящем направлениях, с учетом сетевых механизмов доступа.

4. Исследованы математические модели верхних уровней иерархической мультисервисной сетевой структуры в виде разомкнутых линейных СеМО с тремя классами относительных приоритетов обслуживания заявок с целью анализа характеристик качества обслуживания при соединении сегментов сети доступа через другие уровни иерархии мультисервисной сети. На основе данных моделей проведен анализ характеристик качества обслуживания с учетом влияния топологической структуры, на примере ядра сети, для трех классов трафика: VoIP, IPTV, DoIP.

5. Проанализирована аналитическая модель сегмента сети доступа с доведением оптического кабеля до узла доступа (FTTN) и использующая ADSL-технология на последней миле, на основе многофазной СМО. Проведено численное исследование показателей качества обслуживания передаваемого трафика.

6. Предложена методика оценки задержек распространения в многосвязной сети, учитывающая альтернативный характер маршрутов распространения сигнала.

7. Разработана методика оценки показателей качества обслуживания на участке ОШСД.

8. Предложена и обоснована структурно-функциональная модель кольцевой оптической сети доступа на основе оригинальных оптических сетевых устройств.

9. Разработаны модели надежности и методы анализа показателей надежности кольцевой и других топологических структур сети доступа. Предложены методы повышения надежности кольцевой оптической сети доступа.

10. Исследована математическая модель пакетной кольцевой оптической сети доступа. Проведено численное исследование зависимости показателей качества обслуживания для трафика с двумя классами относительных приоритетов обслуживания, с учетом показателей процесса возникновения отказов и их восстановления. Предложена и обоснована модель для оценки коэффициента потерь пакетов в кольцевой сети с учетом возникновения сбоев.

11. Предложена методика оценки надежности и качества обслуживания трафика в кольцевых оптических сетях доступа.

12. Предложена и обоснована структурно-функциональная модель синхронной сетевой структуры. Проанализированы математические модели кольцевой сети с синхронным случайным и контролируемым доступом, учитывающие различный характер процесса блокировки приемного буфера,

процесс фазирования и ненадежность сети. Исследована модель процесса фазирования синхронной сети на основе метода вероятностно-временных графов и z-преобразования.

13. Предложен метод оптимизации сетевых структур по критерию минимума приведенных затрат, включающий топологическую оптимизацию, оценку стоимости станционного оборудования, основанный на формально-эвристических целочисленных алгоритмах оптимизации.

14. Разработана методика проектирования ОШСД, основанная на предложенном в гл. 5 настоящей работы методе оптимизации и на использовании для оценки ограничений аналитических моделей, предложенных и исследованных в гл. 3 и 4.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы теории вероятностей, теории массового обслуживания, прикладной теории надежности, теории оптимизации и другие.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем.

1. Предложена и обоснована концептуальная модель иерархической мультисервисной сети (МС) с реализацией услуги «Triple Play», ориентированная на применение широкополосных оптических технологий на уровне доступа: технологий пассивных оптических сетей для покрытия городских районов и технологии кольцевых сетей для сельских районов.

2. Предложена методология модернизации сетевой инфраструктуры доступа крупных операторов на основе массового внедрения широкополосных оптических технологий доступа.

3. Предложены и исследованы математические модели сегментов широкополосной сети доступа, использующих технологии пассивных оптических сетей на основе многофазных СМО с тремя классами относительных приоритетов обслуживания для трех классов трафика: VoIP, IPTV, DoIP, учитывающие мультикастинг IPTV вещания и трафик видео по запросу (VoD) в нисходящей ветви и влияние ранжирования по фазе на интервал доступа в восходящей ветви.

4. Предложена и обоснована структурно-функциональная модель сети доступа, построенной на основе оригинальных оптических устройств интерфейса кольцевой синхронной самовосстанавливающейся оптической сети, а также разработаны и проанализированы модели надежности таких сетей и математические модели для оценки характеристик качества обслуживания передаваемого в них трафика, учитывающие процесс возникновения отказов и восстановлений. Предложены методы повышения надежности сетей данного класса.

5. Разработаны и исследованы математические модели синхронных сетевых структур в дискретном времени, отличающиеся от известных тем, что в них механизмы фазирования и блокировки приемных буферов учтены при

конструировании ряда распределения интервалов обслуживания путем вложения их в модель процесса обслуживания. Также предложена и проанализирована математическая модель процесса фазирования на основе вероятно-временно-временных графов и z-преобразования. Решена задача оптимизации структуры синхронной сети, отличающаяся от известных тем, что в ней расширена структура сети, использовано упорядочение множества ее вариантов и в качестве подзадачи решена задача топологической оптимизации, учитывающая ограничение на трассы прокладки кабелей. Предложенный метод оптимизации расширен, обобщен и применен для оптимизации структуры ОШСД.

Практическая ценность полученных в работе результатов состоит в следующем.

1. Разработанные методы расчета обеспечивают адекватность моделей реальным процессам, протекающим в ОШСД.

2. Получены аналитические выражения и разработаны имитационные модели сегментов ОШСД, позволяющие проводить оценку основных показателей качества обслуживания всех видов передаваемого в ШСД трафика, а также показателей надежности, что дало возможность производить прогнозирование этих характеристик в процессе проектирования и предпроектного анализа ШСД.

3. Для применения в проектных организациях разработаны методики оптимального проектирования ОШСД, а также методики оценки их показателей качества обслуживания и надежности.

4. Для использования в крупных операторских структурах разработана концептуальная основа модернизации сетевой инфраструктуры доступа на основе широкого внедрения оптических технологий, как для городских, так и для сельских районов.

5. Предложены методы построения, совершенствования и развития высоконадежных самовосстанавливающихся оптических сетей доступа с иерархической структурой. Предложенные технические решения доведены до промышленного серийного производства двух поколений оригинальных систем и устройств, обеспечивающих построение оптических сетей доступа. Синтезированные на основе этого оборудования системно-сетевые решения, впервые внедренные в народном хозяйстве во многих районах Российской Федерации, позволили провести масштабную модернизацию инфраструктуры доступа в ряде регионов России и доказали свою состоятельность безотказным функционированием во многих операторских структурах и на объектах заказчиков на протяжении ряда лет. Внедрение данной архитектуры сетей и систем телекоммуникаций и входящих в них оригинальных устройств обеспечило переход на новый уровень качественных и эксплуатационных показателей реконструированных сетей доступа при минимальных затратах на станционное оборудование.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационного исследования использованы в следующих работах.

1. Во ФГУП ЛОНИИС при проведении НИР «Разработка рекомендаций по повышению надежности кольцевых оптических систем связи сельских районов», «Разработка концепции внедрения технологий PON на сети ОАО «СЗТ» до 2009 года» и других. Разрешение проблемы создания синхронной кольцевой самовосстанавливающейся сети переноса на основе предложенного автором настоящей работы в инициативном порядке оригинального оборудования оптических интерфейсов комплекса КАПСК (АТСЦ-90) охарактеризовано руководством филиала ЛО ЦНИИС как организация под руководством автора настоящей работы в филиале ЛО ЦНИИС *нового научно-технического направления*, что привело к созданию новой проблемной научно-исследовательской лаборатории «Перспективных исследований и разработки программно-аппаратных средств телекоммуникационных систем и сетей на основе оптических технологий».

2. В Ростовском филиале ОАО «ЮТК», при использовании результатов НИР «Исследование и разработка методов проектирования и оптимизации оптических сетей переноса на основе комплекса аппаратных и программных средств цифровой АТС АТСЦ-90», в ходе цифровой реконструкции сети связи Волгодонского района, а также в гг. Гуково и Донецке. Реализация в промышленном производстве и внедрение на территории Ростовской области комплекса технических решений, защищенных десятью патентами на полезные модели РФ, опубликованными по теме настоящей диссертационной работы, охарактеризовано руководством Ростовского филиала ОАО «ЮТК» как решение *крупной хозяйственной задачи*.

3. В учебном процессе по курсу «Сети ЭВМ и телекоммуникации» в СПбГУИТМО.

4. В ОАО «СЗТ», при использовании результатов НИР «Разработка концепции внедрения технологий PON на сети ОАО «СЗТ» до 2009 года», а также в ОАО «СЗТ» и ЗАО «Центрсвязьинформ» при проведении предпроектных исследований. Внедрение на объектах МО РФ оригинального оптического оборудования доступа, защищенного патентами на полезные модели РФ, опубликованными по теме диссертации, охарактеризовано руководством ЗАО «Центрсвязьинформ» как решение *важной задачи в интересах МО РФ*.

Реализация результатов работы подтверждена соответствующими актами о внедрении.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и были одобрены: на всесоюзной конференции «Проблемы развития цифровых систем передачи городских и сельских сетей связи на основе электрических и волоконно-оптических кабелей «ЦСП-87», на всесоюзной научно-технической конференции по локальным вычислительным сетям «Локсеть-88» (г. Рига, ИЭВТ, 1988), на 16-той всесоюзной школе-семинаре по вычислительным сетям (г. Винница, 1991), на международном семинаре «Инфор-

мационные системы, сети, технологии» ИССТ-97, (г. Ярославль, 1997), на Международной конференции по информационным сетям и системам ICINAS-98, (Санкт-Петербург, 1998), на VII международной конференции ICINASTE-2001 (г. Минск, БГЭУ, 2001), на Международной конференции ICACT-2008 (Респ. Корея, 2008), на XXXVIII научной и учебно-методической конференции СПбГУИТМО (Санкт-Петербург, 2009), на четвертой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию ИММОД-2009, (Санкт-Петербург, 2009) и на других научно-технических конференциях и семинарах.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы нашли отражение в 45 научных публикациях, в том числе в 10 публикациях в периодических изданиях, находящихся в перечне ВАК, рекомендуемых для опубликования результатов докторских диссертаций или находившихся в этом перечне на момент опубликования, в одной монографии, в двух авторских свидетельствах на изобретения СССР, в 10 патентах на полезные модели РФ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Концепция построения, моделирования и исследования широкополосных оптических сетей доступа, а также методы модернизации инфраструктуры доступа крупных операторов, направленные на массовое внедрение широкополосных оптических технологий доступа и предоставление пользователям широкополосных современных услуг.

2. Математические модели сегментов сети доступа с тремя классами относительных приоритетов обслуживания, учитывающие сетевые механизмы на уровне доступа, влияние топологии сети и показателей надежности на характеристики качества обслуживания трех видов трафика: речь (VoIP), видео (IPTV), и данные (DoIP).

3. Метод оптимизации сетевых структур, включающий топологическую оптимизацию, оценку стоимости стационарного оборудования, учитывающий иерархическую структуру сети, особенности построения оптических линейных сооружений и технической реализации ее узлов, основанный на формально-эвристических целочисленных алгоритмах оптимизации.

4. Методика проектирования ОШСД, основанная на использовании метода целочисленной оптимизации структуры сети и оценке ограничений для анализируемых вариантов, использующей математические модели ОШСД разработанные в гл. 3 настоящей работы.

Личный вклад автора. Результаты исследований получены автором самостоятельно. В работах, которые опубликованы с соавторами, соискателю принадлежит основная роль в постановке и решении задач, в обобщении полученных результатов, а также в разработке ключевых технических решений, организации их реализации и внедрения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Пояснительная записка содержит 282 страницы (без текста приложений), 52 рисунка,

12 таблиц, 252 формулы, список литературы содержит 206 наименований литературных источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика работы.

В первой главе работы сформулированы основные методы построения широкополосных оптических сетей доступа нового поколения. Также выявлены основные принципы построения и аспекты эволюции оптических сетевых технологий доступа.

Составлена классификация современных оптических технологий доступа. Приведена обобщенная модель ОШСД. Указывается, что эволюционное развитие технической базы оптических технологий доступа описывается двумя прогностическими законами: законом Мура и законом Боско, а производительность ШСД – законом Нильсена. Выявлены особенности структурной организации оптических сетей доступа нового поколения.

Предложена концептуальная модель иерархической мультисервисной сети, ориентированной на предоставление пакетированной широкополосной услуги «Triple Play», использующей на уровне доступа широкополосные оптические технологии – пассивной оптической сети для городских территорий покрытия и технологии кольцевых сетей для сельских районов. Концептуальная модель иерархической МС приведена на рис. 1.

Выявлены особенности распределения каждого из видов передаваемого трафика: VoIP, IPTV, DoIP. Определены обобщенные технические требования к характеристикам качества обслуживания для всех передаваемых классов трафика. Определена логическая структура МС и СД (совокупность стеков протоколов, функционирующих на различных участках и уровнях модели, показанной на рис.1). В частности, определена логическая структура мультисервисного терминала, участка СД с гибридной средой распространения FTTN/ADSL, участка на основе пассивной оптической сети (PON) для технологий GPON и GEPON, а также участка кольцевой оптической СД.

Выявлена логическая структура верхних уровней МС, приведенной на рис. 1.

Предложены основные методы модернизации сетевой инфраструктуры доступа крупных операторов на основе внедрения широкополосных технологий пассивных оптических сетей (PON) и кольцевых сетей. Отмечается, что основной целью внедрения технологии PON является повышение доходов оператора за счет привлечения абонентов, заинтересованных в получении современных инфокоммуникационных услуг, путем построения качественно новой широкополосной сети доступа. Кроме этого, модернизация СД на основе технологий PON позволяет значительно расширить зону покрытия участка СД, связанного с одним узлом доступа.

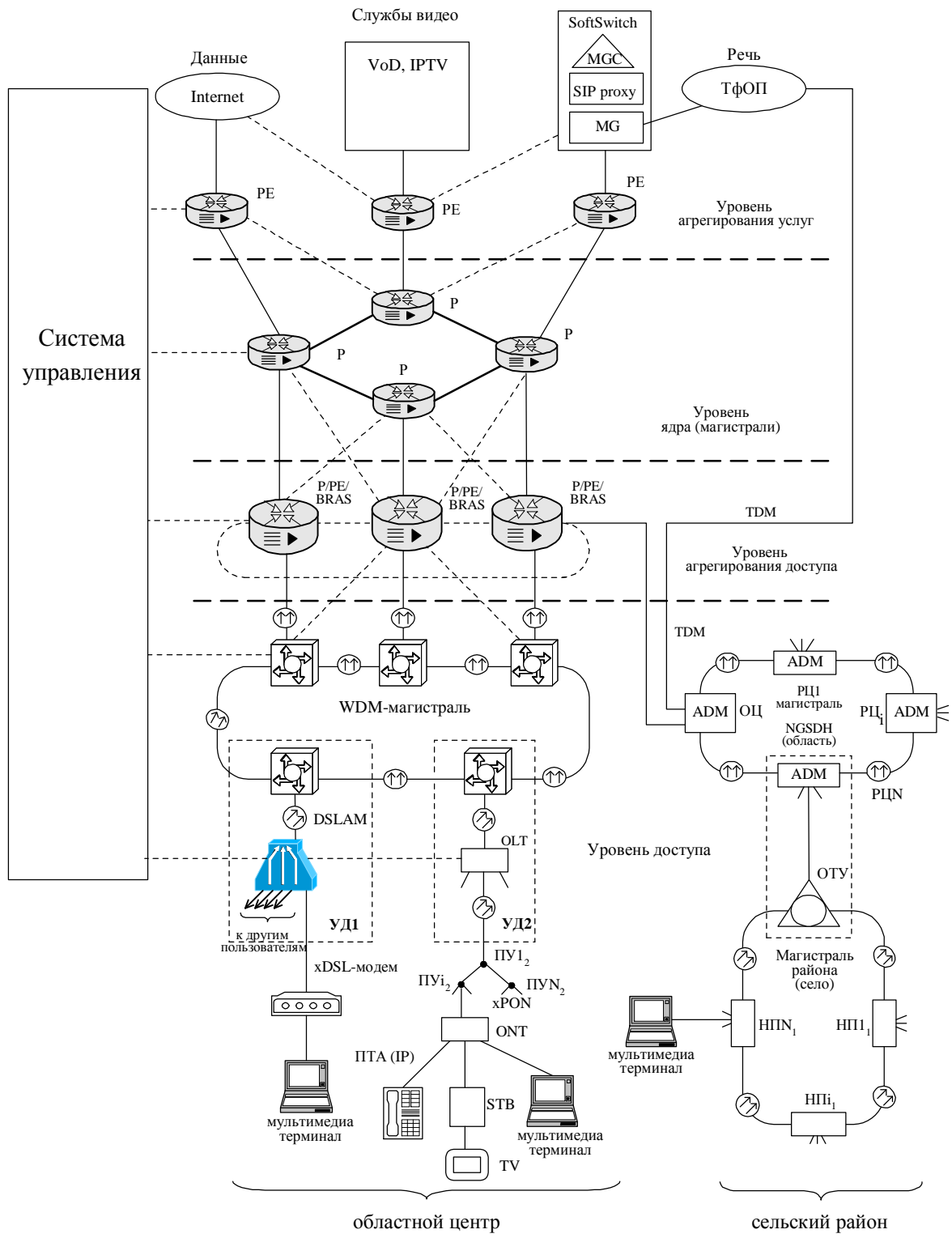


Рис. 1. Концептуальная модель иерархической МС

Это достигается за счет увеличения радиуса такого PON-участка до 20 км, а также позволяет достичь дополнительных технико-экономических преимуществ: укрупнения узлов доступа, снижения физического объема линейных сооружений, получения дополнительной прибыли от сдачи в аренду

высвобождающихся объектов недвижимости, а также кабельной канализации и других.

Сформулированы основные методы модернизации СД сельских районов. Выявлен и изложен перечень основных научно-технических и научно-исследовательских вопросов, возникших и решенных в процессе разрешения проблемы преобразования сосредоточенной коммутационной платформы (комплекса аппаратно-программных средств коммутации КАПСК – АТСЦ-90) в распределенную (сетевую) систему, обеспечивающую доступ абонентов, расположенных на обширных территориях к услугам МС.

Данная система представляет собой оригинальную, дублированную, синхронную, самовосстанавливающуюся оптическую, иерархическую кольцевую структуру, объединяющую до 30 удаленных АЦК, подключаемых к центральной АТС, что обеспечило высокую надежность реализуемых СД.

Комплекс ключевых технических решений этой оригинальной телекоммуникационной системы защищен десятью патентами на полезные модели РФ [12–21], а результаты внедрения оптических СД на ее основе изложены в публикациях [7, 8, 24, 32, 33], методология построения оригинальных устройств телекоммуникаций и системно-сетевых решений на их основе изложена в монографии [23].

Во второй главе работы раскрыта используемая в настоящей работе методология исследования ОШСД. На основе подходов, заданных в рекомендации ИТУ-Т Y.1541, дается математическое описание основных исследуемых характеристик качества обслуживания в IP-ориентированных сетях для трех рассматриваемых в работе классов трафика – VoIP, IPTV, DoIP.

Выделяются следующие основные характеристики, оказывающие влияние на качество обслуживания в IP-ориентированной пакетной сети:

- среднее время задержки передачи пакетов (кадров) или средняя задержка IPTD – u_c ;
- вариация (джиттер) задержки передачи пакетов (кадров) – IPDV;
- коэффициент потерь пакетов (вероятность потери кадра) IPLR – $P_{\text{ПС}}$;
- коэффициент ошибок при передаче пакета IPER – $P_{\text{КС}}$.

Отмечается, что вычисление показателя IPDV на выходе каждого сетевого сегмента (фазы обслуживания) требует информации о законе распределения задержки в каждом из рассматриваемых сегментов.

Показано, что 0,999 - квантиль функции распределения времени задержки, требуемый для вычисления IPDV при оценке и прогнозировании показателя IPDV, можно приближенно определить из следующего выражения:

$$\text{IPTD}_{\text{upper}} = \bar{u}_i + c_{xi} \sigma_{ui}, \quad (1)$$

где \bar{u}_i – средняя задержка в i -й фазе обслуживания СД, σ_{ui} – среднеквадратическое отклонение (ско) задержки в i -й фазе, c_{xi} – коэффициент, связанный с типом и параметрами распределения задержки.

Вычисленные значения коэффициента c_x для некоторых типов распределений и значений их параметров приведены в таблице.

Вид распределения	Значения параметров	Значения коэффициента вариации n_x	Значения коэффициента c_x
Экспоненциальное	–	1	5,90
Парето	$k = 10; a = 2,01$	7,14	2,23
	$k = 10; a = 2,1$	2,22	6,22
	$k = 10; a = 2,5$	0,83	9,81
Вейбулла–Гнеденко	$a = 1; c = 0,2$	15,8	8,16
	$a = 1; c = 1$	1	5,90
	$a = 1; c = 10$	0,35	2,35
	$a = 1; c = 100$	0,11	1,4

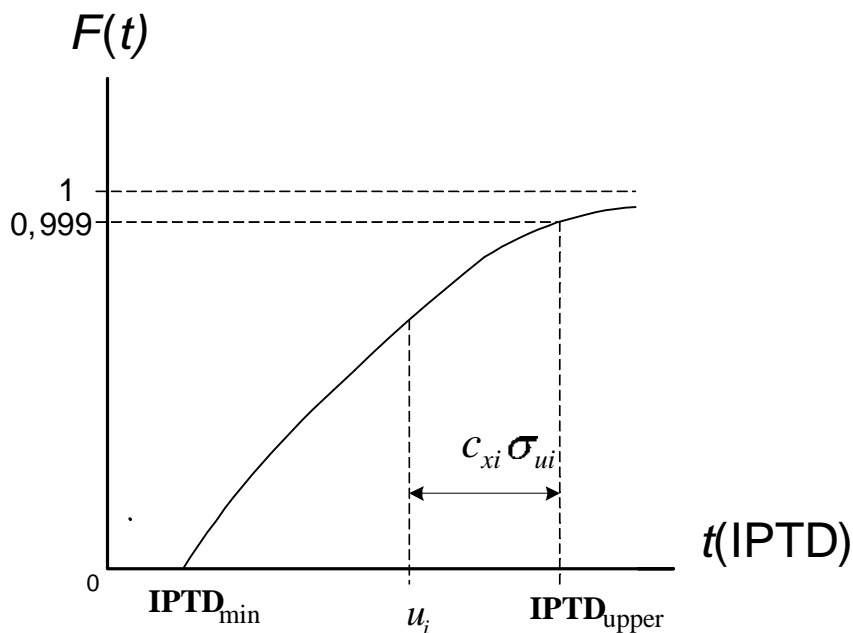


Рис. 2. Графическая интерпретация определения квантиля функции распределения интервала задержки.

Графическая интерпретация определения 0,999-квантиля $IPTD_{upper}$ функции распределения интервала задержки $F(t)$ приведена на рис.2. Значение $IPTD_{min}$ определяется из выражения: $IPTD_{min} = u_{пер min} + u_{обр min} + t_{pij}$, где $u_{пер min}$ – минимальное время передачи кадра, $u_{пер min} = \frac{8n_{min}}{V_{max}}$, n_{min} – минимальная длина кадра, выраженная в байтах, V_{max} – максимальная ско-

рость передачи, t_{rij} – задержка распространения сигнала на рассматриваемом участке СД, между узлами i и j .

Дается математическое описание основных, используемых в последующих главах работы, математических моделей входных потоков, как простейшего, так и потоков обладающих фрактальными свойствами.

Выявлены основные математические соотношения используемые в последующих главах для нахождения характеристик качества обслуживания исследуемых ОШСД, для систем массового обслуживания (СМО) с неоднородным потоком заявок и обслуживанием с тремя классами относительных приоритетов, а также для линейных разомкнутых сетей массового обслуживания (СеМО).

При исследовании ВВХ применяется принцип декомпозиции МС на четыре иерархических уровня (рис.1): сети доступа, сети агрегирования доступа, ядра (магистралей) сети и сети агрегирования услуг.

В результате этого подхода задача моделирования МС распадается на четыре подзадачи моделирования каждой из перечисленных подсетей.

Приводится описание методов моделирования, применяемых для оценки ВВХ МС, базирующихся на математическом аппарате теории массового обслуживания.

В качестве моделей подсетей агрегирования и ядра МС, а также сегментов ОШСД с реализацией услуги «Triple Play» рассматриваются СМО и СеМО с пуассоновским неоднородным потоком заявок и относительными приоритетами, установленными между тремя классами заявок, которые соответствуют трем видам трафика, указанным выше.

При анализе задержек в СМО класса G/G/1 используется известное приближение Кремера, Лангенбаха-Бельца.

Дается краткое описание базовой математической модели, используемой в главе 4 работы для исследования синхронных сетевых структур, на основе математического аппарата, разработанного О.С. Чугреевым для анализа вероятностно-временных характеристик (ВВХ) синхронных локальных сетей передачи данных (ЛСПД).

Предполагается, что все процессы в сети протекают в дискретном времени на интервале окна передачи, длительность которого определяется так:

$$T_{ок} = n_{ок} \cdot V_c^{-1},$$

где $n_{ок}$ – длина окна; V_c – скорость передачи в канале.

В разработанных моделях в интервал обслуживания вложена биномиальная модель фазирования.

Информационная скорость в однородной ЛСПД определяется из выражения:

$$R_c = \lambda \cdot \bar{k} \cdot N, \quad \lambda = q_{и} / T_{ок}, \quad (2)$$

где λ – интенсивность входящего от абонента потока сообщений; \bar{k} – средняя длина информационной части пакета; N – число станций в сети; q_{in} – параметр входного потока Бернулли.

Структура рассматриваемой СД описывается функционалом вида

$$\mathbf{f} = (ТД, Тп, V_c, ТО), \quad (3)$$

где \mathbf{f} – функционал технологий доступа ТД, скорости передачи в среде V_c , топологии Тп, системы технического обслуживания ТО.

На эффективность структуры сети оказывают влияние множество факторов, среди которых основными являются: стоимостной, надежностный, вероятностный и вероятностно-временной. Отмечается, что в качестве основного критерия оптимальности МС и СД должен выбираться технико-экономический (стоимостной) критерий, а критерии, обеспечивающие качество функционирования должны использоваться в качестве накладываемых ограничений. Решение задач синтеза сетевых структур приводится в гл. 5.

В третьей главе приводится описание проведенных исследований разработанных математических моделей сегментов ОШСД, использующих различные принципы и технологии. Разработана обобщенная модель сегмента ОШСД, использующего технологии PON.

Структура аналитической модели рассматриваемого фрагмента СД в терминах теории массового обслуживания приведена на рис. 3.

В нисходящей ветви (рис. 3,а) потоки заявок (начал кадров Ethernet) обслуживаются в трех фазах: 1 – обслуживание в BRAS, 2 – обслуживание суммарного трафика OLT при его передаче по линии BRAS–OLT, 3 – обслуживание в сегменте PON.

В восходящей ветви (рис. 3,б) – две фазы обслуживания: 1 – обслуживание трех классов трафика, поступающего от абонента в сегменте PON, 2 – обслуживание объединенного (суммарного) трафика OLT, (от N_c сегментов PON) при передаче по линии OLT–BRAS. Номера фаз показаны на рис. 2 цифрами в кружках. Приведено отдельное исследование каждой из фаз обслуживания нисходящей и восходящей ветвей.

В результате численного исследования разработанной модели, показано, что крутизна зависимости средней интенсивности потока IPTV от значений верхней границы распределения Парето интервалов во входном потоке нисходящей ветви растет при приближении коэффициента формы ограниченного распределения Парето интервалов во входном потоке к единице.

При изменении этого параметра от 1,6 до 1,1 значение интенсивности потока, соответствующее максимальному значению верхней границы, возрастает в 2 раза. Также показано, что кривые зависимости коэффициентов вариации выходного потока IPTV от верхней границы распределения Парето могут иметь противоположный наклон при изменении значений коэффициента вариации интервала обслуживания в широком диапазоне.

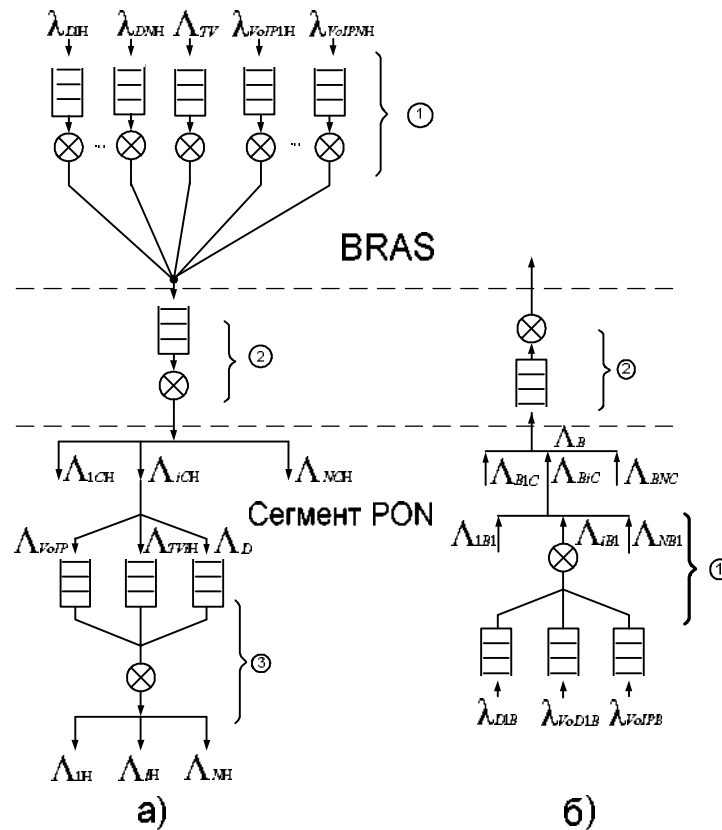


Рис. 3. Аналитическая модель сегмента оптической СД

Установлено, что IPDV заявок с высоким приоритетом растет при росте интенсивности потока таких заявок значительно медленнее, чем для заявок с низким приоритетом. Это дает основание полагать, что организация приоритетного обслуживания кадров в сетевых устройствах, в том числе СД PON, организованное в соответствии с рекомендацией IEEE 802.1p, чаще всего применяемой совместно с рекомендацией IEEE 802.1Q (организация VLAN), обеспечивает снижение IPDV для потоков с высоким приоритетом (VoIP, IPTV) особенно чувствительных к вариации задержки. С другой стороны, высокие значения этой характеристики, проявляющиеся при обслуживании «эластичного» трафика данных не приводят к негативным последствиям.

В результате анализа кривых характеристик восходящей ветви, установлено следующее:

- технология WDM PON имеет наилучшие характеристики QoS восходящей ветви, IPTD в сегменте WDM PON приблизительно в 20 раз ниже, чем для GPON;

- влияние разброса длин линий на IPTD возрастает с ростом числа абонентов, включенных в сегмент TDM PON, а при использовании технологии

WDM PON этот параметр не оказывает влияния на IPTD из-за отсутствия временной процедуры бесконфликтного доступа;

– наименьшее влияние коэффициента вариации интервала обслуживания ν_b на IPTD в восходящей ветви достигается при использовании технологии WDM PON в виду отсутствия длительного процесса доступа и низкого значения интервала обслуживания;

– среди TDM PON технологий, наилучшие характеристики IPTD и IPDV обеспечивает технология GPON.

Приводится ряд других оригинальных результатов исследования. Наряду с аналитическим моделированием для исследования сегментов ОШСД использованы имитационные модели в среде GPSS World. Установлено, что результаты аналитического и имитационного моделирования расходятся не существенно, что свидетельствует о работоспособности разработанных моделей.

Приводятся результаты анализа предложенной модели ядра мультисервисной сети на основе толерантного преобразования разомкнутых линейных СеМО, для трафика с тремя классами относительных приоритетов обслуживания, для случая соединения сегментов ОШСД через верхние уровни иерархии мультисервисной сети. Показаны зависимости характеристик качества обслуживания от интенсивности потоков заявок для трех классов трафика для различных вариантов топологии ядра сети.

Выполненные исследования с использованием разработанных аналитических и имитационных моделей ядра МС показали, что использование приоритетной обработки кадров в узлах обеспечивает для наиболее чувствительного трафика VoIP не только наименьшую среднюю задержку, но и позволяет минимизировать джиттер задержки. При этом различие между характеристиками высокоприоритетного трафика при разных законах распределения интервалов между поступающими кадрами и времени их обработки лежат в приемлемых для практики пределах для значений загрузки узлов и каналов связи в интервале от 0,1 до 0,7. Последнее обстоятельство дает основание полагать, что данные модели могут быть использованы для оценочных расчетов сегментов мультисервисных сетей в режимах малых и средних нагрузок при потоках заявок, отличных от простейшего.

Приводится анализ показателей качества обслуживания трех классов передаваемого трафика для разработанной модели сети, использующей принцип FTTN, реализующей ADSL технологию на последней миле.

Предложена методика оценки показателей качества обслуживания на участке ОШСД, использующая разработанные аналитические модели.

Разработана структурно-функциональная модель кольцевой оптической СД, использующей предложенное автором работы оригинальное оптическое оборудование доступа.

На основе системы показателей качества и специфики функционирования кольцевой оптической СП выделены следующие классы отказов данной системы:

а) отказы, приводящие к простоям двух и более АЦК (включая всю сеть), и потере связи их абонентов, а также к снижению качества обслуживания вызовов абонентов, не потерявших связь – отказы первого рода;

б) отказы, приводящие к простоям одного АЦК и потере связи его абонентов, а также снижению качества обслуживания вызовов абонентов, не потерявших связь – отказы второго рода;

в) отказы, приводящие к переходу сети в состояние Z_e , которому соответствует средняя по всем видам соединений в сети доля потерянных вызовов p_e – отказы третьего рода.

Предложены две модели надежности оптических СД:

- дизъюнктивной сети;
- отказоустойчивой сети.

Первая модель предполагает объединение элементов рассматриваемой сети посредством операции дизъюнкции (по «или»). В этом смысле возникновение отказа любого элемента приводит к началу мероприятий по восстановлению отказавшего оборудования.

При рассмотрении данной модели под отказом понимается любое событие, приводящее к извещению об аварии, снижению качества обслуживания вызовов и началу восстановительных работ (отказы третьего рода).

Вторая модель предусматривает анализ отказоустойчивости рассматриваемых структур с учетом специальных мероприятий по ее повышению (резервирование, выбор отказоустойчивой структуры и т.д.). При рассмотрении этой модели под отказом понимается блокировка обслуживания вызовов (нарушение связи) всех пользователей СП (отказы первого рода).

Интерес к рассмотрению первой модели обусловлен, прежде всего, экономическими соображениями (планированием командировок персонала на объекты заказчика, затрат заказчика на восстановительные работы, транспортных расходов, трудозатрат на восстановление отказавших блоков, выделением соответствующей доли фонда оплаты труда и т.д.).

Разработаны модели для вычисления показателей надежности в различных топологических структурах иерархической ОСД.

Так, например, для дублированной кольцевой структуры [23], для дизъюнктивной модели сети получены следующие соотношения. Коэффициент готовности дублированной кольцевой СП для дизъюнктивной модели:

$$K_{Г\text{ кдж}} = \left(\prod_{i=1}^{N-1} K_{Г\text{ конц}} \cdot \prod_{i=1}^N K_{Г\text{ лс}} \cdot K_{Г\text{ со}} \right)^2, \text{ где } N - \text{ число узлов графа сети; } K_{Г\text{ конц}} -$$

коэффициент готовности оборудования СП каждого из АЦК; $K_{Г\text{ лс}}$ – коэффициент готовности фрагментов линейных сооружений, соединяющих сосед-

ние вершины; $K_{\text{ГСО}}$ – коэффициент готовности стационарного оборудования СП. Интенсивность потока отказов дублированного кольца для дизъюнктивной модели: $\lambda_{\text{КДК}} = 2 \left(\sum_{i=1}^{N-1} \lambda_{\text{конц}} + \sum_{i=1}^N \lambda_{\text{ЛС}} + \lambda_{\text{СО}} \right)$.

Для отказоустойчивой сети, с учетом дублирования, коэффициент готовности дублированного кольца: $K'_{\text{ГКД}} = 2K_{\text{Г}} - K_{\text{Г}}^2$,

$K_{\text{Г}} = \prod_{i=1}^{N-1} K_{\text{Гконц}} \cdot \prod_{i=1}^N K_{\text{ГЛС}} \cdot K_{\text{ГСО}}$, где $K_{\text{Г}} -$ коэффициент готовности кольца без дублирования.

Для иерархической дублированной структуры, использующей оборудование малых выносов [23] ОМВ, для дизъюнктивной модели, коэффициент

готовности: $K_{\text{ГКМК}} = \left(\prod_{i=1}^{N-1-j_i} K_{\text{Гконц}}^* \cdot \prod_{i=1}^N K_{\text{ГЛС}} \cdot K_{\text{ГСО}} \cdot K_{\text{Г}j} \right)^2 K_{\text{ГЛС}j}$, где $j_i -$ число

узлов с концентраторами, подключенными через ОМВ; $K_{\text{Гконц}}^* -$ коэффициент готовности оборудования АЦК узловых вершин СП, оснащенных высокоскоростным оборудованием ОИЦКС и ОМВ; $K_{\text{ГЛС}j} -$ коэффициент готовности дополнительных линейных сооружений для подключения АЦК конечных вершин.

Интенсивность отказов в резервированном кольце с ОМВ:

$\lambda_{\text{КМК}} = 2 \left(\sum_{i=1}^{N-1-j_i} \lambda_{\text{конц}}^* + \sum_{i=1}^N \lambda_{\text{ЛС}} + \lambda_{\text{СО}} + \lambda_j \right) + \lambda_{\text{ЛС}j}$, где $I_{\text{конц}}^* -$ интенсивность от-

казов оборудования ОИ АЦК узловых вершин; $I_j -$ интенсивность отказов ОМВ АЦК узловых вершин; $I_{\text{ЛС}j} -$ интенсивность отказов дополнительных линейных сооружений.

Для отказоустойчивой сети, коэффициент готовности:

$$K_{\text{ГКМ}} = 2K_{\text{Г}} - K_{\text{Г}}^2, \text{ где } K_{\text{Г}} = \prod_{i=1}^{N-1-j_i} K_{\text{Гконц}}^* \cdot \prod_{i=1}^N K_{\text{ГЛС}} \cdot K_{\text{ГСО}} \cdot K_{\text{Г}j} \cdot K_{\text{ГЛС}j}.$$

Предложены методы повышения надежности сетей данного класса.

Разработана и проанализирована математическая модель для анализа показателей качества обслуживания двух классов трафика: VoIP и DoIP для рассматриваемых СД с учетом механизма LAPS, процесса возникновения отказов и их восстановления.

Аналитическая модель участка кольцевой СД в терминах теории массового обслуживания приведена на рис. 4. Обслуживание трафика на рассматриваемом участке сети включает 7 фаз: 3 фазы в восходящей ветви (фазы 1–3) и 4 фазы в нисходящем направлении (фазы 4–7). Номера фаз обозначены на рис. 3 цифрами в кружках. В предложенной модели поток отказов интер-

претирован как поток заявок с высшим приоритетом, а поток восстановлений – как поток обслуживания данного класса заявок. В результате численных исследований установлено, что в фазах с приоритетным обслуживанием, учитывающих ненадежность оборудования, интенсивность потока сбоев оказывает наибольшее влияние на задержку трафика с низким приоритетом. При этом задержка высокоприоритетных видов трафика испытывает наименьшую восприимчивость к повышению интенсивности потока сбоев. Восприимчивость средней задержки к возрастанию длительности интервалов восстановления также наибольшая для заявок с низким приоритетом, а задержки заявок с высокими классами относительных приоритетов восприимчивы к увеличению интервала восстановления в наименьшей степени. Выявлено, что кадры, поступающие в СД на интервале от поступления до восстановления коротких отказов (сбоев), помечаются в рамках процедуры LAPS как ошибочные и затем отбрасываются, что порождает дополнительный источник потерь.

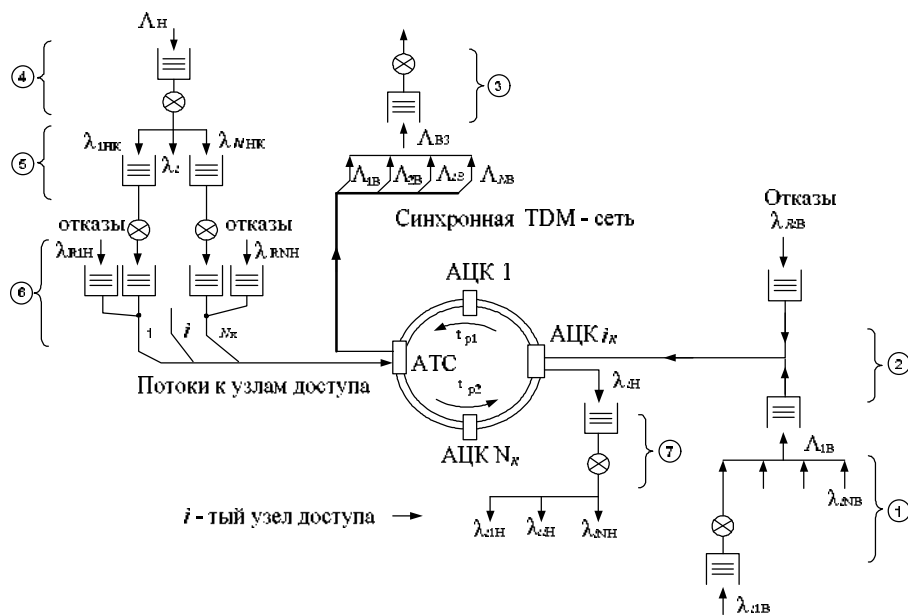


Рис. 4. Модель кольцевой оптической сети доступа

Получено приближенное выражение для расчета IPLR на рассматриваемом участке СД с учетом этого явления:

$$IPLR_i \approx P_{pci} + (1-r)I_{Ri}b_i + r(1-g_i / (I_{Ri} + g_i)), \quad (4)$$

где P_{pci} – вероятность потерь из-за переполнения буфера в i -й фазе, интенсивность потока отказов в i -й фазе: $\lambda_{Ri} = (K_{\Gamma i}^{-1} - 1) / T_{bi}$, T_{bi} – средний интер-

вал восстановления в i -й фазе, $K_{\Gamma i}$ – коэффициент готовности оборудования в i -й фазе.

Если интервалы восстановления распределены по закону Пуассона, то:

$$\lambda_{Ri} = \gamma_i(K_{\Gamma i}^{-1} - 1), \gamma_i = 1/T_{bi} \quad (5)$$

где γ_i – интенсивность потока восстановлений в i -й фазе, T_{bi} – средний интервал восстановления в i -й фазе.

В результате численного исследования предложенной модели потерь выявлено, что наблюдается существенный рост IPLR при росте интенсивности потока отказов λ_{Ri} . При больших значениях λ_{Ri} кривая зависимости IPLR от загрузки СМО спрямляется, а угол ее наклона возрастает, по сравнению с кривой, полученной для малых значений λ_{Ri} .

В среде GPSS World разработана имитационная модель кольцевой СД, использующая оригинальный генератор ON-OFF трафика VoIP. Показано, что средняя задержка в СМО под воздействием ON-OFF источника значительно (более чем в 10 раз) превышает аналогичную характеристику при воздействии непрерывного потока с той же средней интенсивностью при аналогичном обслуживании в исследуемой СМО.

Предложена методика оценки надежности и качества обслуживания трафика в кольцевых оптических сетях доступа.

Четвертая глава посвящена моделированию и анализу синхронных сетевых структур. В сетях, рассматриваемых в данной главе, применяются оригинальные сетевые адаптеры (станции) и упрощенные протоколы. Это обеспечивает возможность построения технической базы сетей данного класса полностью на отечественных элементах и исключает возможность реализации в таких сетях недеklarированных возможностей. Последнее позволяет применять рассматриваемые сети в качестве объектовых сетей, сетей управления, сетей сбора данных, а также сетей другого функционального назначения, в том числе специальных.

Данные сети не являются мультисервисными, а предназначены в основном для передачи трафика данных. Поэтому в качестве основных эксплуатационных показателей таких сетей рассматриваются их вероятностно-временные характеристики (ВВХ) в двукритериальном пространстве (на плоскости) информационная скорость – средняя задержка, а также вероятность своевременной доставки. Приводятся аналитические модели кольцевой синхронной локальной сети передачи данных (ЛСПД) с блокировкой приемного буфера станций при различных моделях процесса блокировки приемного буфера. Данный класс моделей разработан на основе методов теории массового обслуживания в дискретном времени и z-преобразования. Процесс блокировки задается матрицей переходных вероятностей однородной цепи Маркова, полигеометрическим распределением, а также детерминированным интервалом времени разблокирования. Для каждого случая по-

лучены выражения для z-пр.р. времени обслуживания однородного потока заявок, вкладываемые в базовую модель ЛСПД, а также выражения для моментов этого распределения для нахождения средней задержки.

Для ЛСПД с марковской моделью блокировки выражение для определения z-пр.р. времени обслуживания имеет вид:

$$g_s(z) = \frac{\varepsilon(a - az^{-1} + \Omega az^{-1} + b\Omega z^{-1})}{z - 1 + \Omega - \bar{e}(a - az^{-1} + \Omega az^{-1} + b\Omega z^{-1})}, \quad (6)$$

где $a = P_0^0 \Omega + P_1^0 \dot{\psi}$; $b = P_0^0 (1 - \Omega) + P_1^0 (1 - \dot{\psi})$; $\Omega, \dot{\psi}$ – компоненты матрицы переходных вероятностей марковской цепи; P_0^0, P_1^0 – вероятности нулевого и единичного начального состояния, соответственно; $\varepsilon = q_d Q_M Q_K Q_C K_\Gamma$; $\bar{e} = 1 - \varepsilon$; q_d – параметр биномиального процесса доступа; Q_M – вероятность, мешающего действия других станций; Q_K – вероятность безошибочной передачи кадра; Q_C – вероятность нахождения сети в сфазированном состоянии; K_Γ – коэффициент готовности ЛСПД.

Интерпретация процесса блокировки в виде детерминированного интервала времени разблокирования буфера представляет повышенный интерес для инженерной практики, т.к. проектировщикам ЛСПД довольно часто приходится сталкиваться со станциями, где разблокирование оконечного буфера производится за фиксированное, постоянное для данной станции число тактов $\dot{n}_p = \text{const}$. Для этого случая z-пр.р. времени обслуживания заявки вычисляется по формуле:

$$g_s(z) = \frac{\varepsilon q_{\text{БЛ}} \dot{n}_p (z-1) z^{\dot{n}_p-1} + \varepsilon p_{\text{БЛ}} (z^{\dot{n}_p} - 1)}{\dot{n}_p (z-1) z^{\dot{n}_p-1} - \bar{\varepsilon} (\dot{n}_p (z-1) q_{\text{БЛ}} z^{\dot{n}_p-1} + p_{\text{БЛ}} (z^{\dot{n}_p} - 1))}. \quad (7)$$

Также получены выражения для нахождения моментов распределения времени обслуживания:

$$g'(1) = \frac{1}{\varepsilon} + \frac{p_{\text{БЛ}} (\dot{n}_p - 1)}{2\varepsilon}, \quad (8)$$

$$g''(1) = \frac{S1 + S2}{\varepsilon}, \quad (9)$$

где $S1 = 2\varepsilon p_{\text{БЛ}} (\dot{n}_p - 1) (\varepsilon + 2(\dot{n}_p - 2))(1 + \varepsilon)$; $S2 = \left(1 + \frac{p_{\text{БЛ}} (\dot{n}_p - 1)}{2}\right) (\varepsilon + 2\bar{\varepsilon}(1 + \varepsilon))$.

Предложена и проанализирована модель для случая, когда интервал блокировки задается полигеометрическим распределением.

Так, например, когда $g_B(z)$ задается суммой двух составляющих:

$$g_B(z) = \frac{\alpha q_{\text{БЛ1}}}{z - p_{\text{БЛ1}}} + \frac{\beta q_{\text{БЛ2}}}{z - p_{\text{БЛ2}}}, \quad (10)$$

где $q_{БЛ1}$, $q_{БЛ2}$, α , β – параметры распределения, а условие нормировки имеет

$$\text{вид: } \frac{\alpha q_{БЛ1}}{z - p_{БЛ1}} + \frac{\beta q_{БЛ2}}{z - p_{БЛ2}} \Big|_{z=1} = 1.$$

Выражение для z-пр.р. времени обслуживания заявки, попавшей в занятый буфер, определяется по формуле:

$$g_{s\theta}(z) = \frac{\varepsilon[\alpha q_{БЛ1}(z - p_{БЛ2}) + \beta q_{БЛ2}(z - p_{БЛ2})]}{(z - p_{БЛ1})(z - p_{БЛ2}) - (1 - \varepsilon)[\alpha q_{БЛ1}(z - p_{БЛ2}) + \beta q_{БЛ2}(z - p_{БЛ1})]}, \quad (11)$$

а моменты распределения времени обслуживания определяются так:

$$g_{\theta}'(1) = \frac{q_{БЛ1}q_{БЛ2} + \beta q_{БЛ1}p_{БЛ2} + \alpha q_{БЛ2}p_{БЛ1}}{\varepsilon q_{БЛ1}q_{БЛ2}}, \quad (12)$$

$$g_{\theta}''(1) = \frac{VU' - UV'}{V^2}, \quad (13)$$

где:

$$\begin{aligned} U' &= -2\varepsilon q_{БЛ1}q_{БЛ2}(p_{БЛ1}p_{БЛ2} + \alpha q_{БЛ1}p_{БЛ2} + \beta q_{БЛ2}p_{БЛ1}), \\ V' &= 2\varepsilon q_{БЛ2}q_{БЛ1}[(\bar{\varepsilon}\alpha - 1)p_{БЛ2}q_{БЛ1} + (\bar{\varepsilon}\beta - 1)q_{БЛ2}p_{БЛ1} - \varepsilon q_{БЛ1}q_{БЛ2}], \\ U &= \varepsilon q_{БЛ1}q_{БЛ2}(q_{БЛ1}q_{БЛ2} + \alpha q_{БЛ2}p_{БЛ1} + \beta q_{БЛ1}p_{БЛ2}), \\ V &= \varepsilon^2 q_{БЛ1}^2 q_{БЛ2}^2. \end{aligned}$$

Средняя задержка в предложенных моделях может быть определена через моменты распределения времени обслуживания (выражения (8), (9), (12), (13)):

$$\bar{t}_q = T_{ок} [g'(1) + \frac{q_{и} g''(1)}{2(1-\theta)}], \quad \theta < 1, \quad \theta = q_{и} g'(1).$$

Разработана и исследована модель процесса фазирования синхронной сети на основе метода вероятностно-временных графов и z-преобразования (ВВГ-z-пр.). Получены выражения для z-пр.р. времени фазирования и для нахождения среднего значения этой характеристики, для её учета в базовой модели ЛСПД. Выражение для определения z-пр.р. времени фазирования имеет вид:

$$f_{\Phi}(z) = \frac{Q_{кф} Q_{\Phi} z^{\beta}}{z^{\beta+\alpha} - P_{кф} z^{\alpha+\beta-n_{повт}} - Q_{кф} P_{\Phi} z^{n_{повт}+\alpha} n_2(z)},$$

где $\alpha = n_{ТА} + n_1 + n_{прогр.}$; $\beta = n_{ЛФ} + n_{НУ} + n_{Ц} + n_{прогр.} + n_{ТА}$; $Q_{кф}$ – вероятность безошибочной передачи фазирующей комбинации (ФК), Q_{Φ} – вероятность верного фазирования, $P_{кф} = 1 - Q_{кф}$, $P_{\Phi} = 1 - Q_{\Phi}$, $n_{ТА}$ – длина тайм-аута; n_1 – время ожидания ФК после разблокирования приемника ФК, $n_{прогр.}$ – время

программирования устройства цикловой синхронизации (УЦС); $n_{\text{лф}}$ – интервал времени от окончания $n-1$ цикла до принятия решения о ложном фазировании или нефазировании, $n_{\text{ц}}$ – длина цикла ПД, $n_{\text{повт}}$ – время повторения ФК при приеме с ошибкой, $n_{\text{НУ}}$ – время выполнения программы начальной установки УЦС, $n_2(z)$ – z-пр.р. времени ожидания ФК после потери цикла,

$$n_2(z) = \frac{z^{n_{\text{ц}} - n_{\text{фк}}} - 1}{(n_{\text{ц}} - n_{\text{фк}})(z - 1)z^{n_{\text{ц}} - n_{\text{фк}}}}, \text{ где } n_{\text{фк}} \text{ – длина фазирующей комбинации.}$$

Среднее время фазирования может быть найдено из выражения:

$$\bar{t}_{\text{ф}} = \bar{n}_{\text{ф}} \cdot V_{\text{с}}^{-1}, \text{ где } \bar{n}_{\text{ф}} \text{ – среднее дискретное время фазирования.}$$

Средний интервал фазирования $\bar{n}_{\text{ф}}$ вычисляется из выражения:

$$\bar{n}_{\text{ф}}(z) = (d / dz^{-1}) f_{\text{ф}}(z) \Big|_{z=1}.$$

В результате исследования разработанных моделей синхронной ЛСПД установлено следующее. Показано, что увеличение объема окончного буфера приема станций ЛСПД позволяет снизить влияние блокировок на ВВХ и среднее время задержки пакетов в ЛСПД. Так, при увеличении емкости окончного буфера приема от одного до четырех пакетов, среднее значение времени задержек в СПД снижается в режиме низкой нагрузки ($R_{\text{с}} = 0,1V_{\text{с}}$) на 5%, в режиме средней нагрузки ($R_{\text{с}} = 0,2V_{\text{с}}$) – на 20%, в режиме большой нагрузки ($R_{\text{с}} = 0,35V_{\text{с}}$) – на 40% (при моделировании блокировки биномиальным процессом с учетом повторных передач). Снижение вероятности доступа при повторных передачах пакетов станциями с заблокированным буфером приема при биномиальном характере процесса блокировки не приводит к снижению времени задержки пакетов в ЛСПД. Увеличение скорости модуляции в канале ЛСПД не всегда приводит к существенному снижению времени задержки пакетов. Для каждого значения времени разблокирования при детерминированном процессе блокировки существует некоторое значение скорости, начиная с которого дальнейшее повышение скорости не приводит к существенному улучшению ВВХ ЛСПД. При детерминированном времени разблокирования для $N=50$, $R_{\text{с}}=3$ Мбит/с, $\%_{\text{ф}} = 10^{-2}$ с, при повышении скорости модуляции в канале от 4 до 40 МБод, среднее время задержки снижается в 14 раз. При увеличении скорости от 40 до 140 МБод, средняя задержка изменяется на 2%.

При работе ЛСПД в условиях повышенного уровня помех, система сетевой цикловой синхронизации должна обеспечивать защиту фазирующей информации от ошибок. При повышении вероятности успешной передачи

фазирующих комбинаций от 0,75 до 0,999 среднее время фазирования снижается на 30%.

В пятой главе предложен метод оптимизации сетевых структур на основе целочисленных формально-эвристических алгоритмов. Показано, что решение задачи оптимизации структуры (ЗОС), использующей в качестве целевой функции технико-экономический критерий, в частности, приведенные затраты, позволяет выбрать для реализации СД вариант ее структуры, имеющей наилучшие технико-экономические характеристики, при сохранении эксплуатационных характеристик на уровне заданных требований.

При этом ЗОС решается в качестве частной подзадачи при выборе рациональных системно-сетевых решений на основе ограничений, задаваемых для значений чистой текущей (дисконтированной) стоимости СД при $t \rightarrow 0$, для каждого из вариантов ее модернизаций, проводимых на протяжении всего жизненного цикла капиталоемких систем и сооружений СД.

Приводятся примеры решения условной ЗОС для кольцевой оптической СД и для синхронной сетевой структуры. В качестве подзадачи в каждом из решений ЗОС приводится решение задачи топологической оптимизации.

Обобщенная ЗОС для сегмента ШОСД сформулирована в следующей постановке.

Необходимо определить:

– вектор \mathbf{f}^* структуры СД, минимизирующий целевую функцию:

$$P(\mathbf{f}^*) \rightarrow \min, \mathbf{f}^* \in F, \quad (14)$$

где F – допустимое множество вариантов в реализации структуры СД, при выполнении ограничений в виде неравенств:

– на качество обслуживания вызовов:

$$\bar{P}_n \leq P, \quad (15)$$

где \bar{P}_n – средняя вероятность неудачного вызова абонента СД; P – некоторое априорно заданное пороговое значение вероятности неудачного вызова абонента сети;

– на характеристики качества обслуживания – вероятностно-временные характеристики (ВВХ) для каждого из рассматриваемых уровней: 1) среднюю задержку кадров: $IPD_k \leq IPD_{доп}$; 2) вариацию задержки: $IPDV_k \leq IPDV_{доп}$;

3) вероятность потери кадров: $IPLR_k \leq IPLR_{доп}$, где k – соответствующий иерархический уровень сети, $k = \{1, \dots, 4\}$ (рис. 1);

– на допустимые варианты топологической структуры с учетом привязки узлов к местности, трасс прокладки кабелей, допустимых длин линий между узлами всех подуровней сети;

– на допустимые значения длин участков регенерации при использовании различных типов ONT и ONU;

$$l_{ij} < L, \quad (16)$$

где l_{ij} – длина участка линии между узлами i и j ; L – максимально допустимая длина линии распределительной сети;

–на устойчивость к заданным разрушающим воздействиям и отказам;

–на поддержание сетью дальнейшей эволюции сетевой инфраструктуры региона;

–на дискретный характер компонент вектора \mathbf{f} . Область допустимых значений F в данном случае представляет собой множество индексов (множество типа натурального ряда), обозначающих допустимое к использованию множество комбинаций компонент вектора \mathbf{f} .

Перечень ограничений может быть изменен исходя из специфики реализации сегмента СД.

С учетом однотипности оборудования OLT, ONU или других выбранных сетевых устройств, функция приведенных затрат примет вид:

$$\Pi_{(f)} = E_H [C_{(i)} + a_{(i)}(N-1) + b_{(j,l)} + V_{(i)}] + \mathcal{E}, \quad (17)$$

где $C_{(i)}$ – стоимость оборудования OLT; $a_{(i)}$ – стоимость оборудования ONU; $b_{(j,l)}$ – стоимость линейного оборудования; E_H – нормативный коэффициент (для оборудования связи $E_H=0,15$); $V_{(i)}$ – стоимость системы ТО; N – число узлов сети; \mathcal{E} – эксплуатационные расходы.

Приведено решение ЗОС для сегмента кольцевой оптической СД на основе оригинальной технической базы сетевого оборудования доступа.

Данная ЗОС решена, как в двухкритериальной, так и в однокритериальной постановке.

В двухкритериальной постановке ЗОС решена на плоскости стоимость - надежность.

В однокритериальной постановке решение сводилось к выбору варианта с минимальной стоимостью.

При проверке ограничения (15) основной показатель качества функционирования сети, с точки зрения абонента, вычисляется, как отношение числа неудачных попыток получить соединение C_H к общему числу поступивших вызовов C_H на некотором интервале времени. Помимо вызовов, потерянных из-за отсутствия свободных соединительных путей, в число C_H входят и неудачные попытки, обусловленные отказами оборудования сети. Предложено решение ЗОС, применительно к синхронным ЛСПД рассмотренным в главе 4. Функционал приведенных затрат (целевая функция) данной ЗОС имеет вид:

$$\begin{aligned} \Pi(f) = E_H [C(i) + a(i)(N-1) + b(j,l)] + \\ \gamma_2 \sum_{m=1}^M \sum_{\theta=1}^{\mathcal{G}} \omega_{M\theta} K_{M\theta} S_{M\theta} + E_H \gamma_1 \sum_{m=1}^M \sum_{\theta=1}^{\mathcal{G}} \omega_{M\theta} K_{M\theta} S_{M\theta} \end{aligned} \quad (18)$$

где $C(i)$ – стоимость станции управления, $a(i)$ – стоимость коммутационных станций, $b(j,l)$ – стоимость линейного оборудования, M – число типов

систем технического обслуживания (СТО), \mathcal{G} – число типов устройств, обслуживающих СТО, $K_{M\theta}$ – количество ремонтников m каждой СТО θ типа устройств, $S_{M\theta}$ – стоимость оборудования каждой СТО θ типа устройств,

$$\omega_{M\dot{q}} = \begin{cases} 1, & \text{если варианты принадлежат допустимым множествам;} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad \gamma_1 = 4/3; \quad \gamma_2 = 1,24.$$

Первая компонента в (18) представляет собой капитальные затраты, вторая – стоимость линейного оборудования (третье слагаемое в квадратных скобках), третья компонента (два последних слагаемых за скобками) определяет эксплуатационные расходы на содержание обслуживающего персонала и оборудование ТО.

Данный функционал отличается от известных тем, что он позволяет оценить стоимость стационарного оборудования для каждого варианта ЛСПД, а также стоимость соединительных линий с учетом ограничений на трассы.

Показано, что станции ЛСПД могут быть представлены обобщенной структурной схемой, учитывающей два нижних уровня модели открытых систем, инвариантной к типам протоколов, скоростей, топологий, видам среды передачи. Определены стоимостные характеристики стационарного оборудования для различных вариантов сетей.

На первом этапе решена задача топологической оптимизации, учитывающая ограничения на пути прокладки кабелей для кольцевой (задача коммивояжера) и звездообразной (перебор) топологий, с целью отыскания оптимальных с точки зрения минимума суммы длин соединительных линий графов для обоих типов структуры. Результатом решения задачи топологической оптимизации являются: номер станции, на которой должен быть размещен центр оптимальной звездообразной структуры, сумма длин соединительных линий в такой структуре, максимальная длина линии, порядок соединения станций в кольце, сумма длин линий в кольце.

Второй этап сводится к перебору дискретного множества вариантов ЛСПД, имеющих различные топологические структуры, типы среды передачи, протоколов доступа, скоростей передачи в среде, виды блокировки, фазирования, протоколы управления, виды системы технического обслуживания, а также различную иерархическую организацию структуры СД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных в настоящей диссертационной работе исследований были получены результаты, которые сводятся к следующим положениям.

1. Исходя из общностей структуры СД, использующих различные технологии PON с предоставлением услуги «Triple Play» можно использовать для анализа показателей качества обслуживания в таких СД одну обобщенную модель на основе многофазовых СМО, моделирующих процессы в нисходящем и восходящем направлениях, с использованием в качестве модели входного потока неоднородного потока заявок с тремя классами относительных приоритетов, а параметризацию указанной модели СМО проводить с учетом параметров, характерных для каждой из исследуемых технологий PON (GPON, GEPON, WDM PON).

2. Замена модели СМО с приоритетным обслуживанием заявок с тремя классами относительных приоритетов тремя независимыми СМО без приоритетов (например, тремя СМО G/G/1 при воздействии потоков, отличных от простейших) не позволяет воспроизвести всю совокупность и многообразие процессов, связанных с приоритетным обслуживанием, защиту от перегрузок для высокоприоритетных классов трафика и «вытеснение» низкоприоритетных классов даже при параметризации независимых СМО, учитывающей различие в интервалах обслуживания заявок с различными классами приоритетов.

3. Применение имитационного моделирования нисходящей и восходящей ветвей СД в среде GPSS World и другого позволяет исследовать СД в условиях воздействия пульсирующего трафика, потоков обслуживания отличных от простейшего, в том числе задаваемых РТХ, воспроизвести всю совокупность процессов, возникающих при приоритетном обслуживании неоднородного трафика с тремя классами относительных приоритетов в обслуживании, характерных для предоставления услуги «Triple Play», а также исследовать не только поведение среднего значения исследуемых характеристик, но и характер их распределений, что особенно важно при нахождении характеристики IPDV.

4. В приоритетных фазах обслуживания модели PON-СД рост IPTD для трафиковых потоков с высшим относительным приоритетом (VoIP) при возрастании интенсивности входного потока существенно замедлен по сравнению с ростом IPTD потока заявок с низким приоритетом. Такая же тенденция наблюдается в росте ско задержки заявок с высшим приоритетом. Последнее дает основание полагать, что организация приоритетного обслуживания кадров в сетевых устройствах PON-СД и других, в соответствии с рекомендациями IEEE 802.1p и IEEE 802.1Q (организация приоритетного обслуживания, VLAN) обеспечивает снижение IPDV для потоков, чувствительных к джиттеру задержки, при организации логических моделей доступа к услугам на основе VLAN.

5. Выполненный сравнительный анализ результатов аналитического и имитационного моделирования сквозных характеристик QoS для услуги «Triple Play», при соединении сегментов СД через другие уровни МС, по-

зволяет сделать вывод о том, что наименьшие расхождения результатов моделирования при различных предположениях о характере трафика и обслуживания кадров в узлах, в том числе и с применением РТХ, наблюдаются в областях малых нагрузок для трафика с высоким приоритетом (VoIP). В области больших нагрузок для этого трафика, расхождения увеличиваются и составляют 1,6 – 1,8 раз.

Для эластичного (малочувствительного к задержкам) трафика DoIP с наименьшим приоритетом такие расхождения могут составлять от 2 до 8 раз в зависимости от уровня загрузки. Однако, в качестве предположения о входном потоке и потоке обслуживания, для сравнения с простейшим потоком и экспоненциальным обслуживанием был выбран гиперэкспоненциальный поток с коэффициентом вариации $\rho = 3$, т.е. проводилось сравнение систем М/М/1 и Н/Н/1.

6. Выполненные исследования с использованием разработанных аналитических и имитационных моделей, на примере ядра МС показали, что использование приоритетной обработки кадров в узлах обеспечивает для наиболее чувствительного к задержке и ее вариации трафика VoIP не только наименьшую среднюю задержку (IPTD), но и позволяет минимизировать вариацию задержки (IPDV). При этом различие между характеристиками высокоприоритетного трафика, при разных законах распределения интервалов между поступающими кадрами и времени их обработки, лежит в приемлемых для практики пределах для значений загрузки узлов и каналов связи в интервале от 0,1 до 0,7. Последнее обстоятельство дает основание полагать, что разработанные модели могут быть использованы для оценочных расчетов сегментов мультисервисных сетей в режимах малых и средних нагрузок при потоках заявок, отличающихся от простейшего.

7. Полученные выражения для анализа показателей надежности различаются для каждой из предложенных моделей надежности и для каждого варианта топологии СД. Наибольшей надежности и отказоустойчивости при резервировании элементов СД удастся достичь лишь при оптимальном комплексировании ее элементов.

8. При моделировании синхронных сетевых структур в условиях воздействия на СМО потоков Бернулли и переходах исследуемых СМО из состояния в состояние в детерминированные дискретные моменты времени, целесообразно использовать решение СМО на основе вложенных цепей Маркова в дискретном времени и метода z-преобразования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, находящихся в перечне ВАК, рекомендуемых для опубликования результатов докторских диссертаций или находившихся в этом перечне на момент опубликования

1. Никульский, И.Е. Технологии PON: вчера, сегодня, завтра // Вестник связи. – 2009. – № 3. – С. 23–27.
2. Никульский, И.Е. Концепция построения мультисервисной сети оператора связи / А.В. Никитин, В.О. Пяттаев, И.Е. Никульский, А.А. Филиппов // Вестник связи. – 2010. – № 5. – С. 47–49; № 7. – С. 41–45.
3. Никульский, И.Е. Особенности внедрения технологий PON на сети оператора, занимающего существенные рыночные позиции / А.В. Никитин, И.Е. Никульский, А.А. Филиппов // Вестник связи. – 2009. – № 4. – С. 18–20.
4. Никульский, И.Е. Особенности тестирования оптических сетей доступа на базе технологий PON / А.В. Никитин, И.Е. Никульский, А.Л. Цуприков // Вестник связи. – 2009. – № 8. – С. 7–9.
5. Никульский, И.Е. Технологии PON: взгляд в будущее / И.Е. Никульский, А.А. Филиппов // Вестник связи. – 2010. – № 2. – С. 4–8.
6. Никульский, И.Е. Моделирование ядра мультисервисной сети с относительной приоритезацией неоднородного трафика / Т.И. Алиев, И.Е. Никульский, В.О. Пяттаев // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – вып. 04(62). – С. 88–96.
7. Никульский, И.Е. Оптическая сеть переноса системы абонентского доступа АТСЦ-90 / И.Е. Никульский, А.Н. Матяшов // Вестник связи. – 2000. – № 11. – С. 58–61.
8. Никульский, И.Е. Реконструкция сети Волгодонского района / Г.С. Егорочкин, В.В. Макаров, И.Е. Никульский, Ю.В. Метла // Вестник связи. – 2005. – № 7. – С. 53–56.
9. Никульский, И.Е. Беспроводные телефонные системы и их использование на сетях электросвязи / И.Е. Никульский, С.И. Лопатин, В.Н. Сорокин // Электросвязь. – 1996. – № 12. – С. 17–19.
10. Никульский, И.Е. Модель сеансового уровня системы передачи дискретных сообщений // Коммутация и управление потоками в сетях связи: Сборник научных трудов учебных институтов связи. – Л. : ЛЭИС, 1987. – С. 111–117.

**Авторские свидетельства на изобретения
и патенты на полезные модели**

11. А.с.1443757 СССР. Система передачи данных с информационной обратной связью/ И.Е. Никульский (СССР). – № 4058673; заявлено 21.04.1986.

12. Никульский И.Е. Универсальная телекоммуникационная платформа с широкополосным доступом, использующая технологию пассивной оптической сети: пат. на пол. модель №81023 Рос. Федерация. №2008136497/22; заявл.10.09.2008; опубл. 27.02. 2009. Бюл. № 6.

13. Никульский И.Е. Лазерный передатчик волоконно-оптического интерфейса для устройств сетевого стыка цифровых АТС и абонентских цифровых концентраторов: пат. на пол. модель № 81864 Рос. Федерация. №2008142710/22; заявл. 28.10.2008; опубл. 27.03.2009. Бюл. № 9.

14. Никульский И.Е. Приемник волоконно-оптического интерфейса для устройств сетевого стыка цифровых АТС и абонентских цифровых концентраторов: пат. на пол. модель № 81611 Рос. Федерация. №2008142518/22; заявл. 27.10.2008; опубл. 20.03.2009. Бюл. № 8.

15. Никульский И.Е. Одноволоконный оптический интерфейс для устройств сетевого стыка цифровых АТС и АЦК: пат. на пол. модель № 82505 Рос. Федерация. №2008151112/22; заявл. 27.10.2008; опубл. 27.04.2009. Бюл. № 12.

16. Никульский И.Е., Степуленок О.А. Оптический терминал для организации цифровых соединительных линий АТС: пат. на пол. модель № 82975 Рос. Федерация. №2008150239/22; заявл. 18.12.2008; опубл. 10.05.2009. Бюл. № 13.

17. Никульский И.Е., Морозов Г.Г., Степуленок О.А. Модуль и устройство сетевого стыка цифровой АТС с оптическим интерфейсом: пат. на пол. модель № 78020 Рос. Федерация. №2008124309/22; заявл. 16.06.2008; опубл. 10.11.2008. Бюл. № 31.

18. Никульский И.Е., Морозов Г.Г., Степуленок О.А. Универсальное устройство сетевого стыка цифровой АТС и абонентского цифрового концентратора с волоконно-оптическим интерфейсом: пат. на пол. модель № 78022 Рос. Федерация. №20081247571/22; заявл. 07.07.2008; опубл. 10.11.2008. Бюл. № 31.

19. Никульский И.Е., Морозов Г.Г., Степуленок О.А. Устройство сетевого стыка абонентского цифрового концентратора с оптическим интерфейсом: пат. на пол. модель № 81025 Рос. Федерация. №2008136500/22; заявл. 10.09.2008; опубл. 27.02.2009. Бюл. № 6.

20. Никульский И.Е., Морозов Г.Г., Степуленок О.А. Синхронный мультиплексор с волоконно-оптическим интерфейсом для устройств сетевого стыка цифровых АТС и абонентских цифровых концентраторов: пат. на пол. модель № 78021 Рос. Федерация. №2008127561/22; заявл. 07.07.2008; опубл. 10.11.2008. Бюл. № 31.

21. Никульский И.Е., Морозов Г.Г., Степуленок О.А. Станционный комплект с оптическим интерфейсом для цифровых АТС и абонентских цифровых концентраторов: пат. на пол. модель № 81504 Рос. Федерация. №2008146703/22; заявл. 26.11.2008; опубл. 27.04.2009. Бюл. № 12.

22. А.с. 1232113 СССР. Акустический соединитель/ И.Е. Никульский, И.В.Обухов, Н.А. Володин (СССР). – №3747681; заявлено 30.05.1986.

Прочие публикации

23. **Монография.** Никульский, И.Е. Оптические интерфейсы цифровых коммутационных станций и сети доступа / И.Е. Никульский. – М. : Техносфера, 2006. – 256 с. (**Рецензия** опубл.: Фотоника.–№ 4.–2007– С. 31).

24. Никульский, И.Е. Модернизация СТС: Волгодонский Вариант / И.Е. Никульский, А.Н. Матяшов // Информ Курьер-Связь. – 2005. –№ 4. – С. 53–56.

25. Никульский, И.Е. Об одном методе оптимизации городской мультисервисной сети / И.Е. Никульский, В.О. Пяттаев // Техника связи. – 2008. – № 6. – С. 20–26.

26. Никульский, И.Е. Моделирование и анализ подуровня агрегирования мультисервисной телекоммуникационной сети / И.Е. Никульский, В.О. Пяттаев // Техника связи. – 2009. – № 2. – С. 18–22.

27. Никульский, И.Е. Оценка показателей качества обслуживания в сети доступа на основе ADSL технологии / Т.И. Алиев, И.Е. Никульский, В.О. Пяттаев // Техника связи. – 2007. – № 2. – С. 28–34.

28. Никульский, И.Е. Метод оценки задержек распространения при моделировании пакетных сетей / И.Е. Никульский, В.О. Пяттаев // Техника связи. – 2008. – № 6. – С. 8–10.

29. Никульский, И.Е. Моделирование сегмента широкополосной сети доступа, использующего технологию пассивных оптических сетей GPON // Материалы Четвертой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию ИММОД-2009. Т. 2. – СПб., 2009. – С. 187–193.

30. Nikulcky, I.. Modeling of packer switching network wich relative prioritization for different traffic types / T. Aliev, I. Nikulcky, V. Piattaev // ICACT'2008: The 10th International Conference on Advanced Communication Technology. Innovations toward Future Networks and Services, Korea, Phoenix Park, Feb. 17–20, 2008: Proceedings, Vol.3. – [s.l.], 2008. – С. 2174–2176.

31. Никульский, И.Е. Проектирование и оптимизация оптических сетей переноса на основе комплекса аппаратных и программных средств цифровой АТС АТСЦ-90 // Информационные сети, системы и технологии = Information Networks, Systems and Technologies (ICINASTE'2001): Труды VII международной конференции, Минск, 2 – 4 октября 2001 г. В 3 т. Т.2. – Мн. : БГЭУ, 2001. – С. 19–23.
32. Никульский, И.Е. Световодное оборудование синхронной кольцевой абонентской сети // Материалы международного семинара «Информационные сети, системы, технологии» – ИССТ-97. Т.4. – М.; Ярославль, 1997. – С. 73–76.
33. Никульский, И.Е. Передача информации в синхронной кольцевой абонентской сети // ICINAS-98: International Conference on Informational Networks and Systems. International Informatization Forum V: Proceedings, St.Petersburg, Sept. 7–12, 1998. – St.Petersburg : [s.n.], 1998. – p. 249-258.
34. Никульский, И.Е. Оптимизация структуры локальной сети управления распределенным объектовым узлом связи // Локальные вычислительные сети: Тез. докл. всесоюзной научно-технической конференции. – Рига: ИЭВТ, 1988. – С. 154–158.
35. Никульский, И.Е. Сетевые структуры в системах отображения информации / И.Е.Никульский, О.С.Чугреев // Микропроцессорные средства отображения информации в системах управления и связи. – М. : Радио и связь, 1988. – С. 159.
36. Никульский, И.Е. Модель синхронной локальной сети с блокировкой приемного буфера // Проблемы развития цифровых систем передачи городских и сельских сетей связи на основе электрических и волоконно-оптических кабелей: Тез. докл. Всесоюзной конференции ЦСП-87. – М. : Радио и связь, 1987. – С. 112–113.
37. Никульский, И.Е. Модель локальной сети со случайным доступом к заблокированному буферу // Вычислительные сети коммутации пакетов: Тез. докл. V Всесоюзной конференции «Компак-87». – Рига : ИЭВТ, 1987. – С. 145–148.
38. Никульский, И.Е. Оценка алгоритма повышения верности передачи данных в системе с ретрансляционной обратной связью и защитным интервалом // Надежность и качество функционирования информационных сетей и их элементов: Тез. докл. V Всесоюзной научно-технической конференции. – Новосибирск, 1985. – С. 111–117.
39. Никульский, И.Е. Применение полудуплексных регенераторов для развития малых локальных сетей с шинным моноканалом. Шестнадцатая всесоюзная школа-семинар по вычислительным сетям. Часть III. – М. ; Винница, 1991. – С. 229–233.

40. Никульский, И.Е. Система сбора данных для центра технической эксплуатации ГТС // Тез. докл. Всесоюзного научно-технического совещания «Применение электронных управляющих машин в коммутационной технике». – М. : Радио и связь, 1984. – С. 86.

41. Никульский, И.Е. Применение оптронной развязки в устройствах моноканала локальных сетей передачи данных / И.Е.Никульский, О.А.Степуленок // Тез. докл. 47-й научно-технической конференции НТО РЭС «Актуальные проблемы развития радиотехники, электроники и связи». – [Б.м.], 1992. – С. 64.

42. Никульский, И.Е. Цикловая синхронизация в локальной кольцевой сети передачи данных / И.Е.Никульский, М.М.Сальков //Деп. ЦНТИ «Информсвязь», реф.опубл. в БУ «Деп. Рукописи», ВИНТИ, 1988. №2 – С. 164.

43. Никульский, И.Е. Об одном варианте построения системы сбора данных на базе коммутируемой телефонной сети общего пользования/ Никульский И.Е., Чугреев О.С.// Деп. ЦНТИ «Информсвязь» 08.09.1987, №1172-св.

44. Никульский, И.Е. Передача дискретных сообщений в многоканальной внутриобъектовой системе связи/ Никульский И.Е., Чугреев О.С., Сальков М.М. // Деп. ЦНТИ «Информсвязь» 01.09.1987, №1171-св.

45. Никульский, И.Е. Метод оптимизации оптических сетей доступа./ И.Е.Никульский, А.И.Осадчий // Труды всеармейской научно-практической конференции «Инновационная деятельность в вооруженных силах Российской Федерации»./ ВАС – С.Пб, 2010 – С. 352 – 358.

Подписано к печати 23.12.2010

Объем 2 печ. л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в СПбГУТ. 191186 СПб, наб. р. Мойки, 61