

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра «Автоматическая электросвязь»

Специальность 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

Чежимбаева К.С.

«_» январь 2014 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка

на тему: Методы и модели анализа ширококоролонных сетей доступа

Выполнил	<u>магистрант гр. СССп-12-1</u>	<u>Акболат А. Б.</u> (подпись) (Ф.И.О.)
Руководитель	<u>профессор, кандидат</u> <u>технических наук</u> (ученая степень, звание)	<u>Туманбаева К.Х.</u> (подпись) (Ф.И.О.)
Рецензент	(ученая степень, звание)	(подпись) (Ф.И.О.)
Нормаконтроль	<u>старший преподаватель</u> (ученая степень, звание)	<u>Абиров Д.А.</u> (подпись) (Ф.И.О.)
Вычислительная техника	<u>профессор, кандидат</u> <u>технических наук</u> (ученая степень, звание)	<u>Туманбаева К.Х.</u> (подпись) (Ф.И.О.)

Алматы, 2014

Аннотация

Данная магистерская диссертация посвящена анализу методов расчета и моделей широкополосных сетей доступа. В ней сделан сравнительный анализ технологии PON. Исследованы методы модернизации сетей доступа на основе технологии пассивных оптических сетей.

В работе разработана аналитическая модель широкополосной оптической сети на основе теории массового обслуживания. Получены зависимости для определения основных характеристик сети. В среде GPSS World разработана имитационная модель для проведения исследований по анализу широкополосной оптической сети доступа.

Аңдатпа

Бұл магистрлік диссертация кеңжолқты қатынау желілерінің есептеу тәсілдері мен моделін құрастыруға арналған. Бұл жұмыста PON технологиясының салыстырмалы талдауы жасалған. Пассивті оптикалық желілер технолоиясы негізіндегі қатынау желілерін жанарту тәсілдері қарастырылған.

Бұл жұмыста жаппай қызмет көрсету негізіндегі кеңжолқты қатынау желісінің аналитикалық моделі жасалды. Желінің басты сипаттамаларын анықтау үшін тәуелділіктер алынды. Кеңжолқты қатынау желісіні талдау тәжірибелерін жүгізу үшін GPSS World ортасында имитациялық модель жасалды.

Содержание

Введение	4
1 Широкополосные оптические сети доступа нового поколения	6
1.1 Оптоволоконные технологии широкополосных сетей доступа	6
1.2 PON – оптические сети с пассивным распределением	6
1.3 Сравнительный анализ технологий PON	10
1.4 Особенности построения оптических сетей доступа нового поколения	11
1.5 Методы модернизации сетей доступа на основе внедрении технологий пассивных оптических сетей	15
1.6 Постановка задачи	19
1.7 Выводы главе 1	20
2 Аналитическое моделирование на основе методов теории массового обслуживания	20
2.1 Оценка показателей качества широкополосных сетей доступа	20
2.2 Математические модели входных потоков	25
2.3 Системы массового обслуживания	31
2.4 Сети массового обслуживания	42
2.5 Концептуальный подход к оптимизации сетей доступа	44
2.6 Выводы главе 2	46
3 Имитационное моделирование и анализ оптических сетей доступа	47
3.1 Моделирование и исследование фрагмента широкополосной СД; использующего технологию PON.	47
3.2 Аналитическая модель	51
3.3 Система моделирования GPSS World	62
3.4 Имитационная модель оптической сети GPON	63
3.5 Анализ работы оптической сети GPON на имитационной модели	64
3.6 Выводы главе 3	68
Заключение	69
Список сокращений	70
Список литературы	71
Приложение 1	73

Введение

Широкополосная сеть доступа (ШСД), реализующая присоединение пользовательских терминалов и локальных сетей абонентов к узлам доступа является существенным звеном в сети с пакетной коммутации.

Технологии транспортных сетей и систем коммутации, фиксированный сектор сетей доступа на протяжении многих лет не подвергались существенным изменениям. Но в последние годы ситуация стала меняться.

Потребность в повышении скорости передачи данных на уровне доступа постоянно растет. Это объясняется расширением номенклатуры сетевых услуг, развитием технологий передачи, отображением видеоконтента, расширением пользовательской базы, охваченной широкополосными услугами, и многими другими факторами. Данное обстоятельство способствует широкому внедрению в фиксированном секторе сети доступа (СД) широкополосных волоконно-оптических технологий.

В настоящее время в Республике Казахстан активно внедряется широкополосная оптическая сеть. Данная сеть уже используется в шести областях страны.

Разработка моделей и методов создания и внедрения оптических ШСД, 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 является **актуальной задачей**.

Целью магистерской диссертации является исследование методов и разработка модели для анализа широкополосных оптических сетей доступа на базе GPON.

Для достижения поставленной цели следует выполнить следующие задачи:

- 1) анализ современного состояния широкополосных оптических сетей доступа;
- 2) анализ методов расчета и моделей широкополосных сетей доступа на базе GPON;
- 3) аналитическое моделирование широкополосных сетей как системы массового обслуживания;
- 4) разработка имитационной модели оптической сети в системе GPSS World;
- 5) исследование на имитационной модели эффективности работы сети.

Научная новизна магистерской диссертации заключается:

- 1) в анализе характеристик качества обслуживания при соединении сегментов сети доступа;
- 2) в разработке аналитической модели широкополосной сети доступа, использующей технологии пассивных оптических сетей на основе СМО, с

тремя классами относительных приоритетов обслуживания для трех классов трафика: VoIP, IPTV, DoIP;

3) в разработке имитационной модели оптической сети доступа GPON;

4) в разработке методов определения характеристик оптических сетей, влияющих на качество обслуживания абонентов.

Практическая значимость магистерской диссертации. Полученные результаты анализа и разработанная имитационная модель сегментов ОШСД, позволят проводить оценку основных показателей качества обслуживания всех видов передаваемого в ШСД трафика.

Результаты работы могут быть использованы различными компаниями и государственными учреждениями при разработке, внедрении новых и усовершенствовании существующих оптических сетей GPON.

1 Широкополосные оптические сети доступа нового поколения

1.1 Оптоволоконные технологии широкополосных сетей доступа

Широкополосный или высокоскоростной доступ (ШПД) - доступ в Интернет с большой скоростью, в противоположность коммутируемому доступу с использованием модема и телефонной сети общего пользования.

Если коммутируемый доступ имеет ограничение по скорости порядка 56 кбит/с и полностью занимает телефонную линию, то широкополосные технологии обеспечивают во много раз большую скорость обмена данными. Кроме высокой скорости, широкополосный доступ обеспечивает непрерывное подключение к Интернету (без необходимости установления коммутируемого соединения) и так называемую «двустороннюю» связь, то есть возможность как принимать, так и передавать информацию на высоких скоростях.

Широкополосный доступ помогает решать задачу по обеспечению устойчивого развития отдаленных и сельских местностей, а также является важным элементом помощи местным властям в создании привлекательных условий для ведения бизнеса, в предоставлении населению отдаленных и сельских местностей возможности для дистанционной трудовой деятельности получения высококвалифицированных медицинских услуг, повышения образовательного уровня и участия в управлении государством[3].

Выделяют мобильный широкополосный доступ (мобильный ШПД) и фиксированный широкополосный доступ. Фиксированный ШПД строится на основе проводных соединений. В то время как мобильный ШПД включает в себя передачу данных по беспроводным соединениям[4].

Мобильный ШПД в настоящее время использует технологии мобильной связи WCDMA/HSPA (поколение 3.5G), HSPA+ (поколение 3.75G). Также применяются технологии 4G: WiMax и LTE.

Фиксированный ШПД основан на технологиях xDSL и оптоволоконных технологиях, таких как FTТх и PON, которые будут рассмотрены далее.

1.2 PON – оптическая сеть с пассивным распределением

Развитие технологии PON с середины 90-ых гг. проходит несколько этапов, обозначаемых стандартами APON, EPON и GPON [1].

Первые шаги в технологии PON были предприняты 1995 году, когда влиятельная группа из семи компаний (BritishTelecom, FranceTelecom, DeutscheTelecom, NTT, KPN, Telefonica и TelecomItalia) создала консорциум для того, чтобы претворить в жизнь идею множественного доступа по одному

волокну. Эта неформальная организация, поддерживаемая ITU-T, получила название FSAN (Full Service Access Network).

Целью FSAN была разработка общих рекомендаций и требований к оборудованию PON с тем, чтобы производители оборудования и операторы, могли сосуществовать вместе на конкурентном рынке систем доступа PON. На сегодня FSAN насчитывает 40 операторов и производителей и работает в тесном сотрудничестве с такими организациями по стандартизации, как ITU-T, ETSI и ATM форум.

Операторы услуг связи, входящие в FSAN: Bell Canada, BellSouth, Bezeq, British Telecom, Chunghwa Telecom, Deutsche Telecom, Eire, France Telecom, Korea Telecom, KPN, Malta Telecom, NTT, Qwest, SBC, Singapore Telecom, SwissCom, Telecom Italia, Telefonica, Telia, Telstra, Verison и т.д.

Поставщики оборудования PON, входящие в FSAN: Alcatel, Agere, Broadlight, Ericsson, Flexlight Networks, Fujitsu, Hitachi (OpNext), Iamba, Infineon, Lucent, Marconi, Mitsubishi [Paceon], NEC [NEC Luminant], OKI [OKI Network Technologies], Optical Solutions, Quantum Bridge, SAT, Terawave, Zonu и т.д.

Суть технологии PON заключается в том, что между центральным узлом, обеспечивающим подключение к магистрали (SDH/ATM), и абонентскими узлами создается полностью пассивная оптическая сеть древовидной топологии [8]. В промежуточных узлах дерева размещаются компактные пассивные оптические разветвители (сплиттеры), не требующие питания и обслуживания.

Основная идея архитектуры PON – использование всего одного приемопередающего модуля в OLT для передачи информации множеству абонентских устройств ONU и приема информации от них (рис. 1.1).



Рис 1.1 - Сеть PON

Число абонентских узлов, подключенных к одному приемопередающему модулю OLT, может быть настолько большим, насколько позволяет бюджет

мощности и максимальная скорость приемопередающей аппаратуры. Для передачи потока информации от OLT к ONT – прямого (нисходящего) потока, как правило, используется длина волны 1550 нм. Наоборот, потоки данных от разных абонентских узлов в центральный узел, совместно образующие обратный (восходящий) поток, передаются на длине волны 1310 нм. В OLT и ONT встроены мультиплексоры WDM, разделяющие исходящие и входящие потоки. Реализация этого принципа показана на рисунке 1.1.

Прямой поток на уровне оптических сигналов, является широкоэмитальным. Каждый абонентский узел ONT, читая адресные поля, выделяет из этого общего потока предназначенную только ему часть информации. Фактически, мы имеем дело с распределенным демультиплексором.

Все абонентские узлы ONT ведут передачу в обратном потоке на одной и той же длине волны, используя концепцию множественного доступа с временным разделением TDMA (time division multiple access). Для того, чтобы исключить возможность пересечения сигналов от разных ONT, для каждого из них устанавливается свое индивидуальное расписание по передаче данных с учетом поправки на задержку, связанную с удалением данного ONT от OLT. Эту задачу решает протокол TDMA MAC. [2]

В решении «Волокно до дома» (Fiber to the Home — FTTH) затраты на активные устройства представляют собой лишь малую часть от общих затрат на проект, при этом значительно большая часть приходится на долю оптической распределительной сети (ODN). ODN является участком сети между оптическим линейным терминалом OLT (рисунок 1.2) и оптическим сетевым модулем (ONU) и включает в себя магистральный, распределительный и абонентский участки кабеля, а также все необходимые соединители и пассивные устройства[2].

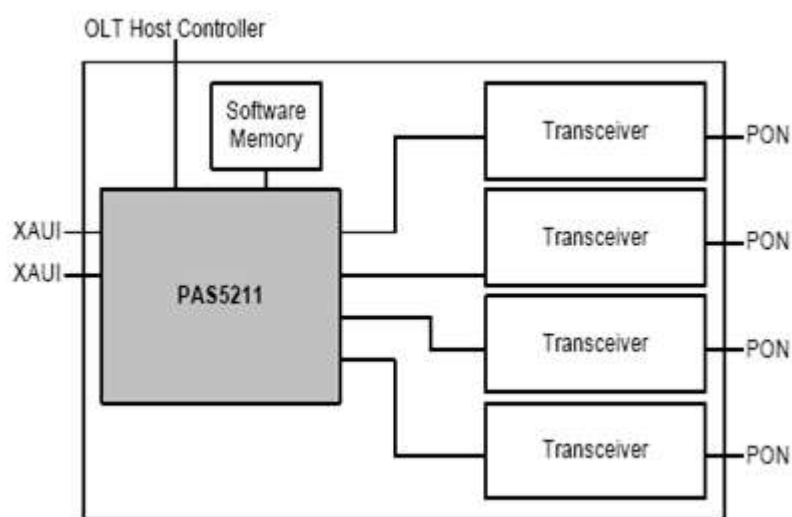


Рис 1.2 - Оптический линейный терминал (OLT)

Отличительной особенностью сетей PON является то, что по одному волокну возможна поддержка сервиса для множества абонентов (рисунок 1.2), что значительно снижает стоимость внедрения оптической распределительной сети, а также количество станционного оборудования.

Архитектуру сети доступа GPON (Gigabit PON) можно рассматривать как органичное продолжение технологии APON (рисунок 1.3). [3]

GPON предоставляет масштабируемую структуру кадров при скоростях передачи от 622 Мбит/с до 2,5 Гбит/с, и допускает системы как с одинаковой скоростью передачи прямого и обратного потока в дереве PON (рисунок 2.1), так и с разной. GPON базируется на стандарте ITU-T G.704.1 GFP (Generic Framing Protocol, Общий Протокол Кадров), обеспечивая инкапсуляцию в синхронный транспортный протокол любого типа сервиса, в том числе TDM. Исследования показывают, что даже в самом худшем случае распределения трафика и колебаний потоков утилизация полосы составляет 93% по сравнению с 71% в APON, не говоря уже о EPON. Если в SDH деление полосы происходит статично, то GFP (Generic Framing Protocol), сохраняя структура кадра SDH, позволяет динамически распределять полосу[10].

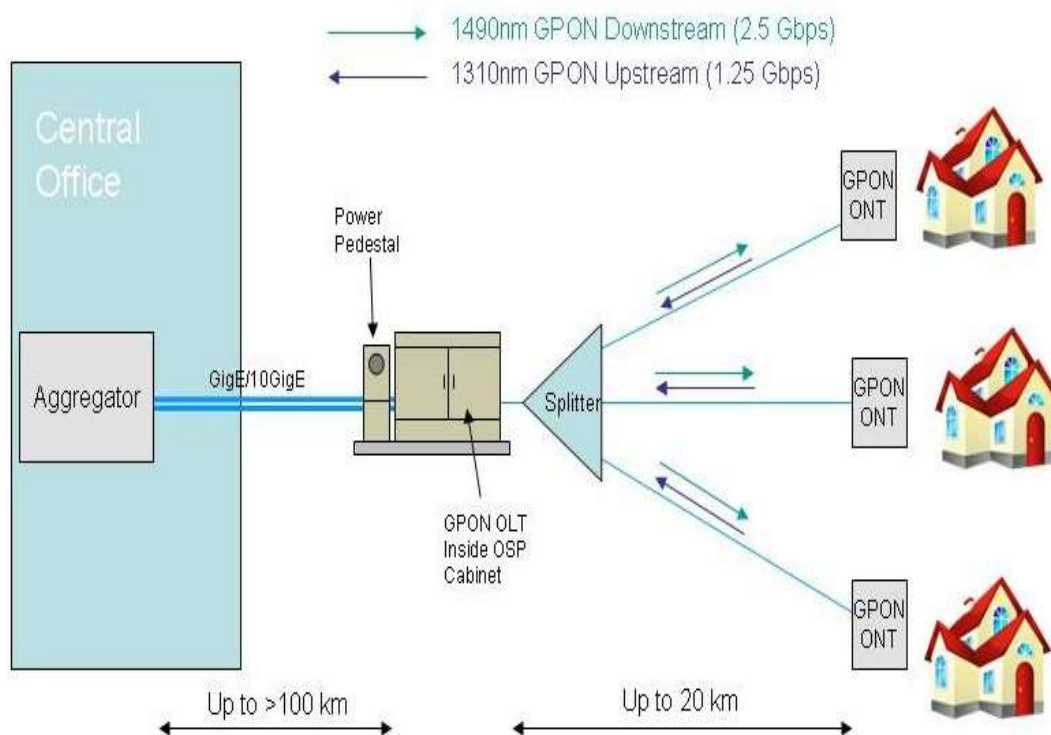


Рис 1.3 - Технология GPON

При этом реализуется увеличение как полосы пропускания сети PON, так и эффективности передачи разнообразных мультисервисных приложений. Стандарт GPON ITU-T Rec. G.984.3 GPON был принят в октябре 2003 года[8].

1.3 Сравнительный анализ технологий PON

Рассмотрев существующие технологии PON, проведем сравнительный анализ их характеристик (таблица 1.1) [8].

Т а б л и ц а 1.1 - Сравнительный анализ технологий APON, EPON и GPON

Характеристики	APON (BPON)	EPON	GPON
Институты стандартизации / альянсы	ITU-T SG15 / FSAN	IEEE / EFMA	ITU-T SG15 / FSAN
Дата принятия стандарта	октябрь 1998	июль 2004	октябрь 2003
Стандарт	ITU-T G.981.x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984.x
Скорость передачи, прямой/обратный поток, Мбит/с	155/155 622/155 622/622	1000/1000	1244/155,622,1244 2488/622,1244, 2488
Базовый протокол	ATM	Ethernet	SDH
Линейный код	NRZ	8B/10B	NRZ
Максимальный радиус сети, км	20	20 (>30 ¹)	20
Максимальное число абонентских узлов на одно волокно	32	16	64 (128 ²)
Приложения	Любые	IP, данные	Любые
Коррекция ошибок FEC	предусмотрена	нет	необходима
Длины волн прямого/обратного потоков, нм	1550/1310 (1480/1310)	1550/1310 (1310/1310)	1550/1310 (1480/1310)
Динамическое распределение полосы	есть	Поддержка	Есть
IP-фрагментация	есть	нет	Есть
Защита данных	Шифрование открытыми ключами	нет	Шифрование открытыми ключами
Резервирование	есть	нет	Есть
Оценка поддержки	высока	низкая	Высока

Таким образом видно, что технология GPON на данный момент является более емкой (количество абонентских узлов), предоставляет более быстрое соединение, поддерживает IP-фрагментацию, шифрование. Предоставляет более высокую поддержку передачи голосовых данных.

1.4 Особенности построения оптических сетей доступа нового поколения

Растущая популярность широкополосных, услуг с «тяжелым контентом» (HDTV, HDVoD - потоковое ТВ-вещание высокой четкости и видео высокой четкости по запросу), в совокупности с постоянно возрастающей потребностью абонентов в высокоскоростном доступе к Интернет, а также обостряющаяся конкуренция со стороны операторов подвижных служб, альтернативных операторов и интернет-провайдеров приводят крупные операторские компании к необходимости построения мультисервисной сетевой инфраструктуры и ее важнейшего элемента - сети доступа, пригодных для оказания широкополосных услуг.

Количественная оценка, определяющая отнесение тех или иных услуг к широкополосным, до сих пор не определена [4]. Так, Федеральная комиссия по связи США (FCC) считает, что услуги, требующие максимальной пропускной способности более 200 Кбит/с являются широкополосными, в то время как Международный Союз Электросвязи (МСЭ) установил аналогичный критерий граничной пропускной способности для услуг цифровой сети интегрального обслуживания (ЦСИО) в 2048 Кбит/с.

В настоящее время доказано [5], что наиболее эффективным с экономической точки зрения подходом к внедрению широкополосных услуг является их пакетирование. Данный термин не следует путать с термином «пакетизация» отражающим внедрения пакетной передачи и коммутации. В рассматриваемом случае термин «пакетирование» применяется для обозначения группирования услуг в пакеты и их совместную предоставления пользователю через общие средства доступа. Такой подход позволяет снизить период окупаемости средств доступа повысить доходы оператора при последующей эксплуатации сети. Примером пакетированной услуги может послужить комбинированная услуга «Triple Play» (видео+речь+данные).

Динамика изменения требований к максимальной пропускной способности оптической инфраструктуры доступа с одной стороны определяется потребностью и экономической обоснованностью внедрения широкополосных услуг, а с другой стороны возможностями применения технологий доступа, классифицированных в предыдущем разделе. Оба Этих процесса тесно взаимосвязаны и стимулируют друг друга [5]. Подобно тому, как в предыдущем разделе было показано проявление двух прогностических законов - закона Мура

и закона Боско (в развитии микроэлектронной элементной базы, а также производительности вычислительной техники и в развитии производительности оптических систем, соответственно), здесь следует упомянуть о третьем прогностическом законе, описывающем тенденцию роста максимальной пропускной способности сети доступа. Этот закон получил название закона Нильсена (Jakob Nielsen) [5]. Согласно этому закону скорость передачи данных на уровне доступа увеличивается на 50% в течение года.

Пропускная способность сети доступа должна поддерживаться на таком уровне, чтобы пользователь комфортно воспринимал весь пакет предоставляемых ему услуг. В контексте предоставления основной современной комбинированной услуги «Triple Play» это требование можно сформулировать так, В пределах максимальной нагрузки на сеть, создаваемой в час наибольшей нагрузки (ЧНН), качество телефонной связи должно быть не хуже, чем в классической цифровой телефонии (TDM), не должно быть заметных, характерных для низкокачественной пакетной связи искажений (реверберации, пропаданий и наложений фрагментов речи, дрожания, нелинейных и частотных искажений, нарушений разборчивости и других).

Телевизионное изображение должно иметь воспринимаемое качество не хуже, чем при кабельном или спутниковом телевидении. Не должно быть «рассыпаний» изображения, остановок трансляции, рассинхронизации звука и изображения, выпадений фрагментов, и других характерных искажений.

Время перехода с канала на канал при нажатии кнопок на пульте пакетной телевизионной приставки Set Top Box (STB), не должно превышать значений, характерных для радиочастотных селекторов каналов традиционных телевизионных приемников.

При доступе в Интернет реакция сети, т.е. появление WEB страницы на экране, должно происходить не более чем через 1 секунду после передачи запроса.

Для обеспечения этих, очень примитивных на первый взгляд, требований необходимо реализовать сеть нового типа с заданными характеристиками качества функционирования во всем диапазоне нагрузок и трафиковых режимов. При дальнейшем рассмотрении и исследовании сетей доступа будем ориентироваться в основном на реализацию услуги «Triple Play», а в качестве основного термина для характеристики сетевой инфраструктуры, обеспечивающей предоставление этой услуги будем использовать термин «мультисервисная сеть» с аббревиатурой МС.

Несмотря на то, что основным предметом рассмотрения данной работы является сеть доступа, рассмотрение этой части сетевой инфраструктуры в отрыве от других иерархических уровней МС существенно сузило бы представления о взаимосвязи процессов, протекающих в СД с другими сетевыми механизмами МС. Поэтому будем рассматривать интегративную структурно-функциональную модель физической организации СД во взаимосвязи с другими иерархическими уровнями МС.

При рассмотрении такой инфраструктуры будем ориентироваться на требования, предъявляемые к МС операторского класса, обеспечивающим выполнение всех требований по надежности и доступности, предъявляемых к сетям общего пользования.

В настоящее время пользователь-потребитель пакетированных услуг может использовать как разнообразный набор терминального оборудования (1Ж - для доступа в Интернет, компьютеризированный IP-телефон, в том числе, с функцией видеотелефонной связи - для проведения телефонных или видеотелефонных сеансов, упоминающуюся выше приставку Set Top Box - для приема IPTV), так и интегрировать все эти услуги в универсальном терминале на базе мультимедиа ПК [7]. Портативные варианты таких устройств в последнее время обозначаются термином «нэтбук». Данный вариант представляется наиболее перспективным, поскольку является продуктом глобализированного крупносерийного производства и поэтому имеет низкую стоимость. Исходя из этих соображений, в рамках предлагаемой структурно-функциональной модели будем рассматривать оба этих варианта структурной организации терминального оборудования.

Подавляющее большинство современных терминальных устройств имеют стандартизованный физический интерфейс Ethernet 100 BaseT или 1000 BaseT. В некоторых случаях для организации домашних и офисных ЛС используются беспроводные роутеры с интерфейсами Wi-Fi (IEEE 802.11), но и эти устройства подключаются к фиксированной сети по интерфейсу, указанному выше. Учитывая данные обстоятельства, при рассмотрении структурно-функциональной модели СД будем подразумевать, что все терминальные устройства взаимодействуют с СД через электрический физический интерфейс Ethernet.

Структурно-функциональная модель СД, присоединенной к другим иерархическим уровням МС (концептуальная модель МС), приведена на рис. 1.4. На этом рисунке структура МС разделена на 4 иерархических уровня: уровень доступа, уровень агрегирования доступа, уровень ядра (магистральной): сети, уровень агрегирования услуг (плоскость услуг).

В нижней части рисунка показана структура СД. Сеть доступа может иметь как чисто оптическую структуру, так и гибридное построение, предусматривающее использование других технологий, например, xDSL. В левой нижней части схемы показан гибридный сегмент СД, использующий принцип FTTH. В узле доступа УД 1 расположен x-DSL мультиплексор DSLAM. В этом случае в качестве дополнительной среды распространения СД используется часть существующих абонентских линий с металлическими жилами, пригодная для использования наложенной x-DSL технологии.

В средней области нижней части схемы показан чисто оптический сегмент доступа, использующий принцип FTTH на основе базовых технологий xPON, рассмотренных в предыдущем разделе работы, с узлом доступа УД2, в котором размещены OLT. Данные сегменты представляют собой древовидные

топологические структуры с пассивными узлами. Оборудование ONT располагается в помещениях пользователей, до которых доведен одноволоконный ВОК. Если левый и центральный (по схеме) сегменты СД располагаются в крупных населенных пунктах (областных центрах, городах-субъектах РФ и других), то в правой нижней части рис. 1.4 показан сегмент СД, ориентированный на применение в условиях сельского района.

Подробное описание концепции построения мультисервисной сети крупного оператора, со структурой, аналогичной рис. 1.4 приводится автором настоящей работы в публикации [8].

Важным аспектом рассмотрения структурно-функциональной модели оптической СД, учитывающим ее взаимодействие с другими иерархическими УРОВНЯМИ МС, является характер распределения и параметры классов Трафика, обеспечивающего реализацию рассматриваемого пакета услуг.

Каждое из трех рассмотренных выше приложений имеет свои отличные друг от друга трафиковых маршруты. Распределение трафика данных для каждого из рассмотренных видов услуг приведено в рис 1.4.

На рис. 1.4 показано распределение трафика данных при доступе в Интернет. Потоки трафика на этой и двух других приведенных ниже схемах показаны стрелками. Толщина стрелок отражает объемы передаваемого трафика и требуемую для его передачи пропускную способность.

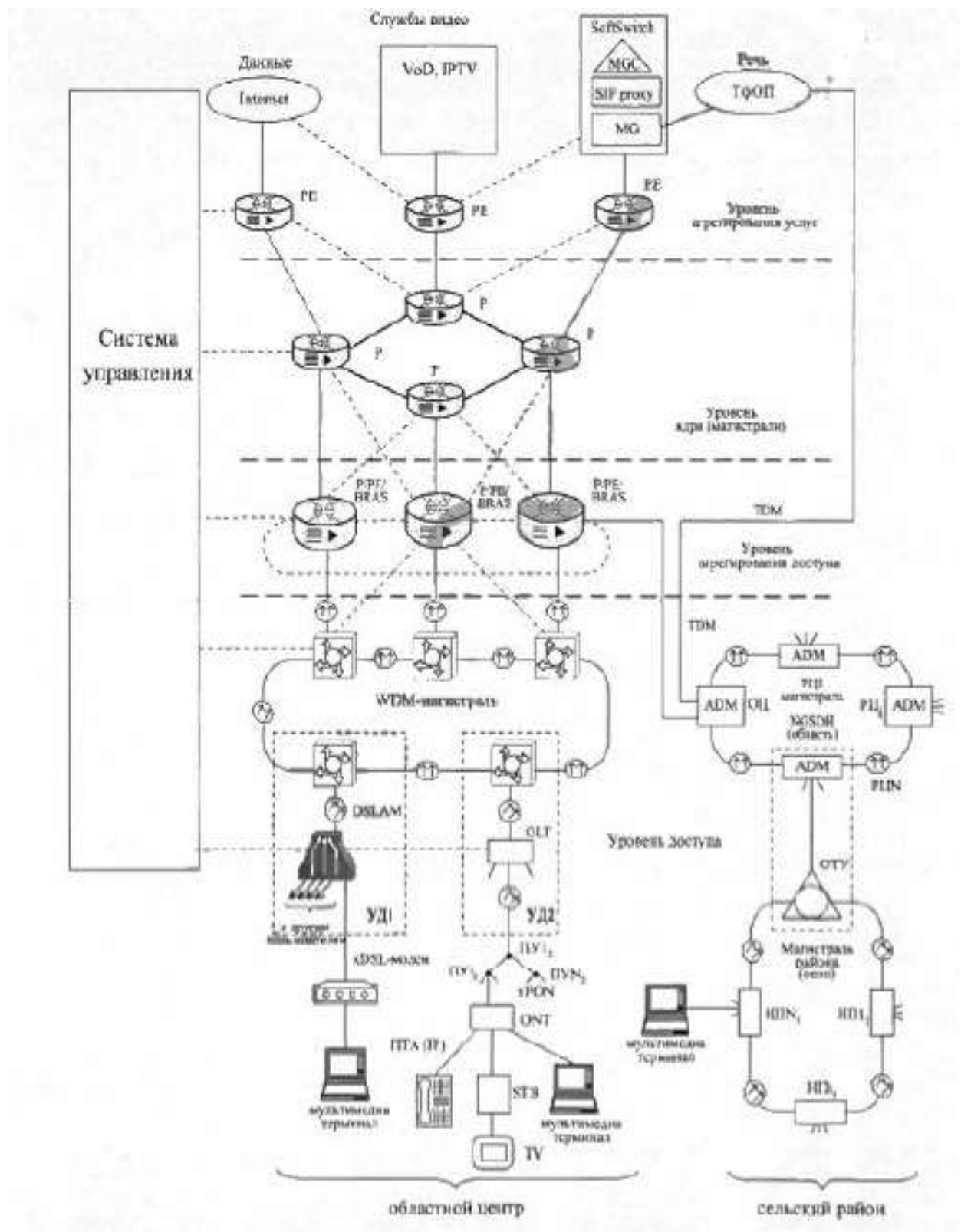


Рис. 1.4. Концептуальная модель иерархической МС

1.5 Методы модернизации сетей доступа на основе внедрении технологий пассивных оптических сетей

Важной особенностью современного этапа развития СД является технологическая унификация подхода к оказанию услуг. Если еще совсем недавно услуга телефонного соединения в сети ТфОП предоставлялась средствами коммутируемой аналоговой или цифровой TDM-сети, доступ к услугам вычислительных сетей осуществлялся посредством сети абонентского доступа, являвшейся частью сети ТфОП [9], а доступ к услугам телевидения предоставлялся сетью CATV, то в рассматриваемой МС все эти и другие услуги предоставляются одними и теми же средствами широкополосной оптической СД,

Для крупного оператора, имеющего развитые сети доступа xDSL, переход к волоконно-оптической инфраструктуре на участке доступа можно рассматривать как выход на новый уровень качества предоставления абонентам инфокоммуникационных услуг, связанный со значительным снижением затрат на эксплуатацию модернизируемой СД.

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. Это достигается за счет увеличения радиуса такого PON-участка до 20 км.

Данное обстоятельство позволяет достичь еще одно важнейшее технико-экономическое преимущество - укрупнение узлов доступа (УД). Последнее обеспечивает высвобождение ряда объектов недвижимости, занимаемых ранее опорно-транзитными АТС, по мере сосредоточения УД в одном здании бывшей АТС, находящемся в «центре тяжести» зоны размещения абонентов. Экономические оценки показывают [4], что средства, которые могут быть выручены за счет продажи здания, в которых пока размещены АТС, существенно превышают затраты, необходимые для модернизации всей инфокоммуникационной системы города. Дополнительным важным преимуществом PON-модернизации является существенное снижение физического объема линейных сооружений существующей сети абонентского доступа, проложенных в кабельной канализации, находящейся в собственности Оператора-Высвобождение пространства в кабельной канализации может быть использовано для получения дополнительной прибыли за счет сдачи высвободившихся кабельных каналов и иных сооружений в аренду, а также в результате утилизации значительного количества высвобождающегося в результате данной модернизации стратегического сырья - меди. Реализованная на основе PON-технологий сеть доступа, с одной стороны должна обеспечить прозрачный транспорт любых информационных потоков, необходимых для

предоставления всего комплекса услуг - TDM, CATV, пакетных широкополосных сервисов поверх Ethernet и других, должна осуществить гибкое распределение разделяемых ресурсов пропускной способности между пользователями, должна иметь хорошую масштабируемость - наиболее простое и удобное подключение новых абонентов. С другой стороны, эта сеть доступа должна иметь наиболее экономичную, с точки зрения объема линейных сооружений, одноволоконную оптическую инфраструктуру.

Крупные местные операторы сталкиваются с необходимостью предоставления современных услуг связи абонентам как квартирному, так и корпоративному секторам. Каждая из этих категорий абонентов имеет характерные потребности в сетевых услугах [10]. Одна из возможных обобщенных моделей распределения трафика для абонента, подписавшегося на полный набор услуг, приведена в [10]. Для каждого абонента устанавливаются две «скоростные» границы на участке GNT-OLT в обоих направлениях (upstream - снизу вверх и downstream - сверху вниз): максимально возможная скорость передачи (100 Мбит/с, upstream и downstream) и гарантированная скорость передачи (30 Мбит/с - upstream, 60 Мбит/с - downstream).

Для обеспечения необходимого качества предоставления всех видов услуг в этой сети должна быть реализована приоритезация классов трафика (8 классов в GEPON и 5 классов в GPON). Важной задачей при внедрении технологий PON является строительство пассивной оптической распределительной сети.

Общие технические требования к этому элементу сети доступа, а также рекомендации по выбору логических моделей доступа, по организации гарантированного электропитания оборудования в помещениях пользователей и многие другие вопросы, которые необходимо разрешить оператору при модернизации в сети доступа на основе PON - технологий, приводятся в публикации автора настоящей работы [10].

Материал данного подраздела настоящей работы подготовлен на основе «Концепции внедрения технологий PON на сети ОАО «СЗТ» до 2009 года», разработанной под научным руководством и при непосредственном участии автора настоящей работы. В целом данная концепция позволила разрешить проблему внедрения технологий PON на сетях крупных операторов.

Возникновение данной проблемы было связано с тем, что с одной стороны, на рынке имеется оборудование платформ доступа xPON различных фирм-изготовителей. С другой стороны, было неясно, какую именно технологию и какого поставщика, а главное, по каким критериям должен выбрать оператор, какие логические модели доступа к услугам и как ему нужно реализовывать, как и по каким критериям нужно выбирать структуру распределительной сети и как решить большое число других важных вопросов, возникающих в процессе реконструкции инфраструктуры доступа. Разработанная концепция позволяла разрешить следующий комплекс основных вопросов:

- определены цели и задачи внедрения технологии PON;

- определен перечень основных услуг PON и особенности профилирования трафика для их предоставления;
- выявлены мировые тенденции внедрения и развития технологий PON и приведен сравнительный анализ этих технологий;
- предложена методология выбора базовой технологии;
- сформулированы основные принципы построения широкополосных сетей доступа на основе технологий PON;
- определены основные положения организации логической структуры СД на основе PON и разработаны логические модели доступа к основным услугам;
- разработаны типовые структурные схемы внедрения основных системно-сетевых решений на основе технологии PON;
- выявлены принципы интеграции сегментов доступа PON в инфраструктуру МС оператора связи;
- сформулированы технические требования к оборудованию OLT, ONT, сплиттерам и их размещению на объектах, к системе управления сегментом PON;
- выявлены методы повышения структурной надежности и отказоустойчивости, а также разработаны рекомендации по их повышению;
- определены основные подходы к организации системы контроля качества услуг, предоставляемых по сетям доступа, использующим технологию PON;
- выработаны принципы расширения и масштабирования сетевой инфраструктуры и разработаны рекомендации по данным вопросам;
- сформулированы подходы к обеспечению доступности основной услуги при использовании принципа FTTH;
- выявлены особенности технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений, разработаны рекомендации по построению оптической распределительной сети на объектах;
- сформулированы подходы к оценке технико-экономической эффективности решений PON и предложен метод оптимизации структуры СД;
- выработана стратегия внедрения PON на сети связи крупного оператора.

На основе предложенной концепции реализуются инновационные проекты строительства широкополосных сетей доступа в крупных городах Северо-западного Федерального округа России. Результаты внедрения, рассмотренных выше методов реконструкции СД крупного оператора и основные положения, рассмотренной выше концепции опубликованы в [10].

Как при выборе поставщика оборудования платформ доступа xPON (на этапе предварительных испытаний), так и на этапе внедрения и эксплуатации широкополосных сетей доступа, использующих данный тип оборудования, одним из важных направлений деятельности оператора является тестирование стационарного, абонентского оборудования и линейной инфраструктуры.

Регулярное проведение тестирования на этапе внедрения и эксплуатации сети позволяет выявить повреждения линейной инфраструктуры и предотвратить возникновение отказов, а также в случае возникновения отказов, в кратчайший срок локализовать место повреждения и обеспечить восстановление работоспособности сети доступа. Последнее обеспечивает поддержание необходимого уровня показателей качества функционирования сети и качества предоставления услуг пользователям. Исходя из сказанного,

можно выделить два этапа проведения тестирования: этап предварительных испытаний, а также этап строительства и эксплуатации.

Тестирование оборудования платформ доступа PON на этапе предварительных испытаний включает следующие основные группы тестов:

- тесты физического уровня;
- тесты функциональных возможностей;
- функциональные тесты предоставления услуг;
- функциональные тесты системы управления;
- тесты производительности;
- тесты надежности;
- тесты качества функционирования в режимах передачи различных видов трафика;

Методология тестирования оборудования платформ доступа и линейно-кабельной инфраструктуры СД на основе xPON технологий. Предложенные в данной публикации практические рекомендации позволили обеспечить надежность, контроль и диагностику функционирования сетей доступа, использующих технологии PON, интенсивно внедряемые в настоящее время в крупных операторских структурах.

1.6 Постановка задачи

Целью магистерской диссертации является исследование методов и разработка модели для анализа широкополосных оптических сетей доступа на базе GPON.

Для достижения поставленной цели следует выполнить следующие задачи:

- 1) анализ современного состояния широкополосных оптических сетей доступа;
- 2) анализ методов расчета и моделей широкополосных сетей доступа на базе GPON;
- 3) аналитическое моделирование широкополосных сетей как системы массового обслуживания;
- 4) разработка имитационной модели оптической сети в системе GPSS World;

5) исследование на имитационной модели эффективности работы сети.

1.7 Выводы главе 1

В первой главе проведен анализ современного состояния оптоволоконных технологии широкополосных сетей доступа. Рассмотрены вопросы особенностей построения оптических сетей доступа нового поколения. Сделан сравнительный анализ технологий PON. Исследованы методы модернизации сетей доступа на основе внедрения технологий пассивных оптических сетей.

2. Аналитическое моделирование на основе методов теории массового обслуживания

2.1 Оценка показателей качества широкополосных сетей доступа

Важным требованием, предъявляемым к рассматриваемой пакетной сетевой инфраструктуре, является обеспечение гарантированного качества предоставления пользователям всего заявленного пакета услуг. Иными словами, пользователи не должны ощущать дискомфорта при восприятии потребляемых ими сетевых услуг.

При этом факторы, оказывающие влияние на качество предоставления услуг можно разделить на две взаимосвязанные группы.

К первой группе относятся факторы, связанные с функционированием терминального оборудования, особенностями применяемых кодеков, процессами пакетизации - депакетизации, вероятностно-временными характеристиками аппаратно-программных средств плоскости услуг и другими, не связанными непосредственно с процессами передачи кадров через сеть.

Ко второй группе факторов можно отнести процессы передачи кадров (пакетов) через все уровни сетевой инфраструктуры, рассмотренные в разделе 1.2 настоящей работы. При этом факторы второй группы оказывают влияние на факторы первой группы и наоборот - факторы первой группы влияют на факторы второй группы. Так, для наиболее чувствительного к факторам второй группы речевого трафика (VoIP), методики оценки факторов первой группы приведены в рекомендациях МСЭ-Т Р.800 (субъективные оценки) [10] и G.107 (объективные оценки) [11]. В основу оценки качества передачи речи, предложенной в [11] положена, так называемая, E-модель. Результатом вычисления в соответствии с E-моделью является число, называемое R-фактором («коэффициентом рейтинга»), определяемое в диапазоне от 0 до 100,

где 100 соответствует самому высокому уровню качества. Подходы к анализу качества передачи речевого трафика рассмотрены во многих публикациях, в том числе в [12]. Европейскими органами стандартизации предложен проект TIPHON (Telecommunications and Internet Protocol Harmonization over Network) - телекоммуникации и гармонизация интернет-протокола в сетях [13], предусматривающий 6 классов качества передачи речевого трафика в IP-сетях. Объектом исследования настоящей работы являются, прежде всего, факторы второй группы, определяющие характеристики качества функционирования сети. Как было отмечено выше, эти факторы находятся под влиянием факторов первой группы, т.к. именно они определяют интенсивность и характер трафиковых потоков передаваемых через исследуемые СД.

В соответствии с рекомендацией МСЭ-Т Y.1541 выделяются следующие основные характеристики, оказывающие влияние на качество обслуживания в IP-ориентированной пакетной сети:

- среднее время задержки передачи пакетов (кадров) или средняя задержка IPTO- u_c ;

- вариация (джиттер) задержки передачи пакетов (кадров) - IPDV;
- коэффициент потерь пакетов (вероятность потери кадра) IPLR - P_{nc} ;
- коэффициент ошибок при передаче пакета IPER - P_{kc} .

Ниже приводятся значения и выражения для оценки данных показателей качества сети в целом с учетом гипотетических путей следования кадров. Среднее время задержки передачи пакетов (в рассматриваемом случае - кадров Ethernet) или, используя краткий термин, - средняя задержка, может быть определена как среднее значение интервала времени, отсчитанного от начала передачи кадра в сеть до окончания его приема из сети. Сетевая задержка является суммой ряда компонент, обусловленных физикой передачи пакетов через узлы и каналы сети, к которым относятся:

- задержка передачи - $u_{ПЕР}$;
- задержка обработки пакетов в узлах - $u_{ОБР}$;
- задержка ожидания в очередях - w ;
- задержка распространения - t_p .

Задержка передачи вычисляется по формуле:

$$u_{ПЕР} = \frac{8n_k}{V_k} \quad (2.1)$$

где n_k - длина кадра в байтах; V_k - битовая скорость передачи в дискретном канале.

Из всех перечисленных компонент можно выделить две основных составляющих задержки. Это задержка в узлах сети $u_{вз} = u_{ПЕР} + u_{ОБР} + w$ и задержка распространения t_p , которая зависит от протяженности линий связи. Для одномодовых ВОК задержка распространения на 1 км оптического кабеля может быть вычислена на основе выражения $\tau_{OPT} = \frac{1}{V_{\Phi}}$, где $V_{\Phi} \approx \frac{c}{n_c}$ - фазовая

скорость в волокнах кабеля; C -скорость света в вакууме; η_c – показатель преломления сердцевины световода в оптоволоконном кабеле [14] Для применяемых типов кабелей $\eta_c=1,5$ и $\tau_{\text{РОПТ}} \approx 5 \text{ мкс/км}$

Для электрических кабелей задержка распространения также составляет $T_{\text{рз}}=5 \text{ мкс/км}$. Поэтому в оценочных расчетах будем ориентироваться на данное значение задержки распространения на единицу длины $\tau_p=5 \text{ мкс/км}$ для всех видов физической среды.

В соответствии с Рекомендации МСЭ-Т Y.154I для оценочного расчета суммарной сетевой задержки в гипотетическом пути, проходящем через N_c сетевых сегментов (или уровней концептуальной модели МС), можно применить следующее выражение:

$$u_c = \tau_p L + \sum_{k=1}^{N_c} u_k \quad (2.2)$$

где, L - суммарная протяженность всех линий в гипотетическом пути на всех сетевых уровнях; u_k - средняя задержка в узлах на k -м сегменте (уровне).

Потери заявок в узлах сети могут быть вызваны переполнением буферов (накопителей) в сетевых устройствах при перегрузках, ошибочной маршрутизацией, а также рядом других причин.

Коэффициент потерь в сети, состоящей из N_e последовательных сегментов, определяется из выражения:

$$P_{\text{ПС}} = 1 - \prod_{k=1}^{N_c} (1 - P_{\text{ПС}k}) \quad (2.3)$$

где, $P_{\text{ПС}k}$ - коэффициент потерь в k -том сегменте (подуровне). Аналогично определяется и коэффициент ошибок:

$$P_{\text{КС}} = 1 - \prod_{k=1}^{N_c} (1 - P_{\text{КС}k}) \quad (2.4)$$

где, $P_{\text{КС}k}$ - вероятность ошибки при передаче кадра в k -том сегменте (подуровне).

Последующие разделы работы посвящены поиску систем соотношений для определения первых трех из четырех рассмотренных показателей качества обслуживания. Следует отметить, что построение моделей для нахождения $P_{\text{КС}}$ является предметом отдельных исследований и не рассматривается в настоящей работе. С учетом того, что рассматриваемые МС строятся на основе высококачественных оптических каналов, вероятности ошибок при передаче кадров в таких сетях, чаще всего, не оказывают существенного влияния на качество обслуживания. Наибольшую сложность вызывает определение вариации (джиттера) задержки TPDV . В [15], приводится следующее рекомендуемое выражение для определения этой характеристики:

$$\text{IPDV} = \text{IPTD}_{\text{upper}} - \text{IPTD}_{\text{min}} \quad (2.5)$$

где, $IPTD_{upper}$ - квантиль 0,999 функции распределения (ФР) задержки на исследуемом участке сети,

$IPTD_{min}$ - минимальное значение указанной ФР.

Также отмечается, что при оценочных расчетах можно использовать следующее выражение:

$$IPDV = IPTD_{max} - IPTD_{min}$$

где, $IPTD_{max}$ - максимальное значение задержки, зарегистрированное за интервал времени наблюдения.

Таким образом, для анализа IPDV необходимо иметь представление о законе распределения времени задержки в каждом из рассматриваемых сегментов сети. В [15, 16] приводится метод определения IPDV с помощью выражений, использующих численные характеристики задержки, полученные в [16]. В отличие от характеристики IPTD и показателя потерь IPRL, показатель IPDV не допускает суммирования его значений на участке, состоящем из нескольких сетевых секций (фаз обслуживания) [16].

В настоящей работе для определения этой характеристики будем использовать метод имитационного моделирования. Квантиль 0,999 ФР и ее минимальное значение будем определять по отчетам GPSS World. При использовании аналитических методов, в оценочных расчетах будем использовать приближенные оценки IPDV на основе анализа среднеквадратического отклонения(с.к.о.) задержки - a_c , используя метод, приведенный в [16]. При анализе сети, состоящей из N_c сегментов, будем определять $\langle u_{\cdot c} \rangle$ из известного выражения [16]: $\sigma_{N_c}^2 = \sum_{k=1}^{N_c} \sigma_1^2$ (2.5a).

При оценке и прогнозировании показателя IPDV, величину 0,999 - квантиля можно приближенно определить из следующего выражения:

$$IPTD_{upper} = u_i + c_{xi} \sigma_{ul} \quad (2.6)$$

где u_i - средняя задержка в i - той фазе, σ_{ul} - среднеквадратическое отклонение (с.к.о.) задержки в i - той фазе, c_{xi} - коэффициент, связанный с типом и параметрами распределения задержки. Значения коэффициента c_{xi} , вычисленные по формуле: $c_{xi} = (x_{0,999} - M) / \sigma$ где $x_{0,999}$ - 0,999 квантиль ФР, M - мат. ожидание, σ - с.к.о. для некоторых типов распределений и значений их параметров, найденных на основании выражений, приведенных в [17], показаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1-Значение параметров некоторых распределении

Вид распределения	Значения параметров	Значения коэффициента вариации v_t	Значения коэффициента c ,

Экспоненциальное	-	1	5,90
Парето	$k=10;\alpha=2,01$	7,14	2,23
	$k=10;\alpha=2,1$	2,22	6,22
	$k=10;\alpha=2,5$	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

Графическая интерпретация определения 0,999 квантиля $IPTD_{upper}$ интервала задержки $F(t)$, приведена на рис. 2.1.

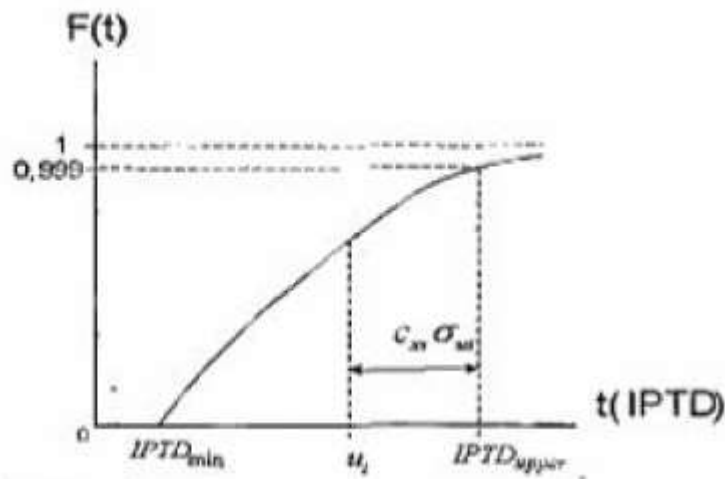


Рис. 2.1 Графическая интерпретация определения квантиля функции распределения интервала задержки

Значение $IPTD_{min}$ определяется из выражения:

$$IPTD_{min} = u_{нерmin} + u_{обrmin} + t_{pij} \quad (2.7)$$

где, $u_{нерmin}$ - минимальное время передачи кадра, $u_{нерmin} = \frac{8n_{min}}{V_{max}}$, n_{min} - минимальная длина кадра, выраженная в байтах, V_{max} - максимальная скорость передачи, t_{pij} - задержка распространения сигнала на рассматриваемом участке сети, между узлами i и j .

В таблице 2.2. показана основная классификация IP-ориентированных сетей по численным значениям характеристик качества обслуживания (QoS). Нулевой и первый основные классы соответствуют требованиям сетей

операторского класса при передаче VoIP и видеоконференций. Второй класс рекомендуется для передачи данных сетевой сигнализации. Третий — для интерактивных транзакций передачи данных. Четвертый - для передачи видеопотоков при условии низких потерь. Пятый - для традиционных приложений IP-сетей (доступ в Интернет).

Подробное описание сетевых механизмов управления трафиком, направленных на обеспечение требуемого качества обслуживания в сети Интернет приводится в [18].

Классификация сетей по характеристикам QoS приводится в таблице 2.2.

Таблица 2.2- Классификация сетей по характеристикам QoS

Сетевые характеристики	Определение и характеристик	Классы QoS					
		Класс 0	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5
IPD	Верхняя граница средней	100 мс	400 мс	100 мс	400 мс	1с	* н.о.
IPDV	Верхняя граница разности 0,999 квантиля IPD и минимального значения	50 мс	50 мс	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
IPLR	Верхняя граница вероятност и потерн пакетов	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	н.о.
IPER	Верхняя граница вероятности ошибки	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	н.о.
* н.о. - не определено							

2.2 Математические модели входных потоков

В качестве основной методологии исследования в настоящей работе выбрано математическое моделирование процессов в СД на основе методов теории массового обслуживания. При задании систем и сетей массового обслуживания (СМО и СеМО) важной задачей является задание и описание входных потоков заявок [19].

В качестве заявок при исследовании моделей сегментов оптических СД будем рассматривать начала кадров Ethernet, поступающих в сеть. Интервалы времени между поступлением следующих друг за другом (соседних) заявок создают случайный входной поток. Для описания входного потока будем использовать распределение интервалов между поступлением соседних заявок. При математическом описании потоков часто вводится их классификация на основе априорных свойств. К таким свойствам относятся [19] следующие:

1. Стационарность-независимость вероятностных характеристик от времени.

2. Последствие — вероятность поступления событий в интервале (t_1, t_2) зависит от события, наступивших ранее f_1 .

3. Ординарность - вероятность поступления двух и более событий за бесконечно малый интервал времени Δt есть величина более высокого порядка малости, чем Δt .

4. Рекуррентность - свойство потока с ограниченным последствием, определяющее одинаковое распределение интервалов между поступлением соседних заявок, начиная с первой заявки.

Рекуррентные потоки полностью задаются законом распределения интервала τ между поступлением соседних заявок (интервала во входном потоке). Величина этого распределения показательная (экспоненциальная), то

$$A_{(\tau)} = 1 - e^{-\lambda\tau} \quad (2.8)$$

где, $A_{(\tau)}$ - ФР интервала τ , λ - интенсивность потока, $\lambda > 0$.

Интенсивностью потока, как и в [19] будем называть среднее значение числа заявок, поступающих в поток за единицу времени. Средний интервал t_{np} между двумя следующими друг за другом заявками для показательного распределения определяется простым соотношением:

$$t_{np} = 1 / \lambda \quad (2.9)$$

Для показательного распределения справедливы [17] равенства:

$$\sigma_{np} = t_{np}$$

$$v_{np} = \sigma_{np} / t_{np} = 1$$

где, σ_{ur} – с.к.о. показательного распределения, ν_{np} — его коэффициент вариации.

По классификации Кендалла-Башарина будем обозначать такой поток при обозначении СМО буквой М (Markovian). Если распределению $A(\tau)$ вырожденное ($\tau = const$), ТО такой поток будем обозначать буквой D (Degenerate distribution - вырожденное распределение). Если распределение гипер-экспоненциальное, т.е.

$$l_{(r)} = \sum_{\lambda=1}^n q_k (1 - e^{-\lambda r}), \quad (2.10)$$

где, $\lambda_k \geq 0$, $q_k \geq 0$, $k = 1, \dots, n$, $\sum_{l=1}^n q_l = 1$, то в обозначениях Кендалла-Башарииа первый символ обозначения такой СМО принимает значение Н. Для обозначения неопределенных потоков обычно используется буква G (General), указывающая на распределение общего вида (произвольное) Стационарный ординарный поток без последействия называется простейшим. Простейший поток часто называют пуассоновским, поскольку число заявок, поступающих за некоторый заданный промежуток времени t , распределено по закону Пуассона:

$$P(k, t) = \frac{\lambda t^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad (2.11)$$

где, $P(k, t)$ - вероятность поступления k заявок за некоторый фиксированный интервал времени t ($k = 0, 1, 2, \dots; t > 0$). Этот вид потока занимает центральное место в теории массового обслуживания.

Аналитические исследования моделей массового обслуживания часто проводятся в предположении о простейшем потоке заявок, что обусловлено рядом присущих ему замечательных особенностей.

1.Суммирование (объединение) потоков. Сумма U независимых стационарных ординарных потоков с интенсивностями $\lambda_1 \dots \lambda_u$ образует простейший поток с интенсивностью:

$$\Lambda = \sum_{l=1}^u \lambda_k \quad (2.12)$$

При условии, что складываемые потоки оказывают незначительное влияние на суммарный поток. На практике [20] суммарный поток близок к простейшему при $U > 5$. Очевидно, что при суммировании независимых простейших потоков суммарный поток будет простейшим при любом значении U .

2. Вероятностное разрежение простейшего потока заявок, при котором любая заявка случайным образом с некоторой вероятностью p исключается из потока, независимо от того, исключены другие заявки или нет. приводит к образованию простейшего потока с интенсивностью $\lambda' = p\lambda$. где λ -

интенсивность исходного потока. Поток исключенных заявок - также простейший с интенсивностью $\lambda' = (1-p)\lambda$.

Предположение о простейшем потоке заявок позволяет для многих математических моделей сравнительно легко получить в явном виде зависимости характеристик от параметров. Наибольшее число строгих (точных) аналитических результатов получено для простейшего потока заявок. Анализ моделей с потоками заявок, отличными от простейших, обычно усложняет математические выкладки и не всегда позволяет получить аналитическое решение в явном виде. Свое название «простейший» поток получил именно благодаря этой особенности.

В данной работе при построении большинства моделей массового обслуживания будем использовать этот вид потока. При моделировании синхронных СД, в которых поступление заявок происходит в детерминированные дискретные моменты времени, задаваемые тактовой системой, т.е. на некотором постоянном интервале окна передачи $T_{ок}$ будем использовать дискретный пуассоновский поток, также называемый биномиальным или потоком Бернулли. Такой поток задается параметром q_u - вероятностью появления заявки на интервале $T_{ок}$. Для такого потока справедливы соотношения:

$$q_u = \lambda * T_{ок} \quad (2.13)$$

$$T_{ок} = n_{ок} * V_c^{-1} \quad (2.14)$$

где, V_c - битовая скорость передачи в физической среде,

$n_{ок}$ - длина окна передачи.

При моделировании графика большого числа современных сетевых приложений МС приходится сталкиваться с потоками, отличными от простейшего. Это прежде всего обусловлено пульсирующим характером трафика многих приложений, порождающих трафик с переменной битовой скоростью передачи (ПБС).

Важной характеристикой таких потоков является коэффициент пачечности определяемый отношением пиковой скорости к средней скорости передачи:

$$K_{п} = \frac{B_{max}}{B} \quad (2.15)$$

где, $K_{п}$ - коэффициент пачечности, B_{max} - максимальная пиковая скорость передачи, B - средняя скорость передачи.

При $K_{п} > 1$ интенсивность потока принимает пульсирующий характер, а временная функция интенсивности потока приобретает свойство, характеризующее сходством части такой функции взятой в расширенном временном масштабе и продолжительных ее участков, взятых в сжатом

масштабе времени. Это свойство названо в современной литературе свойством самоподобия или фрактальности [19]. Впервые это свойство было выявлено в 1993 году группой исследователей трафика корпоративных сетей Ethernet. В [21] дается такое определение данного свойства: «три источника и три составные части теории самоподобных процессов» выражены в медленном убывании дисперсии, долгосрочной зависимости и флуктуационном характере спектра мощности. Важнейшей характеристикой таких потоков является параметр изменчивости или параметр Херста H_x определяемый [19] из выражения:

$$H_x \approx \frac{\log(N/2)}{\log \frac{R_N}{S}}, \quad 0,5 < H_x < 1, \quad (2.16)$$

где, $R_N = \max_{t < j < N} D_t - \min_{t < j < N} D_t$, D_t - интегральное отклонение, $D_t = \sum_{\lambda=1}^t x_\lambda - M_{kj}$, M - математическое ожидание исследуемого выборочного случайного набора, $X_l (j = 1, \dots, N)$, $M_M = 1/N \sum_{k=1}^N X_k$, а выборочная дисперсия этого набора $2_N^2 = 1/N \sum_{k=1}^N (X_k - M)^2$.

Для процессов, не обладающих свойством самоподобия $H_x = 0,5$. Для самоподобных процессов $0,7 < H_x < 0,9$. Простым примером самоподобного процесса является фрактальный гауссовский шум [19].

Потоки, обладающие свойством самоподобия, описываются распределениями с медленно убывающей дисперсией, часто называемыми распределениями с «тяжелым хвостом» (РТХ).

Типы таких распределений, часто используемых при описании потоков различных приложений МС. Важное место среди данных распределений занимают распределения Парето. Для моделирования трафика в настоящей работе используются два вида распределения Парето: классическое и трехпараметрическое. Для классического (двухпараметрического) распределения Парето справедливы [13, 19, 6] соотношения:

$$W_{(k)} = \frac{ak^u}{x^{a-1}} a > 2, k > 0, x > 0, \quad (2.17)$$

где, $W_{(k)}$ - плотность распределения времени (ПРИ) между поступлением соседних заявок, a - параметр формы, k - нижняя граница.

$$M_u = \frac{ak}{a-1} \quad (2.18)$$

где, M_n - математическое ожидание интервала во входном потоке;

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{ak^2}{(\alpha-1)^2(\alpha-2)}}, \quad (2.19)$$

где, σ_u - с.к.о. интервала;

$$v_{\eta}^2 = \frac{1}{\sigma(\sigma-2)}, \quad (2.20)$$

где, v_{η} - коэффициент вариации этого интервала.

Интерес к рассмотренному выше распределению связан с тем, что устремляя α к значению 2 можно получить сколь угодно большие значения дисперсии и коэффициента вариации интервала во входном потоке. Также в разделе 3 настоящей работы используется трехпараметрическое [22] распределение Парето, для которого справедливы соотношения:

$$M_{\text{ПЗ}} = \frac{\alpha(Lk^{\alpha} - L^{\alpha}k)}{(1-\alpha)(L^{\alpha} - k^{\alpha})}, \quad 1 < \alpha < 2 \quad (2.21)$$

где, $M_{\text{ПЗ}}$ — математическое ожидание интервала во входном потоке для трехпараметрического распределения Парето, L - верхняя граница распределения,

$$\sigma_{\text{ПЗ}}^2 = \frac{\alpha}{L^{\alpha} - k^{\alpha}} \left[\frac{L^2 k^{\alpha} - L^{\alpha} k^2}{(2-\alpha)} - \frac{\alpha(Lk^{\alpha} - L^{\alpha}k)^2}{(1-\alpha)^2 (L^{\alpha} - k^{\alpha})} \right], \quad (2.22)$$

где $\sigma_{\text{ПЗ}}$ - с.к.о. интервала во входном потоке,

$$v_{\text{ПЗ}}^2 = A \left(B - \frac{1}{A} \right), \quad (2.23)$$

где,

$$A = \frac{(1-\alpha)^2 (L^{\alpha} - k^{\alpha})}{\alpha(Lk^{\alpha} - L^{\alpha}k)^2},$$

$$B = \frac{L^2 k^{\alpha} - L^{\alpha} k^2}{(2-\alpha)}$$

$v_{\text{ПЗ}}^2$ - коэффициент вариации интервала во входном потоке.

Интерес к данному распределению вызван тем, что с его помощью можно задавать максимальное значение случайной величины не меняя при этом хвоста распределения [22], например, задавая минимальное и максимальное значение интервала между поступлением заявок. В литературе [6] приводится выражение, связывающее параметр формы « и показатель Херста H_x :

$$H_x = \frac{3-\alpha}{2} \quad (2.24)$$

Показатель H_x определяется для каждого вида трафика на основе статистических свойств, с использованием методов, изложенных в [6].

Анализ современных литературных источников показывает, что аппроксимация нестационарных потоков с последствием самоподобными процессами с РТХ является далеко не единственным подходом к моделированию таких потоков. Например, для математического описания трафика NGN используется D-BMAP (Discrete Batch Markovian Arrival Process - дискретный пачечный Марковский процесс). В описание нестационарных потоков осуществляется с использованием аппроксимации произвольной ФР интервала во входном потоке ступенчатой функцией. Кроме этого описание трафика в сетях АТМ используются методы сплайн-интерполяции битового трафика. Некоторые исследователи [23] считают, что в ряде случаев, при исследовании современных пакетных сетей, самоподобие трафика не оказывает существенного влияния на характеристики QoS и полагают вполне допустимым использование для их исследования классической теории массового обслуживания, оперирующей предположением о простейшем входном потоке. Учитывая данные замечания, в настоящей работе будем использовать для моделирования входных потоков, как простейший поток, так и потоки, задаваемые РТХ (распределениями Парето, гиперэкспоненциальным и другими).

2.3 Системы массового обслуживания

Одной из основных причин деградации качества обслуживания в МС, в частности, в исследуемой СД, является задержка пакетов (кадров) в очередях, в буферах сетевых устройств. Поэтому, в качестве основной базовой модели для исследования СД в настоящей работе выбрана модель на основе системы массового обслуживания (СМО). Согласно [24] будем полагать, что СМО является заданной, если полностью описаны следующие ее компоненты:

- входящий поток заявок (запросов, требований, транзактов);
- количество и типы обслуживающих приборов;
- емкости накопителей;
- времена обслуживания заявок в приборах;
- дисциплина обслуживания, определяющая порядок обработки заявок в очереди.

В качестве основных характеристик СМО с однородным потоком заявок используются следующие величины: -нагрузка системы: суммарная интенсивность поступления заявок в систему (интенсивность суммарного потока):

$$\Lambda = \sum_{i=1}^H \lambda_i \quad (2.30)$$

-суммарная нагрузка системы $Y = \sum_{i=1}^H y_i$, и суммарная загрузка системы $R = \sum_{i=1}^H \rho_i$

-среднее время ожидания $W = \sum_{i=1}^H \pi_i w_i$ и среднее время пребывания $U = \sum_{i=1}^H \pi_i u_i$ заявок объединенного потока в системе, где $\pi_i = \lambda_i / \Lambda$ коэффициент, учитывающий долю заявок класса i в суммарном потоке, который может трактоваться как вероятность того, что поступившая в систему заявка принадлежит классу i ;

-суммарная длина очереди $L = \sum_{i=1}^H l_i$, и суммарное число заявок в системе $M = \sum_{i=1}^H m_i$.

Можно показать, [105] что для характеристик объединенного потока справедливы те же фундаментальные соотношения, что и для однородного потока: $U = W + B$; $L = \Lambda W$; $M = \Lambda U$, где B - среднее время обслуживания заявки объединенного потока:

$$B = \sum_{i=1}^H \pi_i b_i \quad (2.31)$$

Приведем наиболее важные расчетные соотношения для определения характеристик наиболее широко используемых классов, которые используются в последующих разделах для анализа разрабатываемых моделей.

СМО М/М/1 с однородным потоком заявок:

-функция и плотность распределения времени пребывания заявок в системе:

$$U(\tau) = 1 - e^{-\mu(1-\rho)\tau} \quad (2.32)$$

$$u(\tau) = \mu(1-\rho)e^{-\mu(1-\rho)\tau} \quad (2.33)$$

- среднее время ожидания заявок в очереди:

$$w = \rho b / (1 - \rho) \quad (2.34)$$

-среднее время пребывания заявок в системе, складывающееся из времени ожидания w и времени обслуживания b :

$$u = w + b = b / (1 - \rho) \quad (2.35)$$

-средняя длина очереди заявок:

$$l = \lambda w = \rho^2 / (1 - \rho) \quad (2.36)$$

-среднее число заявок в системе (в очереди и на обслуживании):

$$m = \lambda u = \rho / (1 - \rho) \quad (2.37)$$

СМО M/G/1 с однородным потоком заявок и длительностью обслуживания распределенной по произвольному закону со средним значением b , интенсивностью μ и коэффициентом вариации v :

-длина очереди заявок: $l = \lambda w$

-время ожидания заявок в очереди:

$$w = 0,5 \lambda b^2 (1 + v_b^2) / (1 - \rho) \quad (2.38)$$

Для одинаковых канальных СМО с неоднородным потоком заявок [105] характеристики обслуживания вычисляются как для каждого i -го класса заявок ($i=1, H$), так и для заявок суммарного (объединенного) потока. В качестве основной характеристики СМО с неоднородным потоком заявок будем использовать среднее время ожидания заявок заданных классов, которое зависит от используемой дисциплины обслуживания.

Для беспрорангетной дисциплины обслуживания средние времена ожидания одинаковы для всех классов заявок и определяются по следующей формуле:

$$w_k^{ПБ} = w^{ПБ} = \frac{\sum_{i=1}^H \lambda_i b_i^2 (1 + v_{iБ}^2)}{2(1-R)} \quad (k=1, K, H) \quad (2.39)$$

где, $R = \sum_{i=1}^H \rho_i = \sum_{i=1}^H \lambda_i b_i$ – суммарная загрузки системы.

Выражение для $w_k^{ПБ}$ получено [25] в предположении, что в системе существует стационарный режим и отсутствует перегрузка, т.е. $R < 1$.

Пусть в систему поступает H классов заявок, образующих простейшие потоки с интенсивностями $\lambda_1, \dots, \lambda_H$. Длительность τ_{br} обслуживания заявок

класса $k=1, H$ распределена по произвольному закону с плотностью распределения вероятностей $L^*(t)$. Выбор заявки из очереди на обслуживание осуществляется в соответствии с дисциплиной обслуживания с относительными приоритетами, назначенными по правилу «чем меньше номер класса, тем выше приоритет».

Для описания функционирования системы используются следующие характеристики обслуживания заявок класса ($k = 1, H$):

время ожидания τ_{wk}

- время пребывания в системе τ_{uk} определяемое как

$$\tau_{uk} = \tau_{wk} + \tau_{bk} \quad (2.40)$$

Ниже при записи выражений для определения характеристик обслуживания заявок используются следующие обозначения (f_k - один из символов: b_k, w_k, u_k):

1. $f_k^{(n)}$ - начальный момент порядка n случайной величины τ_{fk} , причем для простоты при записи первого начального момента (математического ожидания) верхний индекс будем опускать: $f_k = f_k^{(1)}$

2. R - суммарная загрузка системы (см. выражение 2.37), где $p_i = \lambda_i b_i$ загрузка, создаваемая i -заявками, причем предполагается, что система работает без перегрузок $R < 1$.

3. $\Lambda_k = \sum_{l=1}^k \lambda_l$ - частичные суммарные интенсивности потоков заявок.

4. $R_k = \sum_{l=1}^k \rho_l$ - частичные суммарные загрузки.

В [138] показано, что математическое ожидание u_k и второй начальный момент $u_k^{(2)}$ времени пребывания в системе k - заявок ($k=1, H$) равны:

$$u_k = w_k + b_k; \quad u_k^{(2)} = w_k^{(2)} + 2w_k b_k + b_k^{(2)} \quad (2.41)$$

Значения $w_k, w_k^{(2)}$ определяются следующим образом:

$$w_k = \frac{\sum_{i=1}^H \lambda_i b_i^{(1)}}{2(1-R_{k-1})(1-R_k)} \quad (2.42)$$

$$b_i^{(2)} = b_i^2 (1 + v_{bi}^2), \quad (2.43)$$

где, b_i - среднее время обслуживания заявок i -го класса; v_{bi} - коэффициент вариации времени обслуживания заявок i -го класса.

$$w_k^{(2)} = \frac{\sum_{i=1}^H \lambda_i b_i^{(3)}}{3(1-R_{k-1})^2(1-R_k)} + \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i b_i^{(2)}}{2(1-R_{k-1})^2(1-R_k)^2} + \frac{\sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i b_i^{(2)}}{2(1-R_{k-1})^3(1-R_k)}, \quad (2.44)$$

где $b_l^{(n)}$ - n -й начальный момент длительности обслуживания l -заявок ($k=1, H$; $n=1, 2, \dots$).

На основе этих выражений могут быть вычислены дисперсии и коэффициенты вариации соответствующих временных характеристик [25].

В случае трех классов заявок ($H=3$) вторые начальные моменты будут определяться как

$$w_1^{(2)} = \frac{s_3}{3(1-\rho_1)} + \frac{\lambda_1 b_1^{(2)} s_2}{2(1-\rho_1)^2(1-\rho_1-\rho_2)^2}, \quad (2.45)$$

$$w_2^{(2)} = \frac{s_3}{3(1-\rho_1)^2(1-\rho_1-\rho_2)} + \frac{(\lambda_1 b_1^{(2)}) s_2}{2(1-\rho_1)^2(1-\rho_1-\rho_2)^2} + \frac{\lambda_1 b_1^{(2)} s_2}{2(1-\rho_1)^3(1-\rho_1-\rho_2)^2} \quad (2.46)$$

$$\frac{(\lambda_1 b_1^{(2)} + \lambda_2 b_2^{(2)}) S_2}{2(1 - \rho_1 - \rho_2)^3 (1 - R)},$$

где $S_3 = \sum_{i=1}^3 \lambda_i b_i^{(3)}$; $S_2 = \sum_{i=1}^3 \lambda_i b_i^{(2)}$.

Все приведенные выше результаты относятся к расчету средней задержки в различных видах СМО. Однако, учитывая цели исследования данной работы, а также содержание раздела 2.1, представляет практический интерес нахождение выражений для определения вариации (джиттера) задержки и вероятности потери кадров при их обслуживании в узлах сети. С этой целью, будем искать среднеквадратическое отклонение времени задержки. Среднеквадратическое отклонение времени задержки для заявок с относительными приоритетами класса k ($k = 1, H$):

$$\sigma_{u\lambda} = \sqrt{u_k^{(2)} - u_k^2}; \quad (2.47)$$

Для системы M/G/1 с однородным потоком заявок с.к.о. времени задержки равно:

$$\sigma_{u\lambda} = \sqrt{w^{(2)} - u_k^2}; \quad (2.48)$$

где w и $w^{(2)}$ - среднее значение и второй начальный момент времени ожидания; D_h - дисперсия времени обслуживания.

Для СМО M/G/1 с однородным потоком заявок w и $w^{(2)}$ рассчитываются по формулам:

$$w = \frac{\lambda b^2 (1 + v_b^2)}{2(1 - \rho)}, \quad (2.49)$$

$$w^{(2)} = \frac{\rho b^2}{(1 - \rho)} + \frac{2\rho^2 b^2}{(1 - \rho)^2}. \quad (2.50)$$

где $v_b = \frac{\sqrt{D_b}}{b}$ - коэффициент вариации длительности обслуживания.

Можно показать, что для СМО M/M/1 справедливо равенство $\sigma_u = u$, т.е. с.к.о. времени задержки численно равно ее среднему значению.

Расчет вероятности потери кадров будем производить следующим образом.

В случае, когда потери кадров обусловлены переполнением буферной памяти, вероятность потери в i -м узле равна:

$$P_{Hi} = \frac{\rho_i^{K_i} (1 - \rho_i)}{1 - \rho_i^{(K_i + 1)}}, \quad (2.51)$$

где, ρ_i - загрузка исследуемого узла; K_i - емкость буферного накопителя.

До сих пор мы полагали, что на рассматриваемую СМО действует простейший поток заявок. Вместе с тем, в предыдущем разделе указывалось, что при исследовании МС часто встречаются случаи, приводящие к входным потокам, отличным от простейших. Это относится и к потокам обслуживания. В настоящей работе для аналитического моделирования сегментов СД в предположении о воздействии на них потоков, в частности, задаваемых распределениями Парето, используется СМО общего вида G/G/1.

Для таких СМО отсутствуют точные математические выражения для нахождения основных характеристик.. Так, метод диффузионных приближений, позволяющий определить средние значения всех интересующих нас характеристик для СМО общего вида G/G/m. Как можно на основании уравнений Липдли найти верхние и нижние границы, на основе выражений полученных Маршаллом. Верхние и нижние оценки для средних значений характеристик системы G/G/1 получены Кифером и Вольфовицем

Анализ многочисленных литературных источников [25], а также многочисленные эксперименты с различными моделями, проведенные автором настоящей работы показали, что наиболее устойчивое поведение в широком диапазоне параметров и удовлетворительную точность обеспечивает приближение Кремера. Лангенбаха-Бельца [26], которое и используется в настоящей работе для анализа системы G/G/1.

В [26] приводится следующее приближенное выражение для определения средней задержки:

$$u_G \approx \frac{\rho b(v_a^2 + v_b^2)}{2(1-\rho)} f(v_a) + b_G; \quad (2.52)$$

где,

$$f(v_a) = \begin{cases} \exp\left[\frac{2(1-\rho)(1-v_a^2)}{3\rho(v_a^2+v_b^2)}\right], v_a < 1; \\ \exp\left[-(1-\rho)\frac{v_b^2-1}{v_a^2+4v_b^2}\right], v_a \geq 1; \end{cases}$$

Приближение для коэффициента вариации исходящего потока определяется [146] из выражения:

$$v_c \approx v_a + 2\rho v_b - 2\rho(1-\rho)\frac{u_G}{b} \quad (2.53)$$

где, v_a , - коэффициент вариации распределения интервала во входном потоке, v_b - коэффициент вариации интервала обслуживания.

Для определения с.к.о. интервала в выходном потоке можно использовать приближенное выражение:

$$v_c \approx \rho v_b^2 + (1 - \rho)v_b^2 \quad (2.54)$$

Дисперсию (с.к.о.) задержки u G/G/1 можно [147] определить так:

$$D_u = \sigma_u^2 = \frac{\lambda^2(\sigma_a^2 + \sigma_b^2)}{4(1-\rho)^2} + \sigma_b^2, \quad (2.55)$$

где σ_a - с.к.о. интервала во входном потоке, σ_b - с.к.о. интервал обслуживания, $\sigma = \sqrt{D} = v * M$.

Для СМО G/G/1/п/б, с ограниченной емкостью буфера n_b , вероятность переполнения буфера (потери заявки) определяется из выражения:

$$P_n = \frac{1-\rho}{1-\rho \frac{v_a^2+v_b^2}{v_a^2+v_b^2}^{\rho b+1}} \rho \frac{v_a^2+v_b^2}{v_a^2+v_b^2}^{\rho b} \quad (2.56)$$

До сих пор мы рассматривали СМО в предположении о том, что поступление заявок и переходы СМО из состояния в состояние, происходят в любые произвольные моменты времени, иными словами - рассмотрение СМО проводилось в непрерывном времени.

Вместе с тем, на практике, при моделировании синхронных сетевых структур, в которых все процессы протекают на детерминированном тактовом интервале, задаваемом устройством синхронизации, возникает необходимость рассмотрения такого режима СМО, при котором на СМО воздействует входной поток Бернулли с биномиальным распределением интервалов, а СМО переходит из состояния в состояние в детерминированные (тактированные) моменты времени. Для анализа таких СМО и их приложения к моделированию локальных сетей передачи данных О.С. Чугреевым был разработан специализированный математический аппарат, основанный на решении СМО с помощью описания последовательности ее состояний вложенной цепью Маркова в дискретном времени и z-преобразования.

В настоящей работе этот математический аппарат используется в качестве базовой модели в приложении к анализу синхронных сетевых структур, рассматриваемых в главе 4. Основу методологии анализа синхронных систем с применением этого математического аппарата будем рассматривать на примере анализа синхронной локальной сети передачи данных (ЛСПД).

Постановка задачи. Пусть имеется однородная ЛСПД, находящаяся в стационарном режиме, состоящая из L станций, подключенных к общему кольцевому каналу связи. Сообщения в виде пакетов поступают в бесконечные буферы станций, синхронно, на такте с интервалом $T_{ок}$. Потоки сообщений, поступающих в буферы различных станций являются статистически независимыми и описываются в дискретном времени z -преобразованием (2PP) ряда распределения вида:

$$f_{uj}(z) = \rho_{uj} + q_{uj}z^{-1}, \quad (2.57)$$

где, q_{uj} - вероятность поступления на такте T_{jt} в буфер j -ой станции пакета-заявки; ρ_{uj} - вероятность отсутствия заявки на такте,

$$\rho_{uj} + q_{uj} = 1 \quad (2.58)$$

Новые возникающие у абонента пакеты ставятся в очередь заявок требующих обслуживания. Каждый следующий в очереди пакет начинает обслуживаться только после успешной передачи предыдущего.

Дисциплина обслуживания пакетов FIFO.

Обслуживание заявок-пакетов зависит от состояния буферов станций, процессов, протекающих в канале ЛСПД, учитывает протоколы доступа и передачи пакетов.

Будем считать известным z -н.р.р. числа передач кадра до его успешной передачи $g_{jt}(z)$, учитывающее алгоритм защиты от ошибок, процесс блокировки приемного буфера, процесс фазирования УЦС, а также, что все рассматриваемые интервалы кратны $T_{ок}$.

Необходимо определить вероятностно-временные характеристики (ВВХ) ЛСПД : среднюю задержку передачи сообщения t_q , вероятность своевременной доставки λ , производительность коммуникационной системы абонента R_{aj} , и всей сети R , определяемые выражениями:

$$R_{aj} = \lambda_j k_j \Pi_j; \quad \lambda_j = q_{uj} / T_{ок}; \quad (2.59)$$

$$R_C = \sum_{j=1}^N R_{uj} \quad (2.60)$$

где λ_j - интенсивность входящего в устойчивую коммуникационную систему абонента (КСА) j -той станции потока сообщений; N - число станций в сети; Π_p - вероятность своевременной доставки сообщения. Интервал обслуживания τ_b , зависит от того, поступило ли сообщение в непустой буфер с вероятностью θ или в пустой буфер с вероятностью $\theta = 1 - \theta$. Будем считать известным z -н.р.р. времени обслуживания сообщения, поступившего в непустой буфер $g_{s\theta}(z)$ и в пустой буфер $g_{s0}(z)$. Тогда для системы $M^0IG^3I \setminus I^\infty$ можно записать выражение для z -н.р.р. длины очереди в [27] виде:

$$f_i(z) = \frac{f_i(0)(K_\theta(z) - zK_\theta(z))}{1 - zK_\theta(z)}, \quad (2.61)$$

где,

$$K_\theta(z) = g_{s\theta}(f_\theta^{-1}(z)), \quad (2.62)$$

$$K_\theta(z) = g_{s\theta}(f_\theta^{-1}(z)), \quad (2.63)$$

$f_i(0)$ - вероятность пустого буфера:

$$g(z) = \frac{1 - g_{s\theta}(z)}{g_{\theta}(1)(z-1)},$$

$$g'_{\theta}(1) = \left(\frac{d}{dz}\right) g_{s\theta}(z) \Big|_{z=1} \approx 1.$$

В этом случае z -н.р.р. дискретного времени n_q пребывания заявки в системе для процедуры «мерным пришел - первым обслуживается» имеет вид:

$$f_q(z) = \frac{f_i(0)((1-\rho_u z)g_{s\theta}(z) - q_u z g_{s\theta}(z))}{1 - \rho_u z - q_u z g_{s\theta}(z)} \quad (2.64)$$

Заметим, что величина $f_i(0)$ находится из условия $f(1) = 1$ Можно показать, что в (2.59) величина $f_i(0) = \theta$, $\theta = 1 - \theta$, θ - вероятность не пустого буфера определяется из соотношений:

$$\theta = q_u g_r(1). \quad (2.65)$$

$$g_r(1) = (d/dz^{-1}) g_x(z) \Big|_{z=1}, \quad (2.66)$$

$$g_s(z) = \theta g_{s\theta}(z) + (1-\theta) g_{s\theta}(z) \quad (2.67)$$

условие эргодичности состоит в выполнении неравенства:

$$\theta < 1 \quad (2.68)$$

или

$$f_c(0) < 1.$$

Если:

$$n_{s\theta} = n_{s\theta}, g_{s\theta}(z) = g_{s\theta}(z) = g_s(z) \quad (2.69)$$

тогда (2,59) примет вид:

$$f_i(z) = \frac{f_i(0) z K(z) (g_s(z) - 1)}{1 - z K(z)}, \quad (2.70)$$

$$K(z) = g_s(f_u^{-1}(z)). \quad (2.71)$$

Если $f_i(z)$ задается (2.56), то (2.69) примет известный вид:

$$f_u(z) = \frac{f_i(0) K(z) (1-z)}{1 - z K(z)}, \quad K(z) = g_1(z) / (p_H z + q_u) \quad (2.72)$$

При $f_u(z)$ заданном (2.56), аналогом (2.63) будет полученное в выражение:

$$f_u(z) = \frac{f_1(0)g_1(z)(1-z)}{1-p_u z - q_u z g_1(z)}. \quad (2.73)$$

Для случай группавых заявок:

$$\theta = q_{ii} s'(1) (d/dz^{-1}) g_s(z_0, \theta), \quad s'(1) = (d/dz^{-1}) s(z), \quad (2.74)$$

$$s(z) = \sum_{\gamma=1}^{\infty} S_{\gamma} Z^{-\gamma}, \quad \theta < 1, \quad (2.75)$$

где, γ - число пакетов в заявке S_{γ} - вероятность появления сообщений длиной γ пакетов.

Среднее значение времени задержки вычисляется [27] так:

$$t_q = \left(\frac{d}{dz^{-1}} \right) f_q(z) |_{z=1} \quad (2.76)$$

При вычисления на ЭВМ ряда распределения $f_q(n_q)$ удобно производить вычисление среднего значения i_q , через члены ряда по формуле:

$$t_q = T_{ok} \sum_{n_q=0}^{\infty} f_q(n_q) n_q. \quad (2.77)$$

Кроме этого часто бывает удобно вычислять i_q , через моменты распределения времени обслуживания n . Выражение для вычисления i_q , через моменты распределения времени обслуживания имеет вид :

$$t_q = T_{ok} \left[\frac{2g_{\theta}(1) + q_w(g_{\theta}(1) - g_{\theta}(1))}{2(1 - q_w(g_{\theta}(1) - g_{\theta}(1)))} + \frac{q_u g_{\theta}(1)}{2(1 - q_u g_{\theta}(1))} \right], \quad (2.78)$$

А в случае

$$n_{s\theta} = n_{x\theta}; \quad g_{s\theta}(z) = g_{s\theta}(z) = g_s(z), \quad (2.79)$$

(2.77) переписется в виде:

$$t_q = T_{ok} \left[g'(1) + \frac{q_u g(1)}{2(1-\theta)} \right], \quad (2.80)$$

где:

$$g'_{\theta}(1) = (d/dz^{-1}) g_{s\theta}(z) \quad z=1; \quad (2.80a)$$

$$g'_{\theta}(1) = (d^2/dz^{-1}) g_{s\theta}(z) \quad z=1; \quad (2.80b)$$

$$g'_{\theta}(1) = (d^3/dz^{-1})g_{s\theta}(z) \quad z=1; \quad (2.80в)$$

$$g'_{\theta}(1) = (d/dz^{-1})g_{s\theta}(z) \quad z=1; ; \quad (2.80г)$$

$$g''_{\theta}(1) = (d/dz^{-1})g_{s\theta}(z) \quad z=1; ; \quad (2.80д)$$

$$g'(1) = (d/dz^{-1})g_s(z) \quad z=1; ; \quad (2.80е)$$

$$g''(1) = (d/dz^{-1})g_s(z) \quad z=1; ; \quad (2.80ж)$$

Выразив (2.80г) через (2.80а) и (2.80б) после тождественных преобразований и раскрытия неопределенностей можно записать:

$$g'_{\theta}(1) = 1 + \frac{g'_{\theta}(1)}{2g_{\theta}(1)}, \quad (2.81)$$

Аналогично выразив (2.80д) через (2.80а) - (2.80в) будем иметь:

$$g'_{\theta}(1) = \frac{g'_{\theta}(1) + 2g''_{\theta}(1)}{g'_{\theta}(1)}. \quad (2.82)$$

Для нахождения вероятности своевременной доставки воспользуемся моделью стохастических ограничений, являющейся обобщением детерминированных и экспоненциально распределенных ограничений в непрерывном времени. Вероятность своевременной доставки ЛСПД с ограничениями на время доставки определяется из [27] выражения:

$$P_{\varphi} = 1 - C, \quad (2.83)$$

где C - вероятность потерь, определяется так:

$$C = \sum_{n=\varphi}^{\infty} f_{\varphi}(n_{\varphi}) \sum_{n_{\varphi}=0}^{n_{\varphi}-1} (n_{\varphi}) \quad (2.84)$$

Для случая, когда ограничивающий процесс задается распределением [27] вида:

$$f_{\varphi} = \sum_{j=1}^k f_j \alpha_j \beta_j^{n_{\varphi}-1}, \quad (2.85)$$

$$\beta_j = 1 - \alpha_j \sum_{j=1}^k p_j = 1, \quad (2.86)$$

вероятность своевременной доставки может быть найдена из [27] выражения:

$$P_j = \sum_{n=1}^{\infty} f_q(n_q) \sum_{j=1}^k \beta_j'' p_j = \sum_{j=1}^k p_j f_q(z) \quad z = \beta^{-1}, \quad (2.87)$$

где $f_4(z)$ - z-н.р.р. времени задержки, определяемое из (2.63). При $k=1$ функция (2.84) является дискретным аналогом экспоненциальной функции старения информации:

$$f_d(n_d)=\alpha\beta^{n_d-1} \quad (2.88)$$

Средний интервал ограничения [27] определяется из выражения;

$$T_{D=n_d} * T_d, \quad (2.89)$$

где n_d - математическое ожидание величины n_d определяется так :

$$n_d = \sum_{n_d=0}^{\infty} f_d(n_d)n_d \quad (2.90)$$

Для случая биномиального процесса старение будем иметь (2.90) в виде:

$$n_d = \frac{1}{P_d}, \quad (2.91)$$

где P_d - параметр биномиального процесса старения. В этом случае (2.88) примет вид:

$$T_d = \frac{T_{ок}}{1-Q_d}, \quad Q_d=1-P_d \quad (2.92)$$

а (2.87) переписется в виде:

$$P_{\varphi}=f_{\varphi}(z) \quad z=Q_d^{-1} \quad (2.93)$$

2.4 Сети массового обслуживания

Одним из вопросов, решаемых в настоящей работе, является исследование характеристик качества обслуживания при соединении сегментов СД через другие иерархические уровни модели МС, показанной на рис. 1.4, представляющие собой участки многосвязной сети, включающие некоторое число узлов.

При моделировании таких объектов возникает необходимость учета взаимодействия значительного числа СМО, отражающих процессы, протекающие в сетевых устройствах, расположенных во взаимодействующих друг с другом узлах сети, соединенных оптическими линиями связи. Наиболее

адекватным математическим аппаратом для анализа этой совокупности процессов представляется аппарат сетей массового обслуживания СеМО, который будет использован в разделе 3.3. настоящей работы.

В настоящей работе будут использованы линейные, разомкнутые, неоднородные экспоненциальные СеМО.

Для описания таких СеМО будем использовать следующую совокупность параметров:

- число узлов в сети: n ;
- число обслуживающих приборов в узлах сети: K_1, \dots, K_n ;
- матрица вероятностей передач: $P = [p_{ij}] \ i, j = 0, 1, \dots, n$,
- где p_{ij} -вероятность передачи заявки из узла i в узел j
- интенсивность λ_{pi} , источника заявок, поступающих в РСсМО, или число заявок M , циркулирующих в ЗСеМО;-средние длительности обслуживания заявок в узлах сети: b_1, \dots, b_n

В случае неэкспоненциальных разомкнутых СеМО дополнительно необходимо задать законы распределения или, но крайней мере, вторые моменты распределения интервалов времени между заявками, поступающими в разомкнутую сеть, и длительностей обслуживания заявок в узлах сети.

В случае неоднородных СеМО необходимо дополнительно задать количество классов заявок I в сети и для каждого класса - матрицы вероятностей передач $P(h)$, интенсивности $X_{hi}(k)$ или число заявок $M_{i}(k)$, а также средние длительности обслуживания заявок. Характеристики СеМО делятся на узловые, описывающие эффективность функционирования узлов и сетевые, описывающие функционирование СеМО в целом.

Состав узловых характеристик СеМО такой же, как и для СМО, рассмотренных в предыдущем разделе.

В состав сетевых характеристик входят:

- среднее число заявок, ожидающих обслуживания $L = \sum_{i=1}^n l_i$, где l_i - средняя длина очереди заявок в узле i и среднее число заявок, находящихся в

сети $M = \sum_{i=1}^n m_i$, где m_i - среднее число заявок в узле i , причем для замкнутых

сетей это выражение может быть использовано для проверки правильности проведенных расчетов, так как для них число заявок L в сети задано; -среднее время ожидания W пребывания заявок V в сети:

$$W = \sum_{i=1}^n \alpha_i w_i. \quad U = \sum_{i=1}^n \alpha_i u_i, \quad (2.94)$$

где w_i - среднее время ожидания заявок в узле i ; α_i - коэффициент передачи для узла i , показывающий среднее число попаданий заявки в узел i за время ее нахождения в сети; u_i - среднее время пребывания заявок в узле i ;

Коэффициенты передач в узлах СеМО определяются из системы линейных алгебраических уравнений [105]:

$$\lambda_j = \sum_{i=0}^n p_{ij} \lambda_i \quad (2.95)$$

где вероятности передач p_{ij} , ($i, j = 1, \dots, n$), задающие маршруты заявок в СеМО.

Отношение интенсивности потоков λ_j и λ_0 в виде $\alpha_j = \lambda_j / \lambda_0$ называется коэффициентом передачи и определяет среднее число попаданий заявки в узел / за время ее нахождения в сети, причем $\alpha_0 = 1$.

Для разомкнутой сети массового обслуживания известна интенсивность источника заявок λ_0 . Поэтому система уравнений для расчета интенсивностей имеет единственное решение вида $\lambda_j = \alpha_j \lambda_0$ где λ_0 - фиксированная величина.

Расчет характеристик разомкнутых однородных экспоненциальных СеМО базируется на эквивалентном преобразовании, заключающемся в представлении исходной СеМО в виде совокупности независимых СМО вида М/М/1, число которых равно числу узлов в сети.

Параметры каждой такой СМО задаются следующим образом: интенсивность поступления в СМО (узел) j ($j = 1, \dots, n$): $\lambda_j = \alpha_j \lambda_0$, где, α_j - коэффициент передачи для узла j ; b_j -длительность обслуживания в СМО/ равна длительности обслуживания в узле/: b_j . Узловые характеристики СеМО рассчитываются по формулам для СМО вида М/М/1 (2.31-2.36).

Вероятность потери кадров в СеМО определяется так:

$$P_{\text{пс}}^* = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - \alpha_j P_{ij}) \quad (2.96)$$

где « α_j »- коэффициент передач в l -ом узле, вычисляемый из системы уравнений (2.57), а P_{ij} - из выражения (2.51).

2.5 Концептуальный подход к синтезу и оптимизации сетей доступа

Ключевым элементом концепции построения широкополосных оптических сетей доступа следующего поколения, использующих принципы и технологическую основу, рассмотренные в разделе 1 настоящей работы, является решение задачи синтеза структуры СД, а также синтеза, связанных с ней других уровней МС, структурно-функциональная модель которой приведена на рис. 1.4. Решение задачи синтеза структуры МС и СД сводится к определению их параметров, обеспечивающих реализацию заданных характеристик функционирования.

Структура рассматриваемой СД описывается функционалом вида:

$$f=(TД, V_c, T_{ij}, TO), \quad (2.97)$$

где f - функционал технологий доступа ТД, скорости передачи в среде V_c топологии T_{ij} , системы технического обслуживания ТО.

До недавнего времени основным научно-обоснованным подходом к синтезу систем но-сетевых решений считался подход с позицией теории оптимизации. При этом проектировщик старался выбрать вариант системно-сетевого решения, обеспечивающего заданные эксплуатационные характеристики при минимальной стоимости на основании решения задачи оптимизации структуры (ЗОС). Недостатком подхода с позиций теории оптимизации является оценка лишь одномоментных инвестиций (капитальных или приведенных затрат) на развитие отдельных элементов сети, в то время как телекоммуникационные сети имеют период эксплуатации капиталоемких систем и сооружений, исчисляемый десятками лет, претерпевают за этот период множество структурных изменений. При этом результирующая структура сети, накопленная на протяжении жизненного цикла капиталоемких средств, может оказаться неоптимальной по технико-экономическим показателям, даже при условии оптимального выбора ее частей на моменты каждой модернизации и развития. Метод рационального выбора структуры сети, учитывающий приведенные выше соображения. Условие существования «рационального решения» формируется в следующем виде:

$$F(x_1^{min}, x_2^{min}, \dots, x_m^{min}, y_1, y_2 \dots y_u) \geq \psi_{min} \quad (2.98)$$

$$F(x_1^{max}, x_2^{max}, \dots, x_m^{max}, y_1, y_2 \dots y_u) \geq \psi_{max} \quad (2.99)$$

В процессе решения ЗОС обычно руководствуются одним или двумя основными факторами (группами факторов), которые принимаются в качестве критериев оптимальности рассматриваемых вариантов структуры - стоимостным, и одним (или группой) показателей качества функционирования.

При оптимизации рассматриваемого объекта из этих факторов выберем стоимостной, и группу вероятностно-временных и надежность факторов, отражающих качество обслуживания передаваемого в рассматриваемой IP-сети трафика (QoS). Решение ЗОС в такой постановке называют векторным. Вместе с ним, ЗОС часто решается и в однокритериальной скалярной постановке. В этом случае в качестве критерия оптимальности выбирается интегральный экономический критерий - приведенные затраты. Этот критерий является наиболее универсальным и учитывает как интересы изготовителя средств вычислительной техники и средств связи, так и затраты потребителей на закупку и внедрение этих технических средств.

В соответствии с действующей методикой по оценке экономической эффективности новой техники приведенные затраты однозначно связаны с

капитальными вложениями K через нормативный коэффициент E_u , а также с эксплуатационными расходами \mathcal{E} и определяются из выражения:

$$P_1(i) = E_{11}K + \mathcal{E} \quad (2.100)$$

При таком подходе вероятностно-временные критерии, определяющие качество обслуживания трафика, используются в качестве накладываемых ограничений.

Поиск этих критериев производится путем решения задач анализа сети с применением рассмотренных в предыдущем и последующих разделах методов моделирования с применением аппарата теории массового обслуживания, теории надежности.

При выборе метода оптимизации необходимо учитывать возможность его автоматизации, постановки задач и алгоритмов оптимизации на ЭВМ. Этому условию в значительной мере удовлетворяют дискретные методы оптимизации. Метод оптимизации СД, изложенный в пятой главе настоящей работы основан на формировании и анализе дискретного множества F вариантов структуры СД или МС /.

Этот метод сводится к отысканию варианта СД, минимизирующего целевую функцию, в качестве которой выбраны приведенные затраты. $P_1(i) \rightarrow \min, f^* \in F$. По сравнению с известными, метод оптимизации широкополосных СД, рассмотренный в данной работе учитывает: новые математические модели характеристик качества обслуживания и надежности новой технической базы широкополосных СД, в том числе, предложенной автором настоящей работы, процесс фазирования синхронных ЛСПД, рассмотренных в главе 4 работы, а также рассмотренный в этой главе процесс блокировки приемного буфера, а также характеристики системы ТО СД.

2.6 Выводы главе 2

Во второй главе разработана математическая модель широкополосной оптической на теории массового обслуживания. В качестве основной базовой модели для анализа узловых характеристик МС и СД с предоставлением услуги «Triple Play» необходимо использовать СМО с неоднородным потоком заявок (три класса) и приоритетным обслуживанием с тремя классами относительных приоритетов.

3. Моделирование и анализ оптических сетей доступа

3.1. Моделирование и исследование фрагмента широкополосной СД, использующего технологию PON

В данном разделе попытаемся исследовать влияние параметров участка широкополосной СД, использующего технологии PON на основные характеристики качества обслуживания всех классов передаваемого через этот фрагмент сети трафика.

Объектом исследования данного раздела работы является фрагмент СД, использующий технологии PON. Физическая структура рассматриваемого объекта приведена на рис. 3.1. Данная структура является частью структурно-функциональной модели МС, приведенной на рис. 1.4, и рассмотренной в разделе 1. На границе сети доступа расположен граничный сервер BRAS. Это устройство маршрутизирует трафик провайдеров Интернет, ядра МС, сети доступа, терминирует абонентские VLAN, а также абонентские сессии PPPoE, профилирует нисходящие потоки трафика с целью исключения перегрузок в устройствах СД и поддержания требуемого уровня QoS.

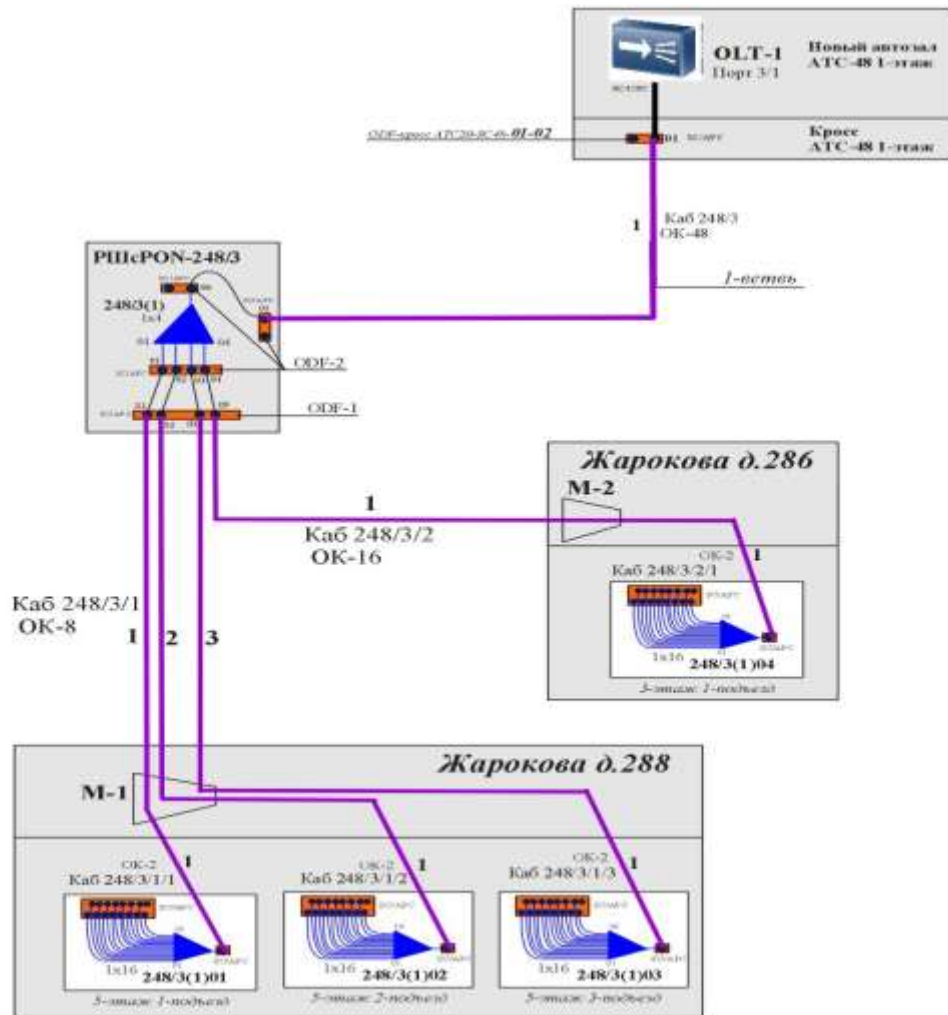


Рис 3.1-Широкополосная оптическая сеть в городе Алматы

Сервер BRAS связан с центральным узлом доступа пассивной оптической сети OLT по высокоскоростной (100 Ethernet) оптической линии. В OLT включены N_c сегментов PON объединяющих по N абонентов. Сегменты PON представляют собой пассивные шинные моноканалы с $N+1$ линиями, включенными в пассивные разветвители (ПР), расположенные в узлах СД. Каждая из N линий терминируется оконечными устройствами ONT, находящимися в помещениях абонентов. К ONT подключаются абонентские установки: телевизионные IP-приставки STB, IP телефонные терминалы, персональные компьютеры, беспроводные роутеры и другие.

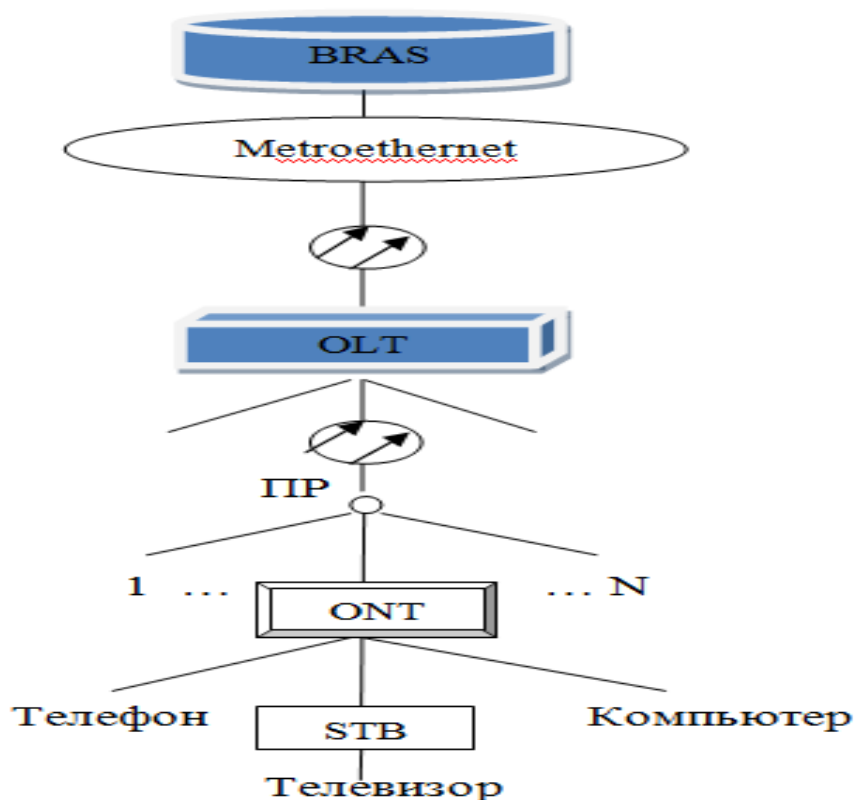


Рис 3.2-Фрагмент сети доступа

Абонентский трафик передается через сегмент PON, как в нисходящем (нисходящая ветвь) так и в восходящем (восходящая ветвь) направлениях. Для передачи трафика на участке BRAS-OLT используется стандартный стек протоколов, ориентированных на передачу трех указанных выше классов трафика через IP-сеть общего пользования. В соответствии с требованиями рекомендации МСЭ-Т Y. 154, в накопителях BRAS для каждого абонента, для каждого вида абонентского трафика создается своя отдельная очередь. При этом пакеты всех видеоприложений помещаются в одну общую очередь. На участке от OLT до ONT создаются мультикастовые группы для потокового IPTV вещания. Между OLT и ONT (нисходящее направление) ведется передача трех классов трафика с соответствующими тремя классами относительных приоритетов обслуживания этих классов трафика в очередях данных сетевых устройств. На участке СД используется комбинированная логическая модель доступа к услугам Triple Play [91], за счет чего обеспечивается разделение передаваемых видов трафика и снижение их взаимного влияния. Будем проводить сравнительный анализ трех видов технологий PON: GPON, GEAPON, WDM PON. Рис. 3.1. Физическая используемых на участке OLT-ONT. Как следует из структура сегмента СД рассмотрения, приведенного в разделе 1, два первых вида технологий в рассматриваемом нами режиме передачи кадров Ethernet имеют значительное число общих сторон, характеризующих процессы, протекающие при передаче кадров через сегмент СД. К ним относятся:

- обе рассматриваемые технологии синхронные, имеют режим инициализации, включающий ранжирование по фазе (подсчет и табулирование задержек распространения) и синхронизации;

- обе технологии реализуют широковещательную передачу и распределение трафика в нисходящей ветви и бесконфликтную передачу в восходящей ветви, причем последняя процедура предусматривает дополнение интервала доступа задержками выравнивания, пропорциональными разбросу задержек распространения до точек подключения ONT в пассивной распределительной сети PON;

- обе технологии имеют режим передачи кадров Ethernet, реализуемый за счет модифицирования преамбул кадров, присоединения к ним служебных адресных и других заголовков небольшой длины, а также в результате широковещательной передачи модифицированных кадров в нисходящем направлении ко всем ONT, включенным в распределительную сеть рассматриваемого сегмента;

- в обеих технологиях объем передаваемого трафика сигнализации пренебрежимо мал по сравнению с объемом трафика полезной нагрузки;

- обе технологии используют приоритетное обслуживание в отдельных очередях кадров каждого из трех классов передаваемого трафика.

Если учесть, что сегмент WDM PON в рассматриваемом режиме передачи кадров Ethernet представляет собой высокоскоростной Ethernet коммутатор, а все ONT присоединены к нему по логически прозрачным оптическим каналам, организуемым на соответствующих длинных волн, то и эта технология так же имеет существенную общность в отношении процессов передачи с двумя другими технологиями, рассмотренными выше, т.к. оперирует теми же форматами данных - кадрами Ethernet.

Пребывание пакетов (кадров) в очередях BRAS, OLT, ONT и других сетевых устройств является основным источником задержки В рассматриваемом фрагменте СД. Учитывая изложенные обстоятельство, представляется возможным замещение рассматриваемого сегмента PON, использующего любую из трех рассмотренных выше технологий PON, одной общей аналитической моделью. При этом, задание параметров этой модели должно различаться для каждой из рассматриваемых технологий PON.

Поскольку две первых из рассмотренных выше технологий реализуют протокол резервирования пропускной способности, имеют много режимов работы, а также включают комплекс других факторов, затрудняющих их исследование и сравнительный анализ, важным вопросом при проведении исследования является выбор такого комплекса предположений и допущений, который бы позволил построить обобщенную модель и провести сравнительный анализ этих технологии.

Постановка задачи

Пусть имеется: фрагмент сети доступа, состоящий из N_c сегментов PON по N абонентов каждый (см. рис. 3.1.) на который воздействует неоднородный

поток с тремя классами заявок, соответствующих трем классам абонентского трафика:

- в нисходящей ветви: трафик VoIP и видеоконференций (высший приоритет обслуживания), со средней интенсивностью $\lambda_{VoIP1H} \dots \lambda_{VoIPNH}$ ко всем NN_C абонентам рассматриваемого участка СД, трафик IPTV (потокое вещание и VoD, средний приоритет обслуживания), со средней интенсивностью Λ_{TV} , трафик сервисов передачи данных к NN_C абонентам (доступ в Интернет, локальные ресурсы и другой, низший приоритет), со средней интенсивностью $\lambda_{D1H} \dots \lambda_{D1N}$

- в восходящей ветви: трафик VoIP и видеоконференций от одного абонента (высший приоритет), со средней интенсивностью λ_{VoIPB} трафик запросов в Интернет, запросов программ TV-вещания и VoD от одного абонента (средний приоритет) со средней Интенсивностью λ_{VoD1B} , трафик сервисов передачи данных от одного абонента (низший приоритет) со средней интенсивностью λ_{D1B} . Требуется определить среднюю задержку пакетов (кадров) TPTD и среднеквадратическое отклонение задержки для определения ее вариации IPDV для трафика VoIP и EPTV в нисходящей и восходящей ветвях, а также вероятность потерь для трафика DoIP.

Основные предположения и допущения. Будем предполагать, что:

- сеть однородна и находится в установившемся режиме;
- интервалы между поступлением заявок во входном потоке нисходящей ветви подчиняются трех пара метрическому распределению Парето, а на восходящую ветвь действует пуассоновский поток.
- все накопители имеют бесконечную емкость;
- дисциплина обслуживания во всех СМО - FIFO (обслуживание в порядке поступления);
- на обслуживание поступает по одной заявке;
- обслуживание в обеих ветвях многофазовое, в первой фазе нисходящей ветви длительности интервалов обслуживания подчиняются распределению Парето, а в восходящей ветви обслуживание общего вида с тремя классами приоритетов, как и в двух последних фазах нисходящей ветви;
- в восходящей ветви PON пропускная способность распределена поровну для всех N абонентов, включенных в рассматриваемые сегменты PON, и каждый ONT за один цикл доступа передает по одному кадру Ethernet;
- сегмент PON находится в рабочем режиме;
- сеть имеет абсолютную надежность.

3.2 Аналитическая модель

Структура аналитической модели рассматриваемого фрагмента СД в терминах теории массового обслуживания приведена на рис. 3.2.

В нисходящей ветви (рис. 3.2 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 (см. рис. 3.2 б) - две фазы обслуживания: 1 - обслуживание трех классов трафика, поступающего от абонента в сегменте PON, 2 - обслуживание объединенного (суммарного) трафика OLT, (от Nc сегментов PON) при передаче по линии OLT-BRAS. Номера фаз показаны на рис. 3.2 цифрами в кружках.

Будем проводить отдельное исследование каждой из фаз, как в нисходящем, так и в восходящем направлениях.

В первой фазе (см. рис. 3.2 а) средняя задержка вычисляется из известной приближения Кремера, Лангенбаха-Бельца для СМО типа G/G/1 (2.51).

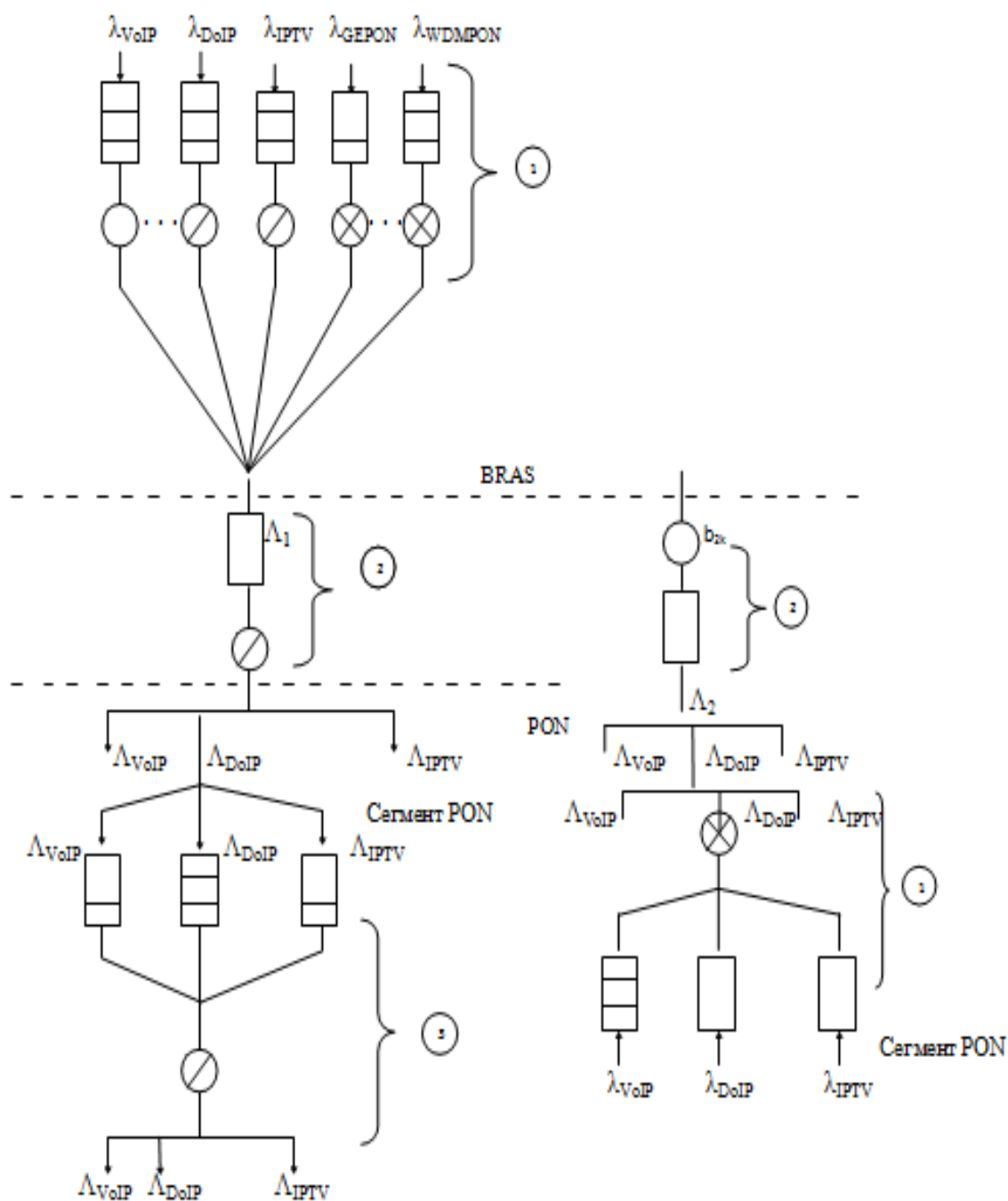


Рис. 3.3.- Аналитическая модель сегмента оптической СД

На каждую из СМО действует входной поток заявок, интервал в котором описывается трехпараметрическим распределением Парето (см. выражение 2.20-2.22). Интервалы обслуживания всех СМО также описываются указанным распределением.

Выбор ЭТОГО ограниченного распределения [28] для моделирования интервалов во входном потоке, обладающем свойствами самоподобия, обусловлен тем, что оно позволяет не меняя формы «хвоста» распределения,

указать максимальное значение случайной величины, что обеспечивает конечное значение коэффициента вариации v_a . При этом параметр L_a отображает максимальное время между приходом соседних заявок, а параметр k_a - минимальное. В условиях пульсирующего «пачечного» трафика с переменной скоростью, параметр k_a может отображать минимальный интервал между приходом начал двух следующих друг за другом кадров минимальной длины, передаваемых с максимальной скоростью, а L_a - интервал между двумя началами кадров, один из которых последний в передаваемой «пачке», а второй - первый в следующей «пачке». Пусть на вход накопителя BRAS (фаза 1) поступают потоки трех классов трафика, с минимальными длинами кадров n_j где j - номер класса трафика, а V_j - максимальная скорость в потоке данного класса трафика. Тогда минимальный интервал передачи j -того класса трафика k_{aj} будет определяться так:

$$k_{aj} = \frac{V_j}{n_j} \quad (3.1)$$

Причем, для VoIP: $j = 1$, ДЛЯ IPTV: $j = 2$, а для DoIP: $j = 3$.

При проведении численного исследования будем фиксировать данные значения для рассматриваемых классов трафика, а значения L_a будем варьировать, обозначая их символом Var. Исходные данные для исследования фазы 1 приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Исходные данные для исследования фазы 1

№ п/п	Наименование параметра	IPTV	VoIP	DoIP
1	2	3	4	5
1	Максимальная скорость и потоке, Мбит/с	120	2	2
2	Минимальная длина кадра, бит	1024	6000	6000
3	Минимальный ншерпал передачи k_a , мкс	8.5	20	20
4	Интервал L_a . мкс (Var)	200-20	2000-80	2000-80
5	Минимальный интервал обслуживания k_b , мкс	1.3	25	25
6	Максимальный интервал обслуживания L_b , мкс	20	50	50

Значения интенсивностей входных потоков в фазе 1 можно определить так:

$$\lambda_{j1n} = M_{aj1n}^{-1}, \quad (3.2)$$

где λ_{j1n} - средняя интенсивность потока, J —того класса трафика в первой фазе нисходящей ветви, а M_{aj1n} - среднее значение интервала во входном потоке j - того класса трафика (математическое ожидание), определяемое из выражения (2.21). Тогда коэффициент загрузки СМО для j - того класса трафика определяется так:

$$\rho_{j1n} = \lambda_{j1n} / \mu_{j1n} \quad (3.3)$$

$\mu_{j1n} = M_{bj1n}^{-1}$, где M_{bj1n}^{-1} - среднее значение интервала обслуживания, вычисляемое для СМО G/G/1 в соответствии с выражением (2.21), коэффициент вариации выходного потока v_c - из выражения (2.53). а с.к.о. задержки в фазе 1 – σ_{u1} - из (2.54).

Будем полагать, что на фазы 2 и 3 нисходящей ветви действует объединенный поток с суммарной интенсивностью

$$\Lambda_2 = (\lambda_{j1n} + \lambda_{31n})N + \Lambda_{\Gamma} \quad (3.4)$$

Поскольку данный поток является объединенным из большого числа потоков, будем предполагать [20], что этот поток простейший.

Тогда, для фазы 2 будем вычислять IPTD как среднюю задержку в СМО M/G/1 с неоднородным потоком заявок и с тремя классами относительных Приоритетов обслуживания. Для вычисления средней задержки будем использовать выражения (2.25) и (2.40-2.45). С.к.о. будем вычислять с подстановкой (2.40) и (2.42) в (2.47). Преобразованное выражение (2.47) для трех классов заявок с тремя классами относительных приоритетов будет приведено ниже, в разделе 3.3 настоящей работы. (PLR для каждого класса трафика будем вычислять в соответствии с (2.50). Для фазы 3 нисходящей ветви будем вычислять IPTD как среднюю задержку в СМО M/G/1 с тремя классами относительных приоритетов в обслуживании ($N = 3$). Вычисления характеристик в фазе 3 будем проводить для трех классов трафика, по тем же выражениям, что и в фазе 2.

Суммарную среднюю интенсивность потока трафика IPTV, воздействующего на фазу 3 нисходящей ветви, можно определить так:

$$\Lambda_{TV3} = k_{MK} \lambda_{1TV} + N_0 \lambda_{VOD}, \quad (3.5)$$

где, Λ_{TV3} - суммарная интенсивность трафика IPTV, k_{MK} - число каналов в мультикастовой группе IPTV, λ_{1TV} - средняя интенсивность потока одного канала IPTV вещания, λ_{VOD} - интенсивность потока «видео по запросу» на

одного абонента, N_0 - суммарное число абонентов в сети (или в сегменте PON) подписавшихся на услугу VoD.

Исходные данные для исследования фазы 2 приведены в таблице 3.2, для исследования фазы 3, для трафика VoIP и DoIP - в таблице 3.3, а для трафика IPTV - в таблице 3.4.

Таблица 3.2 Исходные данные для исследования фазы 2

№ п/п	Число абонентов, N	Средняя интенсивность Λ_{2H} , кадр/мкс	Средний интервал обслуживания b_{2H} мкс
1	20	10^{-2}	$8 \cdot 10^{-2}$
2	100	$4,4 \cdot 10^{-2}$	
3	200	$8,5 \cdot 10^{-2}$	
4	800	$3,3 \cdot 10^{-1}$	

Таблица 3.3. Исходные данные для исследование фазы 3, для VoIP DoIP

№ п/п	Число абонентов N	Интенсивность потока, кадр/мкс		Интервал обслуживания, икс					
		VoIP, Λ_{VoIP}	DoIP, Λ_D	VoIP			DoIP		
				GPON	GEPON	WDMPON	GPON	GEPON	WDMP
1	32	$6 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	1,7	2,68	1,85	1,93	3,24	2,26
2	64	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	1,7	2,68	1,85	1,93	3,24	2,26
3	128	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$8,7 \cdot 10^{-2}$	1,7	2,68	1,85	1,93	3,2-3	2,26

Таблица 3.4 Исходные данные для исследования фазы 3, для IPTV

№ п/п	Число абонентов, N	Число каналов в мультикастовой группе, k_{MK}	Интенсивность потока IPTV, Λ_{TV} кадр/мкс	Интервал обслуживания, b_{2H} , мкс		
				GPON	GEPON	WDMPON
1	128	10	$4,2 \cdot 10^{-2}$	5,52	11,8	8,2
2	128	20	$5 \cdot 10^{-2}$	5,52	11,8	8,2
3	128	30	$6 \cdot 10^{-2}$	5,52	11,8	8,2
4	128	40	$7 \cdot 10^{-2}$	5,52	11,8	8,2
5	32	30	$3,3 \cdot 10^{-2}$	5,52	11,8	8,2
6	64	30	$4,2 \cdot 10^{-2}$	5,52	11,8	8,2
7	128	3d	$5,9 \cdot 10^{-2}$	5,52	11,8	8,2

Среднее время обслуживания для фаз нисходящей ветви определяется

из суммы:

$$\bar{b}_{ijн} = \bar{t}_{abpij} + \bar{t}_{abpij} \quad (3.5)$$

где: $\bar{b}_{ijн}$ - среднее время обслуживания в i -той фазе нисходящей ветви заявок j -того типа (кадров j -того вида трафика), \bar{t}_{abpij} - среднее время обработки в i -той фазе нисходящей ветви заявок j -того типа. \bar{t}_{abpij} - среднее время передачи в i -той фазе нисходящей ветви заявок j -того типа.

Для первой фазы восходящей ветви среднее время обслуживания определяется так:

$$\bar{b}_{1jв} = \bar{t}_{\partial i} + \bar{t}_{abpij} + \bar{t}_{abpij} \quad (3.6)$$

где: $\bar{b}_{1jв}$ - среднее время обслуживания в первой фазе восходящей ветви заявок j -того типа, $\bar{t}_{\partial i}$ - среднее значение интервала доступа для i -того абонента, \bar{t}_{abpij} - среднее время обработки в первой фазе восходящей ветви заявок j -того типа.

$$\bar{t}_{\partial i} = \sum_{i-1}^{K-1} \Delta l_i \tau_p + \sum_{i-l}^{N-1} \bar{t}_{ноplj81} \quad (3.7)$$

где Δl_i - приращение длины линии i -го абонента, τ_p - задержка распространения на единицу длины используемой линии, $\bar{t}_{ноplj81}$ - среднее время передачи заявок j -того типа.

Параметр Δl_i определяется как разность максимальной длины линии OLT-ONT в сегменте GPON, GPON и длины линии i -го абонента. Для упрощения анализа будем использовать значение этого параметра, усредненное для сегмента PON. Для второй фазы восходящей ветви интервал обслуживания определяется по аналогии с (3.5).

Исходные данные интенсивностей потоков, создаваемых рассматриваемыми классами трафика одного абонента для фазы 1 восходящей ветви, для усредненной длины кадра $n_B=1907$ бит, приведены в таблице 3.5, а исходные данные для исследования восходящей ветви с учетом выражений (3.6) и (3.7) – в таблице 3.6.

Таблица 3.5- Исходные данные интенсивностей потоков абонентского трафика.

№ п/п	Вид трафика	Обозначение	Интенсивность,
1	VoIP	Λ_{VoIPB}	$1,9 \cdot 10^{-4}$
2	Запросы	Λ_{VoD1B}	10^{-5}
3	Локальные ресурсы	Λ_{D1B}	$4 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3.6 Исходные данные для исследования восходящей ветви

№ п/п	Число абонентов в сегменте PON, N	Средний разброс длин линий, км	Средний интервал обслуживания, b_{ID} , мкс		
			GPON	GEPON	WDMPON
1	5	2	58	63	2.1
2	10	2	112	123	
3	32	2	354	387	
4	64	2	706	771	
5	10	0.2	20	32	
6	10	0.5	35	47	
7	10	1	60	72	
8	10	2	110	122	
9	10	5	260	272	
10	10	10	510	522	

Будем полагать, что на фазу 2 восходящей ветви действует простейший поток с интенсивностью Λ_B , в ONT сети включено N_c сегментов по N абонентов каждый, а каждый из абонентов каждого из сегментов создает одинаковые интенсивности потоков Λ_{iB} , тогда

$$\Lambda_B = \sum_{n_c=1}^{N_c} \sum_{i=1}^K \Lambda_{iB}, \quad (3.8)$$

$$\Lambda_{iB} = \lambda_{DiB} + \lambda_{VoDiB} + \lambda_{VoIPiB}, \quad (3.9)$$

где, λ_{DiB} - интенсивность потока трафика локальных ресурсов, создаваемая i-тым абонентом, λ_{VoDiB} - интенсивность запросов видео, λ_{VoIPiB} - интенсивность трафика VoIP.

Результаты численного исследования характеристик фаз обслуживания восходящей и нисходящей ветвей, приведены на рис. 3.3 - 3.9.

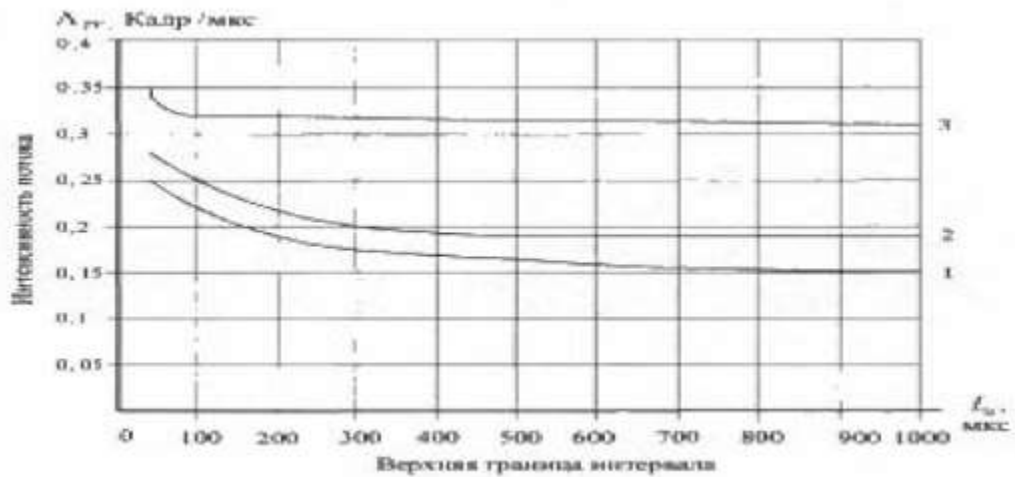


Рис 3.4-Результаты численного исследования фазы 1 нисходящей ветви

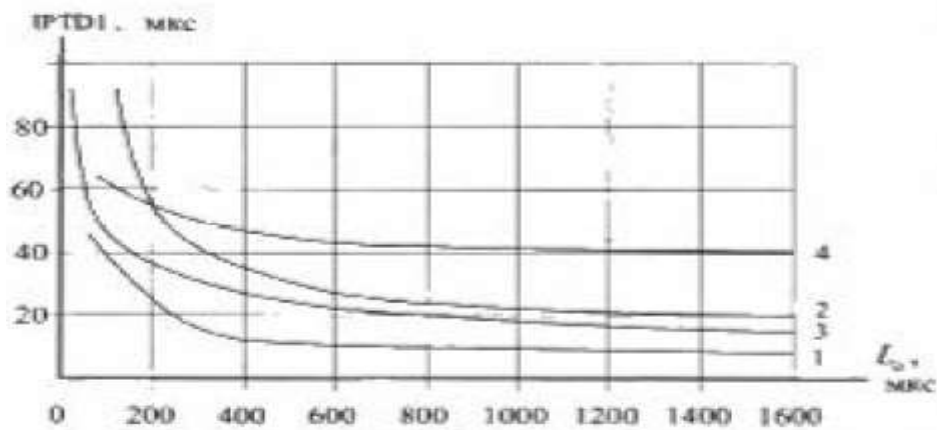


Рис 3.5 -Результаты численного исследования фазы 1 нисходящей ветви

На рис. 3.4 приведены зависимости интенсивности потока Λ_{TV} от значений верхней границы распределения Парето L_g (мкс);

1. $\kappa_a = 1,2$ мкс, $\alpha_a = 1,1$;
2. $\kappa_a = 1,2$ мкс, $\alpha_a = 1,2$;
3. $\kappa_a = 1,2$ мкс, $\alpha_a = 1,6$.

На рис. 3.5 показаны зависимости коэффициента вариации интервалов во входном (v_b) и выходном (v_c) потоках, вычисленные в соответствии с (2.22) и (2.52) от верхней границы L_a распределения Парето для трафика IPTV и VoIP:

1. IPTV, выходной поток, $\alpha_a = 1,3$, $L_a = \text{Var} (200 \text{ мкс} - 20 \text{ мкс})$, $\kappa_a = 3$ мкс,
 $L_b = 20$ мкс, $\kappa_b = 1,3$ мкс, $V_b = 0,82$, $\alpha_b = 1,3$;
2. IPTV, выходной поток, $\alpha_a = 1,5$, $L_a = \text{Var} (200 \text{ мкс} - 20 \text{ мкс})$, $\kappa_a = 3$ мкс.
 $L_b = 20$ мкс, $\kappa_b = 1,3$ мкс, $V_b = 0,82$, $\alpha_b = 1,3$;
3. IPTV, выходной поток, $\alpha_a = 1,5$, $L_a = \text{Var} (200 \text{ мкс} - 20 \text{ мкс})$, $\kappa_a = 3$ мкс,

- $L_b = 250$ мкс, $\kappa_b = 1.3$ мкс, $V_b = 5.3$;
4. VoIP, входной поток, $\alpha_a = 1.5$, $L_a = \text{Var}(2000 \text{ мкс} - 80 \text{ мкс})$. $\kappa_a = 20$ мкс ;
5. VoIP, входной поток. $\alpha_a = 1.1$, $L_a = \text{Var}(2000 \text{ мкс} - 80 \text{ мкс})$, $\kappa_a = 20$ мкс ;
6. VoIP, входной поток. $\alpha_a = 1.1$, $L_a = \text{Var}(2000 \text{ мкс} - 80 \text{ мкс})$. $\kappa_a = 20$ мкс ;
7. VoIP, выходной поток, $\alpha_a = 1.1$. $L_a = \text{Var}(2000 \text{ мкс} - 80 \text{ мкс})$. $\kappa_a = 20$ мкс;
 $L_b = 50$ мкс, $\kappa_b = 25$ мкс, $\alpha_b = 1.3$;
8. VoIP, выходной поток, $\alpha_a = 1.5$, $L_a = \text{Var}(2000 \text{ мкс} - 80 \text{ мкс})$, $\kappa_a = 20$ мкс.
 $L_b = 50$ мкс, $\kappa_b = 25$ мкс, $\alpha_b = 1.3$.
9. IPTV, входной поток, $\alpha_a = 1.3$, $L_a = (200 \text{ мкс} - 20 \text{ мкс})$, $\kappa_a = 3$ мкс

Анализируя кривые рис. 3.4 нетрудно заметить, что крутизна зависимости средней интенсивности потока IPTV – Λ_{TV} , от значений верхней границы интервала во входном потоке растет при приближении коэффициента формы распределения Парето интервалов во входном потоке α_a к единице, а при изменении α_a от 1,6 до 1,1 значение Λ_{TV} , соответствующее максимальному значению верхней границы (1 мс) возрастает в два раза. Это связано с тем, что при приближении α_a к единице, среднее значение интервала устремляется к бесконечности, при этом α_a управляет чувствительностью среднего значения к изменению верхней границы. При увеличении α_a от 1,1 до 1.6 крутизна наклона кривой зависимости интенсивности потока от верхней границы уменьшается приблизительно на 30% , но при этом среднее значение интенсивности потока увеличивается на 50%, а крутизна наклона кривой при приближении верхней границы к нижней резко возрастает.

Анализируя кривые (см. рис. 3.4) зависимости коэффициентов вариации входного и выходного потока СМО G/G/1 в фазе 1 от верхней границы распределения во входном потоке, можно отметить, что наиболее интересным результатом является противоположный наклон кривых 2 и 3 зависимостей коэффициента вариации выходного потока IPTV. При малых значениях коэффициента вариации интервала обслуживания ($v_{bl}=0.82$, кривая 2) коэффициент вариации выходного потока растет с ростом верхней границы, т.к. при снижении значения этой границы растет загрузка СМО, проявляется влияние низкого коэффициента вариации интервала обслуживания, и коэффициент вариации выходного потока снижается (поток выравнивается). При больших значениях коэффициента вариации интервала обслуживания ($v_{bl}=5.3$, кривая 3), наоборот, при повышении загрузки СМО возрастает влияние вариации потока обслуживания, и при «смыкании» границ (приближении верхней границы к нижней) возрастает вариация выходного потока. Поэтому, при формировании потоков (Shaping) необходимо стремиться к тому, чтобы в выравнивающих узлах обслуживающие приборы строились с минимальным коэффициентом вариации интервалов обслуживания, а буферные ОЗУ имели наибольший объем, что обеспечит наилучшие условия формирования трафика (фильтрацию пульсаций).

Одно из исследований фазы 1 рассматриваемой модели связано с заменой входного потока, описываемого распределением Парето. на простейший

входной поток, с приравненной средней интенсивностью и заменой СМО G/G/1 на СМО M/G/1, с аналогичным процессом обслуживания, описываемым распределением Парето. с теми же параметрами, что и в СМО G/G/1.

Наиболее интересным результатом, выявленным при анализе кривых приведенных на рис. 3.4 является то, что при значении параметра формы α_a близком к единице, СМО M/G/1 дает меньшую задержку, чем в СМО G/G/1. В режиме больших загрузок СМО (при смыкании границ) эта разница может составлять около 2-х рпз. При значении $\alpha_a = 1,5$, при малых нагрузках (больших значениях α_a) СМО G/G/1 дает задержку вдвое больше, чем M/G/1, а при больших нагрузках задержка в СМО M/G/1 растет гораздо быстрее, чем в СМО G/G/1. При значениях загрузки около 0,6 - 0,7 эти кривые пересекаются.

Анализ зависимостей с.к.о. (а значит и IPDV) от значений верхней границы /., показывает, что при значениях α_a приближающихся к единице, с.к.о. задержки растет значительно быстрее при расширении границ распределения, чем при α_a приближающихся к значению 2.

На основании анализа кривых приведенных на рис. 3.5 можно заключить, что основной причиной задержки в фазе 2 является ожидание заявок в очереди. Анализ кривых задержки, приведенных на рис. 3.6. (а) показывает, что заявки с высшим приоритетом обслуживаются значительно быстрее, чем заявки с низким приоритетом, при этом задержка заявок с высшим приоритетом растет при увеличении интенсивности потока значительно медленнее, чем у заявок с низким приоритетом. Анализ кривых (см. рис. 3.6. (б)) показывает, что и с.к.о., а значит и IPDV заявок с высоким приоритетом растет при росте интенсивности потока таких заявок значительно медленнее, чем для заявок с низким приоритетом. Последний вывод имеет важное значение, т.к. 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 чувствительным к вариации задержки. С другой стороны, высокие значения этой характеристики, проявляющихся при обслуживании «эластичного» трафика данных не приводят к негативным последствиям. Такой же вывод можно сделать и на основании анализа кривых для третьей фазы нисходящей ветви, также реализующей VLAN и приоритетное обслуживание трафика. Анализ кривых, показывает, что наименьшее значение IPTD для всех видов трафика в нисходящей ветви сегмента PON обеспечивается при применении технологии GPON в виду высокой битовой скорости передачи (2,4 Гбит/с) (см. кривые 1-1, 1-2, 1-3). На основании анализа кривых, можно сделать вывод о том, что с ростом числа каналов в мультикастовой группе IPTV-вещания возрастает задержка других видов трафика. При этом рост IPTD для наиболее чувствительных к задержке классов, таких как VoIP (кривые 1-1, 1-2, 1-3) незначителен, а рост задержки эластичных видов трафика, таких как DoIP

(кривые 3-1, 3-2, 3-3) наибольший. В виду нечувствительности данного класса трафика к задержкам, это не вызывает негативных последствий.

Анализируя кривые характеристик восходящей ветви, приведенные на рис. 3.8 (а) 3.8 (е). можно заметить 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 v_b на IPTD в восходящей ветви достигается при использовании технологии

WDM PON, в виду отсутствия длительного процесса доступа, и низкого значения интервала обслуживания;

- вероятность потерь в фазе 2 восходящей ветви растет при повышении коэффициента вариации интервала обслуживания;

- наименьшее значение с.к.о. задержки и IPDV в восходящей ветви достигается при использовании технологии WDM PON, кривая

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

3.3 Система моделирования GPSS World.

Имитационная модель позволяет воспроизвести весь процесс функционирования Call - центра с сохранением логической структуры, связи между его компонентами и последовательность протекания их во времени.

При имитационном моделировании на компьютере имитируется работа Call - центра. Математическая модель при этом реализуется в виде программы для компьютера. В результате экспериментов на компьютере собирается статистика, обрабатывается и выдается необходимая информация. Таким образом, можно получить характеристики Call - центра, исследовать факторы, влияющие на них.

Для имитационного моделирования разработаны специальные системы моделирования. Системы моделирования имеют специализированные средства, позволяющие организовать модельные эксперименты на компьютере, учитывающие в моделях фактор времени. В них имеются языки моделирования, ориентированные на определенную предметную область.

Одной из систем моделирования, применяемых в отрасли телекоммуникаций, является GPSS World.

GPSS – General Purpose Simulation System, общецелевая система моделирования. Последняя версия **GPSS World** разработана компанией Minuteman (США), работает в операционной системе Windows [29].

Необходимо отметить, что **GPSS** – это язык моделирования СМО.

Сообщения поступают в систему в случайные моменты времени, становятся в очередь и ожидают момента начала обслуживания.

Сообщения будут называться **транзактами**.

Транзакты являются движущимися элементами **GPSS**-модели. Работа **GPSS** модели заключается в перемещении транзакта. В самом начале моделирования в модели нет ни одного транзакта. В процессе моделирования транзакты входят в модель в определенные моменты времени и в соответствии с теми логическими требованиями, которые возникают в модели. Подобным же образом транзакты покидают систему в определенные моменты времени. В общем случае в модели может существовать большое число транзактов, однако в один момент времени двигается только один транзакт.

Следующими обязательными объектами **GPSS**-модели являются блоки. Блоки представляют собой подпрограммы и содержат набор операндов для обращения к ним. В языке число таких блоков более 50.

Для построения модели нужно выбрать требуемые блоки и выстроить их в логической последовательности.

Модель в **GPSS** строится из отдельных элементов, называемых объектами.

Состояние модели в любой момент времени определяется совокупностью состояний всех объектов. Состояние модели изменяется лишь тогда, когда динамический объект, транзакт – проходит через блок. Именно транзакт, двигаясь по модели, является инициатором смены состояний обслуживания, статистических объектов и других транзактов.

Конкретный физический смысл в транзакт вкладывает пользователь.

В имитационной модели Call – центра под транзактом будем понимать вызов, поступающий из сети телекоммуникаций общего пользования (СТОП).

3.4 Имитационная модель оптической сети GPON

Комбинированный подход к моделированию сегмента GPON, использующий как аналитический так и имитационный методы. Для моделирования входного потока и обслуживания в этой работе используется классическое (двух-параметрическое) распределение Парето, задаваемое выражениями (2.17-2.20). Имитационные модели нисходящей и восходящей ветвей сегмента GPON-СД разработаны и среде имитационного моделирования GPSS World [30,31].

Обе модели содержат по три независимых генератора транзактов (блоки GENERATE), программируемые по выбору функциями Pareto или Exponential.

Каждый из генераторов моделирует абонентский источник одного из трех видов передаваемого в сети трафика. Транзакты, формируемые каждым из генераторов, маркируются отличающимися друг от друга параметрами посредством блоков ASSIGN, для того, чтобы в дальнейшем можно было выделить соответствующие потоки транзактов (виды трафика) из общего потока, отдельно их табулировать и анализировать средние задержки, с.к.о., а также гистограммы (в окне таблиц) для каждого из видов трафика. Кроме этого обе имитационных модели содержат наборы блоков, позволяющие имитировать очереди, обслуживающие приборы, приоритетное обслуживание. Фазы, в которых обслуживается объединенный трафик, оснащены генераторами, создающими дополнительные потоки транзактов, имитирующие реальный уровень загрузки этих фаз, а селекция трех видов трафика одного абонента необходимая для анализа вероятностно-временных характеристик реализуется с помощью блоков TEST и TEST NE (тестера транзактов).

3.5 Анализ работы оптической сети GPON на имитационной модели

В результате численных исследований аналитических моделей и обработки результатов имитационных моделей были получены семейства кривых зависимостей средней задержки и ее с.к.о. от параметров распределения интервалов во входном потоке для всех исследуемых видов трафика и фаз обслуживания, приведенные на рис. 3.6.

На рис. 3.6 (а) приведена зависимость коэффициента загрузки СМО Р/Р/1 в первой фазе от нижней границы распределения Парето для трафика IPTV, полученная для аналитической модели для условия, аналогичных условиям кривой 1 на рис. 3.6 (б), заданных ниже.

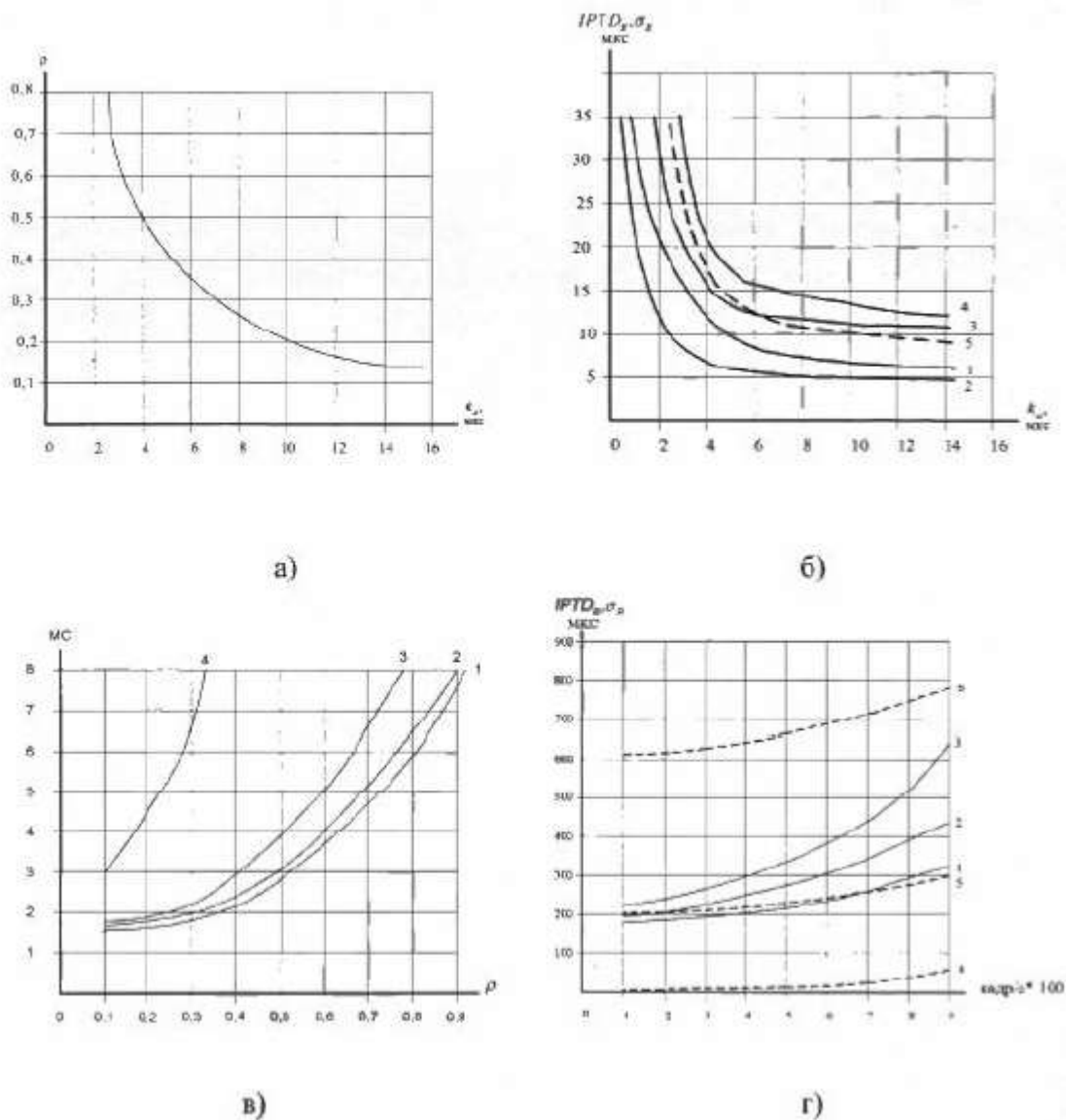


Рис. 3.6. Результаты численного исследования аналитической модели сегмента GPON и его имитационного моделирования

На рис. 3.6. (б) показаны зависимости средней задержки и с.к.о. трафика IPTV в нисходящей ветви от значений нижней границы распределения Парето:

- 1- задержка, первая фаза, аналитическая модель, $\alpha = 2,1$;
- 2- задержка, условия, аналогичные кривой 1, имитационная модель;
- 3- задержка для полного сегмента сети доступа, имитационная модель;
- 4- задержка, условия, аналогичные условиям кривой 3, аналитическая модель;
- 5- с.к.о., условия, аналогичные кривой 1, имитационная модель.

На рис. 3.6 (в) приведены зависимости средней задержки в СМО G/G/1 от коэффициента загрузки ρ для различных распределений интервалов во входном потоке (аналитическая модель):

1. Экспоненциальное; 2. Парето, $\alpha = 2,3$;
3. Парето, $\alpha = 2,1$; 4. Парето, $\alpha = 2,01$.

На рис. 3.7 (г) показаны зависимости средней задержки и с.к.о. от интенсивности потока для различных видов трафика в восходящей ветви:

- 1- задержка, VoIP и видеоконференции;
- 2- задержка, запросы в Интернет, запросы IPTV и VoD;
- 3- задержка, дополнительные сервисы ПД;
- 4- с.к.о. для VoIP и ВК, $v_b = 0$;
- 5- с.к.о. для VoIP и ВК, $v_b = 1$;
- 6- с.к.о. для VoIP, $v_b = 3$, данные аналитической и имитационной модели отличаются не более чем на 10-15% и поэтому не показаны различающимися кривыми.

Анализируя кривые рис. 3.7 (в) можно заметить, что при приближении коэффициента формы α классического распределения Парето к значению 2. наблюдается рост средней задержки в исследуемой СМО, по сравнению с кривыми, для которых α в большей степени отличается от значения 2, при одних и тех же значениях коэффициента загрузки СМО ρ . Это связано с возрастанием дисперсии и коэффициента вариации классического распределения Парето (см. выражение (2.19), (2.20)) и с устремлением данных величин к бесконечности, при устремлении α к значению 2.

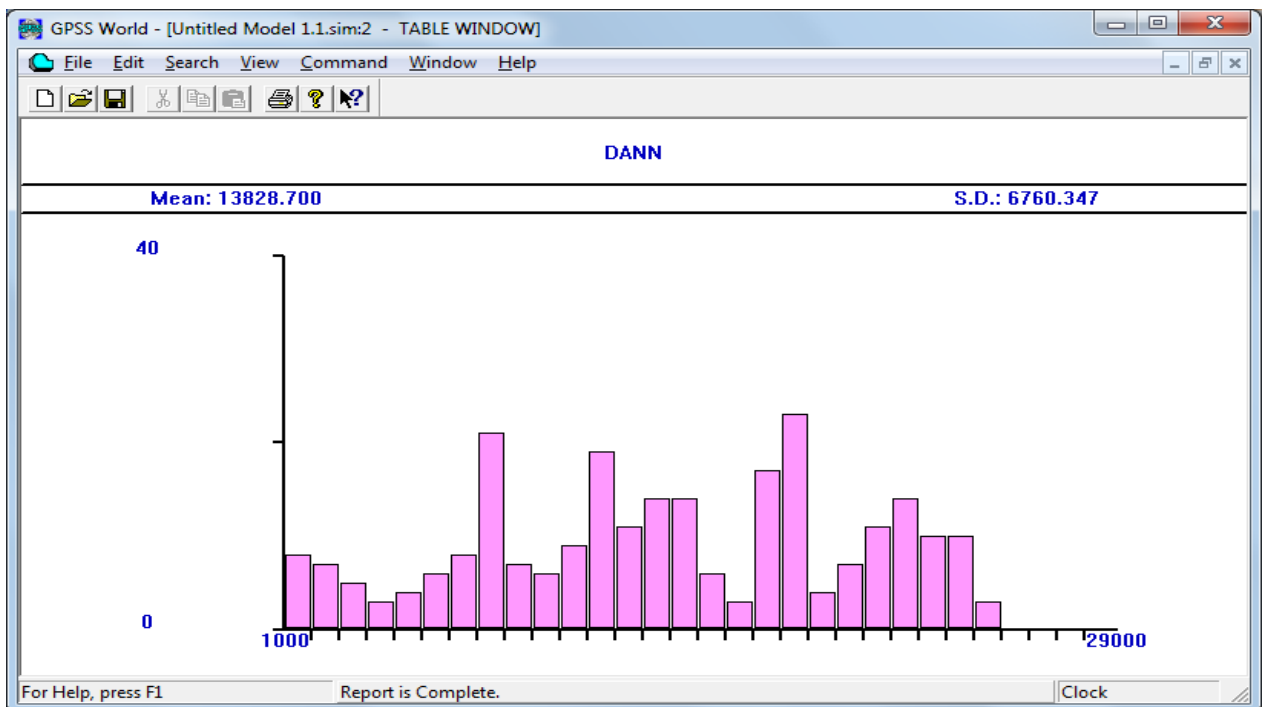


Рис. 3.7.- Гистограмма среднего времени ожидания в очереди при передаче трафика данных.

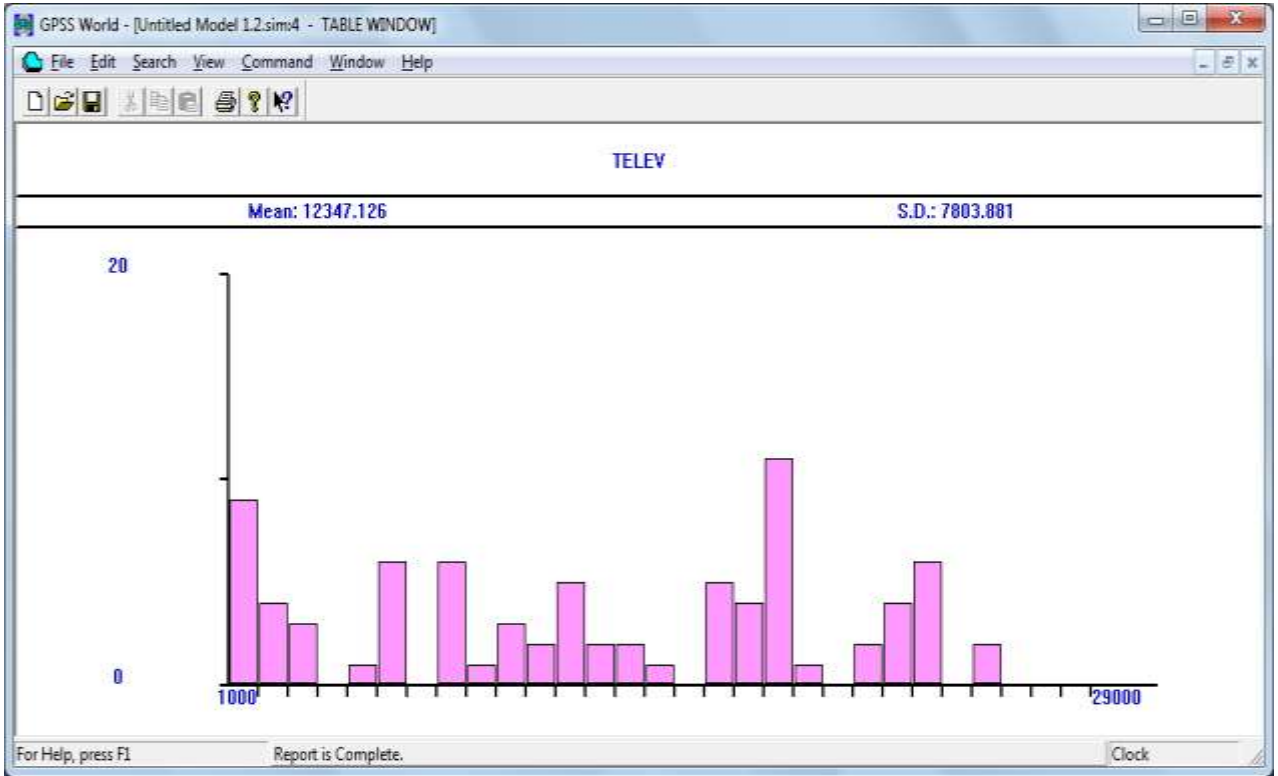


Рис. 3.8.- Гистограмма среднего времени ожидания в очереди при передаче трафика телевидения.

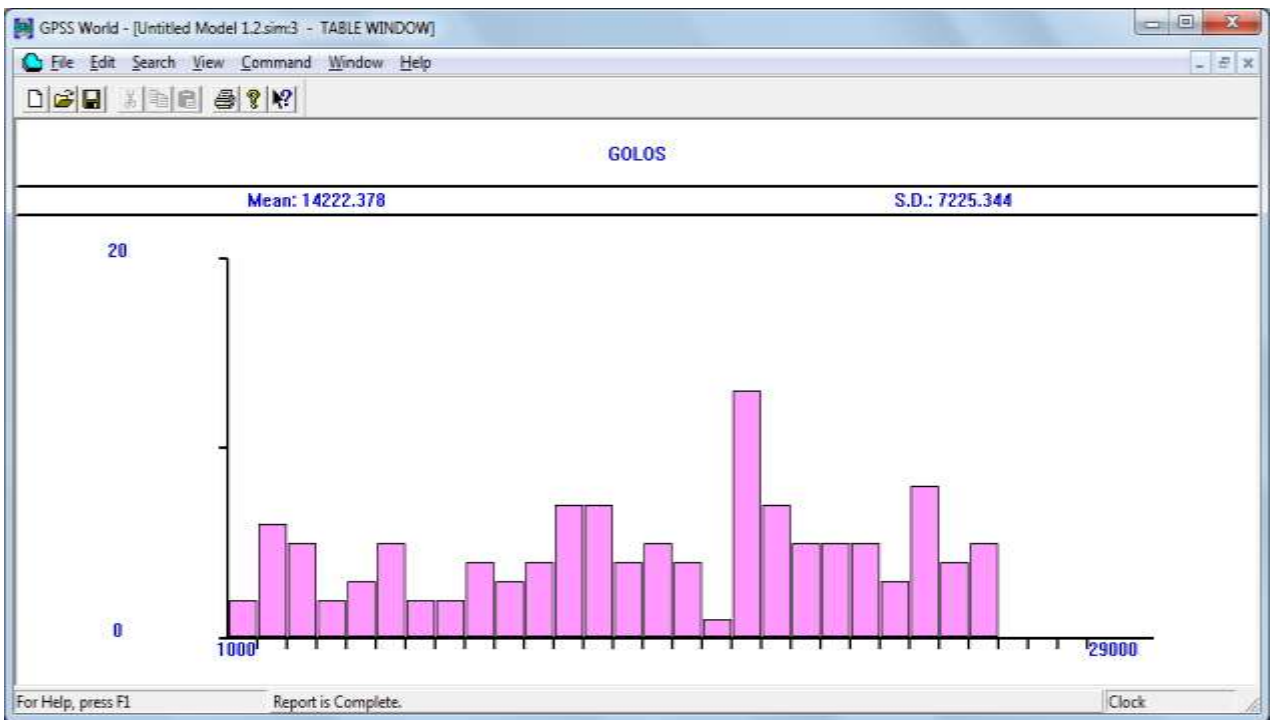


Рис. 3.9.- Гистограмма среднего времени ожидания в очереди при передаче трафика голоса.

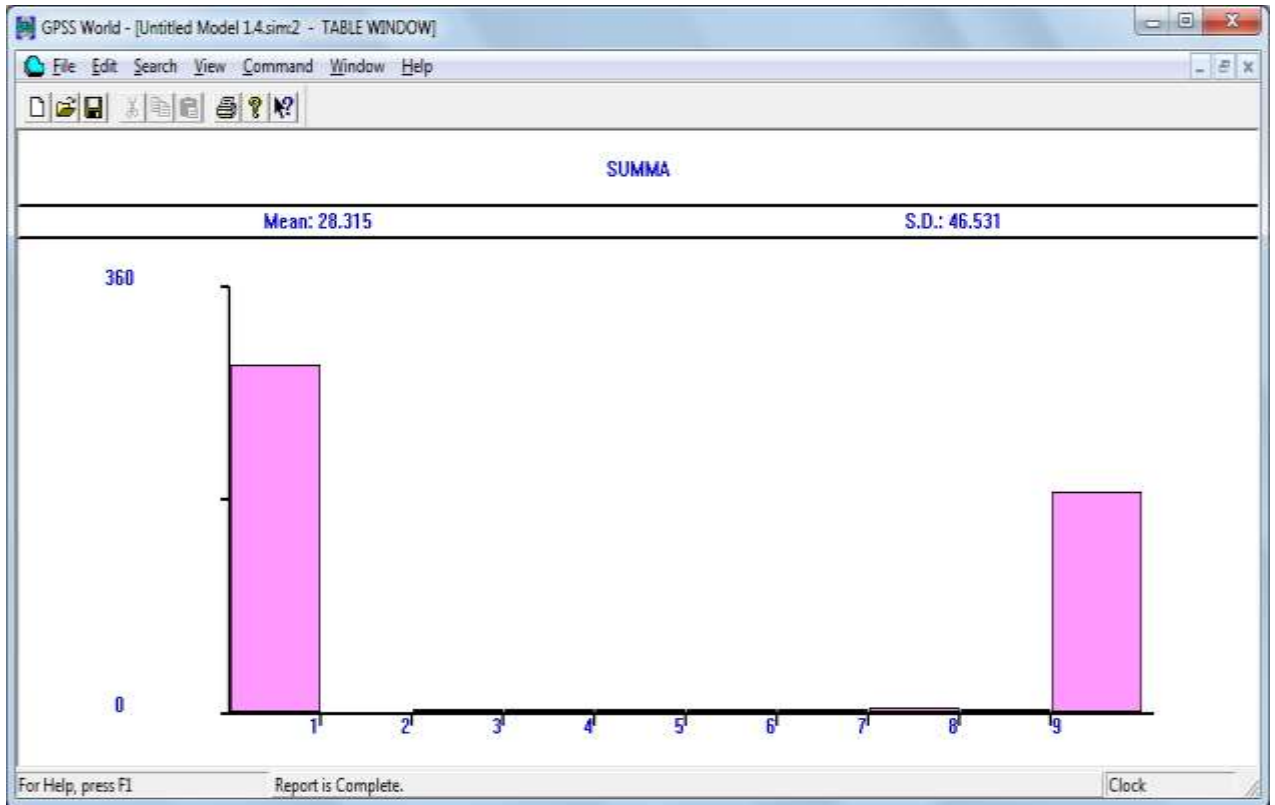


Рис. 3.10.- Гистограмма среднего времени ожидания в очереди при передаче трафика голоса.

3.6 Выводы главе 3

В третьей главе приведены результаты имитационного моделирования оптической в среде GPSS World. Разработана аналитическая и имитационная модель, проведены исследования на данной модели.

Заключение

В первой главе проведен анализ современного состояния оптоволоконных технологии широкополосных сетей доступа. Рассмотрены вопросы особенностей построения оптических сетей доступа нового поколения. Сделан сравнительный анализ технологий PON. Исследованы методы модернизации сетей доступа на основе внедрения технологий пассивных оптических сетей.

Во второй главе разработана математическая модель широкополосной оптической на основе теории массового обслуживания. В качестве основной базовой модели для анализа узловых характеристик МС и СД с предоставлением услуги «Triple Play» необходимо использовать СМО с неоднородным потоком заявок (три класса) и приоритетным обслуживанием с тремя классами относительных приоритетов.

В третьей главе приведены результаты имитационного моделирования оптической в среде GPSS World. Разработана аналитическая и имитационная модель, проведены исследования на данной модели.

Получены зависимости средней задержки и ее среднеквадратическое отклонение от параметров распределении интервалов во входном потоке для всех исследуемых видов трафика и фаз обслуживания.

Список сокращений

Широкополосный доступ	ШПД
Ful Service Access Network	FSAN
Passive Optical Network. Пассивная оптическая сеть	PON
Fiber to the Home. Оптика до дома	FTTH
Time Division Multiple. Временное разделение каналов	TDM
Optical Network Terminal. Оптический сетевой терминал	ONT
Optical Network Unit. Оптический сетевой блок	ONU
Optical Line Terminal. Оптический линейный терминал	OLT
Gigabit PON	GPON
Generic Framing Protocol	GFP
Международный Союз Электросвязи	МСЭ
Час Наибольшей Нагрузки	ЧНН
Set Top Box	STB
Мультисервисная Сеть	МС
Сеть Доступа	СД
Телефония Общего Пользования	ТфОП
Узел Доступа	УД
Digital Subscriber Line. Цифровая абонентская линия	DSL
Customer Relationship Management. Система управления взаимоотношениями с клиентами	CRM
Quality of Service. Качество обслуживания	QoS
Video on Demand. Видео по требованию	VoD
Voice over IP. Технология пакетной передачи речи	VoIP
IP packet Transfer Delay. Задержка передачи IP-пакетов	IPID
IP Television. Телевидение «поверх IP»	IPTV
IP packet Loss Ratio. Коэффициент потерь IP-пакетов	IPLR
General Purpose Simulation System. Общая целевая система моделирования	GPSS
Broadband Remote Access Server. Широкополосный сервер удаленного доступа	BRAS
Система массового обслуживания	СМО
Сеть массового обслуживания	СеМО
Волоконно-оптическая линия связи	ВОЛС
Вероятностно-временные характеристики	ВВХ

Список литературы

1. <http://ru.wikipedia.org/wiki/PON>
2. <http://www.skomplekt.com/tovar/1/0/pon/>
3. <http://www.eltex.kz/model-postroeniya-seti-pon-predostavlenie-uslugi-na-port>
4. Соколов Н.А. Телекоммуникационные сети. - М.: Альварес Паблишинг, 2003.
5. Кучерявый А.Е., Парамонов А.И, Кучерявый Е.А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. М.: ФГУП ЦНИИС, 2008
6. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. Монография /Под ред. О.И.Шелухина - М.: Радиотехника, 2003.
7. Кучерявый А.Е., Пяттаев В.О. Новое терминальное оборудование для пакетных сетей. /Тез. докладов международной конференции «Развитие услуг связи на основе телекоммуникационных технологий нового поколения (NGN-2003)» С. Петербург 2003, с. 55-56.
8. Никитин А.В., Пяттаев В.О., Никульский И.Е., Филиппов А. А. Концепция построения мультисервисной сети оператора связи. //Вестник связи. 2010 №5. - с. 47-49, №7. - с. 41-45.
9. Соколов Н.А. Сети абонентского доступа. Принципы построения. //ЗАО «ИГ» «Энтер-профи», 1999.
10. Никитин А.В., Никульский П.П., Филиппов А.А. Особенности внедрения технологий PON на сети оператора, занимающего существенные рыночные позиции. // Вестник связи. 2009, №8.- с.7-9.
11. ITU-T. Recommendation G.107. The E-model, a computational model for Use intranmission planning.
12. Яновский Г.Г. Оценка качества передачи речи в сетях ГР. //Вестник связи. 2008. №2.-с.91-94.
13. ETSI. Telecommunications and Internet Protocol Harmonization over Networks (TIPHON) Release 3; End-to-End Quality of Service in TIPHON Systems; Part 7: Design guide for elements of a TIPHON connection from end to end speech transmission performance point of view. -TR 101 329-7,2002.
14. Гроднев, И.И. Мурадян А.Г., Шэрафутдинов Р.М. и др. Волоконно-оптические системы передачи и кабели. Справочник - М.: Радио и Связь, 1993.- 264 с.
15. ITU-T Recommendation Y.1541 (02/2006) - Network performance objectives for IP-based services.
16. Рекомендация МСЭ-Т Y.1541 (2006 г.) изменение 1: Новое дополнение X-Пример, показывающий метод расчета IPDV на основе множества сегментов.
17. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. СПб.: Наука, 2001.

18. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. - СПб.: Наука и техника, 2004.
19. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телеграфика и ее приложения. - СПб.: БХВ - Петербург, 2005.
20. Захаров Г.П. Методы исследования сетей передачи данных. М.: Радио и связь. 1982.
21. Нейман В.П. Самоподобные процессы и их применение в теории телеграфика. //Труды МАС. 1999. - № 1(9).- с. 11-15.
22. Галкин А.М., Симонина О.А. Метод расчета характеристик IP-ориентированных мультисервисных сетей с учетом свойств самоподобия трафика. //Труды учебных заведений связи. СПб.: 2005.
23. Горелов Г.В. О применимости методов классической теории телеграфика в исследованиях систем с пакетной коммутацией. Ведомственные и корпоративные сети и системы (ВКСС), 2006, №1 с. 103-107.
24. Вишневикий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.:Техносфера, 2003
25. Алиев Т.Н. Основы моделирования дискретных систем. - СПб, СПбГУ ИТМО, 2009.
26. Kramer W., Langenbach - **Beiz** M. Approximate formulae for the delay in the queuing system G/G/1 /V'Congressbook, S''' Intranet. Telemiffic Congress, Melbome (1976).
27. Суздаев А.В., Чугреев О.С. Передача данных в локальных сетях связи.- М.: Радио и связь, 1987.
28. Симонина О.А., Яновский Г.Г. Характеристики трафика в сетях IP. //Труды учебных заведений связи. СПб., 2004, с.8-14.
29. Боев В.Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World Учебное пособие, БХВ-Петербург, 2004. - 368 с.
30. Учебное пособие по GPSS World. – Казань: Изд-во «Мастер Лайн», 2002.
31. Руководство Пользователя по GPSS World. – Казань: Изд-во «Мастер Лайн», 2002.

Листинг программы

```

GOLOS   QTABLE GOL,500,500,10
TELEV   QTABLE TELE,500,500,10
DANN    QTABLE DAN,500,500,10
SUMMA   QTABLE SUMMAR,1,1,10
        GENERATE      (Exponential(1,0,556))
        ASSIGN   VOIP,100
        QUEUE    GOL
        SEIZE   PON
        DEPART   GOL
        ADVANCE 213
        RELEASE  PON
        TERMINATE
        GENERATE      (Exponential(1,0,1000))
        ASSIGN   IPTV,200
        QUEUE    TELE
        SEIZE   PON
        DEPART   TELE
        ADVANCE 213
        RELEASE  PON
        TERMINATE
        GENERATE      (Exponential(1,0,250))
        ASSIGN   DOIP,300
        QUEUE    DAN
        SEIZE   PON
        DEPART   DAN
        ADVANCE 213
        RELEASE  PON
        TERMINATE
        GENERATE      (Exponential(1,0,200))
        QUEUE    SUMMAR
        SEIZE   BRAS
        DEPART   SUMMAR
        ADVANCE 80
        RELEASE  BRAS
        TERMINATE  1
START 500

```