

Федеральное государственное казенное
военное образовательное учреждение высшего образования
Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

На правах рукописи



Саитов Сергей Игоревич

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА
КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ГОСУДАРСТВА

Специальность: 2.2.15

«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Басов Олег Олегович

Орёл – 2021 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Раздел 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ГОСУДАРСТВА	13
1.1. Исследование современного состояния, принципов функционирования и направлений развития систем мониторинга критически важных объектов	13
1.2. Исследование современного состояния и принципов функционирования многомодальных средств мониторинга состояния технического персонала	19
1.3. Анализ существующих подходов к моделированию и решению задач анализа, синтеза и оптимизации сетей передачи данных систем мониторинга критически важных объектов	26
1.4. Идея реализуемого подхода. Постановка общей и частных задач диссертационного исследования	31
Выводы по первому разделу	35
Раздел 2. МОДЕЛЬ ЗВЕНА СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ БЛОКОВ ДАННЫХ ОТ ОБЪЕМНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФИКА КАК ТРАДИЦИОННЫХ УСЛУГ СВЯЗИ, ТАК И МНОГОМОДАЛЬНЫХ СООБЩЕНИЙ	36
2.1. Постановка задачи моделирования звена СПД, обслуживающей сообщения как традиционных услуг связи, так и в многомодальном представлении	36
2.2. Моделирование звена СПД как приоритетной системы массового обслуживания с градиентным резервированием канального ресурса	42
2.3. Имитационное моделирование звена СПД, обслуживающей сообщения как традиционных услуг связи, так и в многомодальном представлении	58
2.4. Анализ свойств устойчивости, чувствительности и адекватности разработанной модели звена СПД	62
Выводы по второму разделу	70

Раздел 3. АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕНА СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ЗАДАННОЕ КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРОТОКОЛЬНЫХ БЛОКОВ ДАННЫХ ТРАДИЦИОННЫХ УСЛУГ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ ПЕРЕДАЧИ МНОГОМОДАЛЬНЫХ СООБЩЕНИЙ.....	71
3.1. Постановка задачи разработки алгоритма оптимизации характеристик звена СПД с передачей сообщений как в традиционном, так и многомодальном представлении	71
3.2. Разработка алгоритма оптимизации характеристик звена СПД.....	74
3.3. Особенности применения алгоритма оптимизации характеристик звена для определения параметров сетевого тракта СПД системы мониторинга КВО	86
3.4. Анализ свойств алгоритма оптимизации характеристик звена СПД.....	90
Выводы по третьему разделу.....	97
Раздел 4. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА В СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ГОСУДАРСТВА	98
4.1. Основные пути внедрения разработанных модели и алгоритма в СПД с технологией <i>IP/MPLS/Ethernet</i> систем мониторинга критически важных объектов государства	98
4.2. Применение разработанного инструментария для решения расчетных и исследовательских задач оптимизации СПД с технологией <i>IP/MPLS/Ethernet</i>	101
4.3. Разработка физических модулей для СПД с технологией <i>IP/MPLS/Ethernet</i> систем мониторинга критически важных объектов государства	106
4.4. Оценка эффекта от применения разработанных модели и алгоритма в СПД с технологией <i>IP/MPLS/Ethernet</i> федеральной системы мониторинга КВО государства	110
Выводы по четвертому разделу.....	112

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	117
ПРИЛОЖЕНИЕ А	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	131
ПРИЛОЖЕНИЕ В	133

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В последние годы Президент Российской Федерации и Правительство Российской Федерации стали уделять особое внимание надежности и безопасности функционирования стратегических инфраструктурных объектов России, таких как газотранспортные, нефтепроводные и энергетические системы, авто- или железнодорожные сети, водоохранные узлы и пр. [1, 2]. На самом высоком уровне государственного управления неоднократно отмечалось, что именно состояние таких систем определяет потенциально достижимый уровень экономической состоятельности страны, влияет на ее обороноспособность и национальную безопасность. Такие объекты в большинстве случаев являются структурно-сложными и распределенными системами, а многие из них принято относить к критически важным объектам (КВО) государства [3], так как отказ (повреждение) их элементов приводит к существенным негативным военно-политическим и экономическим последствиям, а иногда – к многочисленным человеческим жертвам.

Правительством Российской Федерации разработана и реализуется «Концепция федеральной системы мониторинга (ФСМ) критически важных объектов и потенциально опасных объектов инфраструктуры» [4], определяющая основы государственной политики в области защиты потенциально опасных объектов инфраструктуры и опасных грузов. Для таких объектов разработаны и эксплуатируются разнообразные диспетчерские службы, системы контроля состояния элементов, устройства контроля доступа к автоматизированным рабочим местам (АРМ) операторов и другие аппаратно-программные средства обеспечения защищенности. В рамках этих служб и систем контроля развернуты сети передачи данных (СПД), имеющие специфические архитектуры, профили нагрузки, технологии передачи трафика и режимы функционирования [5–9]. Однако до сих пор для их проектирования и оптимизации применяется научно-методический инструментарий, разработанный для сетей связи общего пользования (ССОП) или вычислительных сетей.

В соответствии со сложившейся практикой [9], информация о событиях в КВО от автоматических датчиков контроля и операторов АРМ объектов передается через системы передачи информации (СПИ) на соответствующие АРМ должностных лиц (ДЛ) органов управления (ОУ). В состав таких СПИ могут входить системы передачи (СП), системы коммутации (СК), а также каналы узкоспециализированных (выделенных) или интегрированных (наложенных) СПД.

Из экономических соображений по этим же каналам и трактам СПД осуществляется предоставление операторам АРМ объектов и ДЛ ОУ традиционных услуг связи (ТУС) и информационных приложений. Таким образом, профиль обслуживаемого трафика в таких СПД существенным образом отличается от профиля трафика традиционных СПД и вычислительных сетей. Вышеизложенное свидетельствует о необходимости проведения системных исследований особенностей совместного обслуживания традиционных сообщений (телефонных, видео, данных и т.д.) и информации состояния КВО в общих СПИ в условиях [5]:

- расширения номенклатуры инфокоммуникационных услуг;
- внедрения новых технологий и приложений, ориентированных на обеспечение безопасности собственно КВО и сетевой инфраструктуры.

Современный период характеризуется еще и тем, что руководством страны перед ведомствами силового блока поставлена задача мониторинга не только технического состояния элементов КВО, но и поведения их персонала, который умышленно или неумышленно может поспособствовать аварийным ситуациям. Перспективной, по мнению большинства экспертов [10], является реализация динамической биометрической регистрации, например, на основе концепции полимодальных инфокоммуникационных систем (ПИКС). Под *модальностями* при этом понимается физически регистрируемые элементы коммуникации (человеко-машинной и/или межличностной), включающие как собственно передаваемую информацию (сообщение), так и информацию о самом индивиде (его состоянии; отношении к сообщению, к собеседнику, к коммуникации и пр.). Исследования показали [11], что дистанционная обработка и контроль информации

в многомодальном представлении аппаратно-программными средствами связи (АПСС) открывает для отечественных спецслужб новые возможности по обеспечению безопасности информации и защищенности КВО государства. Такие приложения позволяют осуществлять дистанционный мониторинг состояния (легитимности, девиантности) персонала, обслуживающего сетевые элементы КВО. Однако для практической реализации концепции ПИКС требуется решение целого ряда модельных и алгоритмических задач, обусловленных новизной предметной области.

Степень разработанности темы исследования. В работах отечественных и зарубежных ученых Ронжина С.Л., Карпова А.А. и др. получены фундаментальные решения по регистрации и распознаванию эмоций [12]. Решены задачи ранжирования модальностей по их вкладу в распознавание свойств индивида, существенных с точки зрения контекста обследования (ситуации) [13]. Однако задачи кодирования и передачи модальностей через каналы и тракты СПД в этих работах не ставились.

В работах Басова О.О., Носова М.В., Зонг Х. и др. предложены способы идентификации пользователя, технологии дистанционного контроля состояния персонала [14, 15]. Однако для передачи информации в модальном представлении в этих работах предполагается выделение дополнительных каналов связи, что существенно удорожает СПД.

Анализ работ российских и зарубежных авторов Башарина Г. П., Гольдштейна Б. С., Ефимушкина В. А., Кучерявого А. Е., Корнышева Ю. Н., Пшеничникова А. П., Rogozinskogo Г.Г., Рослякова А. В., Самуйлова К. Е., Соколова Н. А., Захарова Г.П., Степанова С.Н., Трегубова Р. Б., Цитовича И. И., Шнепса М. А., Iversen V., Ross K., Virtamo J. и др. [6, 16, 17, 18, 19, 20, 60, 85, 92], направленных на решение задачи обеспечения требуемого качества обслуживания заявок в СПД, показал, что в них исследуются системы распределения информации общего пользования и не учитываются особенности, обусловленные принципами построения и условиями функционирования СПД КВО.

Проведенный предметно-классификационный анализ предметной области позволяет сделать вывод, что именно характеристики СПД ограничивают возможность внедрения систем мониторинга легитимности и девиантности операторов АРМ. Эти ситуации являются следствием постоянно возрождающегося противоречия между потребностью в расширении перечня субъектов и параметров контроля для формирования более полного представления о состоянии КВО и текущим состоянием СПД. При этом, формальные средства описания процессов передачи блоков данных через СПД, реализующих как предоставление ТУС, так и передачу контрольной информации от операторов АРМ КВО в многомодальном представлении, до сих пор отсутствуют.

Таким образом, своевременными и злободневными являются задачи разработки моделей и алгоритмов, способов и технологий, обеспечивающих повышение защищенности КВО государства и качества обслуживания соответствующих абонентов СПД через существующие и перспективные каналы СПД (в том числе с технологией *IP/MPLS/Ethernet*) за счет организации дополнительных трактов обмена информацией, в том числе в многомодальном представлении, с минимизацией затрат канального ресурса. При этом во вновь разрабатываемых формализмах требуется учесть специфику сообщений в многомодальном представлении передачи через СПД с КП.

Объект исследования: звено СПД в системе мониторинга критически важных объектов государства.

Предмет исследования: процессы передачи блоков данных в звене СПД, а также модели и алгоритмы обработки, передачи и приема информации, в том числе в многомодальном представлении.

Цель исследования: повышение степени использования ресурсов пропускной способности звена СПД системы мониторинга КВО государства за счет организации в них дополнительных трактов обмена информацией в многомодальном представлении с обеспечением заданного качества обслуживания абонентов СПД традиционными услугами связи.

Основной научной задачей является разработка новых и усовершенствование известных моделей звена СПД и алгоритмов оптимизации его характеристик и их практической реализации.

Достижение этой цели требует решения следующих **частных задач**:

1. Определение условий и возможности реализации дополнительного тракта передачи сообщений с модальностями оператора по текущим параметрам ресурса пропускной способности, их загрузки и качества обслуживания ТУС.

2. Разработка математической модели звена СПД, учитывающей дисциплину обслуживания с приоритетами, прерыванием и резервированием канального ресурса (РКР), определяющую зависимость качества обслуживания от характеристик гетерогенного трафика.

3. Разработка имитационной модели звена СПД для процессов обслуживания гетерогенного трафика.

4. Разработка и реализация в виде программы для ЭВМ алгоритма оптимизации характеристик звена СПД, обеспечивающего заданное качество обслуживания ТУС в условиях реализации дополнительных трактов передачи многомодальных сообщений.

5. Разработка научно-технических предложений по применению систем передачи многомодальной информации в СПД систем мониторинга КВО государства.

6. Исследование достоверности полученных результатов и оценка эффекта от применения разработанного инструментария.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Модель звена СПД, учитывающая зависимость качества обслуживания блоков данных от объемно-временных характеристик трафика как традиционных услуг связи, так и многомодальных сообщений;

2. Алгоритм оптимизации характеристик звена СПД, обеспечивающий заданное качество обслуживания протокольных блоков данных традиционных услуг связи в условиях реализации дополнительных трактов передачи многомодальных сообщений;

3. Научно-технические предложения по применению систем передачи многомодальной информации в СПД систем мониторинга критически важных объектов государства.

Научная новизна работы заключается в формальном описании зависимости качества обслуживания блоков данных ТУС и многомодальных сообщений в звене СПД как в системе массового обслуживания (СМО) с градиентным РКР от объемно-временных характеристик гетерогенного трафика.

Теоретическая значимость работы заключается в дальнейшем совершенствовании теории сетей связи с коммутацией пакетов в направлении разработки моделей и алгоритмов оптимизации характеристик звена СПД на базе инструментария СМО с градиентным РКР, в которых наряду с протокольными блоками данных (ПБД) ТУС обслуживаются блоки данных информации в многомодальном представлении.

Практическая значимость работы состоит в доведении разработанных модели и алгоритма оптимизации характеристик звена СПД до уровня их программной и аппаратной реализации, обеспечивающих как решение расчетных и исследовательских задач практики построения полимодальных и гибридных инфокоммуникационных систем, так и применение средств многомодальной идентификации в реальных системах мониторинга КВО государства.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач в работе использованы методы теории систем, теории множеств, теории надежности, теории массового обслуживания, теории вероятностей, теории и методы оптимизации. Для практической реализации осуществлялось компьютерное моделирование с использованием приложения РТС Mathcad, имитационное моделирование в программной среде AnyLogic. **Обоснованность** полученных результатов обеспечивается корректной постановкой задач моделирования и оптимизации, решаемых в диссертации, использованием апробированного инструментария, математически адекватного описываемым процедурам и функциям, выполняемым СПД и ее отдельными элементами.

Степень достоверности полученных результатов обусловлена строгостью использования математического аппарата, сопоставлением с результатами, полученными другими исследователями, а также согласованностью теоретических выкладок, приведенных в работе, с результатами имитационного моделирования и натурных экспериментов.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований, полученные в диссертации, использованы в научно-исследовательской и практической деятельности АО «НТЦ ВСП «Супертел ДАЛС», АО «НИИ «Рубин», а также нашли свое отражение в материалах НИОКР «Разработка методических рекомендаций по строительству внутри узловых волоконно-оптических линий связи» («Круговорот», акт приемки от 18 декабря 2018 г. № 6414).

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на IX Всероссийской научно-практической конференции «Территориально распределенные системы охраны» (г. Калининград, 2016 г.), Международной научно-технической конференции «Проблемы фундаментальной и прикладной информатики в управлении, автоматизации и мехатронике» (г. Курск, 2017 г.), XI Всероссийской межведомственной научной конференции «Актуальные направления развития систем охраны, специальной связи и информации для нужд органов государственной власти Российской Федерации» на базе Академии ФСО России (г. Орел, 2019 г.), 14-й межведомственной научно-практической конференции МИНИТ ФСБ России (г. Москва, 2020 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях, изданных в 5 ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК и Scopus при Министерстве образования и науки Российской Федерации [54, 55, 72, 73, 84, 88,], 3 патентах РФ на изобретение [97, 98, 99], 2 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ [41, 100], 1 свидетельстве о государственной регистрации базы данных для ЭВМ [40].

Личный вклад автора. Все результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены

автором самостоятельно. Во всех совместно опубликованных статьях и докладах соискателю принадлежит ведущая роль при постановке и решении частных научных задач, а также обобщении полученных результатов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 105 наименований. Основной текст диссертации изложен на 134 страницах и содержит 37 рисунков и 5 таблиц.

Раздел 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ГОСУДАРСТВА

1.1. Исследования современного состояния, принципов функционирования и направлений развития систем мониторинга критически важных объектов

Современная геополитическая обстановка сопряжена с расширением перечня угроз национальным интересам Российской Федерации. Западный мир разрабатывает различные концепции противоборства России, среди которых особая роль отводится воздействию на объекты критически важной инфраструктуры нашего государства [21]. Рассматриваются варианты как разрушающего информационного, диверсионного и агентурного воздействия на железнодорожные станции и узлы, мосты и тоннели, пункты транзита и распределения энергии и углеводородов, узлы инфокоммуникационных систем и другие объекты.

В соответствии с Федеральным законом Российской Федерации № 68-ФЗ от 21.12.1994 «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [4] в Российской Федерации создана и постоянно совершенствуется Федеральная система мониторинга состояния КВО государства, важнейшими подсистемами которых являются региональные подсистемы ФСМ и соответствующие СПД. Тип системы мониторинга и технология функционирования ее СПД существенно определяется классом КВО (рис. 1.1) [22].

Мониторинг КВО федерального уровня государства традиционно обеспечивается на организационно-техническом и технологическом уровнях, реализуя задачи идентификации 1) технического состояния элементов [23–27]; 2) работоспособности средств управления [28, 29]; 3) легитимности персонала [30, 31]. При этом системы мониторинга технического состояния элементов КВО и органов управления (АРМ) постоянно совершенствуются в соответствии

с развитием компонентной базы и технологий контроля. Иная ситуация с мониторингом поведения самих операторов АРМ КВО.

Критически важные объекты		
По значимости	Объекты федерального уровня	
	- объекты, в которых размещены аппараты высших органов государственной власти и управления; - объекты, которые могут использоваться террористами или террористическими организациями в целях нарушения государственной безопасности, дестабилизации государственного строя, либо оказания воздействия на принятие решений высшими органами государственной власти для побуждения их к совершению действия в интересах террористов; - объекты, уничтожение или прекращение действия которых представляет угрозу для национальной (информационной, экономической, военной, внешнеполитической, экологической) безопасности Российской Федерации.	
	Объекты территориального и муниципального уровня	
	- объекты, в которых размещены аппараты органов государственной власти и управления субъектов Российской Федерации; - объекты, уничтожение или прекращение действия которых представляют угрозу информационной, экономической или экологической безопасности субъекта Российской Федерации.	
По видам угроз	Объекты субъектового уровня	
	объекты, уничтожение или прекращение действия которых приводит к существенному ухудшению безопасности жизнедеятельности населения, проживающего на этих территориях.	
	Ядерно опасные (атомные электростанции, предприятия ядерно-оружейного комплекса)	Радиационно опасные (спецкомбинаты «Радон», места хранения жидких радиоактивных отходов отработанного ядерного топлива и др.)
	Химически опасные (предприятия нефтехимического, металлургического, машиностроительного, оборонного производства, пищевой промышленности)	Биологически опасные (крупные предприятия по производству, переработке и хранению сельхозпродукции и др.)
По уровням угроз	Гидродинамически опасные (крупные гидротехнические сооружения промышленного и водохозяйственного обеспечения)	Объекты государственного управления, информационной и телекоммуникационной инфраструктуры
	Техногенно опасные (крупные железнодорожные узлы, морские порты, аэропорты в крупных городах, метрополитены, мосты и тоннели длиной более 500 м., тепловые электростанции, электроподстанции и магистральные линии электропередач)	Пожаровзрывоопасные (магистральные газо-, нефте- и продуктопроводы, газоконденсаторные и нефтеперекачивающие станции, а также хранилища сжиженных газов и нефти, крупные предприятия по производству и переработке жидкофазных или твердых взрывоопасных материалов);
	1 класс (федеральные или трансграничные ЧС. Количество пострадавших свыше 500 человек, либо размер материального ущерба свыше 500 млн. рублей)	
	2 класс (региональные ЧС. Количество пострадавших не более 50, но до 500 человек, либо размер материального ущерба свыше 5 млн. рублей, но не более 500 млн. рублей)	
По уровням угроз	3 класс (межмуниципальные ЧС. Количество пострадавших не более 50 человек, либо материальный ущерб не более 5 млн. рублей)	
	4 класс (муниципальные ЧС. Количество пострадавших не более 50 человек, либо размер материального ущерба не более 5 млн. рублей)	
	5 класс (локальные ЧС. Количество пострадавших не более 10 человек, либо размер материального ущерба не более 100 тыс. рублей)	

Рисунок 1.1 – Классификация критически важных объектов

Исследования показывают, что методы и способы защиты АРМ КВО, разработанные еще в начале 2000-х годов, заключаются, как правило, только в парольном или биометрическом разграничении доступа операторов/администратора (идентификацию легитимности пользователя АРМ), когда как контроль действий операторов в ходе его деятельности реализован ограниченно и несистемно [32].

Военно-политическая обстановка в мире требует существенного совершенствования методов и средств защиты элементов КВО. В ответ на миротворческую миссию России в Сирийской Арабской Республике, пуск Крымского моста, реализацию российско-индийских и российско-китайских проектов в атомной энергетике, подготовку проекта «Северный поток-2» и строительство газопроводов «Сила Сибири» и «Турецкий поток» активизировались усилия спецслужб ряда мировых держав во главе с США по снижению эффективности деятельности федеральных органов исполнительной власти России.

Особое внимание в данном контексте приобретает противоборство в информационном пространстве. Черeda «цветных» революций и текущая ситуация в Украине однозначно дают понять, что технологии воздействия на сознание людей окончательно вышли за пределы психологических лабораторий и стали неотъемлемой частью окружающей реальности. Субъектами этих воздействий оказываются в том числе легитимные операторы АРМ КВО. В связи с вышеизложенным, системы дистанционного мониторинга КВО в срочном порядке дополняются подсистемами мониторинга поведения *легитимных операторов АРМ* с целью выявления их *девиантности* [25]. Вариант классификации внедряемых в современные КВО систем мониторинга операторов АРМ представлен на рисунке 1.2. Для структурно-сложных распределенных КВО федерального уровня особый интерес представляют сетевые системы ограничения доступа как к физическим объектам, так и информации. При этом идентификация пользователя осуществляется комплексно (одновременно по нескольким признакам) с комбинированным (местно-дистанционным) считыванием идентификационных признаков.

Из представленной классификации видно, что информационное обеспечение современных систем мониторинга КВО отличается существенным разнообразием и сложностью. А с учетом необходимости непрерывного контроля действий операторов АРМ построение СПД системы мониторинга КВО становится сложной научно-технической задачей.

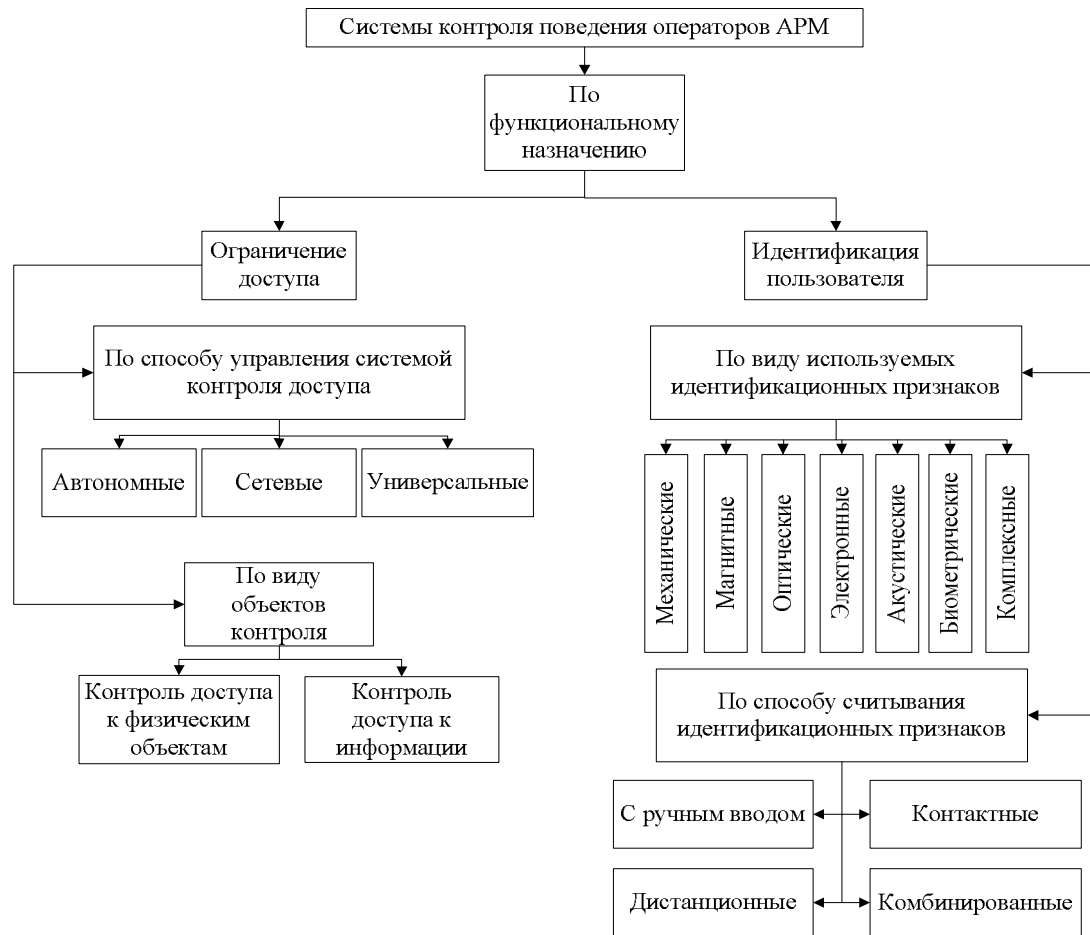


Рисунок 1.2 – Классификация систем контроля поведения операторов АРМ

Исследования [26] показали, что структура системы удаленного мониторинга операторов АРМ КВО и состав инфокоммуникационного обеспечения в такой системе существенно зависит от архитектуры контролируемого инфраструктурного объекта (рис. 1.3). При *децентрализованном* варианте (рис. 1.3, а) агенты контроля состояния оператора (АКСО), локальные базы данных

(БД) и информационно-аналитическая система (ИАС) идентификации оператора встраиваются непосредственно в контролируемый АРМ. При этом через каналы СПД передается готовое *суждение* v_i о легитимности/девиантности i -го оператора. Очевидно, что в таких системах мониторинга расходуется небольшой объем канального ресурса СПД, хотя периодически, для обновления локальных БД от централизованной БД, потребуется дополнительный расход пропускной способности СПД.

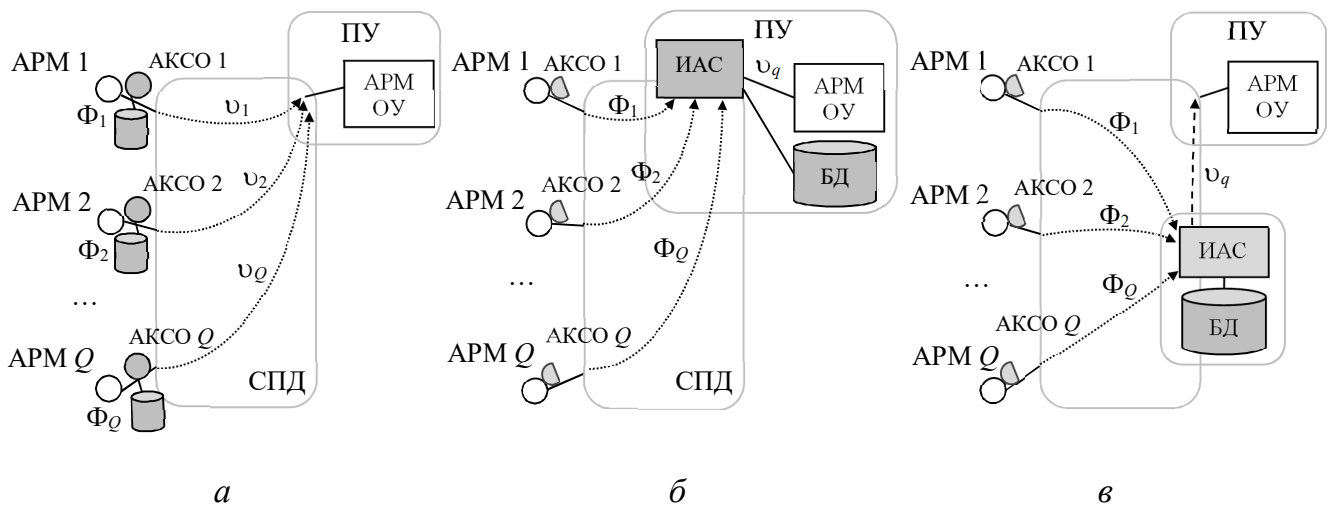


Рисунок 1.3 – Варианты размещения агентов и баз данных контроля состояния операторов АРМ КВО: *a* – децентрализованный (АКСО – активные);

б – централизованный (АКСО – пассивные);

в – иерархический децентрализованный

Однако, как показывает практика применения соответствующих АРМ, существует реальная опасность модификации программного модуля АКСО+ИАС+БД субъектом контроля. В настоящее время такой вариант построения используется только для КВО, в которых предусмотрено нахождение в одном помещении нескольких АРМ операторов. Примерами являются такие пункты управления (ПУ) как пульт управления тоннелями Комплекса защитных

сооружений г. Санкт-Петербурга или Центральный диспетчерский пункт Крымского моста, в каждом из которых работают не менее 3 операторов.

Централизованный вариант (рис. 1.3, б) построения системы подразумевает обработку данных и формирование суждения υ_q о состоянии всех операторов в АРМ ОУ. С этой целью в АРМ ОУ инсталлируются ИАС и глобальная БД. В ходе функционирования КВО через каналы СПД к АРМ ОУ от пассивных АКСО, встроенных в АРМ операторов, передается вся *первичная информация состояния* $\{\Phi_q\}$, $q = 1, \dots, Q$. Суждение υ_q формируется уже в ОУ. С учетом данных от датчиков технического состояния элементов КВО нагрузка на СПД оказывается значительной, в связи с чем такой вариант целесообразно применять только для компактных объектов (например, для мониторинга атомных электростанций).

Исследования показали, что для крупных иерархических многоуровневых КВО, например, газотранспортных систем или энергетических сетей, в которых АРМ операторов размещены автономно на большом удалении как от друг от друга, так и от ОУ, высокую эффективность демонстрирует вариант построения, при котором узел ИАС+БД размещается отдельно от АРМ ОУ. Место его размещения в КВО определяется путем решения задачи оптимизации топологической структуры с учетом ограничений на устойчивость, безопасность и ресурсоемкость каждой из систем передачи информации (рис. 1.4), составляющих СПД.

Однако и у такого способа имеются свои недостатки: при введении дополнительных субъектов контроля или увеличения перечня контролируемых параметров каналы СПД могут быть перегружены.

Таким образом, внедрение средств удаленного контроля операторов АРМ КВО приводят к тому, что канального ресурса имеющейся СПД становится недостаточно. При этом организация новых СПД с КП или аренда дополнительного канального ресурса могут быть невозможны по организационно-техническим или иным причинам.

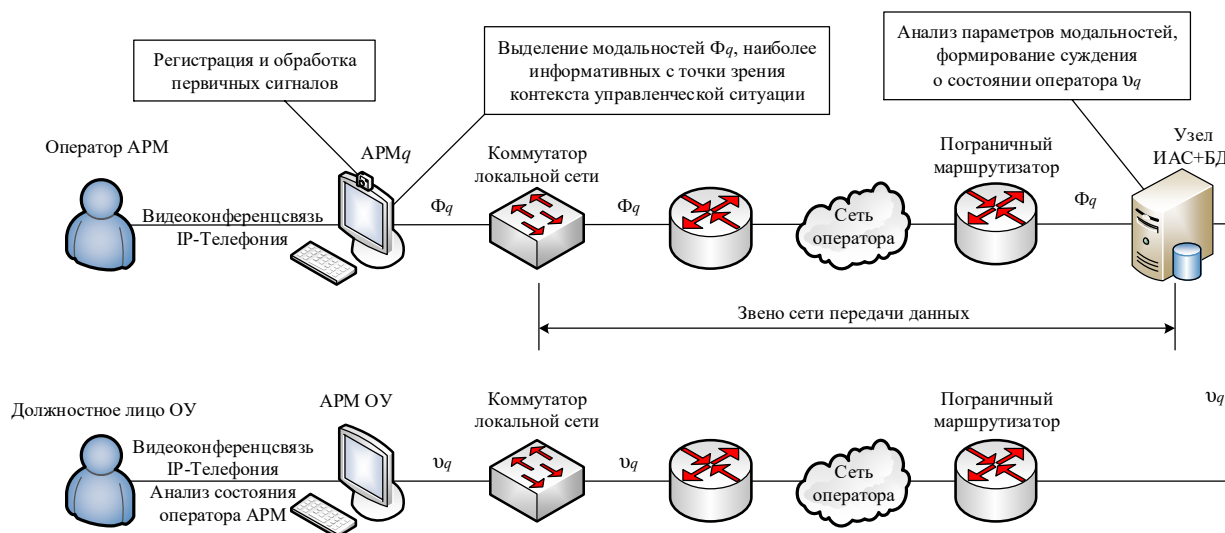


Рисунок 1.4 – Вариант структуры системы передачи информации СПД

Следовательно, в предметной области имеет место постоянно возрождающееся *противоречие* между *потребностью расширения* перечня субъектов и параметров контроля для более полного представления текущего состояния КВО и *ограниченными возможностями* существующей СПД. В связи с этим в рамках данного исследования предлагается рассмотреть возможность применения в системах передачи информации ФСМ КВО многомодального представления информации состояния субъекта контроля [10].

1.2. Исследование современного состояния и принципов функционирования многомодальных средств мониторинга состояния технического персонала

Одним из важнейших КВО государства являются объекты критической информационной инфраструктуры [4, 9, 33]. Так как эти объекты по своему предназначению и технологиям представляют собой собственно инфокоммуникационные системы, то именно на таких объектах в первую очередь началось внедрение средств многомодальной динамической аутентификации [34]. Причиной этого явились объективные данные об ущербе, нанесенному Российской Федерацией штатным персоналом АРМ инфокоммуникационных систем.

Например, по данным аналитической компании InfoWatch [35] только за 2016 год в Российской Федерации зафиксировано 213 случаев утечки секретной информации с объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ). В 62% случаев причиной инцидента стали легитимные сотрудники организаций, которые имели доступ к этой информации. Внедрение многомодальных интерфейсов в КИИ позволило существенно повысить безопасность информации и защищенность самой информационной инфраструктуры [36]. Следовательно, перспективным является исследование данного опыта КИИ и его применение для СПД сложно-распределенных КВО других классов.

В настоящее время контроль над сотрудниками, имеющими доступ к АРМ КВО государства, основан на разграничении прав доступа пользователей и психофизиологическом обследовании (ПФО) индивида [11, 37]. Под ПФО понимается комплекс мероприятий, направленных на изучение физиологических механизмов, которые обеспечивают реализацию психических процессов и явлений. Но как видно из примера, приведенного выше, такая политика безопасности не является достаточной. Результат ПФО является следствием уже совершенного проступка. Практика показывает, что реализация даже двухфакторной аутентификации не снимает угрозу злонамеренных действий с конфиденциальной информацией о КВО или угрозу модификации данных, приводящую к аварии КВО. Выходом из сложившегося положения дел считается разработка и внедрение средств определения девиантности (отклонения от нормы) пользователя в процессе работы [14].

С этой целью были разработаны и внедряются средства динамической многомодальной аутентификации (ДМА). Теоретической основой этого метода является многомодальное представление информации, известное медицинским наукам вследствие морфологического представления естественной коммуникации между людьми [10, 11]. Позже данные подходы стали использоваться при разработке средств человеко-машинного взаимодействия [8, 17, 38]. Было выяснено, почему общение людей через АРМ, оборудованные традиционными

интерфейсами на основе клавиатуры и мыши, существенно уступает по информативности естественной межличностной коммуникации (рис. 1.5).

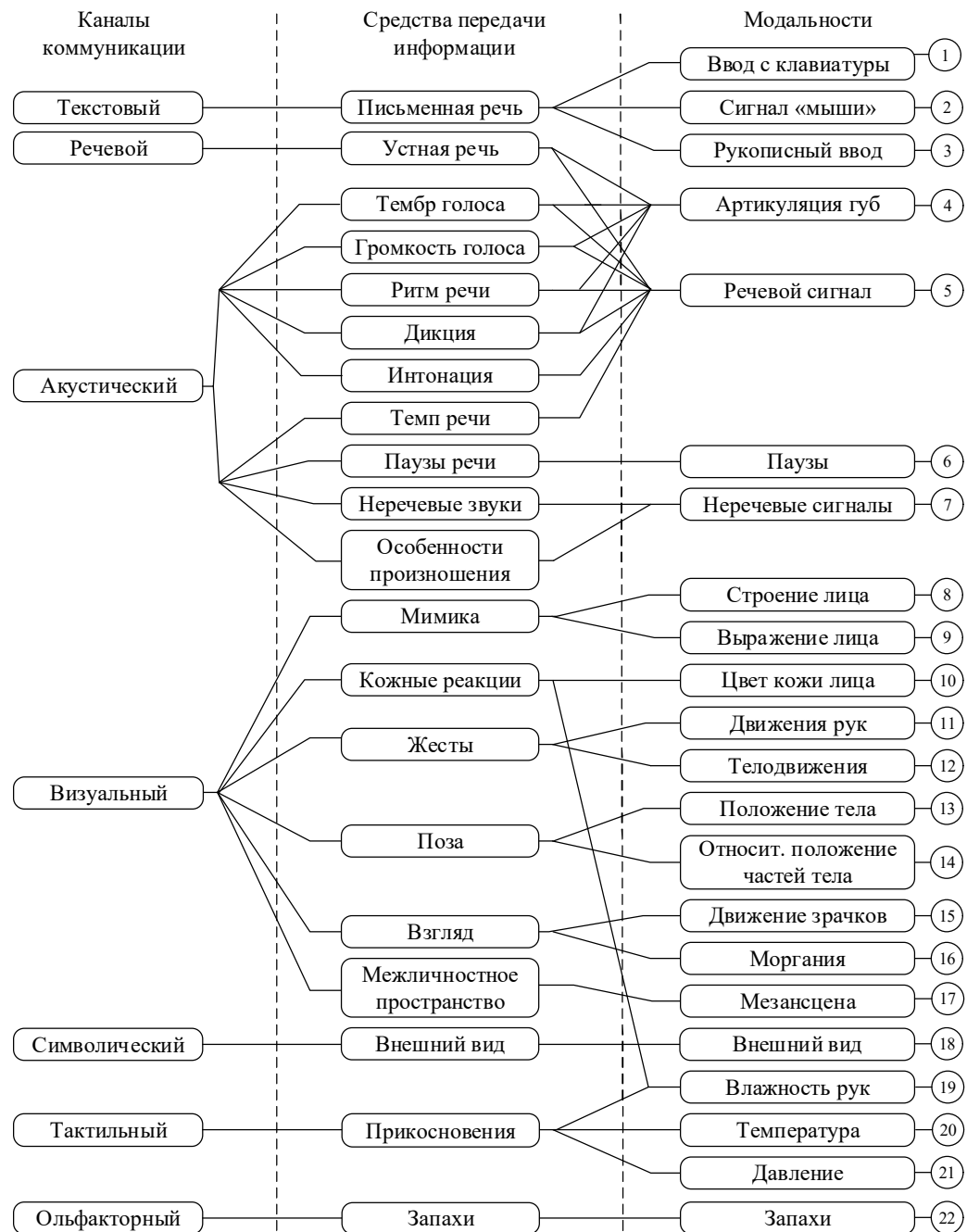


Рисунок 1.5 – Многомодальный характер межличностной коммуникации

Например, при личной беседе опытный управленец может уверенно определить психофизическое состояние подчиненного, в том числе

его девиантность, когда как традиционные АРМ, даже с видеокамерой этого не позволяют. Дело оказалось в том, что типовые приложения и услуги связи настроены на передачу только семантики сообщений. В модальностях заключена не только семантика, но и отношение индивида к этой информации, сеансу, корреспонденту.

В настоящее время в России и за рубежом многомодальные интерфейсы уже используются в прикладных областях: дистанционной медицине, робототехнике, системах виртуальной реальности и т.д. Больших успехов отечественная наука достигла в разработке человеко-машинных интерфейсов для людей с ограниченными возможностями, когда АРМ преобразует модальности, которые данный оператор не в состоянии регистрировать из-за своего текущего состояния, в модальности, которые воспринимаются им с необходимой достоверностью [10, 39]. Данные наработки могут быть использованы для совершенствования инфокоммуникационного обеспечения систем мониторинга состояния операторов АРМ КВО.

Недостатки классических парольных и атрибутных методов идентификации и аутентификации пользователя АРМ известны [6, 8, 14, 21]. Во-первых, существует возможность кражи или взлома пароля. Во-вторых, после ввода пароля возможна подмена легитимного пользователя. В-третьих, в типовых системах аутентификации и идентификации нет средств обнаружения девиантности легитимного пользователя в процессе эксплуатации АРМ.

Многомодальное представление информации при известных результатах ПФО позволяет кроме сообщений от операторов АРМ, обусловленных функциональными обязанностями, получать сведения об их психофизическом состоянии. При наличии видеокамеры на базе визуальных, клавиатурных [40, 41] и речевых сообщений можно не только идентифицировать легитимность пользователя и принять видео, текстовую и аудио информацию, которую собственно хочет передать оператор АРМ КВО. Становится возможным «снять» (рис. 1.6) с помощью АКСО модальности $\Phi_q(t_c) = \{IM_j\}$, характеризующие положения его взгляда и мимических мышц, клавиатурного почерка и параметров

речи (основной тон, формантный состав и пр.), свидетельствующие о его текущем состоянии $\cup_q(t_c) = F(S_{y\phi})$.

При этом сведения, полученные при ПФО в виде массива $\{\Phi_{\text{ПФО}q}\}$, используются для первоначального обучения распознающей системы [10]. Дообучение системы производится в ходе вводного тестирования индивида по заранее подготовленным последовательностям заданий, позволяющим идентифицировать его клавиатурный почерк, речевые особенности, мимику и другие характеристики в различных психологических состояниях $\{\Phi_{\text{Т}q}\}$.

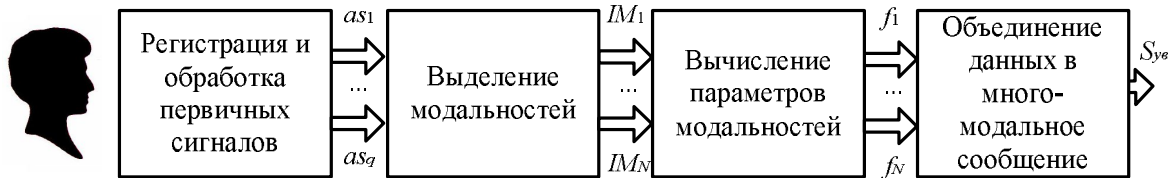


Рисунок 1.6 – Преобразование входных сигналов АКСО в сообщение $S_{y\phi}$

Такое тестирование в настоящее время представляет собой автоматизированные версии отдельных методик, имеющие стандартизованные вербальные и статические невербальные [11, 42, 43] стимулы (рис. 1.7).

В результате отбора и тестирования в БД ИАС накапливается необходимый объем сведений $(\{\Phi_{\text{ПФО}q}\} + \{\Phi_{\text{Т}q}\})$ о конкретном операторе, обеспечивающий впоследствии его идентификацию «на лету», а также распознавание его девиантности с требуемой достоверностью [11, 43]. Исследования показали, что выделение при помощи АКСО и передача всех известных модальностей в исходном виде через СПД нецелесообразна, так как потребует большого расхода канального ресурса как при коммутации каналов (КК, $SyTDM$), так и в трактах СПД с КП ($StTDM$). Кроме того, в различных условиях для разных КВО информативность одних и тех же модальностей будет существенно варьироваться.

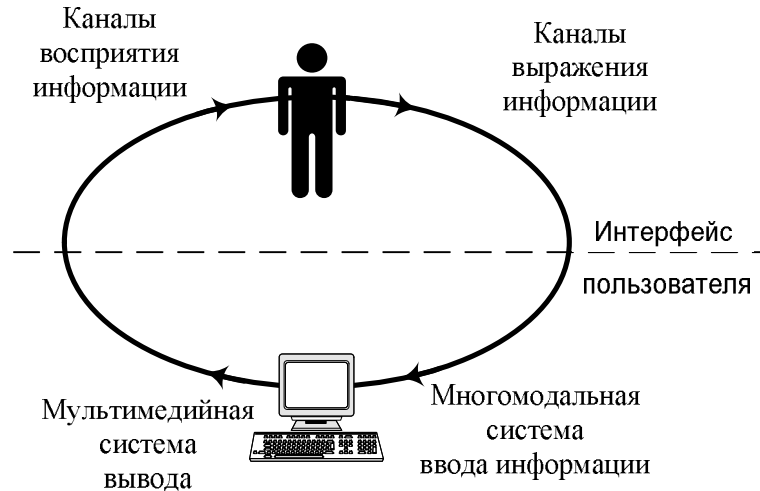


Рисунок 1.7 – Общая организация тестирования индивида для получения характеристик его модальностей

К настоящему времени уже определены состав и иерархия эталонного $\{\Phi_{\text{ПФ}O_q}\} + \{\Phi_{Tq}\}$ и текущего $\{\Phi_q\}$ массивов данных для основных классов КВО. В связи с этим далее считаются известными реализуемые в системе подходы к выделению требуемого множества и ранжированию модальностей для АРМ различных КВО. Также предполагается, что выделенное множество модальностей обеспечивает идентификацию состояния оператора АРМ КВО с требуемой достоверностью [43]

$$D(t_c) \geq D^*, \quad (1.1)$$

где $D(t_c)$ – полученное в момент времени t_c , а D^* – требуемое значение показателя достоверности оценки психофизического состояния $\cup_q(t_c)$ оператора АРМ КВО.

В ходе функционирования АРМ КВО сообщения модальностей от пассивного АКСО (рис. 1.6) в цифровом коде передаются на сетевую плату АРМ (рис. 1.8), где по известному алгоритму формируются протокольные блоки данных (ПБД), соответствующие сетевой технологии, применяемой в звене СПД (рис. 1.4).

Передача этих ПБД в ИАС производится по заданной программе или «по возмущениям», что определяется также типом и классом КВО.



Рисунок 1.8 – Структура взаимодействия операторов АРМ КВО и технических средств ввода информации

На пути внедрения средств ДМА имеются сложности, обусловленные тем, что модальности несут информацию о девиантности индивида в конкретный момент времени t_c не каждая по отдельности (автономно), а совместно. Поэтому условием реализации ДМА состояния операторов АРМ КВО является соблюдение требования синхронизации модальностей [10, 44] на приеме. Этот факт определяет особенности обслуживания трафика сообщений модальностей в СК СПД.

Таким образом, внедрение средств мониторинга состояния оператора на основе ДМА, с одной стороны, позволяет повысить защищенность КВО от «человеческого фактора», с другой – создает на СПД дополнительную нагрузку в виде потока ПБД сообщений модальностей. Этот поток имеет свои особенности, отличные от характеристик ПБД традиционных услуг связи, что потребует учесть при его обслуживании в СК.

1.3. Анализ существующих подходов к моделированию и решению задач анализа, синтеза и оптимизации сетей передачи данных систем мониторинга критически важных объектов

СПД с КП, рассматриваемая в исследовании, предназначена для:
 передачи информации между операторами АРМ и ДЛ ОУ о состоянии контролируемых параметров узлов, агрегатов, подсистем и элементов КВО;
 инфокоммуникационного обеспечения ДЛ ОУ и технического персонала традиционными услугами связи.

Нагрузочные параметры данных источников информации учитывались при проектировании этой СПД и считаются далее достоверно известными.

В связи с внедрением средств мониторинга состояния операторов АРМ имеет место появление дополнительных источников трафика и организуются дополнительные тракты передачи информации в СПД. Следовательно, требуется решить задачи моделирования, анализа и синтеза СПД с тем, чтобы обеспечить *требуемое качество обслуживания* и минимизировать вероятность перегрузки каждого отдельного звена (рис. 1.4) и СПД в целом.

Здесь и далее качество обслуживания трактуется в соответствии с [5, 45–49] (рис. 1.9). Под традиционными услугами связи (ТУС) далее понимаются *все услуги и приложения*, которые применялись (использовались) в СПД до внедрения средств динамической многомодальной аутентификации в систему мониторинга КВО. Это позволит выделить в поступающем потоке заявок два типа нагрузки:

обусловленный вызовами ТУС;
 сформированной в результате работы средств ДМА.

В соответствии с изложенным, дальнейшему исследованию подлежат только те научно-методические средства анализа, синтеза и оптимизации сетей передачи данных, которые оперируют *измеримыми* с заданной точностью *характеристиками* и изученными *количественными зависимостями*. Подробный анализ основных методов анализа СПД подробно приведен в [16, 50]. Ниже данный инструментарий анализируется в части, касающейся настоящего исследования.

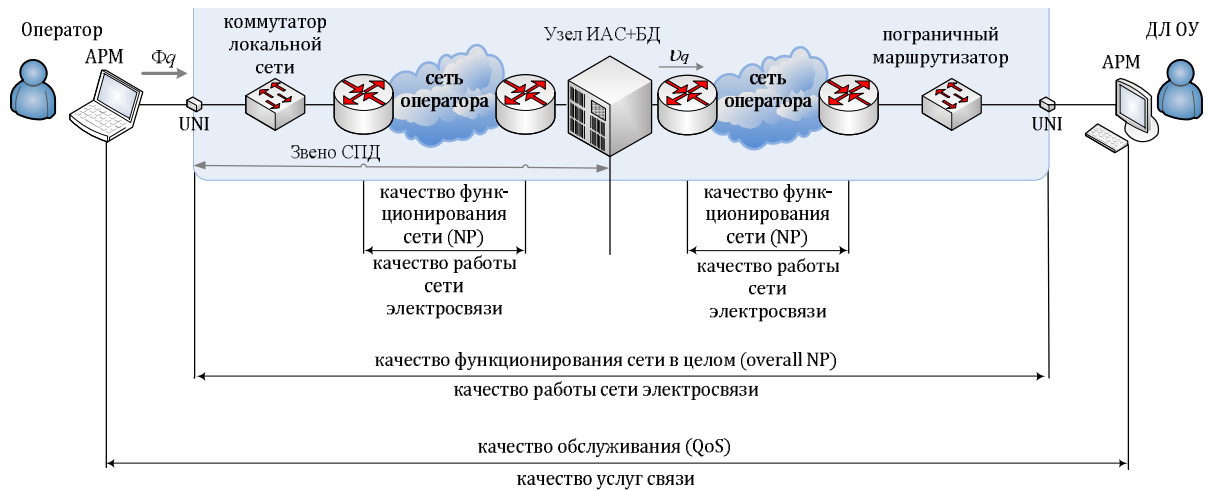


Рисунок 1.9 – Структурная модель качества в системе передачи информации
СПД системы мониторинга КВО

Исследование различных методов анализа и оптимизации СПД, в том числе с технологией *IP/MPLS/Ethernet*, показало, что наиболее методологически разработанными и применяемыми на практике математическими аппаратами до сих пор являются теория массового обслуживания (ТМО) и теория графов (ТГ). На базе выделенного инструментария построено и широко используется большое количество как интегральных, так и частных моделей элементов СПД.

1. Инструментарий систем массового обслуживания (СМО) является наиболее применяемым математическим аппаратом, примененным для анализа СПД. В фундаментальных работах [18, 51] обосновываются основные допущения, которые в настоящее время позволяют получить аналитические зависимости для оценки показателей качества современных СПД. Так, например, пусть на вход звена СПД поступает n потоков заявок на обслуживание (вызовов), каждый из которых описывается моделью примитивного (простейшего) потока. Условие применимости модели простейшего или примитивного потоков выступает система неравенств [18]:

$$\begin{cases} N_k \geq 15 \cdot V, & \text{условие формирования простейшего потока;} \\ N_k < 15 \cdot V, & \text{условие формирования примитивного потока.} \end{cases} \quad (1.2)$$

Здесь для модели примитивного потока принимается, что общее число источников N_k ($k = \overline{1, n}$), формирующих каждый поток нагрузки, ограничено ($N_k \leq 100$). Интенсивность поступления заявок k -го потока $\lambda_k(i_k)$ прямо пропорциональна числу свободных источников $\lambda_k(i_k) = \alpha_k \cdot (N_k - i_k)$, где α_k – интенсивность потока заявок от одного источника k -го потока в свободном состоянии, i_k – число заявок k -го потока, находящихся на обслуживании.

Для модели простейшего потока число источников нагрузки N_k , формирующих каждый поток нагрузки, не ограничен ($N_k > 100$), а в идеальном случае $N_k > 500$. Поступление заявок k -го потока ($k = \overline{1, n}$) подчиняется закону Пуассона. Интенсивность поступления заявок k -го потока λ_k .

Длительности обслуживания заявок k -го потока являются случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону, и не зависят друг от друга и от других входных потоков. Среднее время занятия канального ресурса обслуживанием одной заявки k -го потока равно $\frac{1}{\mu_k}$, где μ_k – интенсивность обслуживания заявок k -го потока. Для современных приложений СПД с КП принято [20], что обслуживания одной заявки k -го потока необходимо b_k (целое число) единиц канального ресурса (ЕКР) линии связи.

Система обслуживания определяется числом обслуживающих приборов V . Для СПД СК скорость передачи информации в линии связи выражается в ЕКР – V (целое число).

Способ обслуживания может быть, как с явными потерями, так и с ожиданием. При этом считается, что потерянная заявка повторно в систему не поступает. Порядок обслуживания может быть без приоритета, с абсолютным или относительным приоритетом.

Известно, что «аппроксимация независимостью Клейнрока» состоит в допущении о независимости потока заявок в каждой СМО от процедуры обслуживания заявок в других СМО, при этом считается, что поток заявок стационарен, а время между соседними заявками и время обслуживания заявок

распределены по экспоненциальному закону. Между тем, несмотря на этот недостаток моделей ТМО данные формальные средства по-прежнему являются основным инструментарием анализа и оптимизации СПД, в том числе с технологией *IP/MPLS/Ethernet*.

2. Наряду с ТМО к основному математическому аппарату исследования СПД следует относить теорию графов. Основными приложениями ТГ являются задачи формального представления структурно-сложных систем, в том числе моделирования процессов обеспечения устойчивости, реализации маршрутизации и распределения потоков [52, 53].

В качестве простой частной модели топологической структуры СПД часто используется неориентированный граф $G_T(A, B)$ с N_y вершинами из множества $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{N_y}\}$ и $N_{лп}$ ребрами из $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{N_{лп}}\}$. Более конструктивными являются графы, в которых в качестве весов элементов используются параметры системных свойств СПД (пропускная способность в виде скорости передачи или числа ЕКР, устойчивости в виде вероятностей работоспособного состояния и пр.). С помощью ТГ в совокупности с теорией множеств [16, 54, 55] успешно решены и продолжают решаться задачи маршрутизации, поиска кратчайшего пути, поиска максимального потока, сетевого планирования, распределения ресурсов и др. Однако с помощью моделей ТГ затруднительно учесть параметры дисциплины и способа обслуживания в звене СПД.

3. Тензорное представление СПД с КП изначально осуществлялось из-за невозможности на базе моделей СМО адекватно описывать состояние инфраструктуры в условиях предельных нагрузок [56]. Однако такой инструментарий оказывается нечувствительным к изменениям дисциплины и способа обслуживания в СПД. Для СПД с технологией *IP/MPLS/Ethernet* данный инструментарий оказывается неконструктивным, так как не позволяет учитывать вариацию длин протокольных блоков данных.

4. Математический аппарат фракталов использует свойства самоподобия потока заявок [57], которое состоит в масштабной (по оси времени) независимости

некоторых статистических характеристик потока заявок. Основным направлением исследования в этой области является прогнозирование показателей качества обслуживания заявок в СПД (задержек заявок, длины очереди заявок и т.д.) в долгосрочной перспективе путем анализа тенденции изменения этих характеристик за краткий период времени. В качестве недостатков данного методического аппарата можно отметить необходимость описания объектов сложной системы в терминах теории фракталов, что не позволяет использовать хорошо апробированные модели ТМО и ТГ для решения задач управления СПД в условиях обслуживания реального потока заявок.

Таким образом, анализ существующих основных подходов к формальному представлению СПД показал, что наиболее методологически разработанным и применяемым математическим аппаратом является ТМО. В рамках данной теории имеются хорошо апробированные средства для количественного описания зависимостей характеристик качества обслуживания пользователей (QoS) от показателей качества функционирования сети (NP) в различных условиях (рис. 1.9). Применение для анализа СПД вместо ТМО другого математического аппарата (часто менее разработанного и апробированного), а также внесение его элементов в уже существующие модели на базе ТМО значительно усложняет процедуры анализа и оптимизации СПД [16, 50]. Вновь предлагаемые в предметной области формальные средства могут отличаться друг от друга системой допущений и ограничений, источниками и характером исходных данных, составом и физическим смыслом операторов. Вследствие этого полученные результаты либо имеют существенные погрешности в вычислениях, либо становятся трудно интерпретируемыми.

Модели ТМО, усовершенствованные в соответствии с развитием технологий передачи и алгоритмов функционирования СК, например [58-60], легко встраиваются в действующие СПД, так как существующее программные средства СК до сих пор базируются на инструментарии СМО.

Из вышеизложенного следует, что в предметной области является актуальной разработка конструктивного подхода к решению задач моделирования, анализа и синтеза (оптимизации) характеристик СПД на основе ТМО.

1.4. Идея реализуемого подхода. Постановка общей и частных задач диссертационного исследования

Проведенный выше предметно-классификационный анализ предметной области позволяет сделать вывод, что в последнее время часто наблюдаются ситуации, когда именно характеристики СПД (п. 1.1) ограничивают возможность внедрения систем мониторинга легитимности и девиантности операторов АРМ. Эти ситуации являются следствием постоянно возрождающегося *противоречия* между потребностью в расширении перечня субъектов и параметров контроля для формирования более полного представления о состоянии КВО и текущим состоянием СПД. Объемы требуемого канального ресурса СПД в ходе среднесрочного и перспективного планирования деятельности организации ДЛ ОУ определяют, исходя из своего опыта, часто интуитивно, так как формальные средства описания процессов передачи ПБД через СПД, реализующих как предоставление традиционных услуг, так и передачу контрольной информации от операторов АРМ КВО в многомодальном представлении, до сих пор отсутствуют.

В связи с высокими требованиями к достоверности оценки легитимности и девиантности пользователя, к качеству передачи сообщений модальностей также выдвигается ряд специфических требований (п. 1.2). Объемно-временные свойства и статистические характеристики передачи многомодальной информации отличаются от параметров обслуживания известных услуг связи как на уровне соединения, так и на уровне кадров. Кроме того, экономическая целесообразность диктует необходимость минимизации расходов ресурсов СПД (п. 1.1), для передачи нового типа сведений, в том числе в СПД с технологией *IP/MPLS/Ethernet*.

Таким образом, своевременной и злободневной является цель настоящего исследования, заключающаяся в *повышении степени использования ресурсов пропускной способности* каналов СПД системы мониторинга КВО государства за счет организации в них дополнительных трактов обмена информацией в многомодальном представлении с обеспечением заданного качества обслуживания абонентов СПД традиционными услугами связи.

Для достижения такой цели требуется решение следующей **общей задачи исследования**, заключающейся в разработке модели звена СПД; алгоритма оптимизации его характеристик в условиях совместного обслуживания в СПД как протокольных блоков данных традиционных услуг связи, так и блоков данных информации в многомодальном представлении.

В качестве теоретической основы разрабатываемого научно-методического инструментария целесообразно использовать подходы ТМО (п. 1.3). Следовательно, формальную постановку общей задачи исследования целесообразно записать в теоретическом базисе СМО.

Дано:

На звено СПД (рис. 1.4) с КП поступает нагрузка от оператора АРМ из сообщений ТУС и сообщений в многомодальном представлении, преобразованных в единый вид ПБД: соответственно ПДБ_{ТУС} и ПБД_{МОД}.

Вектор параметров входной нагрузки вида

$$\vec{Z}_k = [b_k, N_k, \alpha_k, \mu_k]^T \quad (1.3)$$

где n – число потоков заявок, $k = 1, \dots, n$; b_k – число единиц ресурса линии, необходимого для обслуживания k -го потока; N_k – общее число источников, формирующих k -й поток нагрузки; α_k – интенсивность потока заявок от одного источника k -го приоритета в свободном состоянии; μ_k – интенсивность обслуживания заявок k -го потока.

Требуется:

определить *дисциплину обслуживания* заявок и *управляемые параметры* звена СПД, обеспечивающие требуемое качество обслуживания (сообщений ТУС и сообщений в многомодальном представлении), выраженного вероятностью потерь заявок k -го потока

$$\pi_k = \vec{F}(\vec{Z}_k, V, n, \varphi_2(i)), \quad (1.4)$$

где V – объем канального ресурса, без использования дополнительной канальной емкости звена СПД, обеспечив тем самым *повышение степени использования пропускной способности*

$$\rho_c = V(t_c) / V > \rho_{\text{стек}}, \pi_k \leq \pi_k^*, \quad (1.5)$$

где $\rho_{\text{стек}}$ – текущая степень использования пропускной способности в s -той управленческой ситуации, π_k^* – требуемая величина вероятности потерь заявок k -го потока.

Данная общая задача исследования может быть представлена в виде совокупности частных задач:

обосновать *дисциплину обслуживания* заявок, обеспечивающую непрерывание потока ПБД_{мод} даже при максимальной загрузке звена СПД с тем, чтобы не нарушить синхронизацию модальностей на приеме;

для обоснованной дисциплины обслуживания формально описать *зависимость* вероятности потерь заявок π_k от управляемых параметров звена СПД;

по текущим параметрам ресурса пропускной способности, их загрузки и качества обслуживания ПДБ_{ТУС} определить условия и возможность реализации дополнительного тракта передачи ПБД_{мод};

разработать модель звена СПД, учитывающую *зависимость* качества обслуживания от характеристик трафика ПДБ_{ТУС} и ПБД_{МОД};

разработать имитационную модель звена СПД для процессов обслуживания ПДБ_{ТУС} и ПБД_{МОД};

проверить характеристики разработанных моделей звена СПД;

разработать алгоритм оптимизации характеристик звена СПД, обеспечивающий заданное качества обслуживания ПБД ТУС в условиях реализации дополнительных трактов передачи многомодальных сообщений;

проверить свойства разработанного алгоритма оптимизации характеристик звена СПД;

разработать научно-технические предложения по применению систем передачи многомодальной информации в СПД систем мониторинга КВО государства.

Выводы по первому разделу

1. В соответствии с руководящими документами Российской Федерации мониторинг КВО государства традиционно реализует задачи идентификации состояния элементов и работоспособности средств управления. В связи с существенными осложнениями военно-политической обстановки в последние годы системы мониторинга потенциально опасных объектов оборудуются средствами контроля легитимности и девиантности операторов АРМ. Перспективными технологиями контроля поведения операторов АРМ КВО считается динамическая многомодальная аутентификация.

2. Характеристики каналов СПД с КП часто не позволяют внедрить многомодальные системы мониторинга легитимности и девиантности операторов АРМ. Эти ситуации являются следствием постоянно возрождающегося противоречия между потребностью в расширении возможностей мониторинга КВО и ограниченностью канального ресурса СПД. Формальные средства описания процессов передачи ПБД через СПД, реализующих как предоставление традиционных услуг, так и передачу контрольной информации от операторов АРМ КВО в многомодальном представлении, до сих пор отсутствуют.

3. В предметной области для решения задач моделирования, анализа и синтеза (оптимизации) СПД часто используются формализмы ТМО. Несмотря на недостатки, такие модели, усовершенствованные в соответствии с развитием технологий передачи и алгоритмов функционирования СК, легко встраиваются в действующие СПД. Это обусловлено тем, что существующее программные средства СК до сих пор базируются на инструментарии СМО. В связи с этим ТМО определена как теоретический базис настоящего исследования.

4. Изложенное свидетельствует об актуальности задачи повышения степени использования ресурсов пропускной способности каналов СПД с КП системы мониторинга КВО государства за счет организации в них дополнительных трактов обмена информацией в многомодальном представлении с обеспечением заданного качества обслуживания абонентов СПД традиционными услугами связи.

Раздел 2. МОДЕЛЬ ЗВЕНА СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ БЛОКОВ ДАННЫХ ОТ ОБЪЕМНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФИКА КАК ТРАДИЦИОННЫХ УСЛУГ СВЯЗИ, ТАК И МНОГОМОДАЛЬНЫХ СООБЩЕНИЙ

2.1. Постановка задачи моделирования звена СПД, обслуживающей сообщения как традиционных услуг связи, так и в многомодальном представлении

В терминах системного анализа [61] в ходе исследования текущего состояния исследуемой СПД (раздел 1) выявлены *симптомы* проблемной ситуации. Эта ситуация заключается в том, что на каналный ресурс СПД, обслуживающий с требуемым качеством потоки сообщений традиционных услуг связи и типовых приложений о техническом состоянии элементов КВО (вместе – ПБД_{тус}) [6, 8, 21, 23–29], будет поступать еще один тип нагрузки – данные от систем контроля состояния операторов АРМ (ПБД_{мод}) [10–15, 21, 30–32, 34, 36–44]. Без изменения режима работы возможна перегрузка СПД. Для оценки качества функционирования СПД в данных условиях требуется получить количественное описание процессов обслуживания двухмерного потока (ПБД_{тус} + ПБД_{мод}) для различных дисциплин обслуживания с тем, чтобы обоснованно:

выбрать порядок и способ обслуживания всех ПБД,
определить параметры NP ,
в совокупности обеспечивающие выполнение и требований по QoS для ТУС, и заданных характеристик доставки сообщений в многомодальном представлении.

Таким образом, моделирование СПД целесообразно производить системно [16, 61], учитывая специфику как уровня сетевого тракта, так и уровня звена (рис. 2.1). При этом для сервисов «оператор АРМ – ДЛ ОУ» характеристики из конца в конец (*End-to-End, E2E*) QoS будут определяться: для выделенных СПД – параметрами NP двух звеньев обслуживания; для наложенных СПД – еще параметрами NP сетей операторов, если таковые используются.

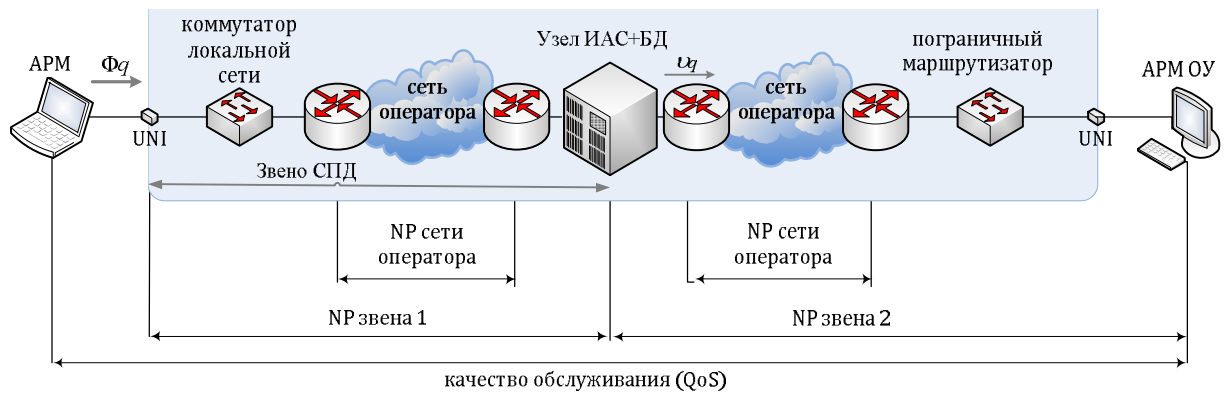


Рисунок 2.1 – Структурная модель системы передачи информации СПД

Далее считается, что параметры NP сетей операторов связи, предоставляющих каналы связи в интересах СПД, соответствуют требованиям договора об обслуживании (SLA) и известны достоверно.

Системный анализ сетевого тракта СПД позволяет определить следующие источники исходных данных для моделирования:

1. Требования суперсистемы, в том числе к качеству (своевременности $T_{пд}$, достоверности $D_{пд}$ и надежности $H_{пд}$) обслуживания ПБД сетевыми трактами.

2. Структурные и технологические характеристики, включая: V – пропускная способность для каждого сетевого тракта (в единицах скорости передачи и/или в единицах канального ресурса [20]); состав, структуру, максимальную и минимальную длины ПБД, обслуживаемых СК; ограничения, обусловленные применяемыми технологиями и др.

3. Статистические сведения о функционировании действующего сетевого тракта СПД при обслуживании ТУС, в том числе: α_i – интенсивность потока заявок от i -го источника ПБД_{ТУС} в свободном состоянии; μ_i – интенсивность обслуживания заявок i -го источника; π_i – показатель качества обслуживания в виде вероятности потерь заявок i -го источника.

4. Требования к полноте P^* (числу оцениваемых параметров m_A и количеству информации δ_a в них, $a = 1, \dots, A$, для каждой управленческой ситуации), оперативности O^* (периодичность контроля $\Delta t_{\text{конт}}$ и/или время реакции

системы на «возмущение» $t_{\text{реак}}$) и достоверности D^* контроля состояния операторов АРМ.

Анализ исходных данных продемонстрировал их неполноту для аналитического описания требований по пропускной способности для совместного обслуживания ПБД_{ТУС} и ПБД_{МОД}. Исследования показали, что при моделировании таких СПД [62] нельзя ограничиться только знанием минимального (или максимального) объема $\mathcal{G}_m$ сообщений модальностей, который должен быть передан в каждом звене $E2E$ сетевого тракта на АРМ ДЛ ОУ, чтобы реализовать идентификацию легитимности и девиантности оператора с заданной (максимальной) достоверностью

$$\mathcal{G}_{min}(m_A(t_c), \delta_a) \rightarrow \min : D(t_c) \geq D^*, \quad (2.1)$$

$$\mathcal{G}_{max}(m_A(t_c), \delta_a) : D(t_c) \rightarrow \max, \quad (2.2)$$

где $m_A(t_c)$ – число активных в момент времени t_c модальностей (в соответствии с принятым алгоритмом ДМА), δ_a – количество информации, доставляемой конкретной активной модальностью, $a = 1, \dots, A$; $D(t_c)$ – достоверность идентификации состояния оператора АРМ на момент времени t_c ; D^* – заданное значение достоверности идентификации.

Необходимо определить свойства АКСО, как источника нагрузки СМО. Испытания и измерения, проведенные с многомодальными человеко-машинными интерфейсами [10, 12, 13], свидетельствует о существенных расхождениях между наблюдаемыми значениями трафика и параметрами нагрузки, рассчитанными традиционными [18, 20] методиками предметной области.

Зная значения $\mathcal{G}_m$, $\Delta t_{\text{конт}}(t_{\text{реак}})$ и производительность СПД, далее целесообразно определить две группы параметров АКСО. К первой группе относятся

параметры, определяющие активность АКСО как источников трафика [16]: время сеанса связи $t_{\text{сеан}}$, с; среднее время нахождения АКСО в свободном состоянии $t_{\text{своб}}$, с. Тогда, учитывая цикличность алгоритма ДМА [34, 43], интенсивность поступающей нагрузки от одного АКСО можно определить, как

$$\alpha_m = \frac{t_{\text{сеан}}}{t_{\text{сеан}} + t_{\text{своб}}}, \text{ Эрл.} \quad (2.3)$$

Вторая группа параметров характеризует скорость передачи ПБД_{МОД} в сетевой тракт [16, 20]:

средняя скорость передачи ПБД_{МОД} за сеанс $v_{\text{ср}}$, кбит/с;

максимальная (пиковая) скорость передачи ПБД_{МОД} за сеанс v_{max} , кбит/с;

минимальная скорость передачи ПБД_{МОД} за сеанс v_{min} , кбит/с;

размер ПБД_{МОД} l_m , байт;

коэффициент пачечности $v_{\text{max}}/v_{\text{ср}}$.

Далее необходимо определить ситуации в сетевом тракте (рис. 2.2), когда возможна потеря ПБД_{МОД} или их задержка на время, приводящее к потере синхронизации модальностей. Исследования показали, что это произойдет, когда мгновенная скорость $v(t)$ передачи ПБД превосходит значение пропускной способности тракта, не занятого обслуживанием ПБД_{ТУС}. Во-вторых, если для управления интенсивностью поступления ПБД в СПД с КП, как правило, используется механизм *Traffic Shaping*, то часть ПБД, не удовлетворяющая согласованной пропускной способности тракта, задерживается путем постановки "неконформных" ПБД в очередь. В свою очередь механизм *Traffic Policing* предполагает отбрасывание "неконформных" ПБД, интенсивность поступления которых выше согласованной пропускной способности.

Из [7, 16, 18, 20, 59] и изложенного следует, что дисциплины обслуживания:

с явными потерями;

с ожиданием и потерями из-за ограниченного объема буфера СК;

с абсолютным приоритетом и прерыванием

нецелесообразно использовать в СПД системы мониторинга КВО.

Перспективным для проанализированных исходных и вновь полученных данных является применение дисциплины обслуживания с абсолютным приоритетом, прерыванием и градиентным резервированием канального ресурса [63]. При этом, зарезервированный объем ресурса должен обеспечивать передачу ПБД_{мод} с требуемыми параметрами своевременности.

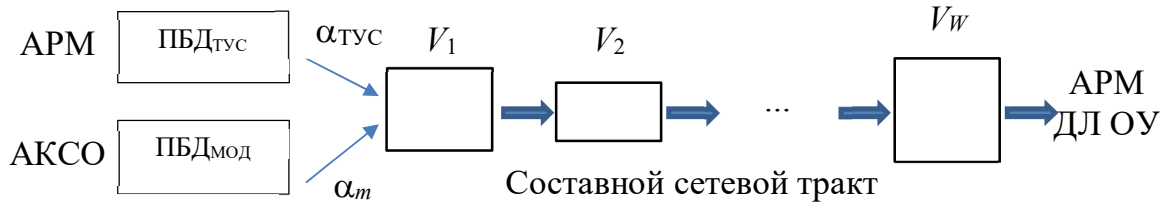


Рисунок 2.2 – Модель обслуживания суммарного потока ПБД_{тус}+ПБД_{мод} составным трактом СПД

Открытым остается вопрос об определении всего ресурса пропускной способности и оценки степени его использования для составного сетевого тракта (рис. 2.1, рис. 2.2). Морфологический анализ действующих СПД показал, что участки сетей могут существенно отличаться. В связи с изложенным и, используя теорему Форда-Фалкерсона [64], далее предлагается считать объем ресурса сетевого тракта, доступный для обслуживания потока (ПБД_{тус} + ПБД_{мод}) соответствующий минимальному объему ресурса из всех простых каналов связи, составляющих этот тракт.

$$V = V_{kc1} \cap V_{kc2} \cap \dots \cap V_{kcW}; V = \min V_{kcW}, \quad (2.4)$$

где V_{kcW} – пропускная способность w -го простого канала связи, $w = 1, \dots, W$.

Практика применения средств ДМА в КВО свидетельствует о том, что после узла ИАС+БД поток ПБД_{мод} (рис. 2.1) будет генерироваться в виде сообщения (суждения) $\upsilon_q(t_c)$ о состоянии оператора. Объем таких сообщений существенно

меньший, чем в звене 1, где передаются *параметры* текущего состояния $\Phi_q(t_c)$. Следовательно, задачу моделирования достаточно решить только для звена 1.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что для достижения цели исследования, заключающейся в повышении степени использования ресурса пропускной способности, необходимо для дисциплины обслуживания с абсолютным приоритетом и градиентным РКР определить возможность передачи дополнительного объема информации без ухудшения качества обслуживания услуг связи. В связи с этим задачу исследования целесообразно трансформировать из

$$\rho_c = V(t_c) / V > \rho_{\text{тек}}, \pi_k \leq \pi_k^*, \pi_k = \vec{F}(\vec{Z}_k, V, n, \varphi_2(i)) \leq \pi_k^*, \quad (2.5)$$

где $\rho_{\text{тек}}$ – текущая степень использования пропускной способности; π_k^* – требуемая величина вероятности потерь заявок k -го потока, в задачу:

для исследуемой СМО с РКР доказать, что

$$\exists \varphi_2(i) : \pi_k = \vec{F}(\vec{Z}_k, V, n, \varphi_2(i)) \leq \pi_k^*, \quad (2.6)$$

где $\varphi_2(i)$ – градиентная функция внутренней блокировки для заявок k -го потока, где i – общее число занятых канальных единиц объема канального ресурса V в момент поступления заявки k -го потока.

Таким образом, сформулированная ранее научная задача диссертационного исследования декомпозирована на две задачи:

- первая состоит в моделировании процессов обслуживания нагрузки определенным типом СМО – СМО с абсолютным приоритетом и градиентным РКР;
- вторая состоит в разработке алгоритмов получения управляемых характеристик, обеспечивающих рациональное функционирование такой СМО.

В ходе постановки задачи моделирования имеющиеся исходные данные о СПД системы мониторинга КВО дополнены характеристиками АКСО

как источников многомодальных сообщений. Обоснована дисциплина обслуживания для суммарного потока ПБД_{ТУС}+ПБД_{МОД}. Это позволило поставить формальную задачу исследования с учетом специфики реализации абсолютного приоритета с градиентным резервированием канального ресурса.

2.2. Моделирование звена СПД как приоритетной системы массового обслуживания с градиентным резервированием канального ресурса

Задачу моделирования звена СПД как полнодоступной СМО с РКР далее предлагается сформулировать в условиях обеспечения абсолютного приоритета сообщений ТУС (ПБД_{ТУС}) по отношению к сообщениям в многомодальном представлении (ПБД_{МОД}). Соответственно, предлагаемая модель в формализованном виде может быть представлена как СМО с РКР следующим образом.

Дано: вектор параметров входной нагрузки $\vec{Z}_k = [b_k, N_k, \alpha_k, \mu_k]^T$, где $k = 1, \dots, n$; n – число потоков заявок, b_k – число единиц канального ресурса (ЕКР), необходимого для обслуживания k -го потока; α_k – интенсивность потока заявок от одного источника k -го приоритета в свободном состоянии; μ_k – интенсивность обслуживания заявок k -го потока; N_k – общее число источников, формирующих k -й поток нагрузки; $\varphi_k(i)$ – градиентная функция внутренней блокировки для заявок k -го потока, где i – общее число занятых ЕКР объема канального ресурса V в момент поступления заявки k -го потока; V – объем канального ресурса.

Дисциплина обслуживания – с абсолютным приоритетом и РКР.

Ограничения и допущения:

процесс обслуживания заявок рассматривается на уровне соединения;

поступающие входные потоки описываются моделью примитивного потока с параметром $\alpha_k (N_k < 100)$;

длительность обслуживания заявок потоков имеет экспоненциальное распределение с параметром μ_k ;

функция внутренней блокировки $\varphi_k(i) \neq 1$ и является неубывающей.

Необходимо: разработать математическую модель системы, учитывающую дисциплину обслуживания заявок с приоритетами, прерыванием и резервированием канального ресурса, определяющую зависимость $\pi_k = \bar{F}(\bar{Z}_k, V, n, \varphi_2(i))$, где π_k – показатель качества обслуживания в виде вероятности потерь заявок k -го потока (рис. 2.3).

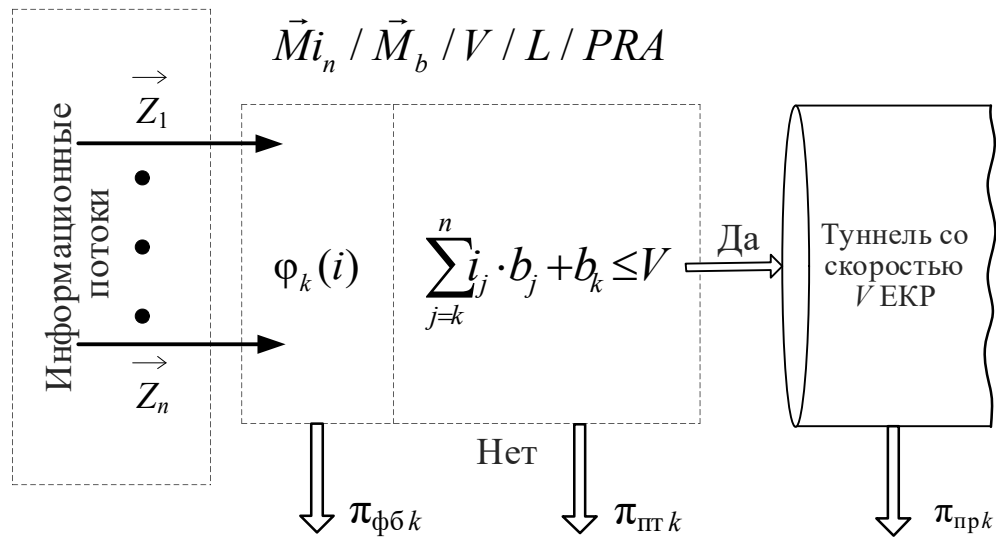


Рисунок 2.3 – Формализованное представление звена СПД при реализации дисциплины обслуживания с приоритетами, прерыванием и РКР

В символике Кендалла-Башарина модель СМО представляется в виде $\bar{M}i_n / \bar{M}_l / V / L / PRA$. Ниже раскрываются элементы этого представления.

1. Входной поток – $\bar{M}i_n$. На СМО поступает n примитивных потоков заявок (вызовов) с общим числом источников $N_k, k = 1, \dots, n; N_k < 100$. Основные предпосылки выбора механизма формирования входных потоков:

необходимость учета ограниченного последствия, связанного с непосредственным влиянием потока ПБД_{тус} на формирование потока ПБД_{мод};

приближенность к реалиям функционирования современных СПД за счет учета зависимости общей интенсивности поступления заявок от количества занятых источников N_k ;

небольшое количество операторов АРМ КВО ($N_k < 100$), деятельность которых оказывает непосредственное влияние на функционирование КВО.

2. Поток освобождений – $\vec{M}_l$. Среднее время занятия канального ресурса обслуживанием одной заявки k -го потока равно $1/\mu_k$. Число ЕКР, необходимое для обслуживания одной заявки k -го потока, – b_k (целое число). Длительности обслуживания заявок k -го потока являются случайной величиной, имеют экспоненциальное распределение и не зависят друг от друга и от других входных потоков.

3. Скорость передачи информации в канале связи, выраженная в ЕКР, – V (целое число).

4. Способ обслуживания с явными потерями – L .

5. Порядок обслуживания с абсолютным приоритетом – PRA .

Пусть на звено СПД со скоростью передачи информации V поступают два потока заявок ($n = 2$), ПБД_{мод} и ПБД_{тус}. Доля потерянных заявок k -го потока ($k = 1, 2$) далее обозначается через π_k . Заявки второго потока ($k = 2$) обладают абсолютным приоритетом по отношению к заявкам первого потока ($k = 1$) за исключением случаев, предусмотренных РКР для низкоприоритетных заявок с характеристиками субъекта контроля (оператора АРМ).

Входными данными разработанной модели являются: $\vec{Z}_k$ – вектор параметров входной нагрузки, определяемый как $\vec{Z}_k = [b_k, N_k, \alpha_k, \mu_k]^T$.

Выходные данные модели: π_1, π_2 .

Число заявок первого и второго потока, находящихся на обслуживании, далее обозначается в виде $i_1 \in \left\{0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{V}{b_1} \right\rfloor\right\}$ и $i_2 \in \left\{0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{V}{b_2} \right\rfloor\right\}$ соответственно, где скобки $\lfloor \cdot \rfloor$ обозначают целую часть от соответствующего выражения. Общее число занятых ЕКР определяется из соотношения $i = i_1 b_2 + i_2 b_1$. Тогда вектор (i_1, i_2) отражает состояние системы.

При поступлении высокоприоритетного вызова возможны такие исходы:

- вызов будет принят на обслуживание с вероятностью $1 - \varphi_2(i)$, при $\varphi_2(i) \in [0; 1)$, не влияя на число установленных низкоприоритетных соединений. Ситуация возможна, когда число свободных ресурсов звена больше или равна b_2 ЕКР, т. е. при $V - i \geq b_2$;

- вызов будет принят на обслуживание с вероятностью $1 - \varphi_2(i)$, при $\varphi_2(i) \in [0; 1)$ за счет прерывания $\left\lceil \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rceil$ установленных низкоприоритетных соединений, где $\lceil \cdot \rceil$ – округление к большему целому. Ситуация возможна, когда число свободных ресурсов звена меньше числа ЕКР b_2 , требуемых для установления высокоприоритетного соединения, т. е. при $V - i < b_2$;

- вызов будет потерян, когда число ресурсов звена, не занятых обслуживанием высокоприоритетных соединений, меньше числа ЕКР b_2 , т. е. при $V - i_2 b_2 < b_2$.

При поступлении низкоприоритетного вызова возможны такие исходы:

- вызов будет принят на обслуживание. Ситуация возможна, когда число свободных ресурсов звена больше или равно b_1 , т. е. при $V - i \geq b_1$;

- вызов будет потерян во всех остальных случаях.

Описанные правила приема и обслуживания вызовов показаны на рисунке 2.4 для случая, когда $b_1 = 1$, $b_2 = 2$, $V = 5$.

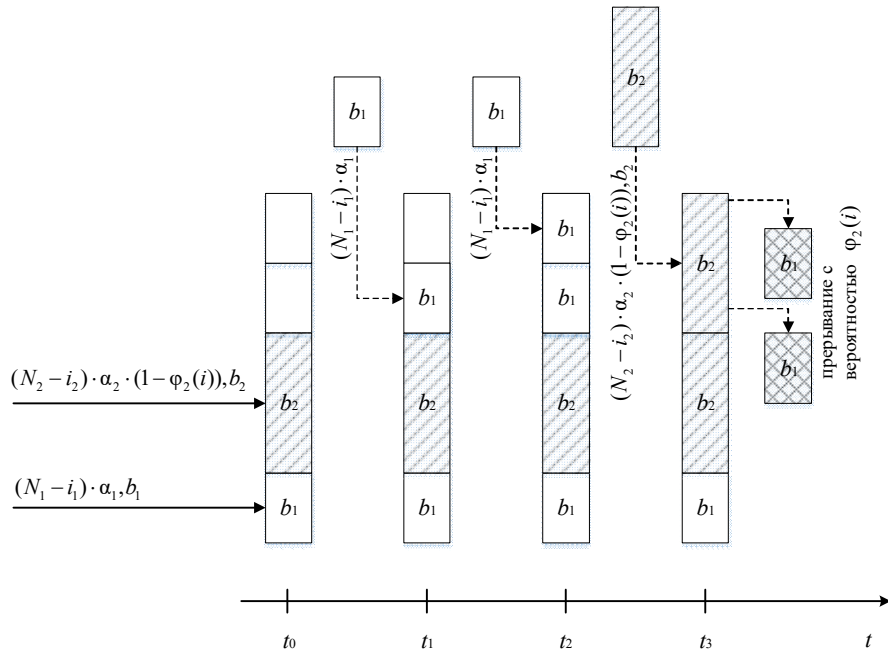


Рисунок 2.4 – Реализация механизма прерывания установленных низкоприоритетных соединений при использовании функции внутренней блокировки

Сформулированная постановка задачи задает вид пространства состояний рассматриваемой двухпоточковой модели звена СПД (ПБД_{тус} и ПБД_{мод}) и определяет структуру изменения случайного процесса обслуживания заявок обоих потоков, где

$i_1(t)$ – число заявок первого потока ($k = 1$), находящихся в момент времени t на обслуживании,

$i_2(t)$ – число заявок второго потока ($k = 2$), находящихся в момент времени t на обслуживании.

Соответственно, динамика изменения состояния модели звена СПД описывается двумерным случайным процессом $r(t) = (i_1(t), i_2(t))$, определенным на пространстве состояний $\Omega = \{(i_1, i_2) : i \leq V\}$. Диаграмма переходов исследуемой СМО для случайного процесса $r(t)$ показана на рисунке 2.5.

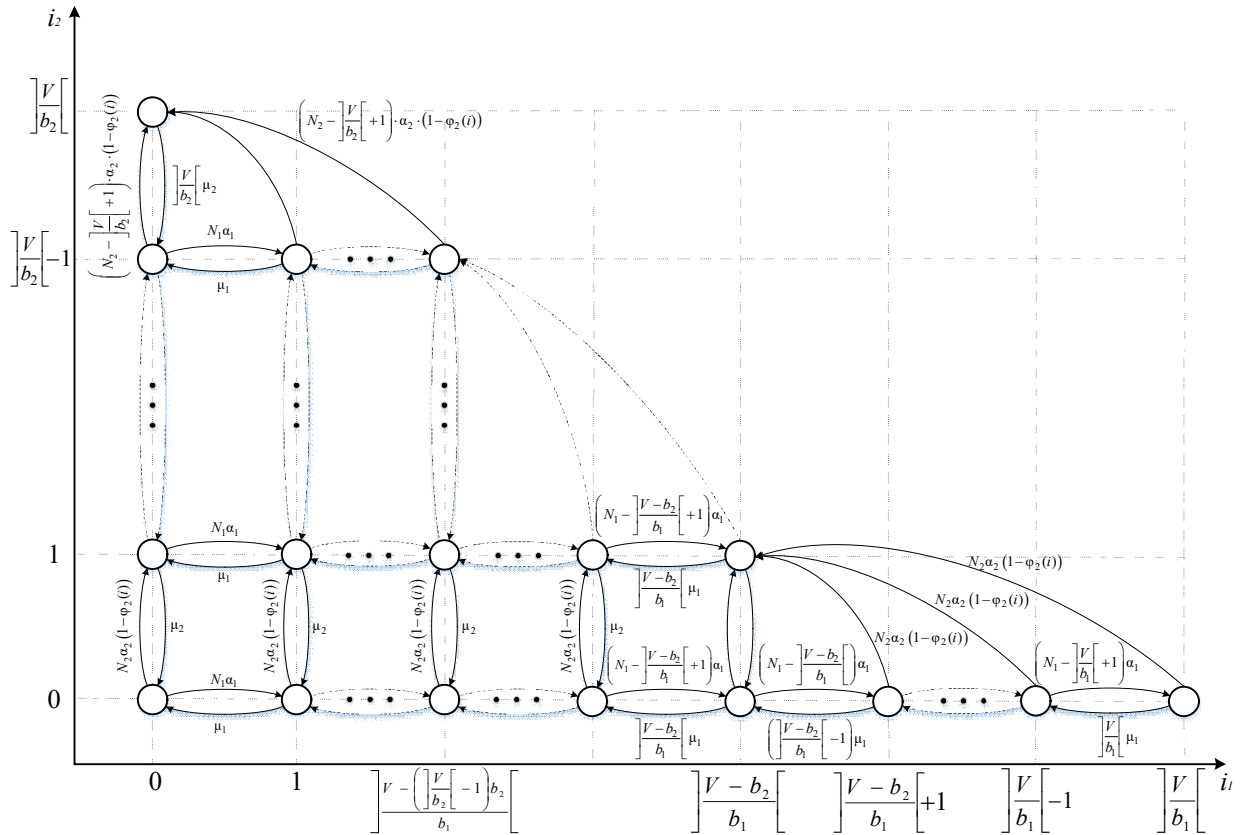


Рисунок 2.5 – Диаграмма переходов для случайного процесса $r(t)$

Приведенная постановка задачи и математическое описание модели позволяют утверждать, что процесс $r(t)$ является *марковским* и может быть исследован в стационарном режиме. Пусть $p(i_1, i_2)$ – вероятность того, что i_1 заявок на передачу низкоприоритетного трафика с сообщениями модальностей и i_2 заявок высокоприоритетного трафика ТУС находятся на обслуживании в момент времени t .

На основании интерпретации стационарных вероятностей марковского случайного процесса $r(t)$ значение вероятности $p(i_1, i_2)$ представляет собой долю времени нахождения звена СПД в состоянии (i_1, i_2) . Соответственно, указанная интерпретация позволяет определить показатели качества обслуживания поступающих потоков заявок, к которым относятся вероятности потери заявок низкоприоритетного трафика π_1 сообщений в многомодальном представлении

и высокоприоритетного трафика π_2 ТУС. Ниже приводятся общие выражения и порядок оценивания данных показателей $\pi_1 = \pi_{пт1} + \pi_{пр}$, где $\pi_{пт}$ – вероятность потерь низкоприоритетного трафика из-за занятости всего канального ресурса обслуживанием заявок обоих потоков, определяемая как отношение интенсивности потерянных заявок к интенсивности поступивших заявок

$$\pi_{пт1} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_1} p(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} p(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1}, \quad (2.7)$$

где $B_1 = \{(i_1, i_2) \in \Omega : i + b_1 > V\}$; $\pi_{пр}$ – вероятность потерь низкоприоритетного трафика из-за прерывания соединения заявкой более высокого приоритета, определяемая как отношение интенсивностей соответствующих событий. Высокоприоритетная заявка будет принята к обслуживанию с вероятностью $1 - \varphi_2(i)$, если компоненты состояния СМО удовлетворяют условию $i_2 \cdot b_2 + b_2 \leq V$.

Прерывание низкоприоритетных заявок для компонент рассматриваемого состояния (i_1, i_2) происходит при выполнении неравенства $i + b_2 > V$. В этом случае

число прерываемых заявок будет определяться из выражения $\left\lceil \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rceil$:

$$\pi_{пр} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_2} \left(\left\lceil \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rceil \right) \cdot p(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} p(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1}, \quad (2.8)$$

где $B_2 = \{(i_1, i_2) \in \Omega : V - i_1 \cdot b_1 < i_2 \cdot b_2 + b_2 \leq V\}$;

π_2 – вероятность потерь высокоприоритетного трафика из-за занятости всего канального ресурса и с учетом РКР определяется выражением $\pi_2 = \pi_{пт2} + \pi_{фб}$,

где $\pi_{пт2}$ – вероятность потерь высокоприоритетного трафика ТУС из-за занятости всего канального ресурса обслуживанием заявок приоритетного потока, определяемая как отношение интенсивности потерянных заявок к интенсивности поступивших заявок

$$\pi_{пт2} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_3} p(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} p(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))}, \quad (2.9)$$

где $B_3 = \{(i_1, i_2) \in \Omega : i_2 \cdot b_2 + b_2 > V\}$;

$\pi_{фб}$ – вероятность потерь высокоприоритетного трафика из-за функции блокировки

$$\pi_{фб} = \sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} p(i_1, i_2) \cdot \varphi_2(i), \quad (2.10)$$

Приведенные определения показателей качества обслуживания заявок и заданная функция блокировки для высокоприоритетного трафика ТУС дают возможность произвести оценку отличий предложенной модели СПД как СМО с РКР относительно известных моделей с отказами и абсолютным приоритетом. Для вычисления показателей качества обслуживания заявок необходимо составить систему уравнений равновесия (СУР), связывающую значения стационарных вероятностей $p(i_1, i_2)$.

При формировании СУР, в соответствии с правилом статистического равновесия, требуется определить и просуммировать интенсивности поступления всех событий, позволяющие вывести случайный стационарный процесс $r(t)$ из произвольного состояния (i_1, i_2) , взвешенные вероятностью данного состояния (левая часть СУР). Затем необходимо приравнять левую часть СУР к суммарным интенсивностям перехода случайного процесса $r(t)$ в состояние (i_1, i_2) , взвешенным

соответствующими вероятностями состояний, из которых этот переход происходит (правая часть СУР) [65, 66].

Сначала целесообразно сформировать левую часть СУР. Переход из произвольного состояния (i_1, i_2) может быть осуществлен в следующих ситуациях:

1. При поступлении заявки на передачу низкоприоритетного трафика. Данное событие наступает с интенсивностью $(N_1 - i_1) \cdot \alpha_1$ при условии, что есть свободный канальный ресурс для обслуживания поступившей заявки (т. е. при $i + b_1 \leq V$). В этом случае совершается переход в состояние $(i_1 + 1, i_2)$.

2. При поступлении заявки на передачу высокоприоритетного трафика. Данное событие наступает с интенсивностью $(N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))$ при условии, что заявка принята на обслуживание и функция блокировки $\varphi_2(i) \neq 1$. Данное действие будет выполнено в двух случаях:

если есть свободный канальный ресурс для обслуживания поступившей заявки, т. е. $i + b_2 \leq V$. В этом случае совершается переход в состояние $(i_1, i_2 + 1)$;

если число свободных ресурсов звена меньше b_2 , т. е. $V - i < b_2$. В таком случае произойдет прерывание обслуживания $\left\lceil \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rceil$ низкоприоритетных потоков заявок и совершится переход в состояние $\left(i_1 - \left\lceil \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rceil, i_2 + 1 \right)$.

3. При окончании обслуживания низкоприоритетной заявки. Данное событие наступает с интенсивностью $i_1 \cdot \mu_1$ в том случае, если имеются на обслуживании заявки соответствующего потока ($i_1 > 0$). При таком случае совершается переход в состояние $(i_1 - 1, i_2)$.

4. При окончании обслуживания высокоприоритетной заявки. Данное событие наступает с интенсивностью $i_2 \cdot \mu_2$ в том случае, если имеются на обслуживании заявки соответствующего потока ($i_2 > 0$). При таком случае совершается переход в состояние $(i_1, i_2 - 1)$.

Правая часть СУР определяет, с какой интенсивностью, из каких состояний, и при каких условиях возможна реализация перехода случайного процесса $r(t)$ в заданное состояние (i_1, i_2) .

Переход случайного процесса $r(t)$ в заданное состояние (i_1, i_2) может произойти при наступлении следующих событий:

1. Из состояния $(i_1 - 1, i_2)$ с интенсивностью $(N_1 - i_1 + 1) \cdot \alpha_1$ при поступлении низкоприоритетной заявки. В таком случае, условием возникновения события является принадлежность пространству состояний модели Ω состояния $(i_1 - 1, i_2)$

$$\left(\text{т. е. при } 0 < i_1 \leq \left\lceil \frac{V - i_2 \cdot b_2}{b_1} \right\rceil \right).$$

2. В результате поступления высокоприоритетной заявки, если принято решение на обслуживание соответствующей заявки. Указанное действие осуществляется в двух случаях:

из состояния $(i_1, i_2 - 1)$ с интенсивностью $(N_2 - i_2 + 1) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))$. Условием наступления данного события является принадлежность пространству состояний модели Ω $\left(\text{т. е. при } 0 < i_2 \leq \left\lceil \frac{V - i_1 \cdot b_1}{b_2} \right\rceil \right)$ состояния $(i_1, i_2 - 1)$;

из состояний $(i_1 + k, i_2 - 1)$, где $k = 1, \left\lceil \frac{V - (i_2 - 1) \cdot b_2}{b_1} \right\rceil - i_1$, с интенсивностью $(N_2 - i_2 + 1) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))$, в случае прерывания низкоприоритетной заявки. Условием осуществления события является принадлежность состояний $(i_1 + k, i_2 - 1)$ пространству состояний модели Ω (т.е. при $i_2 > 0$ и $i_2 \cdot b_2 \leq V, i + b_1 > V$).

3. Из состояния $(i_1 + 1, i_2)$ с интенсивностью $(i_1 + 1) \cdot \mu_1$ в результате окончания обслуживания низкоприоритетной заявки. Условием наступления данного события является принадлежность пространству состояний модели Ω (т.е. при $i + b_1 \leq V$) состояния $(i_1 + 1, i_2)$.

4. Из состояния $(i_1, i_2 + 1)$ с интенсивностью $(i_2 + 1) \cdot \mu_2$ в случае окончания обслуживания высокоприоритетной заявки. Условием наступления данного

события является принадлежность пространству состояний модели Ω (т. е. при $i + b_2 \leq V$) состояния $(i_1, i_2 + 1)$.

Приравняв обе части уравнения равновесия, можно получить общий вид СУР:

$$\begin{aligned}
P(i_1, i_2) \cdot & \left[(N_1 - i_1) \cdot \alpha_1 \cdot I(i + b_1 \leq V) + (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i)) \cdot I(i + b_2 \leq V) + \right. \\
& + (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i)) \cdot I(i + b_2 > V, i_2 \cdot b_2 + b_2 \leq V) + \sum_{k=1}^2 i_k \cdot \mu_k \cdot I(i_k > 0) \Big] = \\
& = P(i_1 - 1, i_2) \cdot (N_1 - i_1 + 1) \cdot \alpha_1 \cdot I\left(0 < i_1 \leq \left\lfloor \frac{V - i_2 \cdot b_2}{b_1} \right\rfloor\right) + \\
& + P(i_1, i_2 - 1) \cdot (N_2 - i_2 + 1) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i - b_2)) \cdot I\left(0 < i_2 \leq \left\lfloor \frac{V - i_1 \cdot b_1}{b_2} \right\rfloor\right) + \\
& + P(i_1 + 1, i_2) \cdot (i_1 + 1) \cdot \mu_1 \cdot I(i + b_1 \leq V) + P(i_1, i_2 + 1) \cdot (i_2 + 1) \cdot \mu_2 \cdot I(i + b_2 \leq V) + \\
& + \sum_{k=1}^{\left\lfloor \frac{V - (i_2 - 1) \cdot b_2}{b_1} \right\rfloor - i_1} P(i_1 + k, i_2 - 1) \cdot (N_2 - i_2 + 1) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i - b_2)) \cdot \\
& \cdot I(i_2 > 0, i_2 \cdot b_2 \leq V, i + b_1 > V), (i_1, i_2) \in \Omega
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Через $I(\cdot)$ определена индикаторная функция:

$$I(\cdot) = \begin{cases} 1, & \text{если выполнено условие, сформулированное в скобках;} \\ 0, & \text{если это условие не выполнено.} \end{cases}$$

Полученные ненормированные значения решения СУР $P(i_1, \dots, i_n)$ необходимо нормировать:

$$\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} p(i_1, i_2) = 1.$$

При этом, инструмент прерывания исследуемой дисциплины обслуживания заявок в СМО не позволяет выполнить для данной модели критерий Колмогорова. Соответственно, случайный процесс $r(t)$ не обладает свойством обратимости, а распределение вероятностей состояний рассматриваемой системы не может быть представлено в мультипликативном виде [67]. На основании вышесказанного, для решения составленной системы уравнений необходимо использовать численные методы.

На выбор необходимого численного метода влияют свойства матрицы СУР. Основные способы решения таких систем уравнений: прямой и итерационный [7,71]. В случае использования прямых методов, система уравнений решается при помощи стандартных процедур или преобразуется к удобному для их реализации виду. Однако эти способы либо в самой слабой степени используют свойства матрицы СУР (только свойства разреженности и ленточности), либо имеют потерю точности с ростом числа шагов алгоритма и увеличением размерности матриц.

Исследования показали, что в данных условиях целесообразно руководствоваться итерационным методом Гаусса–Зейделя, описание и условия применения которого с общих позиций линейной алгебры представлены в [67–70], общая схема реализации при решении СУР рассматриваются в [7, 71]. Его основные преимущества заключаются в:

- легкости реализации метода на алгоритмических языках программирования;
- возможности решения системы уравнений практически любой структуры с несколькими миллионами неизвестных;
- простоте формулировки.

Ниже в работе демонстрируется порядок решения СУР (2.11) с помощью итерационной схемы Гаусса–Зейделя [3].

Пусть $P^{(l)}(i_1, i_2)$ – l -е приближение к ненормированному значению решения СУР $P(i_1, i_2)$ состояния (i_1, i_2) , полученное с использованием итерационного алгоритма Гаусса–Зейделя. Применение данного метода заключается в реализации следующих действий:

1. Выбор начального приближения. Начальное приближение для всех $(i_1, i_2) \in \Omega$ определяется соотношением $P^{(0)}(i_1, i_2) = 1$.

2. Рекурсивное соотношение для вычисления компонент $(l+1)$ -го приближения по известным компонентам $(l+1)$ -го и l -го приближений. В соответствии с выражением (2.11), формулы для вычисления компонент $(l+1)$ -го приближения принимают вид:

$$\begin{aligned}
 P^{(l+1)}(i_1, i_2) = & \frac{1}{X} \cdot \left[P^{(l, l+1)}(i_1 - 1, i_2) \cdot (N_1 - i_1 + 1) \cdot \alpha_1 \cdot I\left(0 < i_1 \leq \left\lfloor \frac{V - i_2 \cdot b_2}{b_1} \right\rfloor\right) + \right. \\
 & + P^{(l, l+1)}(i_1, i_2 - 1) \cdot (N_2 - i_2 + 1) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i - b_2)) \cdot I\left(0 < i_2 \leq \left\lfloor \frac{V - i_1 \cdot b_1}{b_2} \right\rfloor\right) + \\
 & + P^{(l, l+1)}(i_1 + 1, i_2) \cdot (i_1 + 1) \cdot \mu_1 \cdot I(i + b_1 \leq V) + P^{(l, l+1)}(i_1, i_2 + 1) \cdot (i_2 + 1) \cdot \mu_2 \cdot I(i + b_2 \leq V) + \\
 & + \sum_{k=1}^{\left\lfloor \frac{V - (i_2 - 1) \cdot b_2}{b_1} \right\rfloor - i_1} P^{(l, l+1)}(i_1 + k, i_2 - 1) \cdot (N_2 - i_2 + 1) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i - b_2)) \cdot \\
 & \left. \cdot I(i_2 > 0, i_2 \cdot b_2 \leq V, i + b_1 > V) \right]. \tag{2.12}
 \end{aligned}$$

При этом, X выражается в виде соотношения:

$$\begin{aligned}
 X = & \left[(N_1 - i_1) \cdot \alpha_1 \cdot I(i + b_1 \leq V) + (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i)) \cdot I(i + b_2 \leq V) + \right. \\
 & \left. + (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i)) \cdot I(i + b_2 > V, i_2 \cdot b_2 + b_2 \leq V) + \sum_{k=1}^2 i_k \cdot \mu_k \cdot I(i_k > 0) \right]. \tag{2.13}
 \end{aligned}$$

Выражение $(l, l+1)$ в обозначениях последовательных приближений определяет вычисление компонент $(l+1)$ -го приближения с использованием уже найденных компонент $(l+1)$ -го приближения. При этом, если таковых нет, то с использованием известных компонент l -го приближения.

3. Окончание итерационного цикла. Оценка сходимости процедуры итерации заключается в достижении требуемой нормированной разности между двумя последовательными приближениями к вектору неизвестных вероятностей, т.е. проверяется справедливость соотношения

$$\sum_{(i_1, \dots, i_n) \in \Omega} \frac{|P^{(l+1)}(i_1, i_2) - P^{(l)}(i_1, i_2)|}{P^{(l+1)}(i_1, i_2)} \leq \varepsilon. \quad (2.14)$$

Как правило [3, 20], значение ε берется из интервала $10^{-8} \dots 10^{-10}$.

4. Оценивание вероятностей состояний. После достижения сходимости по сформулированному критерию вычисляются вероятности состояний модели. Для этого используется следующее выражение:

$$p(i_1, i_2) = \frac{P^{(l+1)}(i_1, i_2)}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} P^{(l+1)}(i_1, i_2)}. \quad (2.15)$$

Варьируя значения вероятностей отказа в обслуживании высокоприоритетного трафика в зависимости от общего числа занятых ЕКР, ниже исследуются алгоритмы резервирования канального ресурса СПД (рисунки 2.6 и 2.7) по исходным данным:

$$\begin{aligned} V = 1, 2 \dots 20, n = 2, N_1 = N_2 = 5, b_1 = 1, b_2 = 4, \alpha_1 = 0,7, \alpha_2 = 0,5, \mu_1 = \mu_2 = 1, \varphi_2(0, \dots, 8) = 0, \\ \varphi_2(9) = 0,4, \varphi_2(10) = 0,45, \varphi_2(11) = 0,5, \varphi_2(12) = 0,55, \varphi_2(13) = 0,6, \varphi_2(14) = 0,65, \\ \varphi_2(15) = 0,7, \varphi_2(16) = 0,75, \varphi_2(17) = 0,8, \varphi_2(18) = 0,85, \varphi_2(19) = 0,9, \varphi_2(20) = 0,95. \end{aligned}$$

Наблюдаемое локальное уменьшение вероятности потерь низкоприоритетных заявок объясняется вытеснением с обслуживания ресурсоемких заявок в соответствии с правилом, заданным функцией внутренней блокировки.

Представленный механизм позволяет обеспечить как необходимое качество обслуживания сообщений ПБД_{мод}, так и соответствующее качество ТУС в зависимости от актуальной обстановки по связи.

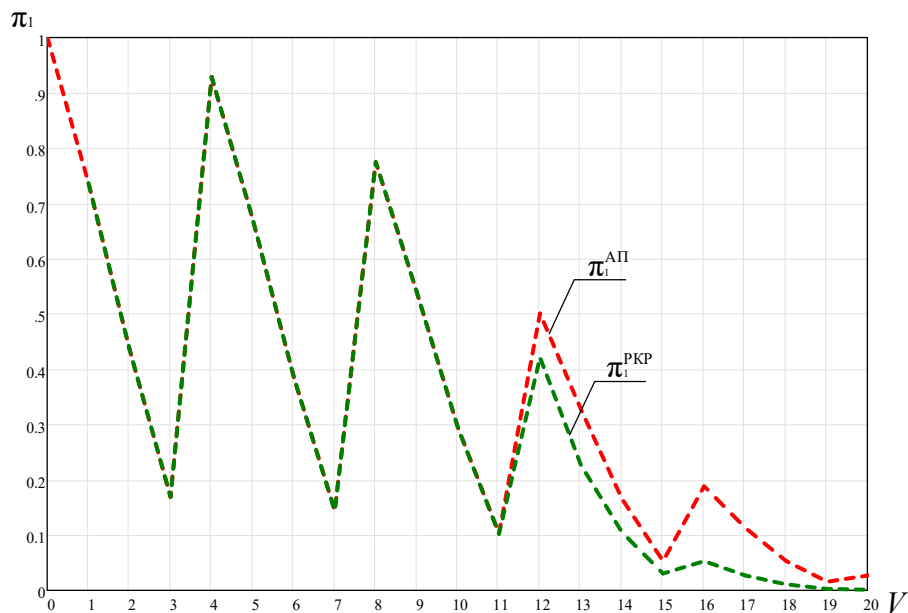


Рисунок 2.6 – Зависимость вероятности потерь низкоприоритетных заявок от канального ресурса известной и предлагаемой модели: $\pi_1^{\text{АП}}$ – вероятности потерь низкоприоритетных заявок известной модели, $\pi_1^{\text{РКР}}$ – вероятности потерь низкоприоритетных заявок предлагаемой модели с учетом РКР

Моделирование обеспечило описание закономерностей зависимости качества обслуживания ПБД_{ТУС} и ПБД_{мод} от параметров звена СПД (от АКСО до узла ИАС+БД). Данная модель позволяет разработать алгоритм для определения оптимальных значений управляемых характеристик звена СПД, а также решить задачу, заключающуюся в поиске таких функций блокировок для звена СПД, при которых вероятность потерь низкоприоритетных заявок ПБД_{мод} будет минимальной, а показатели качества обслуживания ПБД_{ТУС} останутся в заданных рамках.

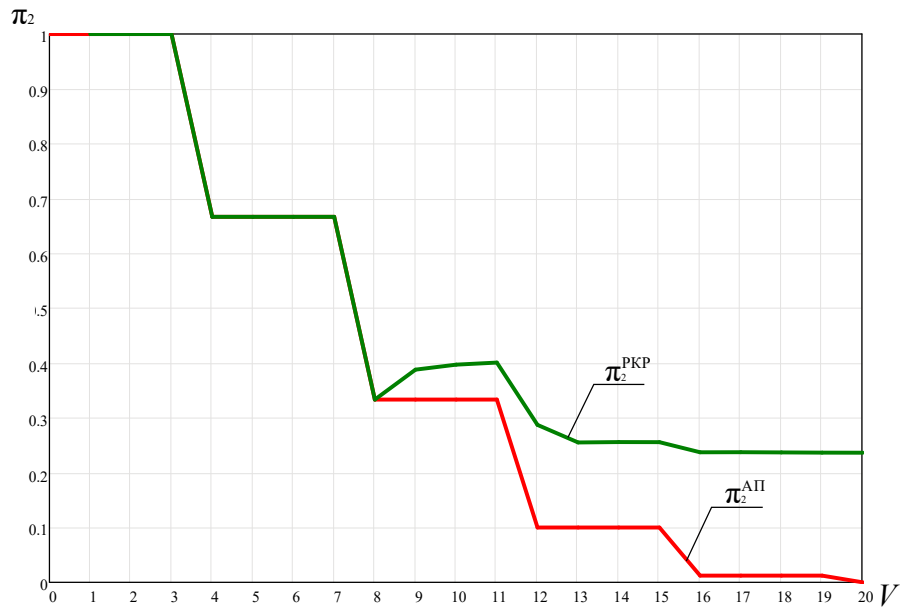


Рисунок 2.7 – Зависимость вероятности потерь высокоприоритетных заявок от канального ресурса известной и предлагаемой модели: $\pi_2^{\text{АП}}$ – вероятности потерь высокоприоритетных заявок существующей модели, $\pi_2^{\text{РКР}}$ – вероятности потерь высокоприоритетных заявок предлагаемой модели с учетом РКР

Таким образом, для системы мониторинга КВО с реализованным контролем состояния операторов АРМ на базе ДМА предложена новая математическая модель СМО $\vec{M}i_n / \vec{M}_l / V / L / PRA$ с градиентным резервированием канального ресурса вида $\pi_k = \vec{F}(\vec{Z}_k, V, n, \varphi_2(i))$. Разработанная модель в комплексе с известными моделями систем распределения информации позволит решать оптимизационные задачи, связанные с определением наиболее предпочтительных параметров при проектировании СПД системы мониторинга КВО государства [72, 73].

2.3. Имитационное моделирование звена СПД, обслуживающей сообщения как традиционных услуг связи, так и в многомодальном представлении

Следующим этапом моделирования является исследование свойств полученных в п. 2.2 формализмов. Так как исследуемый класс СПД в предлагаемом в работе режиме еще не функционирует, натурный эксперимент с практическим измерением показателей качества обслуживания двумерного потока (ПБД_{тус}+ПБД_{мод}) затруднен. В этой связи в соответствии с принятой в предметной области практике [74] целесообразно использовать серию компьютерных экспериментов.

Для проверки точности разработанной выше аналитической модели СМО $\bar{M}_i / \bar{M}_b / V / L / PRA$ в ходе исследований была разработана имитационная модель звена СПД в среде AnyLogic. Так же сравнение результатов моделирования проводилось (где это имеет физический смысл) с результатами применения уже известных моделей, представленных, например, в [7, 16, 18, 20, 59].

Для наглядности изложения изображения оконных форм, формируемых при работе имитационной модели, представлены на рисунках 2.8 и 2.9.

Имитационное моделирование звена СПД реализовано со следующими исходными данными.

На СМО поступает два потока заявок, порождаемых источниками нагрузки двух типов услуг:

- анализ состояния субъекта контроля методом ДМА по информации, снимаемой с помощью IP-видеокамеры (192 кбит/с);
- видеоконференция (384 кбит/с).

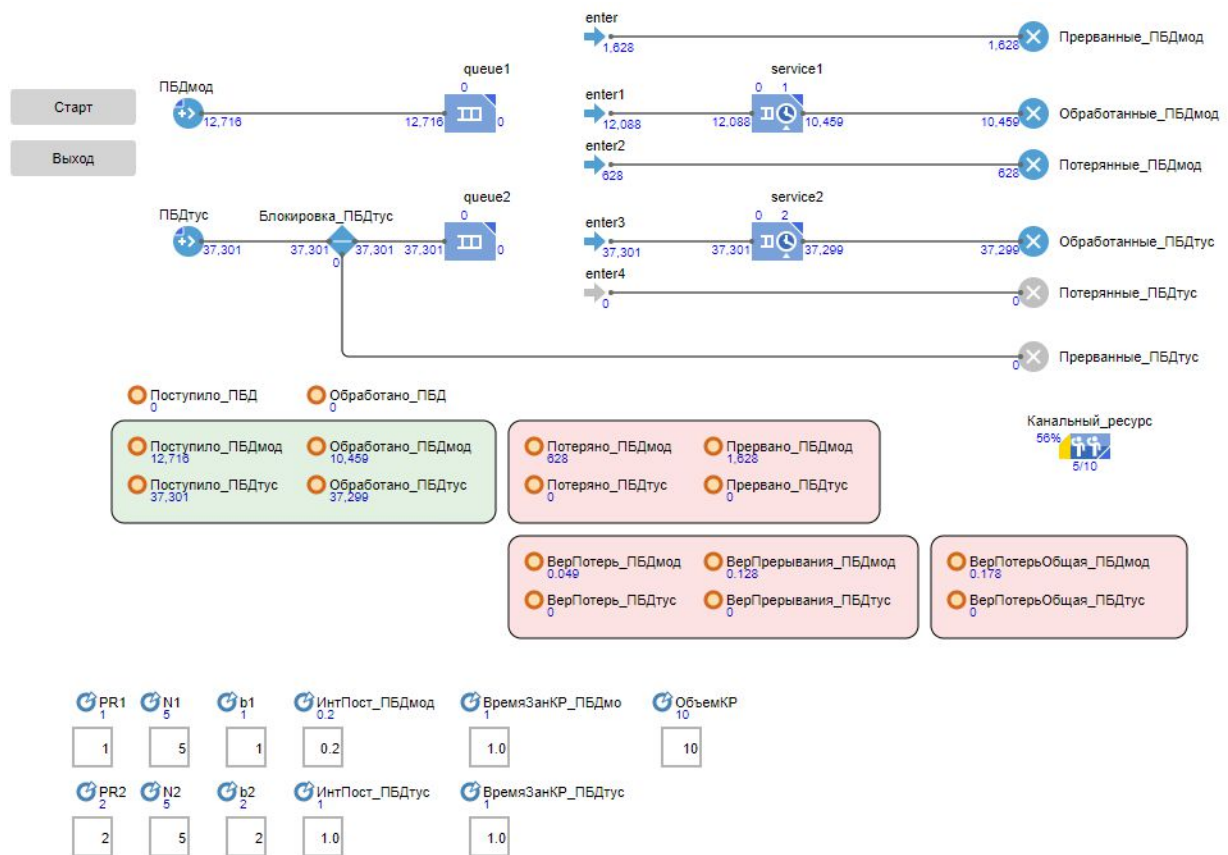


Рисунок 2.8 – Результаты имитационного моделирования
(без функции блокировки, опыт № 20)

Интенсивность заявок на предоставление услуг, поступающая в звено сети, имеет следующие значения:

- анализ состояния субъекта контроля – 0,2 заявки/час (утром и вечером);
- видеоконференция – 1 заявка/час.

Пропускная способность звена составляет 1920 кбит/с. Тогда формализованная запись исходных данных с использованием ЕКР, равной 192 кбит/с, будет иметь вид: $n = 2$, $b_1 = 1$ ЕКР, $b_2 = 2$ ЕКР, $\alpha_1 = 0,2$ Эрл, $\alpha_2 = 1$ Эрл, $\pi_2^* \leq 0,05$. Время обслуживания каждого потока принято за единицу. Оценивание значения π_k производилось при имеющемся канальном ресурсе $V = 10$ ЕКР.

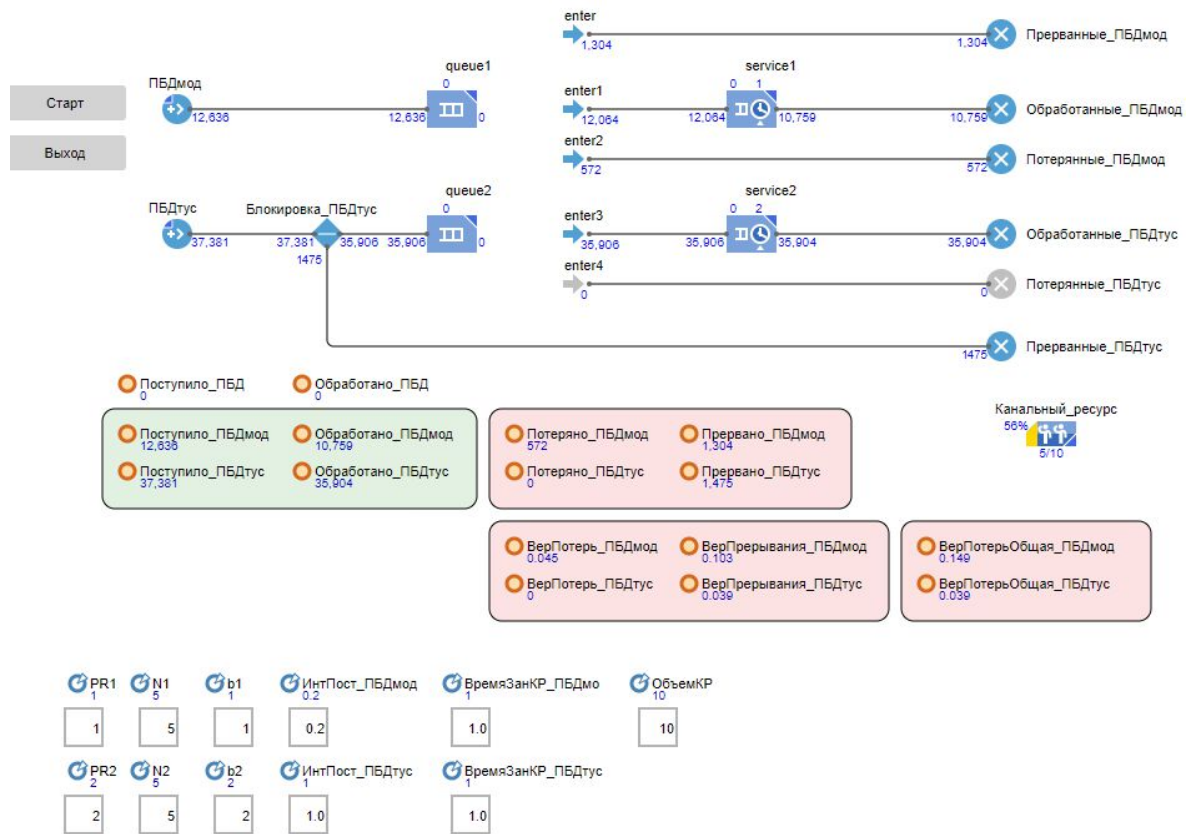


Рисунок 2.9 – Результаты имитационного моделирования
(с функцией блокировки, опыт № 30)

Для повышения достоверности определения состояния субъекта исследования при одновременном обеспечении требуемого качества обслуживания традиционной услуги связи подобрана градиентная функция блокировки $\varphi_2(0, \dots, 7) = 0$, $\varphi_2(8) = 0,1$, $\varphi_2(9) = 0,2$, $\varphi_2(10) = 0,3$.

Сравнение доли потерянных заявок каждого потока для имитационной и аналитической модели, а также для известной модели, рассмотренной в [59], представлено в таблице 2.1. Расчет точности оценок производился по распределению Стьюдента [75, 76, 77] при доверительной вероятности $P_\alpha = 0,99$ и числе опытов 30. Результаты имитационного моделирования представлены в Приложении А.

Аналогичные эксперименты производились и по другим исходным данным в области определения разработанной в п. 2.2 аналитической модели. Выявленные закономерности подтверждаются с такой же точностью.

Таблица 2.1 – Показатели качества обслуживания заявок, полученные в ходе применения различных типов математических моделей

№ потока	Известная модель	Предлагаемая модель	Имитационная модель		
			$\bar{\pi}_k - \delta$	$\bar{\pi}_k$	$\bar{\pi}_k + \delta$
	Показатели качества обслуживания заявок при $\varphi_2(0, \dots, 10) = 0$				
1 (ПБД _{мод})	0,17698	0,17698	0,17649	0,17716	0,17784
2 (ПБД _{тус})	0	0	0	0	0
	Показатели качества обслуживания при $\varphi_2(0, \dots, 7) = 0, \varphi_2(8) = 0,1, \varphi_2(9) = 0,2, \varphi_2(10) = 0,3$				
1 (ПБД _{мод})	–	0,14839	0,14754	0,14816	0,14878
2 (ПБД _{тус})	–	0,04011	0,03920	0,03996	0,04073

Следует отметить, что модели в среде *AnyLogic* могут выполняться либо в режиме виртуального, либо в режиме реального времени. В режиме виртуального времени модель выполняется без привязки к физическому времени – она просто выполняется настолько быстро, насколько это возможно, т.е. с максимальной возможной скоростью выполнения соответствующего программного кода. Этот режим лучше всего подходит в том случае, когда требуется моделировать работу системы в течение достаточно длительного периода времени [78, 79, 80]. Следовательно, работа имитационной модели в режиме виртуального времени не наносит ущерба точности компьютерных экспериментов.

Анализ результатов, представленных в таблице 2.1 и в приложении А, показывает, что разработанная модель адекватно описывает процесс приоритетного обслуживания заявок с резервированием канального ресурса в звене сети передачи данных специального назначения в случае поступления двухмерного неординарного потока протокольных блоков данных.

2.4. Анализ свойств устойчивости, чувствительности и адекватности разработанной модели звена СПД

К аналитическим моделям СПД принято предъявлять целый комплекс требований, основными из которых в контексте проводимого исследования являются устойчивость и чувствительность, исходя из которых делается вывод об адекватности предложенных формализмов [75]. Здесь и далее под *адекватностью* понимается степень соответствия модели тому реальному явлению (объекту, процессу), для описания которого она строится. Вместе с тем, разработанная модель ориентирована, как правило, на исследование определенного подмножества свойств этого объекта, поэтому можно считать, что адекватность модели определяется степенью ее соответствия не столько реальному объекту, сколько целям исследования [61].

Под *устойчивостью* модели, как правило, понимается её способность сохранять адекватность при исследовании моделируемого объекта на всем возможном диапазоне изменения исходных данных, описывающих его состояние. С этой точки зрения особый интерес представляет устойчивость модели к изменению таких параметров, как общая пропускная способность сетевого тракта и отдельно интенсивности поступления ПБД от каждого из типов источников сообщений. При этом, в качестве системных характеристик модели рассматриваются вероятности потерь ПБД_{мод} ($k = 1$) и ПБД_{тус} ($k = 2$) в виде $\pi_1^{\text{РКР}}$, $\pi_2^{\text{РКР}}$ при использовании градиентной функции блокировки и π_1 , π_2 без нее.

Для наглядности далее рассматриваются простые примеры применения разработанной модели для расчета системных параметров звена СПД.

1. Исходные данные: $V = 0, \dots, 40$, $n = 2$, $N_1 = N_2 = 7$, $b_1 = 1$, $b_2 = 5$, $\alpha_1 = 0,5$, $\alpha_2 = 2$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\varphi_2(0, \dots, 20) = 0$, $\varphi_2(21, \dots, 40) = 0,25$. Результаты расчетов показаны на рисунках 2.10 и 2.11. Из представленного видно, что вероятности потерь заявок различных приоритетов являются убывающими функциями от аргумента V .

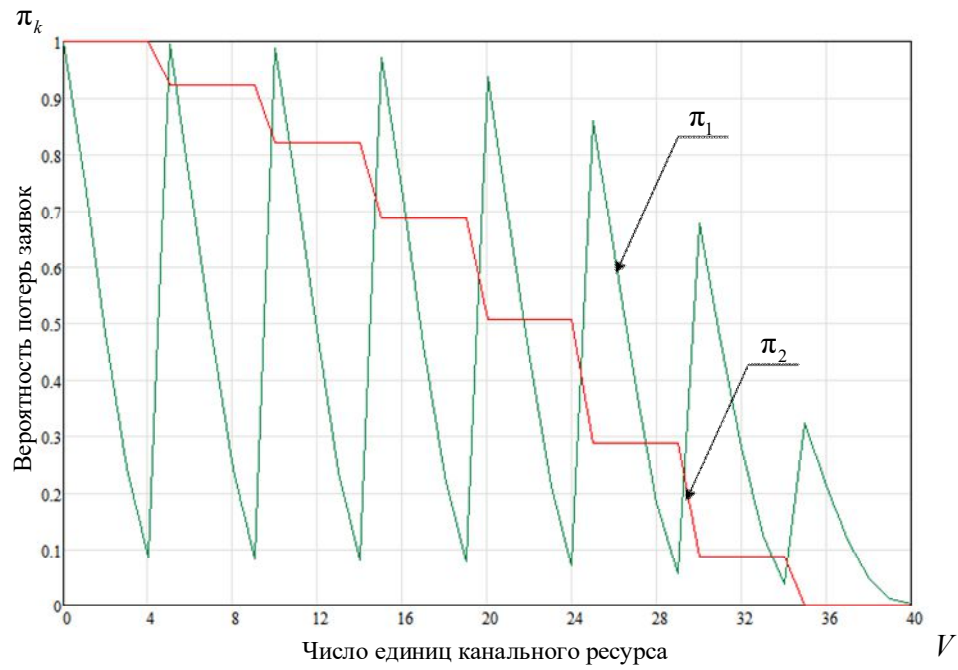


Рисунок 2.10 – Зависимость вероятности потерь заявок различных приоритетов π_1 , π_2 от канального ресурса без РКР

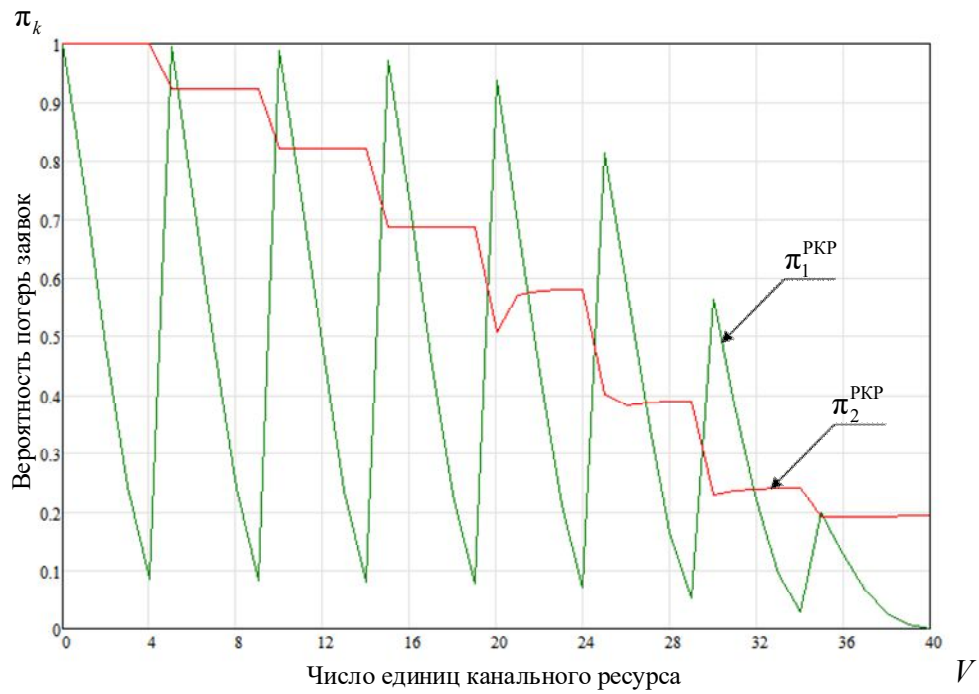


Рисунок 2.11 – Зависимость вероятности потерь заявок различных приоритетов π_1 , π_2 от канального ресурса при реализации РКР

При этом зависимости имеют ярко выраженный волнообразный характер, что соответствует результатам, полученным в исследованиях моделей звена СПД для беспriorитетных и приоритетных дисциплин обслуживания без РКР [3, 59]. Также из данных графиков видно, что введение градиентной функции блокировки позволяет повысить вероятность доставки сообщений информации в многомодальном представлении ($k = 2$) за счет отказа в обслуживании ресурсоемким заявкам ТУС ($k = 1$). Вместе с тем, существуют ситуации, при которых одновременно обеспечить качество обслуживания и перспективных, и традиционных услуг связи невозможно. Это связано с уже существующей перегрузкой СПД и соответствующим обслуживанием трафика ТУС с качеством ниже заданного. Очевидно, что в таких условиях предлагаемая модель неприменима, а для реализации ДМА необходимо увеличивать пропускную способность СПД (арендовать дополнительные тракты передачи информации).

Следующие задачи описывают закономерности изменения системных характеристик от интенсивности поступления потоков заявок.

2. Исходные данные: $V = 15$, $n = 2$, $N_1 = N_2 = 5$, $b_1 = 1$, $b_2 = 3$, $\alpha_1 = 0,3$, $\alpha_2 = 0, \dots, 5$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\varphi_2(0, \dots, 10) = 0$, $\varphi_2(11, \dots, 15) = 0,1$, $\pi_2^* \leq 0,05$.

3. Исходные данные: $V = 15$, $n = 2$, $N_1 = N_2 = 5$, $b_1 = 1$, $b_2 = 3$, $\alpha_1 = 0, \dots, 5$, $\alpha_2 = 2$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\varphi_2(0, \dots, 10) = 0$, $\varphi_2(11, \dots, 15) = 0,1$.

Результаты расчетов представлены на рисунках 2.12 и 2.13. Данные графики свидетельствуют об увеличении вероятности потерь ПБД_{ТУС} и ПБД_{МОД} при повышении интенсивностей соответствующих потоков заявок. Использование градиентной функции внутренней блокировки позволяет обеспечить заданное качество обслуживания традиционной услуги связи несмотря на необходимость обработки дополнительных объемов информации (рисунок 2.12):

$$\pi_2 \leq \pi_2^* : 0 \leq \alpha_2 \leq 1,8.$$

Одновременно с этим, повышается вероятность нормальной доставки сообщений в многомодальном представлении относительно математической модели без резервирования канального ресурса.

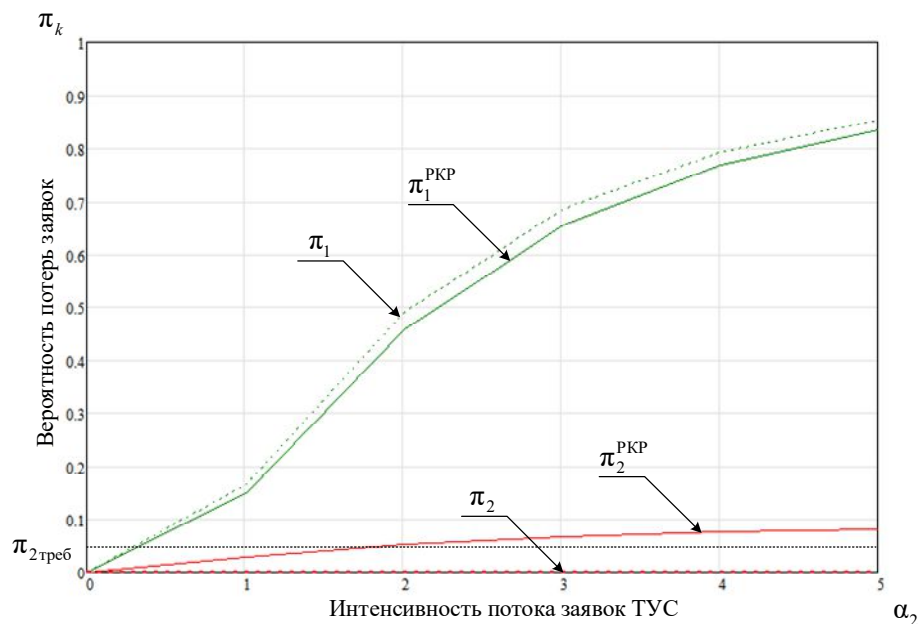


Рисунок 2.12 – Зависимость вероятности потерь заявок различных приоритетов π_1 , π_2 от интенсивности потока заявок ТУС

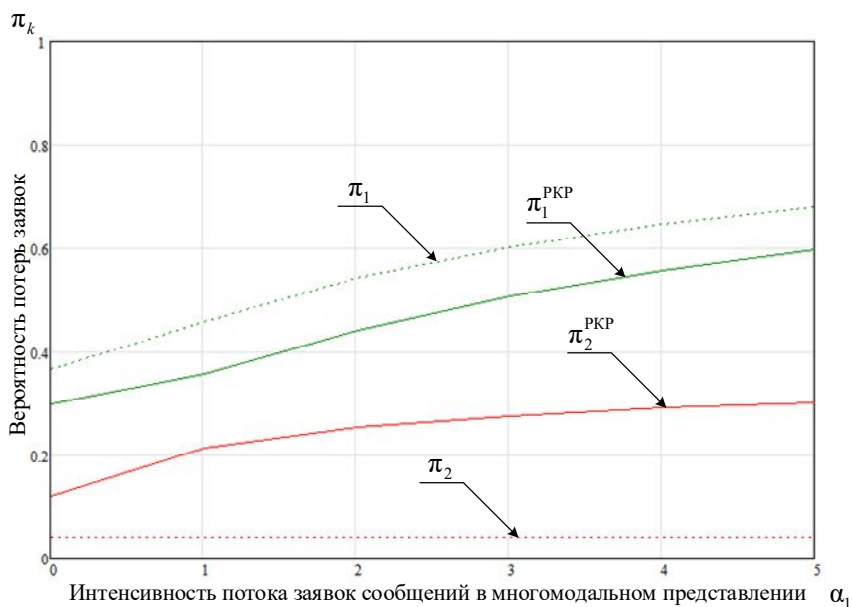


Рисунок 2.13 – Зависимость вероятности потерь заявок различных приоритетов π_1 , π_2 от интенсивности потока заявок перспективных услуг связи

Такая особенность модели может быть применена для повышения степени использования пропускной способности звена СПД с небольшими объемами передачи сообщений традиционных услуг связи для более детального исследования субъектов контроля.

Анализ приведенных данных позволяет сделать вывод, что разработанная модель является *устойчивой* в диапазоне интенсивностей $\alpha_1 = 0, \dots, 5$, $\alpha_2 = 0, \dots, 5$ и для объемов ресурсов $V = 0, \dots, 40$, что охватывает все важные с практической точки зрения области определения для СПД системы мониторинга КВО.

Следующие примеры расчета целесообразно посвятить исследованию характеристик *чувствительности* модели. Известно, что если изменение входных воздействий в некотором заданном диапазоне не отражается на значениях выходных параметров, то практическая польза от такой модели невелика (её можно назвать малочувствительной) [76].

4. Исходные данные: $V = 40$, $n = 2$, $N_1 = N_2 = 7$, $b_1 = 1$, $b_2 = 5$, $\alpha_1 = 0,5$, $\alpha_2 = 2$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$, функция внутренней блокировки при вычислении:

$$\pi_k^{\text{PKP1}} - \varphi_2(0, \dots, 30) = 0, \quad \varphi_2(31, \dots, 40) = 0,25;$$

$$\pi_k^{\text{PKP2}} - \varphi_2(0, \dots, 30) = 0, \quad \varphi_2(31, \dots, 40) = 0,5;$$

$$\pi_k^{\text{PKP3}} - \varphi_2(0, \dots, 30) = 0, \quad \varphi_2(31, \dots, 40) = 0,75.$$

На рисунке 2.14 показаны графики зависимости вероятности потерь первого приоритета, а на рисунке 2.15 – второго приоритета от объема канального ресурса и значений функции блокировки. Из представленного видно, что наблюдаемое изменение значения вероятности потерь соответствует физике реализуемых процессов и характеру вариации переменных V и $\varphi_2(i)$.

5. Исходные данные: $V = 12$, $n = 2$, $N_1 = N_2 = 5$, $b_1 = 1$, $b_2 = 2$, $\alpha_1 = 0,8$, $\alpha_2 = 0, \dots, 1$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\varphi_2(0, \dots, 8) = 0$, $\varphi_2(9) = 0,125$, $\varphi_2(10) = 0,25$, $\varphi_2(11) = 0,5$, $\varphi_2(12) = 0,75$. На рисунке 2.16 показаны графики зависимости показателей

качества обслуживания (для СМО с РКР и без такового) от интенсивности потока заявок второго приоритета и значений функции блокировки.

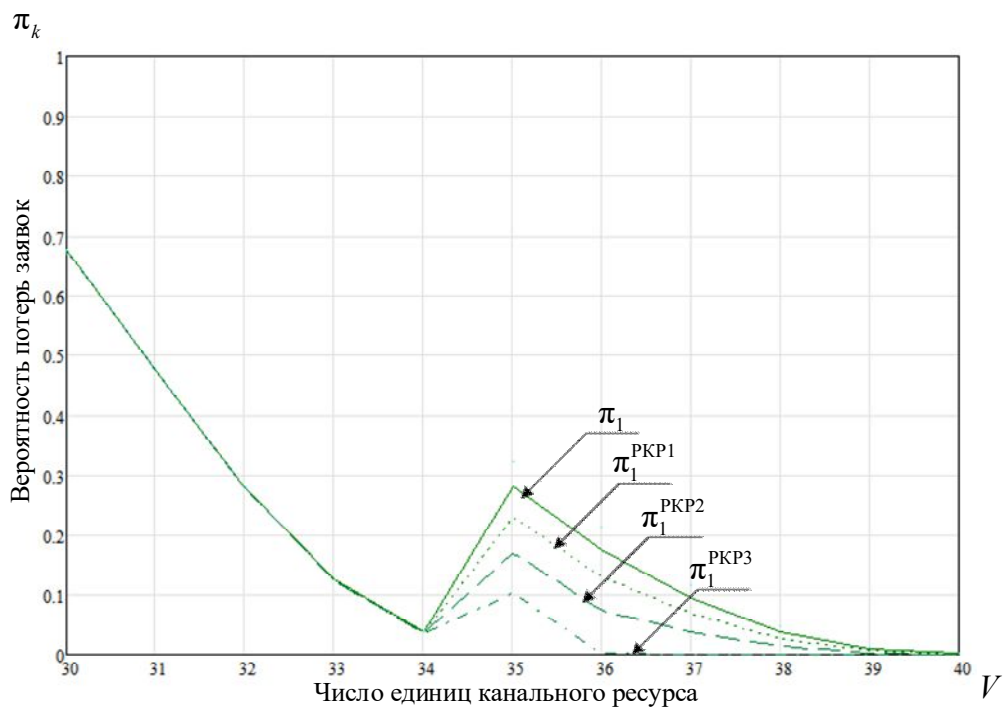


Рисунок 2.14 – Проверка модели на чувствительность к объему канального ресурса и значениям функции блокировки

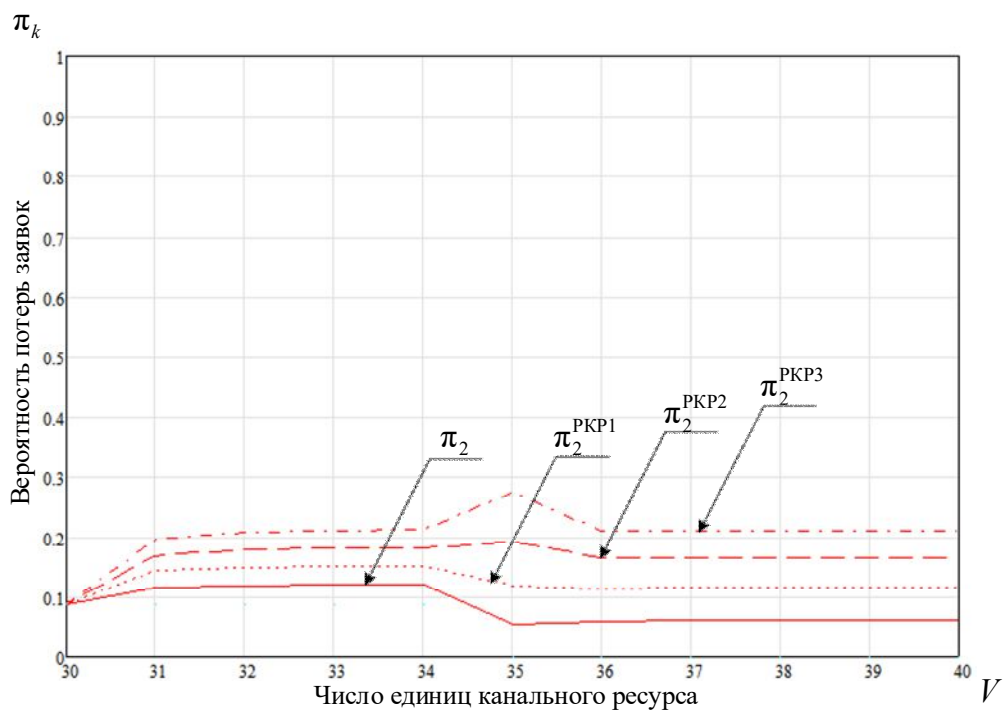


Рисунок 2.15 – Проверка модели на чувствительность к объему канального ресурса и значениям функции блокировки

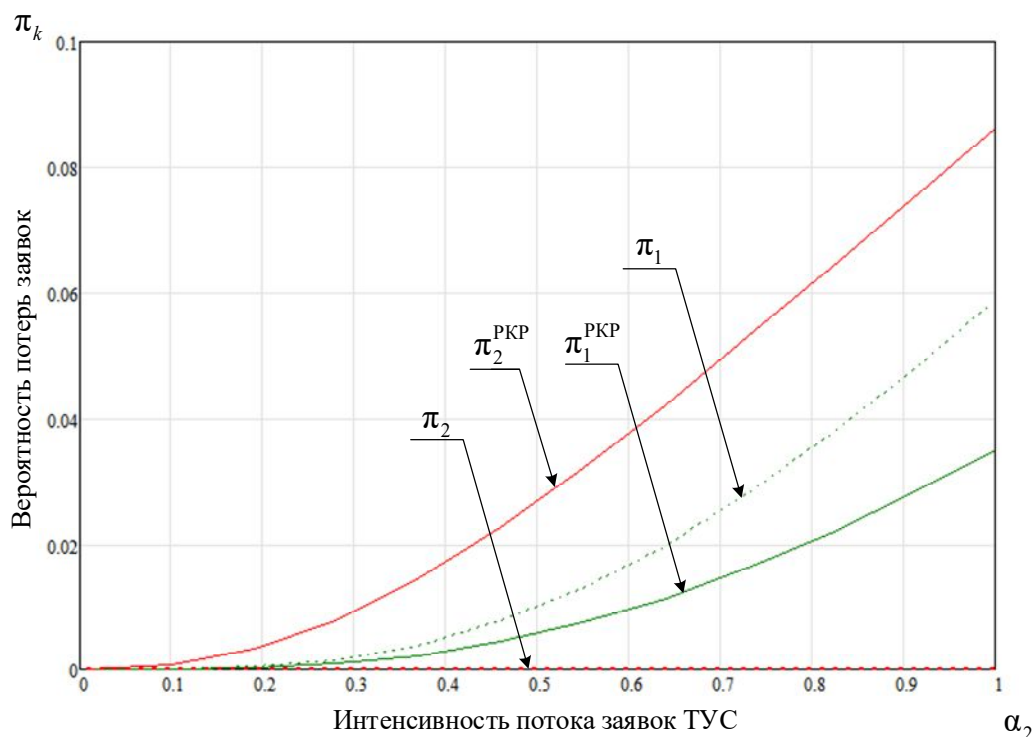


Рисунок 2.16 – Проверка модели на чувствительность к интенсивности потока заявок второго приоритета и значений функции блокировки

Наблюдаемые на графиках рисунка 2.16 тенденции соответствуют известным в предметной области. На малые приращения переменной α_2 модель отвечает адекватными приращениями значения функции $\pi(\alpha_2, \varphi_2(i))$.

6. Исходные данные: $V = 12$, $n = 2$, $N_1 = N_2 = 5$, $b_1 = 1$, $b_2 = 2$, $\alpha_1 = 0, \dots, 1$, $\alpha_2 = 1$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\varphi_2(0, \dots, 8) = 0$, $\varphi_2(9) = 0,125$, $\varphi_2(10) = 0,25$, $\varphi_2(11) = 0,5$, $\varphi_2(12) = 0,75$.

На рисунке 2.17 показаны графики зависимости показателей качества обслуживания (для СМО с РКР и без такового) от интенсивности потока заявок первого приоритета и значений функции блокировки. Из представленных зависимостей видно, что с ростом интенсивности потока заявок растут вероятности потерь, при этом характер наблюдаемых изменений функции $\pi(\alpha_1, \varphi_2(i))$ в рамках модели полностью соответствует закономерностям, известным для СМО.

Резюмируя изложенное, можно сделать вывод, что разработанная модель является *чувствительной* для всех типов входных данных.

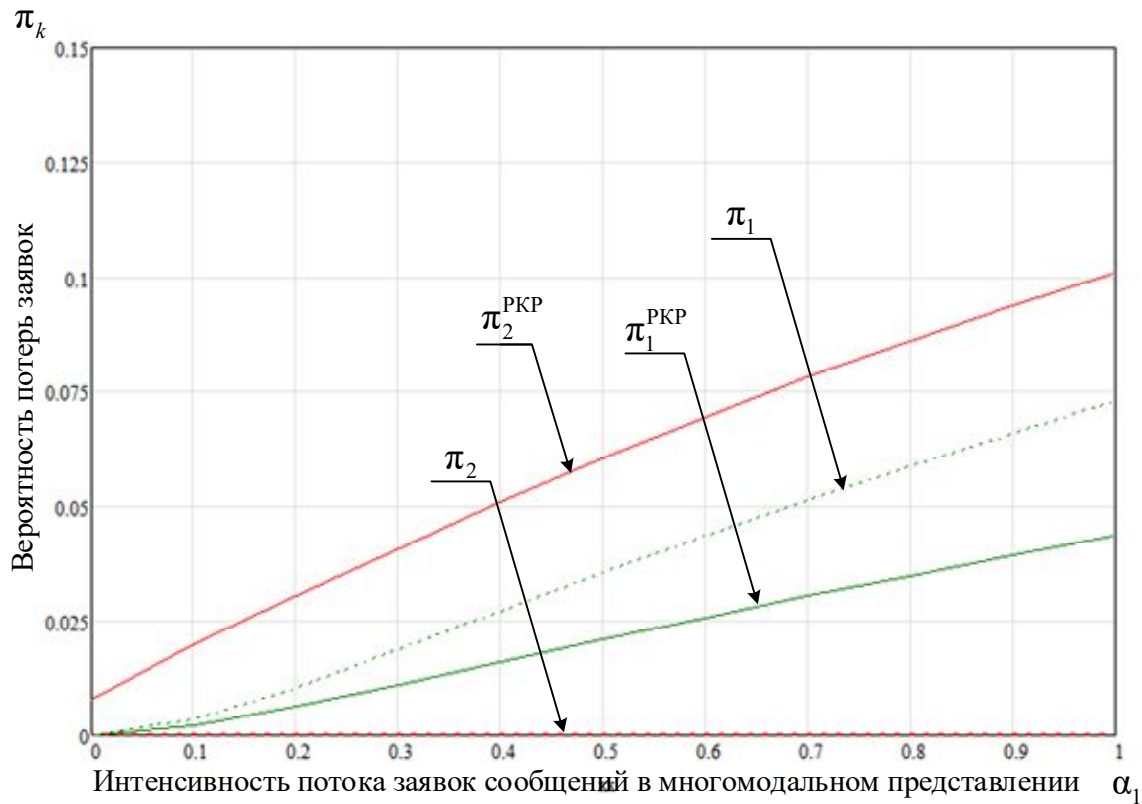


Рисунок 2.17 – Проверка модели на чувствительность к интенсивности потока заявок первого приоритета и значений функции блокировки

Таким образом, разработанная выше математическая модель СМО с абсолютным приоритетом и градиентным резервированием канального ресурса соответствует предъявляемым требованиям. Представленные выше результаты исследований показали, что предложенная модель является устойчивой, чувствительной, и, как следствие, адекватной во всем диапазоне исходных данных, важных с практической точки зрения области определения для сети передачи данных специального назначения системы мониторинга критически важного объекта.

Выводы по второму разделу

1. Анализ объекта моделирования на предварительном этапе позволил обосновать дисциплину обслуживания для суммарного потока ПБД_{тус}+ПБД_{мод}. Это позволило трансформировать формальную задачу исследования с учетом специфики реализации абсолютного приоритета с градиентным РКР.

2. С учетом специфики объекта исследования разработана новая математическая модель СМО $\bar{M}i_n / \bar{M}_l / V / L / PRA$ с градиентным резервированием канального ресурса вида $\pi_k = \bar{F}(\bar{Z}_k, V, n, \varphi_k(i))$. Предложенная модель в комплексе с известными моделями систем распределения информации позволяет представить зависимости параметров качества обслуживания заявок двухмерного потока ПБД_{тус}+ПБД_{мод} заявок от управляемых параметров СК. Применение модели целесообразно для выбора оптимальных параметров при проектировании СПД системы мониторинга КВО государства.

3. Предлагаемая имитационная модель, разработанная в программной среде AnyLogic, адекватно воспроизводит алгоритм функционирования звена СПД при обслуживании двухмерного потока ПБД_{тус}+ПБД_{мод} заявок. Применение имитационной модели целесообразно для проверки результатов аналитического моделирования. При известной компонентной базе модель может применяться самостоятельно для решения расчетных и исследовательских задач обоснования рациональных параметров звена СПД, в том числе с технологией *IP/MPLS/Ethernet*.

4. Исследования характеристик аналитической и имитационной моделей позволяют сделать вывод, что разработанные формализмы соответствуют предъявляемым требованиям. Аналитическая модель звена СПД является устойчивой, чувствительной, и, как следствие, адекватной во всем диапазоне исходных данных, важных с практической точки зрения области определения для СПД системы мониторинга КВО.

Раздел 3. АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕНА СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ЗАДАННОЕ КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРОТОКОЛЬНЫХ БЛОКОВ ДАННЫХ ТРАДИЦИОННЫХ УСЛУГ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ ПЕРЕДАЧИ МНОГОМОДАЛЬНЫХ СООБЩЕНИЙ

3.1. Постановка задачи разработки алгоритма оптимизации характеристик звена СПД с передачей сообщений как в традиционном, так и многомодальном представлении

Для достижения цели исследования, заключающейся в повышении степени использования ресурса пропускной способности, в разделе 2 была разработана и всесторонне исследована с помощью компьютерных экспериментов аналитическая модель СМО с абсолютным приоритетом и градиентным резервированием канального ресурса. Данная модель позволила выявить закономерности зависимости качества доставки ПБД_{тус} от имеющегося канального ресурса при реализации дополнительного объема заявок на обслуживание ПБД_{мод}.

Кроме того, имитационное моделирование СМО с РКР подтвердило корректность и область определения трансформации задачи

$$\rho_c = V(t_c) / V > \rho_{\text{стек}}, \quad \pi_k = \vec{F}(\vec{Z}_k, V, n, \varphi_2(i)) \leq \pi_k^*,$$

в вид

$$\exists \varphi_2(i) : \pi_k = \vec{F}(\vec{Z}_k, V, n, \varphi_2(i)) \leq \pi_k^*,$$

где $\varphi_2(i)$ – градиентная функция внутренней блокировки для ПБД_{тус}, где i – общее число занятых канальных единиц объема канального ресурса V в момент поступления заявки k -го потока.

Практика эксплуатации современных СПД (в том числе с технологией *IP/MPLS/Ethernet*) системы мониторинга КВО нуждается в совершенствовании программного обеспечения (ПО) систем коммутации. Следовательно, на основе предложенной выше аналитической модели необходимо разработать алгоритм, позволяющий в условиях [7, 16, 18, 19, 20] поступления неординарных заявок от ограниченной группы источников с абсолютными приоритетами, отказами и градиентным резервированием канального ресурса обеспечить как своевременную доставку ПБД_{мод}, так и заданное качество обслуживания ПБД_{тус}.

Формальную постановку задачи разработки алгоритма оптимизации параметров системы коммутации СПД (с учетом трансформации общей задачи исследования) целесообразно представить в виде следующего критерия оценки качества обслуживания поступающих потоков заявок

$$\pi_k = \vec{F}(\vec{Z}_k, V, n, \varphi_k(i)),$$

где $\vec{Z}_k$ – вектор параметров входной нагрузки,

$$\vec{Z}_k = [b_k, N_k, \alpha_k, \mu_k]^T,$$

V – объем канального ресурса СПД; n – число потоков заявок, $k = \overline{1, n}$; b_k – число единиц ресурса линии, необходимого для обслуживания k -го потока; N_k – общее число источников, формирующих k -й поток нагрузки; α_k – интенсивность потока заявок от одного источника k -го приоритета в свободном состоянии; μ_k – интенсивность обслуживания заявок k -го потока; $\varphi_2(i)$ – градиентная функция внутренней блокировки для ПБД_{тус} ($k = 2$).

Как было доказано в разделе 2, значение функции блокировки определяет вероятность отказа в обслуживании соответствующего потока заявок в зависимости от общего числа занятых ЕКР

$$\varphi_k(i)=[0,1],$$

где i – общее число занятых ЕКР в общем объеме канального ресурса V в момент поступления заявки k -го потока, $i = \overline{0, V}$.

Разработанная выше модель является базисом [83] для разработки алгоритма, так как она:

- предоставляет возможность формального описания процессов передачи и обработки двухмерного потока (ПБД_{тус}+ПБД_{мод}) в интегрированной СПД, представляя собой явные аналитические зависимости между системными свойствами звена и управляемыми параметрами системы коммутации [84];

- определяет ситуации в СПД, когда поставленную задачу без дополнительных каналов связи решить нельзя. Например, в условиях, когда сетевые тракты уже предельно загружены или трафик ТУС в СПД уже обслуживается с качеством ниже заданного по причине ошибок проектирования или эксплуатации, отказов элементов СПД;

- позволяет избежать основного недостатка распределения ресурсов в звене СПД с КП с разнородным трафиком, заключающегося в перманентном вытеснении из обслуживания заявок с большими требованиями к ресурсам передачи информации (ПБД_{тус}) заявками с меньшими требованиями (ПБД_{мод});

- имеет в составе гибкий инструмент в виде градиентной функции внутренней блокировки высокоприоритетного трафика для изменения выделяемого объема пропускной способности звена СПД под информацию с характеристиками состояния оператора АРМ.

Таким образом, имеющиеся исходные данные (с учетом дополнения, полученного в п. 2.1) и закономерности обслуживания двух неординарных потоков заявок от ограниченной группы источников с абсолютными приоритетами, отказами и градиентным резервированием канального ресурса, выявленные разработанной ранее аналитической моделью, составляют необходимые и достаточные условия для разработки алгоритма оптимизации параметров звена

СПД с передачей сообщений как в традиционном, так и многомодальном представлении.

3.2. Разработка алгоритма оптимизации характеристик звена СПД

В соответствии с выбранной дисциплиной обслуживания алгоритм оптимизации предполагает обслуживание в СК двух потоков заявок (рис. 3.1):

- ПБД_{мод} с характеристиками состояния операторов ($k = 1$);
- ПБД_{тус} традиционных услуг связи ($k = 2$), имеющих абсолютный приоритет при обслуживании.

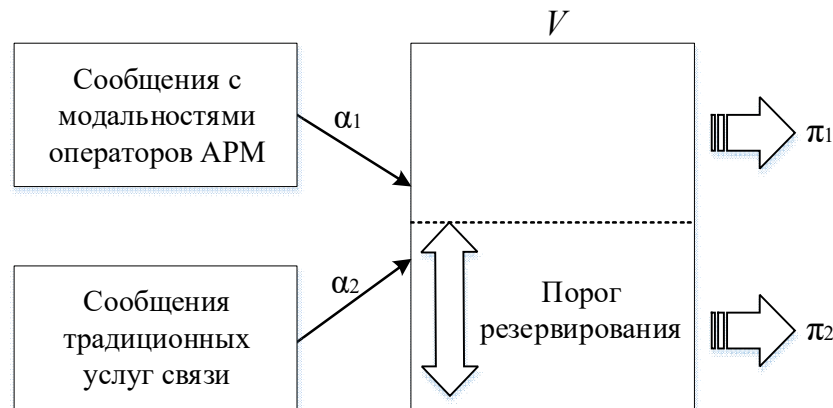


Рисунок 3.1 – Схема обслуживания двух потоков ПБД в СМО с РКР

В алгоритм оптимизации характеристик звена СПД вкладывается следующая логика функционирования. Порог резервирования [63, 85] делит весь имеющийся ресурс V на полосы, предоставляемые источникам нагрузки для обслуживания соответствующих ПБД. Из рисунка 3.1 видно, что, управляя значением градиентной функции внутренней блокировки высокоприоритетного трафика, можно изменять объем канального ресурса, выделяемого под информацию с характеристиками состояния оператора АРМ, а, следовательно, влиять на показатели качества обслуживания трафика. При этом не должно быть такой ситуации, при которой не остается канального ресурса под передачу ПБД_{мод}

меньше некоторого порогового значения, так как в таких условиях будут нарушены временные соотношения между модальностями, и идентификация оператора АРМ будет произведена или недостоверно, или с опозданием.

Соответственно, целевая функция может быть записана в виде:

$$\varphi_{2\text{опт}}(i) = \varphi_2(i) : \pi_2 \leq \pi_2^*, \pi_1 \rightarrow \min. \quad (3.1)$$

При разработке алгоритма учитываются следующие факторы:

1. Достоверность и своевременность определения психофизиологического состояния оператора, а также полнота информации о его поведении определяются вероятностью потерь заявок соответствующего потока.

2. Величина канального ресурса принимает дискретные значения.

3. Значения градиентной функции внутренней блокировки рассчитываются только для потока заявок высокоприоритетных традиционных услуг связи $\varphi_2(i)$.

4. При свободном канальном ресурсе в момент поступления потока заявок ТУС ($i = 0$) функция блокировки не используется ($\varphi_2(0) = 0$).

5. Функция блокировки – неубывающая.

6. Функция блокировки $\varphi_2(i) \neq 1$.

7. Условиями, показывающими, что определена оптимальная функция блокировки, являются получение минимальной вероятности потерь заявок ПБД_{мод}.

С учетом рассмотренных факторов и анализа методов для решения задачи (3.1) выбран пассивный метод вычисления оптимальной градиентной функции внутренней блокировки $\varphi_{2\text{опт}}(i)$ [86, 87].

Для этого необходимо сформировать матрицу $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$, где s – количество возможных неубывающих градиентных функций блокировки,

$$\left[\varphi_{ji} \right]_{s \times V} = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \dots & \varphi_{1V} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \dots & \varphi_{2V} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{s1} & \varphi_{s2} & \dots & \varphi_{sV} \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

в которой каждая строка определяет функцию блокировки $\varphi_2(i)$:

при $j = 1$ $\varphi_2(0) = 0, \varphi_2(1) = \varphi_{11}, \varphi_2(2) = \varphi_{12}, \dots, \varphi_2(V) = \varphi_{1V}$,

при $j = 2$ $\varphi_2(0) = 0, \varphi_2(1) = \varphi_{21}, \varphi_2(2) = \varphi_{22}, \dots, \varphi_2(V) = \varphi_{2V}$,

при $j = s$ $\varphi_2(0) = 0, \varphi_2(1) = \varphi_{s1}, \varphi_2(2) = \varphi_{s2}, \dots, \varphi_2(V) = \varphi_{sV}$,

и вычислить j -ю строку матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$, определяющую оптимальную функцию блокировки $\varphi_{2\text{опт}}(i)$, удовлетворяющей условиям (3.1).

Исследования показали [87], что использование других методов в условиях большой размерности системных и управляемых характеристик используемой математической модели либо невозможно, либо приведет к неконструктивному усложнению решения данной задачи, когда полученный результат трудно интерпретировать. Все вышеизложенное позволило разработать обобщенный алгоритм оптимизации параметров звена СПД.

Исходные данные для условия формирования потоков и дисциплины обслуживания заявок: $\vec{Z}_k = [b_k, N_k, \alpha_k, \mu_k]^T$; π_2^* – требования (вероятность потерь заявок ПБД_{ТУС}) к качеству обслуживания заявок 2-го потока; l – изменение аргумента градиентной функции блокировки; V – объем канального ресурса звена.

Выходные данные:

$\varphi_{2\text{опт}}(i)$ – оптимальная градиентная функция внутренней блокировки.

Обобщённый алгоритм оптимизации включает в себя следующие процедуры и операнды [88]:

Шаг 1. Ввод числа источников нагрузки k -го потока.

Шаг 2. Ввод исходных данных.

Шаги 3, 4. Расчет π_2 по алгоритму, представленному в частном алгоритме № 2, и сравнение полученного значения с требуемым порогом качества обслуживания ТУС π_2^* для проверки возможности применения алгоритма.

Шаг 5. Расчет количества аргументов функции блокировки $m = \frac{1}{l} + 1$.

Шаг 6. Расчет количества возможных неубывающих функций блокировки (сочетаний с повторениями) $s = \bar{C}_m^V = \frac{(m+V-1)!}{V!(m-1)!}$.

Шаг 7. Формирование матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$ по частному алгоритму № 1, представленному ниже.

Для наглядности ниже представлен пример заполнения матрицы при $V = 4$, $l = 0,5$ ($s = 15$):

$$[\varphi_{ji}]_{s \times V} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0,5 \\ 0 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0,5 & 1 \\ 0 & 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0,5 & 1 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0,5 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.3)$$

При $j = 11$ функция блокировки $\varphi_2(i)$ будет определена в следующем виде:
 $\varphi_2(0) = \varphi_2(1) = 0$, $\varphi_2(2) = 0,5$, $\varphi_2(3) = \varphi_2(4) = 1$.

Шаг 8. Начало цикла для j от 1 до s .

Шаг 9. Расчет вероятности потерь заявок k -го потока π_k по алгоритму, представленному в частном алгоритме № 2.

Шаг 10. Сравнение полученного значения вероятности потерь заявок традиционных услуг с требуемым значением $\pi_2 < \pi_2^*$.

Шаг 11. Добавление строки $[j, \pi_1, \pi_2]$ в матрицу Π для дальнейшего вычисления оптимальной функции блокировки, где j – номер строки матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$, π_1, π_2 – соответствующие показатели качества обслуживания.

Шаг 12. Присвоение счетчику i значения 1.

Шаги 13, 14. Увеличение значения счетчика i на единицу при выполнении условия $\varphi_{ji} = \varphi_{j(i+1)}$ для определения в j -й строке матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$ элемента, с которого началось повышение вероятности потерь ПБД_{тус}.

Шаг 15. Увеличение значения счетчика i на единицу.

Шаги 16, 17. Увеличение значения счетчика j на единицу при выполнения условий $\varphi_{ji} \neq 0$ и $j \neq s$ для исключения функций блокировок, при которых вероятность потерь ПБД_{тус} выходит за рамки требуемого значения π_2^* , а также для завершения цикла при достижении счетчика j значения s .

Шаг 18. Определение строки матрицы Π с минимальной вероятностью потерь ПБД_{мод} $[j, \pi_{1\min}, \pi_2]$.

Шаг 19. Вычисление количества строк матрицы Π с минимальной вероятностью потерь ПБД_{мод}.

Шаг 20. Сравнение количества строк матрицы Π с минимальной вероятностью ПБД_{мод} с единицей.

Шаг 21. При наличии нескольких строк матрицы Π с одинаковым значением минимальной вероятности потерь ПБД_{мод} $\pi_{1\min}$ определение строки с минимальной вероятностью потерь ПБД_{тус} $[j, \pi_{1\min}, \pi_{2\min}]$ и определение j -й строки матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$ для вывода оптимальной функции блокировки.

Шаг 22. Вывод оптимальной функции внутренней блокировки $\varphi_{2\text{опт}}(i)$.

Схема разработанного обобщенного алгоритма, оформленная согласно требованиям [89, 90], представлена на рисунке 3.2.

В состав обобщенного алгоритма входит частный алгоритм № 1 формирования матрицы функции блокировки (шаг 7). Его можно представить в виде следующей последовательности процедур:

Шаг 1. Ввод исходных данных.

Шаг 2. Присвоение счетчику j значения 1.

Шаг 3. Добавление первой строчки в матрицу $[\varphi_{ji}]$ с нулевыми значениями элементов (для расчета показателей качества обслуживания без использования функции блокировки).

Шаг 4. Начало цикла для j от 2 до s .

Шаги 5, 6. Присвоение j -й строки матрицы $[\varphi_{ji}]$ значений строки $(j-1)$.

Шаг 7. Присвоение счетчику i значения $V - 1$.

Шаг 8. Сравнение значений первого φ_{j1} и последнего элемента φ_{jV} j -й строки матрицы $[\varphi_{ji}]$.

Шаг 9. Увеличение значения φ_{jV} на l .

Шаги 10, 11. Присвоение всем элементам j -й строки матрицы $[\varphi_{ji}]$ кроме элемента φ_{jV} значения 0.

Шаги 12, 13. Уменьшение значения счетчика i на единицу при выполнении условий $\varphi_{ji} = \varphi_{j(i+1)}$ или $\varphi_{ji} \neq \varphi_{j1}$.

Шаг 14. Увеличение значения φ_{ji} на l .

Шаг 15. Проверка достижения счетчика i значения 1 (первого элемента j -й строки матрицы $[\varphi_{ji}]$).

Шаги 16, 17. Присвоение элементам $\varphi_{j(1,i-1)}$ значения 0.

Шаг 18. Вывод выходных данных $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$.

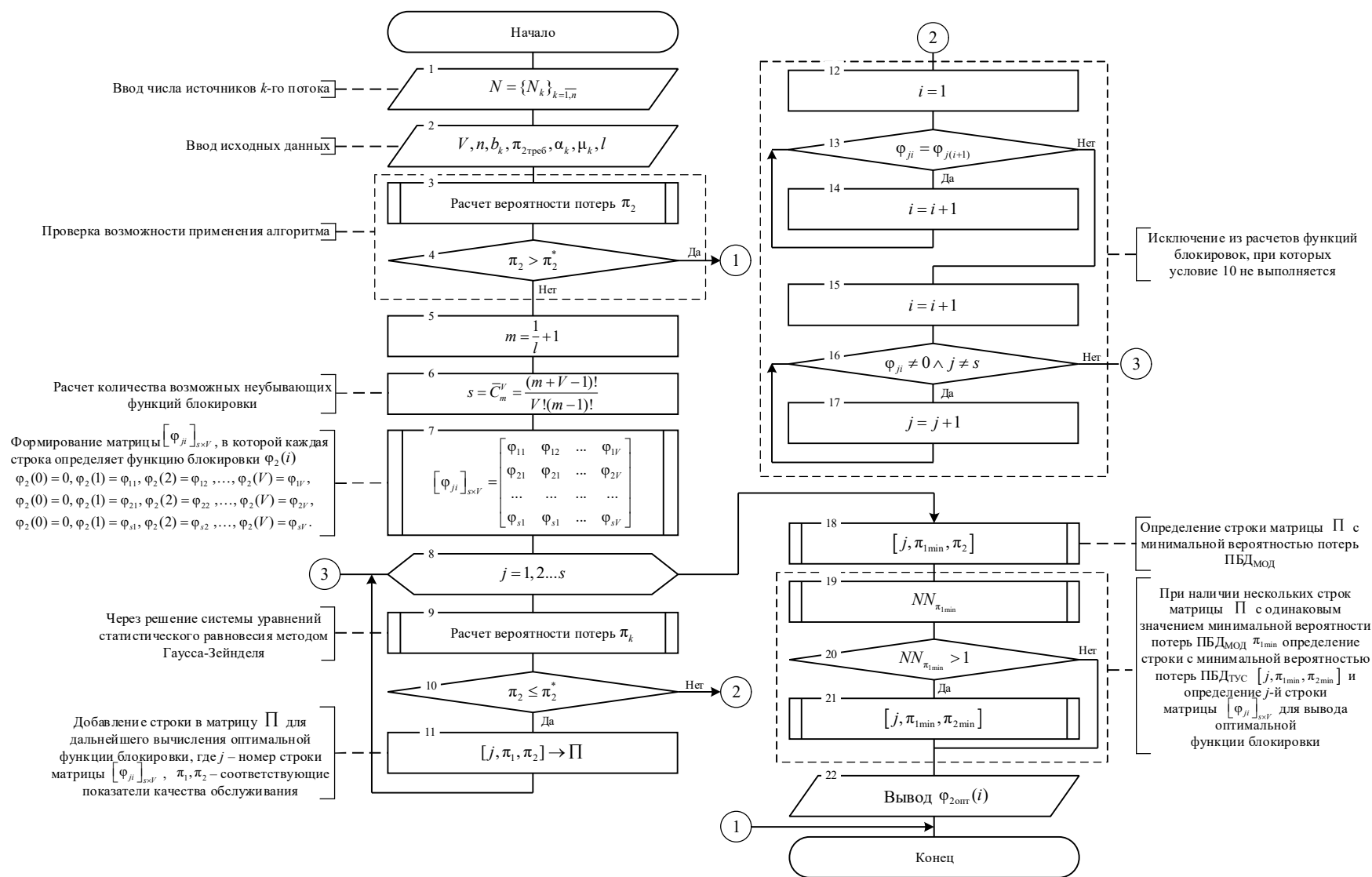


Рисунок 3.2 – Схема обобщенного алгоритма оптимизации параметров (определения оптимальной функции блокировки) звена СПД

Схема частного алгоритма № 1 формирования матрицы функции блокировки представлена на рисунке 3.3.

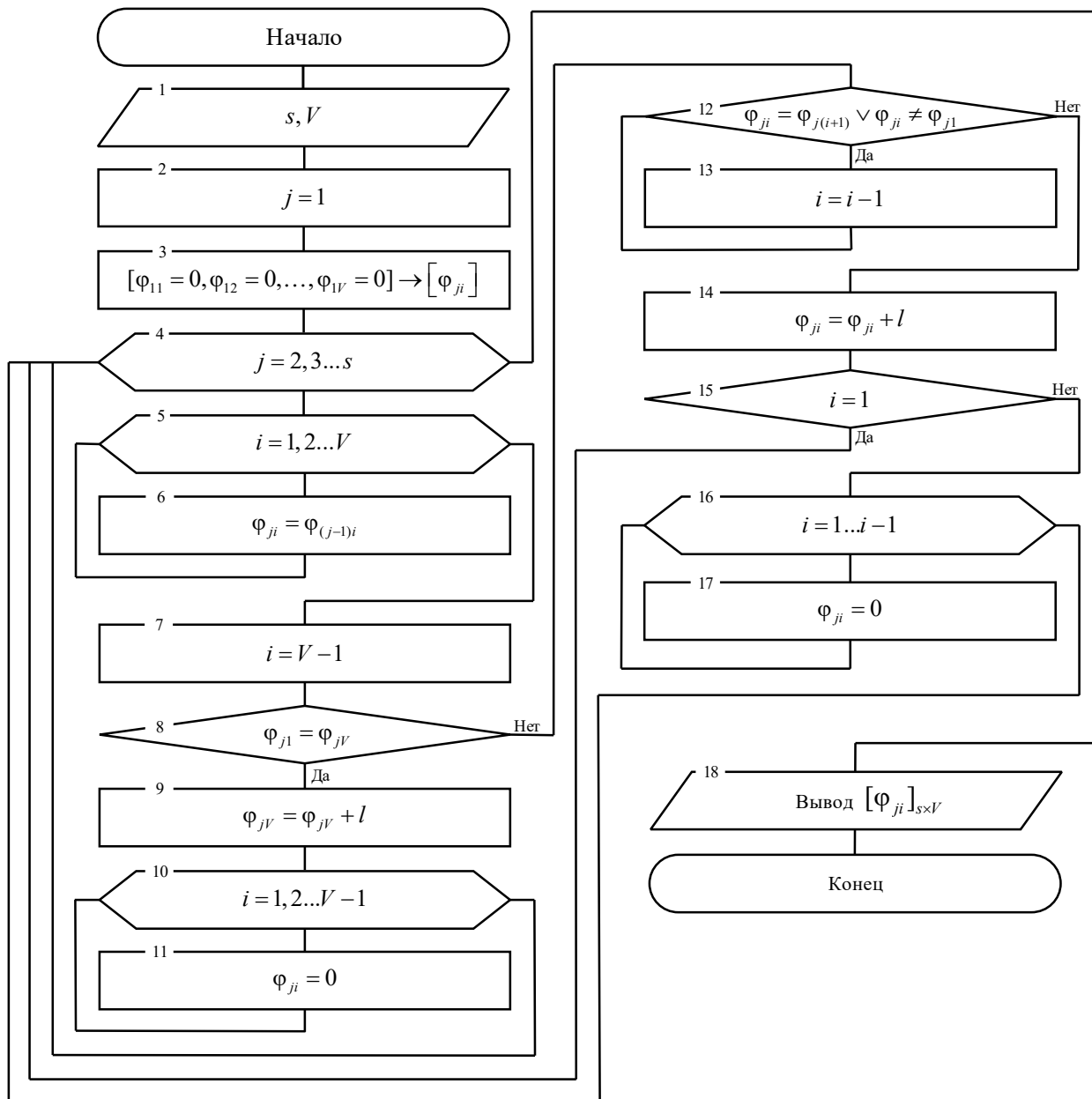


Рисунок 3.3 – Схема частного алгоритма № 1 формирования матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$

Частный алгоритм № 2 [88] расчета вероятности потерь заявок k -го потока (шаги 3, 9 обобщенного алгоритма) можно представить следующим образом:

Шаг 1. Ввод числа источников нагрузки k -го потока.

Шаг 2. Ввод исходных данных, где ε – параметр точности вычисления для метода Гаусса–Зейделя.

Шаг 3. Решение СУР методом Гаусса–Зейделя. Через $i_1(t)$ обозначено число заявок первого ($k = 1$) и $i_2(t)$ – второго ($k = 2$) потоков, находящихся в момент времени t на обслуживании. Динамика изменения с течением времени числа обслуживаемых заявок каждого из имеющихся потоков описывается двумерным случайным процессом $r(t) = (i_1(t), i_2(t))$, определённым на конечном пространстве состояний $\Omega = \{(i_1, i_2) : i \leq V\}$.

Шаг 4. Оценивание вероятностей состояний. Вычисление значений вероятностей нахождения системы в состояниях (i_1, i_2) .

Шаг 5. Вычисление вероятности потерь заявок с характеристиками состояния операторов из-за занятости всего канального ресурса обслуживанием заявок потоков равного или более высокого приоритета $\pi_{\text{пт1}}$.

Шаг 6. Вычисление вероятности потерь заявок с характеристиками состояния операторов из-за прерывания установленного соединения заявками более высокого приоритета $\pi_{\text{пр}}$.

Шаг 7. Вычисление вероятности потерь заявок с характеристиками состояния операторов π_1 .

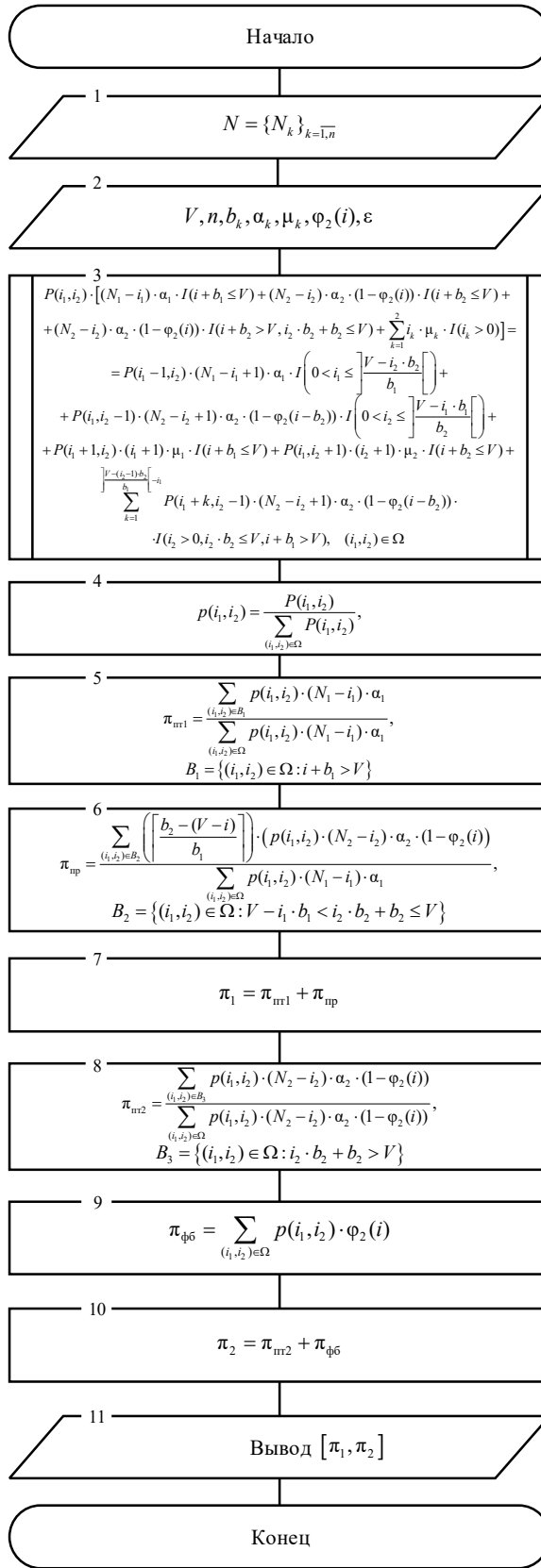
Шаг 8. Вычисление вероятности потерь заявок традиционных услуг связи из-за занятости всего канального ресурса обслуживанием заявок потоков равного приоритета $\pi_{\text{пт2}}$.

Шаг 9. Вычисление вероятности потерь заявок традиционных услуг связи из-за градиентной функции внутренней блокировки $\pi_{\text{фб}}$.

Шаг 10. Вычисление вероятности потерь заявок традиционных услуг связи π_2 .

Шаг 11. Вывод вероятности потерь заявок k -го потока π_k .

Изложенный частный алгоритм № 2 можно представить в виде схемы, изображенной на рисунке 3.4.

Рисунок 3.4 – Схема частного алгоритма № 2 расчета вероятности потерь π_k

При исходных данных $n = 2$, $b_1 = 1$ ЕКР, $b_2 = 2$ ЕКР, $\alpha_1 = 0,2$ Эрл, $\alpha_2 = 1$ Эрл, $\pi_2^* \leq 0,05$, $V = 10$ ЕКР, используемых в разработанной в п. 2.3 имитационной модели СПД, алгоритм выводит следующие значения оптимальной функции внутренней блокировки $\varphi_{2\text{опт}}(i)$:

$$\varphi_2(0, \dots, 8) = 0, \varphi_2(9) = 0,4, \varphi_2(10) = 0,4. \quad (3.4)$$

При этом, в процессе работы алгоритма сформирована матрица $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$, состоящая из 184757 строк ($s = 184757$). Результат (3.4) достигнут через 57 итераций. Изменения вероятностей потерь ПБД_{мод} и ПБД_{тус} в зависимости от используемой функции блокировки представлены в таблице 3.1 и в Приложении Б.

Таблица 3.1 – Сравнение показателей качества обслуживания заявок π_1, π_2 при изменении значений функции блокировки $\varphi_2(i)$

Градиентная функция внутренней блокировки $\varphi_2(i)$										Показатели качества обслуживания заявок	
$\varphi_2(1)$	$\varphi_2(2)$	$\varphi_2(3)$	$\varphi_2(4)$	$\varphi_2(5)$	$\varphi_2(6)$	$\varphi_2(7)$	$\varphi_2(8)$	$\varphi_2(9)$	$\varphi_2(10)$	π_1	π_2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,17698	0
0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,14839	0,04011
0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,4	0,13996	0,04877

На основании полученных результатов (3.4) можно посчитать выигрыш в качестве обслуживания ПБД_{мод} при обеспечении требуемого качества обслуживания ПБД_{тус}:

$$\sigma = \frac{\pi_1 - \pi_1^{\text{РКР}}}{\pi_1} \cdot 100\% = \frac{0,17698 - 0,13996}{0,17698} \cdot 100\% \approx 21\%,$$

где π_1^{PKP} – показатель качества обслуживания ПБД_{мод} при использовании оптимальной градиентной функции блокировки $\phi_{2\text{опт}}(i)$ и π_1 без нее.

Для оценки повышения степени использования пропускной способности канального ресурса СПД используются следующие аналитические выражения. Минимальный объем пропускной способности сети передачи данных специального назначения без использования градиентной функции блокировки с учетом неэффективного использования канального ресурса

$$V_{\min} = V_{2\min} + V_{1\min}, V_{1\min} = F_1(\alpha_1, \pi_1), V_{2\min} = F_1(\alpha_2, \pi_2), \pi_2 < \pi_2^*.$$

Минимальный объем пропускной способности сети передачи данных специального назначения с использованием оптимальной градиентной функции блокировки

$$V_{\min}^{\text{PKP}} = V_{2\min}^{\text{PKP}} + V_{1\min}^{\text{PKP}}, V_{1\min}^{\text{PKP}} = F_2(\alpha_1, \pi_1^{\text{PKP}}), V_{2\min}^{\text{PKP}} = F_2(\alpha_2, \pi_2^{\text{PKP}}), \pi_2^{\text{PKP}} \approx \pi_2^*.$$

Соответственно, на основании полученных результатов в п. 3.2 можно сделать вывод, что при $V_{\min} = V_{\min}^{\text{PKP}}$ характеристики качества обслуживания:

$$\pi_2^{\text{PKP}} \approx \pi_2^*;$$

$$\pi_2^{\text{PKP}} > \pi_2;$$

$$\pi_1^{\text{PKP}} < \pi_1.$$

Однако, учитывая зависимость вероятности потерь ПБД_{мод} от интенсивности поступления заявок, можно сделать вывод, что при $\pi_1^{\text{PKP}} \approx \pi_1$, увеличивается объем переданной информации о состоянии оператора $\alpha_1^{\text{PKP}} \geq \alpha_1$, при обеспечении требуемого качества обслуживания традиционных услуг связи, что соответствует поставленной задаче 1.5:

$$\rho_c = V(t_c)/V > \rho_{\text{стек}}, \pi_k \leq \pi_k^*.$$

Таким образом, обобщенный и частные алгоритмы в совокупности позволяют определить функцию блокировки, которая в условиях заданного объема канального ресурса обеспечит требуемое качество обслуживания двухмерного потока ПБД_{тус}+ПБД_{мод} заявок в системе массового обслуживания с абсолютными приоритетами, отказами и градиентным резервированием канального ресурса.

3.3. Особенности применения алгоритма оптимизации характеристик звена для определения параметров сетевого тракта СПД системы мониторинга КВО

Для централизованных систем мониторинга (рис. 1.3), в которых узел ИАС+БД размещается непосредственно на пункте управления КВО, оптимизации подлежат параметры сетевого тракта в целом (рис. 3.5), а не звена (рис. 2.1). Сложность данной ситуации состоит в том, что в СПД с КП реализуется множество алгоритмов маршрутизации, балансировки трафика, ограничения нагрузки и т.д. Следовательно, перед реализацией обобщенного алгоритма оптимизации в сети необходима выбрать маршрут для ПБД_{мод}, обеспечивающий возможность их передачи с заданным качеством.

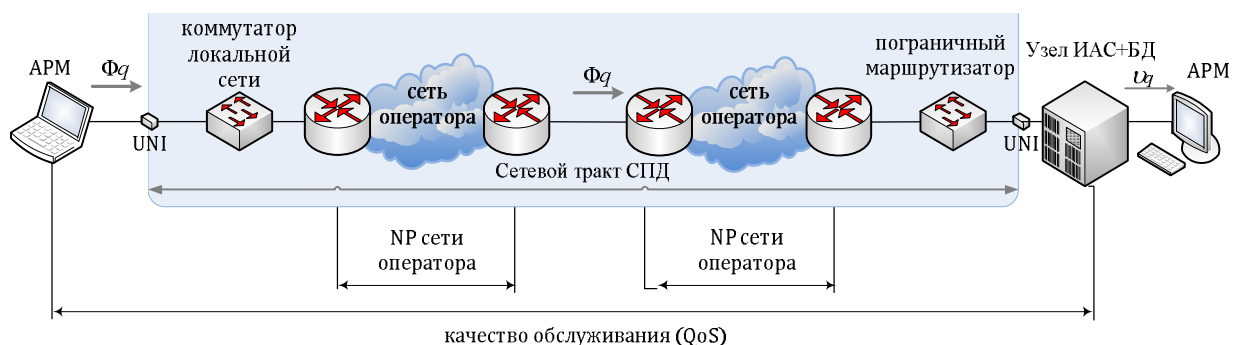


Рисунок 3.5 – Структурная модель системы передачи информации СПД для централизованного типа системы мониторинга КВО

Исследования показали, что для протяженных составных сетевых трактов имеются дополнительные рычаги повышения степени использования ресурсов пропускной способности. В этой связи в данном параграфе показаны пути не использовать упрощение (2.4), вытекающее из теоремы Форда-Фалкерсона [64], а представить составной сетевой тракт, доступный для обслуживания неординарного двумерного потока (ПБД_{тус} + ПБД_{мод}), в виде полнодоступной многозвенной СМО с РКР с эффектом «просеивания нагрузки».

Побудительным мотивом для такого представления звена СПД явился тот факт, что имитационная модель СПД, разработанная в п. 2.3, в ходе многократно повторяющихся компьютерных экспериментов демонстрирует на выходе параметры качества обслуживания, лучше расчетных. При этом получается, что реально доступный ресурс $V_{\text{дост}}$ пропускной способности составного тракта выше $\min V_{\text{кс } w}$, продиктованного выводами из теоремы Форда-Фалкерсона, т. е.

$$V_{\text{дост}} > V_{\text{кс1}} \cap V_{\text{кс2}} \cap \dots \cap V_{\text{кс } W}; V_{\text{дост}} > \min V_{\text{кс } w}, \quad (3.5)$$

где $V_{\text{кс } w}$ – пропускная способность w -го простого канала связи, $w = 1, \dots, W$.

Для формального описания данной ситуации и более точного решения задачи оптимизации далее предлагается использование инструментария метода «просеянной нагрузки» [91, 92], модифицированного в [93].

Метод «просеянной» нагрузки (*Reduced Load Approximation, RLA*) базируется на том, что на многозвенном маршруте (составном канале) потери нагрузки в звене (простом канале) будут определяться не только параметрами рассматриваемого звена (простого канала), но и характеристиками смежных с ним (инцидентных ему) звеньев. Это значит, что неоднородный поток сообщений, проходящий через w -е звено, создает нагрузку не равную входной, а меньшую. Уменьшение поступающей нагрузки на w -е звено обусловлено как раз наличием потерь $\pi_{k,w}$ в предыдущих

звеньях, где k – номер потока заявок, $k = 1, \dots, n$; n – число потоков заявок; w – номер звена, $w = 1, \dots, W$.

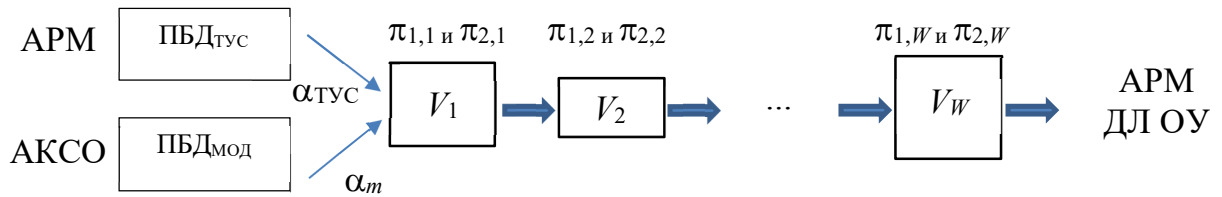


Рисунок 3.6 – Представление системы передачи информации СПД
в виде многозвенной полнодоступной СМО с РКР

Аппроксимация Келли [91] оперирует параметрами пуассоновского потока, первой формулой Эрланга, что больше соответствует числу источников информации, стремящемуся к бесконечности. В рассматриваемой сети передачи данных специального назначения обслуживается неординарный поток заявок, что ставит под вопрос адекватность применения метода RLA в рассматриваемых условиях. Однако в [93] показана возможность более точного вычисления вероятности того, что поступившая заявка k -го потока не получит необходимый ей ресурс среды передачи на w -м звене. Для этого кроме суммарной нагрузки, поступающей на звено w -е звено вида

$$A_w = \sum_{k=0}^n \alpha_{k,w} b_k, \quad (3.6)$$

предлагается использовать дополнительный параметр неоднородной нагрузки – ее дисперсия в w -м звене вида:

$$\Delta_w = \sum_{k=0}^n \alpha_{k,w} b_k^2, \quad (3.7)$$

где b_k – потребность в ЕКР для обслуживания k -го потока.

Тогда коэффициент неравномерности (скупенности) нагрузки, поступающей на звено:

$$g_w = \frac{\Delta_w}{A_w} = \frac{\sum_{k=0}^n \alpha_{k,w} b_k^2}{\sum_{k=0}^n \alpha_{k,w} b_k} = \frac{\sum_{k=0}^n (\alpha_{k,w} b_k) b_k}{\sum_{k=0}^n \alpha_{k,w} b_k}. \quad (3.8)$$

Как видно из этого соотношения, что только для однородного (равномерного) узкополосного трафика (когда все $b_k = 1$) коэффициент $g_w = 1$. Если же разные категории источников нагрузки имеют различные требования к пропускной способности виртуального соединения (присутствуют $b_k \neq b_t$ при $k \neq t$), то g_w численно равен средневзвешенной ширине полосы пропускания, необходимой для обслуживания одного вызова. При этом по формуле (3.8) усреднение производится с весовыми коэффициентами $(\alpha_{k,w} b_k)$, которые характеризуют интенсивность поступающей нагрузки для отдельных составляющих объединенного трафика.

С точки зрения настоящего исследования это можно интерпретировать следующим образом: вероятности потерь $\pi_{k,w}$ в звеньях сетевого тракта будут асимптотически приближаться снизу (т.е. показатель качества будет лучше, чем в модели) к решению, полученному в п. 3.2. При поступлении на сетевой тракт однородного (равномерного) узкополосного трафика (когда все $b_k = 1$) решения для звена и сетевого тракта могут совпасть.

Следует отметить, что в условиях реальной аренды канального ресурса полнодоступность составного сетевого тракта будет определяться физическими свойствами линий привязки сети передачи данных специального назначения к сети связи оператора (рис 3.5), на которые, естественно, может и должен влиять персонал и должностные лица органов управления системы мониторинга критически важного объекта.

При недостаточной пропускной способности линий привязки схема не будет полнодоступной, а метод «просеянной» нагрузки RLA в уточненном виде [93] будет неприменим, так как ограничением этого инструментария является единство скорости передачи по всему многозвенному маршруту.

Таким образом, при оптимизации параметров составного сетевого тракта сети передачи данных специального назначения далее предлагается использовать обобщенный алгоритм оптимизации характеристик звена. Вероятность потерь в сетевом тракте в реальности будет ниже, чем в решении, полученном при оптимизации параметров звена. Совпадение возможно только для случая поступления на сетевой тракт однородного (равномерного) узкополосного трафика.

3.4. Анализ свойств алгоритма оптимизации характеристик звена СПД

Перед применением разработанного научно-методического инструментария на практике целесообразно провести системное исследование его свойств.

Согласно [94], алгоритм называется *корректным*, если выполнены следующие условия:

1. После выполнения конечного числа элементарных операций алгоритм позволяет преобразовать любые входные данные в результат.
2. Результат устойчив по отношению к малым возмущениям входных данных.
3. Результат обладает вычислительной устойчивостью.

Ниже производится анализ выполнения указанных условий.

1. Выполнение условия *конечности* для алгоритма при корректности и непротиворечивости исходных данных подтверждается отсутствием бесконечных циклов, операторов ветвления, приводящих к заиклииванию. Сходимость алгоритма определяется также отсутствием бесконечных значений исходных данных (в теории телетрафика рассматриваются только финитные

потоки) и конечностью решения подзадач, кроме того, проверка условия выполнения требований по качеству обслуживания препятствует заиклииванию.

2. *Устойчивость по входным данным* означает, что результат непрерывным образом зависит от входных данных при условии, что отсутствует вычислительная погрешность. Для проверки данного условия при работе алгоритма, когда число источников нагрузки $N_k \leq 100$, целесообразно рассмотреть полученные выходные данные при вариации исходных данных.

Исходные данные 1: $V = 20$, $n = 2$, $N_1 = N_2 = 5$, $b_1 = 1$, $b_2 = 4$, $\alpha_1 = 0,7$, $\alpha_2 = 0,5$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\pi_2^* = 0,05$, $l = 1; 0,5; 0,25$.

Исходные данные 2: $V = 20$, $n = 2$, $N_1 = N_2 = 5$, $b_1 = 1$, $b_2 = 4$, $\alpha_1 = 0,7$, $\alpha_2 = 0,8$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\pi_2^* = 0,05$, $l = 1; 0,5; 0,25$.

Исходные данные 3: $V = 12$, $n = 2$, $N_1 = N_2 = 5$, $b_1 = 1$, $b_2 = 2$, $\alpha_1 = 0,7$, $\alpha_2 = 0,7$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\pi_2^* = 0,05; 0,04 \dots 0,01$, $l = 0,1$.

Результаты работы алгоритма по вычислению оптимальной градиентной функции внутренней блокировки, представлены в таблицах 3.2, 3.3 и 3.4.

Таблица 3.2 – Результаты работы алгоритма при исходных данных 1

Изменение аргумента функции блок-ки, l	Кол-во строк матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$, s	Номер j -й строки матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$	Кол-во итераций	π_1	π_2 ($\pi_2^* = 0,05$)	Оптимальная функция блокировки $\Phi_{2 \text{ опт}}(i)$						
						0 - 14	15	16	17	18	19	20
-	-	-	-	0,027	0	0	0	0	0	0	0	0
1	21	5	5	0,009	0,048	0	0	0	1	1	1	1
0,5	231	63	25	0,006	0,044	0	0	0,5	0,5	1	1	1
0,25	10626	4966	248	0,003	0,049	0	0	0,75	0,75	1	1	1

Наблюдаемое уменьшение вероятности потерь низкоприоритетных заявок объясняется вытеснением с обслуживания ресурсоемких заявок в соответствии с правилом, заданным градиентной функцией внутренней блокировки.

Представленный механизм позволяет устранить негативные последствия неконтролируемого перераспределения канального ресурса СПД, чем обеспечить заданное качество передачи ПБД_{тус} традиционных услуг связи, так и ПБД_{мод} сообщений в многомодальном представлении.

Таблица 3.3 – Результаты работы алгоритма при исходных данных 2

Изменение аргумента функции блок-ки, l	Кол-во строк матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$, s	Номер j -й строки матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$	Кол-во итераций	π_1	π_2 ($\pi_2^* = 0,05$)	Оптимальная функция блокировки $\varphi_{2\text{опт}}(i)$						
						0 - 14	15	16	17	18	19	20
-	-	-	-	0,102	0	0	0	0	0	0	0	0
1	21	2	2	0,092	0,026	0	0	0	0	0	0	1
0,5	231	4	7	0,077	0,044	0	0	0	0	0,5	0,5	0,5
0,25	10626	45	44	0,071	0,049	0	0	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5

Таблица 3.4 – Результаты работы алгоритма при исходных данных 3

Изменение аргумента функции блок-ки, l	Кол-во строк матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$, s	Номер j -й строки матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$	Кол-во итераций	π_1	π_2	Оптимальная функция блокировки $\varphi_{2\text{опт}}(i)$						
						0 - 6	7	8	9	10	11	12
-	-	-	-	0,021	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	646646	306593	711	0,009	0,0497 ($\pi_2^* = 0,05$)	0	0	0	0	0,4	0,7	1
0,1	646646	157796	419	0,011	0,0397 ($\pi_2^* = 0,04$)	0	0	0	0	0,1	0,8	0,9
0,1	646646	130339	222	0,014	0,0299 ($\pi_2^* = 0,03$)	0	0	0	0	0	0,6	0,9
0,1	646646	293943	91	0,016	0,0199 ($\pi_2^* = 0,02$)	0	0	0	0	0	0,2	1
0,1	646646	18565	24	0,019	0,0099 ($\pi_2^* = 0,01$)	0	0	0	0	0	0	0,7

При этом в результате работы алгоритма для исходных данных 1, 2 и 3 небольшие изменения исходных данных незначительно приводят к изменению выходных данных. Таким образом, результат устойчив по отношению к малым возмущениям входных данных.

3. Алгоритм является *вычислительно устойчивым*, если вычислительная погрешность результата стремится к нулю при стремлении к нулю значения машинного эпсилона. Для того, чтобы доказать вычислительную устойчивость, необходимо найти критические фрагменты алгоритма с точки зрения корректности (извлечение квадратного корня, деление на ноль и др.) определении предусловий для этих фрагментов и оформлении всех предусловий в единую систему условий корректности алгоритма.

Анализ шагов разработанного алгоритма при его работе показывает, что критическими операциями являются:

циклы 4, 5, 10, 12, 16 в частном алгоритме № 1 формирования матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$, представленному на рисунке 3.3;

циклы 8, 16 основного обобщенного алгоритма;

функция деления на переменную: шаги 4, 5, 6, 8 в процедуре расчета вероятности потерь заявок k -го потока π_k по частному алгоритму № 2, представленному на рисунке 3.4;

Циклы 4, 5, 10, 12, 16 не приведут к заикливлению, так как число строк s и число столбцов V матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$ конечно. Алгоритм оптимизации будет всегда завершен вследствие того, что исходные данные имеют конечные, конкретные значения и при условии корректности и непротиворечивости исходных данных всегда будет найдена оптимальная функция блокировки, при которой будет выполняться условие 10.

Циклы 8, 16 обобщенного алгоритма не приведут к заикливлению, так как число строк матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$ конечно, соответственно алгоритм будет всегда завершен.

На шаге 6 частного алгоритма № 2 при вычислении $p(i_1, i_2)$ знаменатель $\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} P(i_1, i_2)$ при условии корректности исходных данных не будет равен 0, следовательно, деления на 0 не будет. На шагах 5, 6 при вычислении $\pi_{пт1}$ и $\pi_{пр}$, знаменатель данных выражений $\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} p(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1$ при условии корректности исходных данных не будет равен 0, следовательно, деления на 0 не будет. На шаге 8 при вычислении $\pi_{пт2}$, знаменатель $\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} p(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))$ при условии корректности исходных данных ($\varphi_2(0) = 0$) не будет равен 0, следовательно, деления на 0 не будет.

Таким образом, разработанный научно-методический инструментарий является корректным. Однако его практическая реализация возможна только при условии его умеренной *вычислительной сложности*.

Основная сложность обобщенного алгоритма определяется выполнением представленной на рисунке 3.2 процедуры расчета вероятности потерь заявок k -го потока π_k и решением СУР методом Гаусса–Зейделя в блоке 3 частного алгоритма № 2. Данный блок представляет собой совокупность итерационных процессов, сложность которых зависит от размерности K СУР и количества итераций t , затраченных для достижения заданной малости нормированной разности между двумя последовательными приближениями к вектору неизвестных вероятностей ε [7]. Очевидно, что эти действия сводятся к умножению $K \times K$ матрицы СУР на вектор длины K , что потребует $O(K^2)$ операций, и к последующему сложению двух векторов длины K , что потребует еще K операций. В итоге каждая итерация требует $O(K^2)$ операций, тогда в целом количество арифметических операций, необходимых для решения СУР, определится как $t \cdot O(K^2)$.

Данная процедура в соответствии с циклом 8 повторяется r раз (значение r зависит от входных данных, $r < s$) для поиска функций блокировки, позволяющих

выполнить условие $\pi_2 < \pi_2^*$. В соответствии с этим общее количество арифметических операций, производимых разработанным алгоритмом, определится как $n \cdot r \cdot t \cdot O(K^2)$, а асимптотическая вычислительная сложность данного алгоритма будет составлять $O(K^2)$.

Таким образом, алгоритм относится к классу алгоритмов с полиномиальной вычислительной сложностью и является применимым на практике [95].

Далее необходимо определить объем требуемой памяти для разработанного алгоритма, он определяется числом переменных, которые требуется хранить в памяти в ходе вычислений. Для метода Гаусса–Зейделя целесообразно разместить в памяти один вектор длины K для хранения последовательных приближений к вектору неизвестных вероятностей. Следовательно, асимптотическая оценка этой величины будет составлять $O(K)$.

Порядок применения разработанного обобщенного алгоритма заключается в следующем. Предварительно, на основе известных скоростей, требуемых для одной заявки каждого потока, определяют величину ЕКР и переводят скорости из бит/с в единицах канального ресурса. Затем выполняются шаги, определенные в разработанном алгоритме, результатом работы которых является сформированная матрица $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$ и вычисленная на ее основе оптимальная градиентная функция внутренней блокировки.

Отличием настоящего алгоритма от алгоритмов, основанных на методах равномерного поиска, является возможность исключения из расчетов функций блокировок, на основании которых невозможно выполнить условие $\pi_2 < \pi_2^*$, что позволяет существенно уменьшить количество итераций алгоритма (при исходных данных 2 и $l = 0,25$ в 241 раз, при исходных данных 3 и $\pi_2^* = 0,05$ в 909 раз).

Проведенное исследование корректности разработанного алгоритма показывает, что после выполнения конечного числа элементарных операций алгоритм позволяет преобразовать любые корректные и непротиворечивые

входные данные в результат, который устойчив по отношению к малым возмущениям входных данных, и обладает вычислительной устойчивостью.

Таким образом, на основе разработанного обобщенного и частных алгоритмов, корректность которых доказана выше, целесообразна разработка программного обеспечения (ПО) систем коммутации сети передачи данных специального назначения. Соответствующие программные модули позволят реализовать на практике дисциплину обслуживания с градиентным резервированием канального ресурса для обеспечения передачи наряду с типовыми услугами связи сообщений в модальном представлении. Данная реализация в определенных условиях будет способствовать повышению степени использования ресурсов пропускной способности сети передачи данных специального назначения системы мониторинга критически важных объектов.

Выводы по третьему разделу

1. Исследование исходных данных и анализ закономерностей обслуживания двух неординарных потоков заявок от ограниченной группы источников с абсолютными приоритетами, отказами и градиентным резервированием канального ресурса, выявленные разработанной в разделе 2 аналитической моделью, составляют необходимые и достаточные условия для разработки алгоритма оптимизации параметров звена СПД с передачей сообщений как в традиционном, так и многомодальном представлении.

2. Обобщенный и частные алгоритмы оптимизации параметров звена СПД в совокупности позволяют с необходимой точностью определить функцию блокировки, которая в условиях заданного объема канального ресурса обеспечит качество обслуживания двумерного неординарного потока $\text{ПБД}_{\text{ТУС}} + \text{ПБД}_{\text{МОД}}$ заявок в СМО с абсолютными приоритетами, отказами и РКР.

3. При оптимизации параметров составного сетевого тракта СПД далее предлагается использовать обобщенный алгоритм оптимизации характеристик звена. В соответствии с закономерностями предметной области на базе модифицированного метода RLA показано, что вероятность потерь в сетевом тракте в реальности будет ниже, чем в решении, полученном при оптимизации параметров звена. Совпадение возможно только для случая поступления на сетевой тракт однородного (равномерного) узкополосного трафика.

4. Для исследования свойств алгоритма проведены компьютерные эксперименты с использованием имитационной модели, разработанной в разделе 2. Анализ показал, что после выполнения конечного числа элементарных операций алгоритм позволяет преобразовать любые корректные и непротиворечивые входные данные в результат, который устойчив по отношению к малым возмущениям входных данных, обладает вычислительной устойчивостью и удовлетворительной вычислительной сложностью. Это все обеспечивает применение данных алгоритмов для совершенствования ПО систем коммутации СПД.

Раздел 4. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА В СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ГОСУДАРСТВА

4.1. Основные пути внедрения разработанных модели и алгоритма в СПД с технологией *IP/MPLS/Ethernet* систем мониторинга критически важных объектов государства

Потенциальные возможности разработанных моделей звена СПД (п. 2.2) и алгоритма оптимизации его параметров (п. 3.2) для перспективных технологий на примере СПИ *IP/MPLS/Ethernet* [96] для систем мониторинга КВО государства могут быть реализованы по следующим направлениям внедрения (рис. 4.1):

теоретическому, состоящему в применении формализмов в расчетных и исследовательских задачах планирования и проектирования СПД;

практическому, заключающемуся в доработке аппаратно-программных средств передачи, мультиплексирования и коммутации СПД.

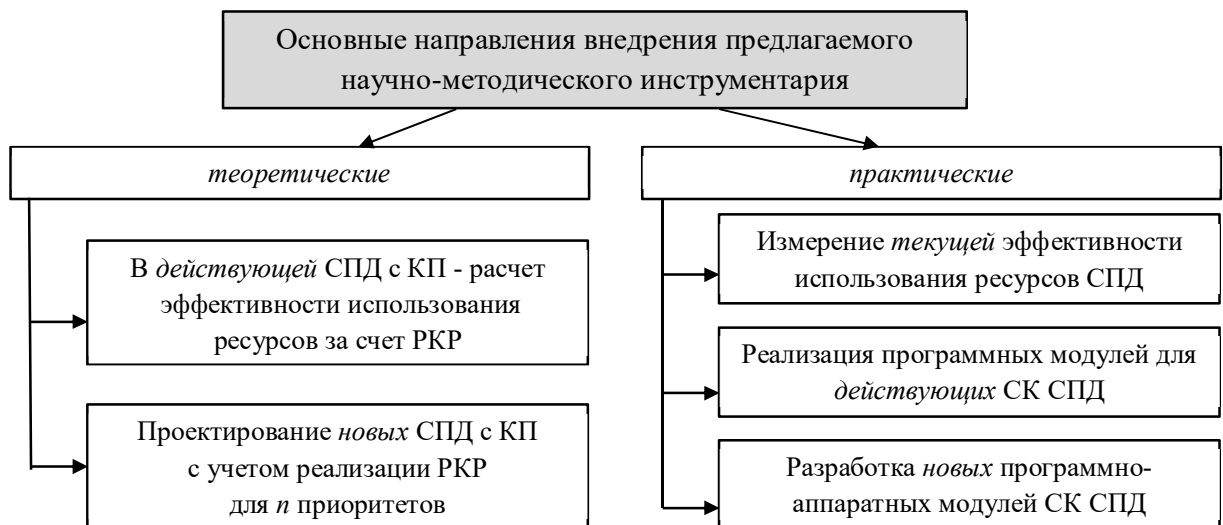


Рисунок 4.1 – Структура научно-технических предложений по применению разработанного инструментария в СПД

Существенное значение для внедрения разработанного инструментария имеет текущее состояние СПД системы мониторинга КВО. Это состояние определяют: метод (способ) коммутации и схема мультиплексирования ПБД, составляющие сетевую технологию, профиль нагрузки от пользователей и средств контроля технического состояния элементов КВО, наличие канального ресурса и его типизация (физические и/или логические [16, 54, 55] каналы), способ управления функционированием узлов и линий связи.

При переводе СПИ с *SyTDM* на технологии с коммутацией пакетов (*StTDM*) или в случае проектирования новой СПД с КП [50] или ПИКС [10], предлагаемый инструментарий позволяет произвести обоснование объема канального ресурса (п. 4.2), обеспечивающего обслуживание ПБД различных источников нагрузки с требуемым качеством. Исследования показывают, что модели и алгоритмы могут быть отлажены не только под двухмерный поток (традиционные услуги и приложения + сообщения в многомодальном представлении), но и под большее число приоритетов. Увеличение числа приоритетов при градиентном РКР может позволить, исходя из оперативной обстановки, ранжировать все $n \geq 2$ источников нагрузки по их важности. При этом основные выражения моделей и алгоритмов останутся без изменения [72, 73, 84, 88].

В ходе эксплуатации действующих СПД, разработанные модели позволяют на базе произведенных измерений оценить долю пропускной способности, которую можно перераспределить под передачу сообщений в многомодальном представлении. Если такая доля существует (т. е. доказано, что ресурс пропускной способности используется неэффективно), возникает необходимость реализовать дисциплину обслуживания с РКР. Важность этапа измерения привела к необходимости разработки дополнительных средств для обеспечения большей точности и чувствительности оценки параметров звена СПД с технологией *IP/MPLS/Ethernet*. В разработанных для этого способе и устройстве [97] сначала осуществляется формирование случайного потока ПБД_{тус} на стороне отправителя в виде пакетов протокола ICMP, при этом длина ПБД_{тус} определяется

по случайному закону усеченного и смещенного геометрического распределения (рис. 4.2).

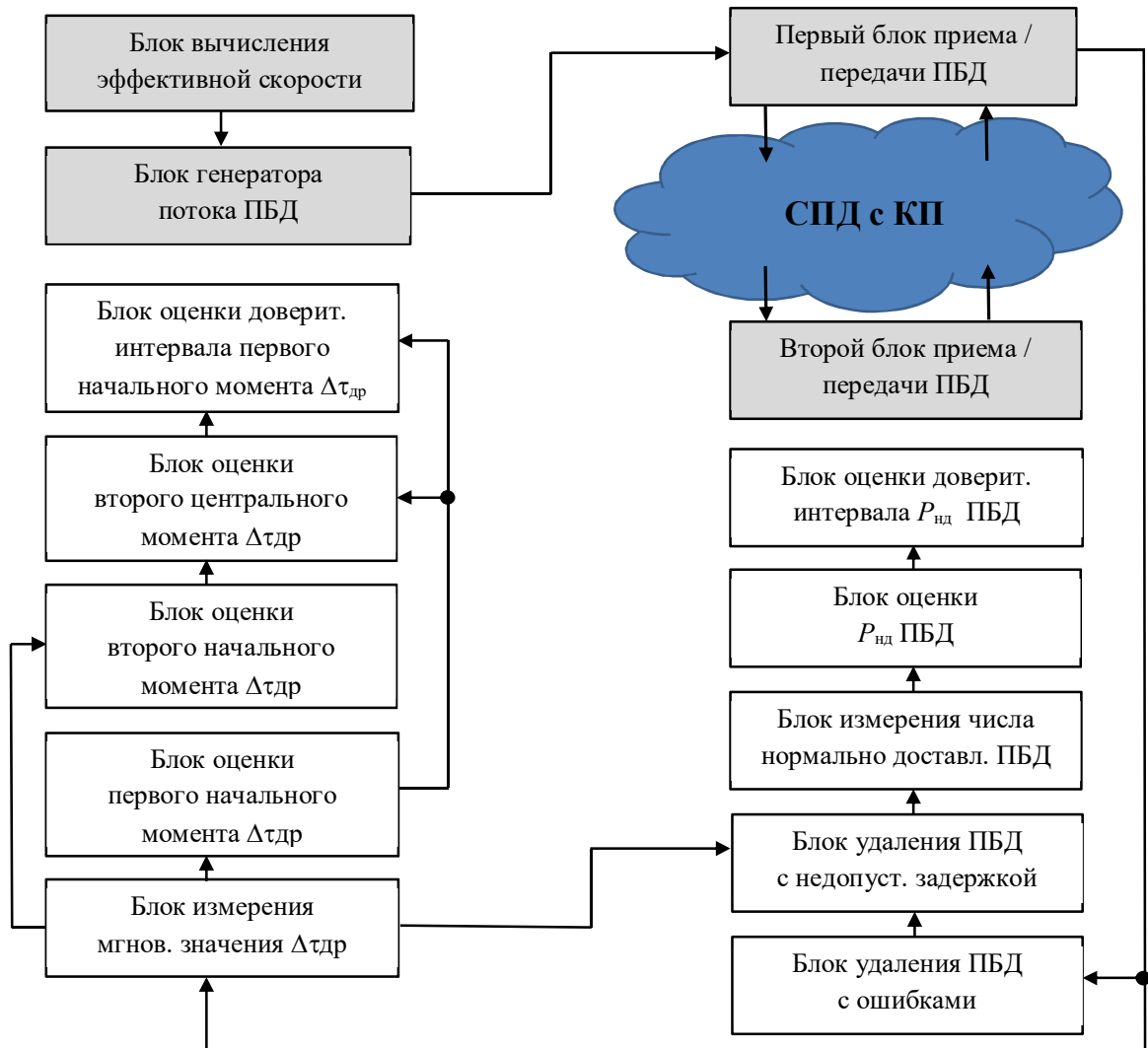


Рисунок 4.2 – Функциональная схема устройства измерения параметров качества функционирования СПД с технологией *IP/MPLS/Ethernet*

Аналогично осуществляется передача ПБД_{тус}, оценка и расчеты для звена СПД в обратном направлении передачи. Далее вычисляются эффективная скорость передачи. После удаления ПБД_{тус} с завышенной задержкой и недопустимым количеством ошибочно принятых бит осуществляются необходимые расчеты параметров СПИ. Как показали эксперименты, такая процедура за счет

использования ISMP протокола и формализмов, основанных на усеченном и смещенном геометрическом распределении случайной величины, позволяет увеличить точность оценки вероятности надежности доставки ПБД_{тус} (до 23%) и времени задержки $\Delta t_{др}$ на двухстороннее распространение для ПБД_{тус} (до 19 %). В конечном итоге это позволяет более достоверно определить объем ресурса, обеспечивающего качественную передачу ПБД_{мод}. Если измерения показывают эффективность использования ресурсов пропускной способности СПИ, то для передачи ПБД_{мод} необходимо организовать (приобрести) дополнительный канальный ресурс.

Если измерения подтверждают неэффективность использования канального ресурса, то при помощи модели СМО с РКР возможно определить параметры для реализации мультиплексирования [98] и передачи [99] сообщений в многомодальном представлении, а на базе алгоритма – оптимальные характеристики для настройки коммутаторов *MPLS/Ethernet* СПД [100]. Кроме того, разработанный инструментарий позволяет доработать ПО (п. 4.3) систем коммутации СПД, с тем, чтобы обеспечить оперативную перестройку аппаратно-программных средств передачи многомодальной информации под изменяющиеся задачи контроля состояния КВО государства.

4.2. Применение разработанного инструментария для решения расчетных и исследовательских задач оптимизации СПД с технологией *IP/MPLS/Ethernet*

Эволюция федеральной системы мониторинга критически важных объектов государства приводит к планомерной модернизации соответствующих сетей передачи данных специального назначения [21, 23]. В настоящее время перед органами управления КВО ставятся задачи перевода СПИ с *SyTDM* на технологии с *StTDM*, например, на *IP/MPLS/Ethernet*, так как данная технология широко используется в инфокоммуникационных системах общего пользования. В некоторых случаях органы управления КВО вынуждены решать задачи

проектирования новой сети передачи данных специального назначения с коммутацией пакетов.

В связи с автоматизацией процессов управления СПД, в АРМ должностных лиц органов управления реализованы системы поддержки принятия решения (СППР).

Под *системой поддержки принятия решения* далее понимается человеко-машинная аппаратно-программная интерактивная система, которая позволяет лицам, принимающим решения (ДЛ ОУ), использовать данные, знания, модели и алгоритмы для анализа и решения слабоструктурируемых и неструктурируемых задач [101, 102].

Исследования, проведенные в разделах 2 и 3 показывают, что предлагаемый инструментарий позволяет произвести обоснование объема канального ресурса в СПД, обеспечивающего обслуживание протокольных блоков данных различных источников нагрузки с требуемым качеством. Ниже это продемонстрировано на исходных данных СПД с технологией IP/MPLS/Ethernet на примере АКСО, реализующего способ определения истинности речевой информации [103] и/или средств распознавания клавиатурного почерка [41], разработанных в ходе проводимых исследований.

Применительно к процессу принятия решения на модернизацию сети передачи данных специального назначения (ее проектирование), СППР должна обеспечить должностных лиц органов управления ограниченным множеством вариантов построения звена СПИ с РКР (обоснованное и ранжированное по показателям качества доставки ПБД_{тус} и ПБД_{мод}) для принятия окончательного решения.

С этой целью целесообразно итерационное применение разработанной в ходе исследований «Программы вычисления оптимального значения функции блокировки коммутатора» [100] с последующим определением эффективности использования канального ресурса (рис. 4.3).

При этом необходимо отметить, что результативность применения разработанных научно-методических средств существенным образом зависит

от объема и точности имеющихся исходных данных. Ниже для наглядности дальнейших рассуждений представлены примеры применения предлагаемого инструментария для различных управленческих ситуаций в задачах проектирования новых сетей передачи данных специального назначения с коммутацией пакетов системы мониторинга КВО.

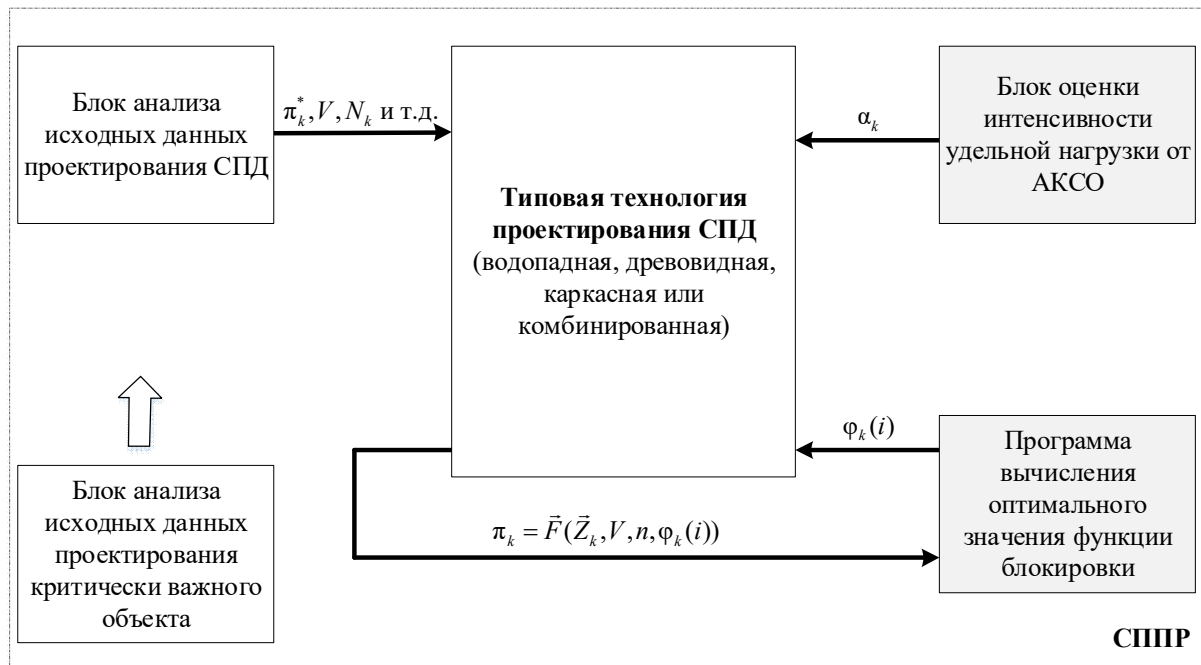


Рисунок 4.3 – Методические аспекты применения разработанного инструментария в составе СППР для решения задач проектирования СПД

В данных примерах будет сравниваться:
 существующий (экстенсивный) подход к организации дополнительного тракта передачи многомодальных сообщений;
 разработанный подход к организации такого тракта с реализацией дисциплины обслуживания с абсолютным приоритетом и градиентным РКР.

В соответствии с целевыми установками диссертационной работы данное сравнение будет осуществлено по показателям эффективности использования ресурсов пропускной способности.

Пример 1. На сетевое оборудование СПД системы мониторинга КВО поступает поток заявок услуг видеоконференцсвязи ($k = 2$). Видеоконференция реализуется по протоколу H.323 на скорости 380 кбит/с. Динамическая идентификация состояния оператора КВО реализуется посредством анализа модальностей видео- и аудиопотоков (180 кбит/с) и модальностей клавиатурного почерка индивида (10 кбит/с). Параметры идентификации поступают на обслуживание в виде потока заявок протокольных блоков данных модальностей ($k = 1$). Исходными данными для проектирования сети передачи данных специального назначения являются: $N_1 = N_2 = 5$, $b_1 = 1$ ЕКР, $b_2 = 2$ ЕКР, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 1$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\pi_1^* = \pi_2^* = 0,05$.

При экстенсивном подходе к проектированию СПД ($\pi_1 = \pi_2 = 0$) минимально необходимая пропускная способность арендуемого канала связи для обслуживания потоков составляет $V = 15$ ЕКР [20].

При этом, на основании приведенных в разделах 2 и 3 расчетных формул (2.7-2.10) каналный ресурс звена СПИ, удовлетворяющий требованиям качества обслуживания гетерогенного трафика, составляет:

без РКР $V = 13$ ЕКР с достижимыми показателями качества соответственно $\pi_1 = 0,022$, $\pi_2 = 0$, удовлетворяющим нормативным;

с РКР $V = 13$ ЕКР с достижимыми показателями качества соответственно $\pi_1 = 0,013$, $\pi_2 = 0,048$, удовлетворяющим нормативным.

Таким образом, в данной предпроектной ситуации при использовании разработанного инструментария появляется возможность обеспечить требуемое качество обслуживания обоих потоков заявок, задействовав меньшую на 2 ЕКР (380 кбит/с) пропускную способность каналов связи. При этом видно, что реализация градиентного РКР позволяет перераспределить объем каналного ресурса в СПД в пользу передачи идентификационных сведений об операторе АРМ КВО с гарантированным обеспечением требуемого качества предоставления типовых услуг связи. При таком сценарии минимально необходимая пропускная

способность каналов СПД для передачи перспективных и традиционных услуг связи снижается на 13%.

Пример 2. Проектируется СПД для оператора АРМ дежурно-диспетчерской службы системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб, принимающего вызов по единому номеру «112». Типовой услугой связи, предоставляемой одному оператору является телефония на скорости передачи 64 кбит/с. Динамический мониторинг физиологического состояния оператора АРМ реализован как по параметрам аудиомодальностей (32 кбит/с), так и с использованием модальностей клавиатурного почерка при заполнении им карточек события (16 кбит/с).

Исходными данными для проектирования являются: $N_1 = N_2 = 5$, $b_1 = 3$ ЕКР, $b_2 = 4$ ЕКР (ЕКР = 16 кбит/с), $\alpha_1 = 0,5$, $\alpha_2 = 0,5$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\pi_1^* = \pi_2^* = 0,05$.

Расчеты показали, что при экстенсивном подходе к проектированию такой СПД ($\pi_1 = \pi_2 = 0$) минимально необходимая пропускная способность канала связи составляет $V = 35$ ЕКР.

Объем канального ресурса, обеспечивающий качественное обслуживание обоих потоков заявок, составляет:

без РКР $V = 24$ ЕКР ($\pi_1 = 0,047$, $\pi_2 = 0$);

с РКР $V = 23$ ЕКР ($\pi_1 = 0,05$, $\pi_2 = 0,047$).

Видно, что в данной предпроектной ситуации выигрыш в эффективности использования канального ресурса имеется даже относительно СМО с приоритетным обслуживанием, но без РКР. Относительно экстенсивного решения предлагаемый подход гарантирует экономию ресурсов пропускной способности 192 кбит/с на одного оператора АРМ, что составляет 34 % от первоначального значения арендуемого канального ресурса.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что выигрыш в применении разработанного научно-методического аппарата существенным образом зависит от характеристик предоставляемых типовых услуг связи и применяемых методов динамической идентификации состояния операторов АРМ КВО. Возможны

ситуации, при которых показатели качества обслуживания потоков заявок и эффективность использования ресурсов пропускной способности СМО с абсолютным приоритетом и РКР будут сходиться к соответствующим характеристикам СМО с абсолютным приоритетом (без РКР).

Таким образом, разработанные в ходе диссертационного исследования модели и алгоритмы, реализованные в составе СППР, позволяют принимать более обоснованные решения на модернизацию СПД (ее проектирование) с точки зрения эффективности использования канальных ресурсов. Данный вывод подтвержден в ходе множества компьютерных экспериментов для различных по составу СПИ и разнообразных топологий СПД.

4.3. Разработка физических модулей для СПД с технологией *IP/MPLS/Ethernet* систем мониторинга критически важных объектов государства

В СПД применяются существующие стандартизированные сетевые технологии, каждой из которых соответствуют свои протокольные и интерфейсные примитивы [7, 16, 17, 20, 29, 38, 54, 55, 58, 96]. Реализация самой возможности передачи трафика в многомодальном представлении возможна только при условии формирования ПБД, которые могут обрабатываться оборудованием (мультиплексорами, коммутаторами и другими типами СК) соответствующей сетевой технологии (IP/MPLS/Ethernet). Кроме того, корректную и точную оценку интенсивности нагрузки α_m , поступающей от АКСО, представленную выражением (2.3), можно только после преобразования сообщения в модальном представлении в ПБДМОД. Следовательно, применение разработанного инструментария существенным образом зависит от способа и устройств мультиплексирования [98].

В разработанном устройстве мультиплексирования предлагается следующая последовательность процедур (рис. 4.4):

выделение в АКСО сигналов модальностей (СМ), наиболее информативных с точки зрения контекста наблюдаемой или программной управленческой ситуации [10–15, 21, 23, 29, 31, 32, 34, 38, 39, 40, 43, 44, 103];

аналогово-цифровая обработка выделенных сигналов модальностей [104];

побитное объединение символов в кодовую комбинацию значения модальности – общий информационный кадр (ОИК);

формирование кадра служебной информации (КСИ) о типе (номере) модальности;

формирование кадра информации по скорости передачи бит (ИСПБ). Данный кадр играет роль временной метки демультиплексирования сообщения модальности в двоичной форме, связывая процесс преобразования модальностей с системным временем СПД. В соответствии принятой в СПИ скорости передачи ПБД, данный кадр должен обеспечить синхронность использования сообщений разных модальностей на приемной стороне.

поканальное объединение ОИК, КСИ и ИСПБ, с формированием мультиплексированного кадра (МК);

инкапсуляция МК в информационное поле ПБД данной сетевой технологии (*IP/MPLS/Ethernet*), т.е. формирование кадра ПБД_{мод}.

В результате из сообщения модальности на выходе АКСО формируется примитив, который может мультиплексироваться в общий поток ПБД, поступающий на обслуживание, типовыми средствами StTDM, используемыми в СПД. Данное преобразование сообщения модальностей в ПБД обеспечит корректную и точную оценку интенсивности нагрузки α_m , поступающей в СПД от АКСО.

Вышеизложенный способ мультиплексирования пригоден для СПД, где в ходе измерений выявлена неэффективность использования канального ресурса. Однако в процессе исследований были выявлены ситуации в КВО государства, когда при наличии острой необходимости во внедрении средств динамической многомодальной аутентификации персонала, из-за высокой

загрузки СПД отсутствует возможность формирования дополнительных логических каналов передачи ПБД_{мод}.

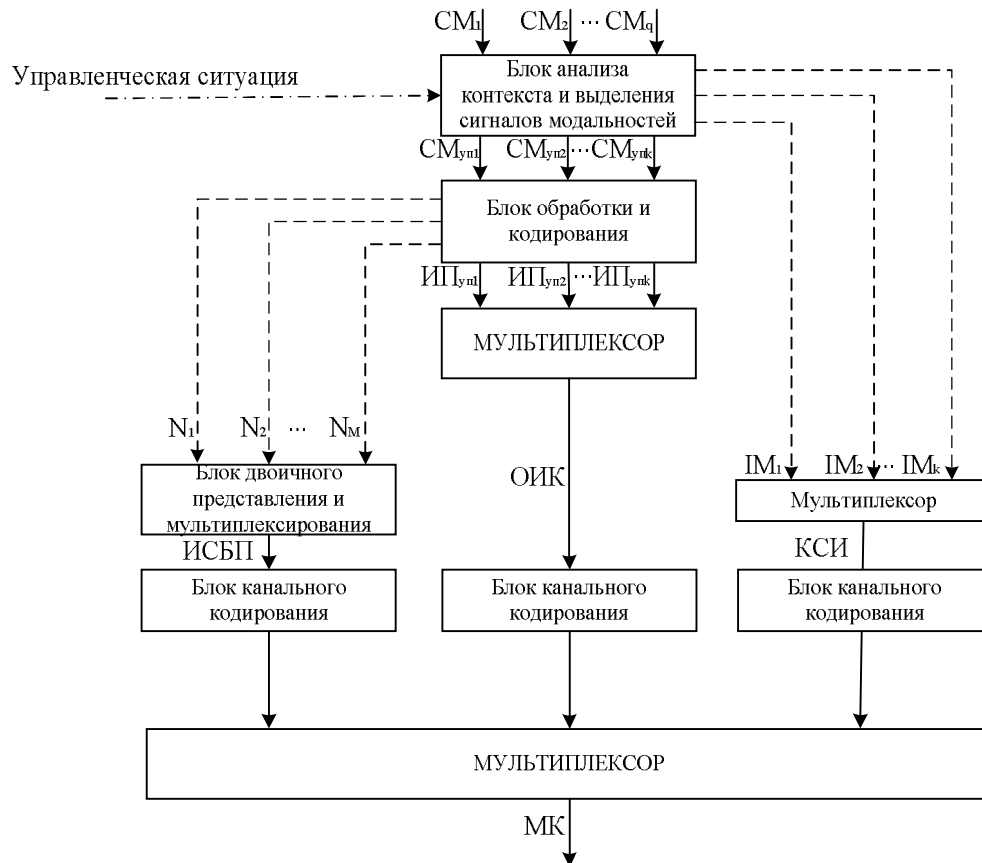


Рисунок 4.4 – Структурная схема устройства мультиплексирования сообщений в многомодальном представлении в формат ПБД

Для данных условий разработан другой способ передачи многомодальных сообщений [99]. Его идея заключается в организации туннелей передачи кадров МК за счет избыточности действующих протоколов СПД, в том числе в отдельных полях типовых ПБД, которые по разным причинам не используются на территории Российской Федерации (рис. 4.5).

4 бита Номер вер.	4 бита Длина заг.	8 бит Тип сервиса	16 бит Общая информация	
16 бит Идентификатор пакета			3 бита Флаги	13 бит Смещение фрагмента
8 бит Время жизни	8 бит Протокол TCP		16 бит Контрольная сумма заголовка	
32 бита IP-адрес отправителя				
32 бита IP-адрес получателя				
8 бит След. протокол IP	8 бит Длина полезной нагрузки		16 бит Зарезервировано	
32 бита Индекс параметров безопасности				
32 бита Номер по порядку				
32 бита Аутентификационные данные				
4 бита Номер вер.	4 бита Длина заг.	8 бит Сообщения модальностей	16 бит Общая информация	
16 бит Идентификатор пакета			Сообщ. модальн.	13 бит Сообщения модальностей
8 бит Время жизни	8 бит Протокол TCP		16 бит Сообщения модальностей	
32 бита IP-адрес отправителя				
32 бита IP-адрес получателя				
32 бита Заголовок TCP				
Данные				

Рисунок 4.5 – Идея размещения данных ДМА в поле типового ПБД

Так, например, для *IP/MPLS/Ethernet* это возможно реализовать при использовании в качестве каналов СПД туннелей *VPN*, где происходит инкапсуляция всей исходной *IP*-дейтаграммы (служебной и информационной части) в пакет нового формата. При этом, такие поля исходной дейтаграммы как тип сервиса, флаги, смещение фрагмента, время жизни и контрольная сумма заголовка при маршрутизации не используются и не претерпевают никаких изменений вплоть до восстановления исходного вида *IP*-дейтаграммы на приемной стороне (после процедур аутентификации и удаления сформированных для передачи по туннелям *VPN* заголовков маршрутизации и аутентификации). Следовательно, в СПД системы мониторинга КВО имеется возможность организации логического тракта передачи многомодальной информации (48 бит в каждом пакете) без дополнительных затрат пропускной способности.

Однако такой подход является временным решением, а его основным недостатком является весьма ограниченная пропускная способность канала сообщений в многомодальном представлении. Исследования показали, что данный способ актуальнее для передачи по СПД не сообщений о параметрах модальностей $\Phi(t_c)$ (рис. 1.3, рис. 2.1), а суждений $\upsilon_q(t_c)$ о состоянии операторов. Естественно такие сообщения имеют существенно меньший объем и передаются в звене № 2, т. е. на участке после узла ИАС+БД до АРМ ДЛ ОУ.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что предлагаемые физические модули обеспечивают системное и всестороннее практическое внедрение разработанного научно-методического инструментария в аппаратно-программные средства СПД системы мониторинга КВО государства.

Таким образом, рассмотренные выше запатентованные физические модули СПД, разработанные в ходе исследований, позволяют на практике обеспечить формирование из сообщений, генерируемых АКСО в модальном представлении, поток ПБД такого формата, который соответствует сетевой технологии (в перспективе *IP/MPLS/Ethernet*), применяемой в СПД системы мониторинга КВО государства. В совокупности с изложенным в п. 4.2 это свидетельствует о практической значимости результатов, полученных в диссертационной работе.

4.4. Оценка эффекта от применения разработанных модели и алгоритма в СПД с технологией *IP/MPLS/Ethernet* федеральной системы мониторинга КВО государства

Звено СПД является элементом сложной распределенной иерархической системы [61, 105], в связи с чем оценить эффект от применения разработанного научно-методического инструментария целесообразно как с точки зрения ресурсов исследуемой системы («внутренний» аспект), так и по степени достижения целей функционирования суперсистемы – системы мониторинга КВО государства («внешний» аспект).

«Внутренний» эффект от применения разработанного инструментария заключается в экономическом выигрыше, полученном в результате применения алгоритмов оптимизации на реальных топологиях СПД федеральной системы мониторинга КВО государства, при аренде физических и логических (VPN) каналов у основных операторов связи Российской Федерации.

Для оценки «внешнего» эффекта от применения разработанных моделей и алгоритмов требуется определить *потенциально* достижимые количественные показатели качества контроля [23, 25, 31, 83] состояния КВО. Далее для простоты и наглядности изложения считается, что достоверность идентификации состояния КВО линейно возрастает с увеличением полноты отображения ситуации при ограничениях по оперативности (п. 2.1) доставки сведений о контролируемых параметрах, то есть

$$D_{\text{КВО}}(t_c) = F(\Pi_{\text{КВО}}(t_c)) = A \cdot \Pi_{\text{КВО}}(t_c), \text{ при } O_{\text{КВО}} \leq O^*,$$

где A – коэффициент пропорциональности, $A > 1$.

Тогда при нахождении возможности организации дополнительного тракта передачи сообщений в многомодальном представлении о состоянии оператора АРМ (при том же значении времени задержки доставки ПБД_{ТУС}) будет обеспечено повышение полноты описания ситуации в $\Pi^*(t_c)$ раз ($\Pi^*(t_c) > 1$), что соответствует росту в $A \cdot \Pi^*(t_c)$ раз достоверности $D_{\text{КВО}}(t_c)$ контроля состояния КВО.

При всей простоте и качественном характере приведенных выше рассуждений следует отметить, что итоговый «внешний» эффект от внедрения дополнительных трактов передачи многомодальных сообщений в СПД, будет заключаться в снижении вероятности отказа потенциально опасного или стратегически важного объекта критической инфраструктуры государства [34, 43].

Выводы по четвертому разделу

1. Условием применения разработанных моделей и алгоритмов является наличие такой текущей ситуации в СПД, при которой ресурс пропускной способности расходуется неэффективно. В разработанных для этой цели способе и устройстве измерений параметров СПД с КП за счет использования ISMP протокола и формализмах, основанных на усеченном и смещенном геометрическом распределении случайной величины, удалось существенно увеличить точность оценки вероятности надежности доставки ПБД и времени задержки на двухстороннее распространение для ПБД_{тус}.

2. Разработанные в ходе исследования модели звена СПД и алгоритмы оптимизации его параметров, реализованные в составе СППР, позволяют принимать более обоснованные решения на модернизацию СПД (ее проектирование) с точки зрения эффективности использования канальных ресурсов. Данный вывод подтвержден в ходе множества компьютерных экспериментов для различных по составу СПИ и разнообразных топологий СПД.

3. Запатентованные физические модули СПД, разработанные в ходе исследований, позволяют на практике обеспечить формирование из сообщений, генерируемых АКСО в модальном представлении, получить поток ПБД такого формата, который соответствует сетевой технологии, применяемой в современной СПД. Это подтверждает практическую значимость полученных результатов.

4. «Внутренний» эффект от внедрения разработанного инструментария соответствует стоимости сэкономленного канального ресурса СПД. «Внешний» эффект при организации в СПД дополнительного тракта передачи сообщений в многомодальном представлении о состоянии оператора АРМ состоит в повышении полноты описания объекта контроля. Итоговый «внешний» эффект от внедрения средств контроля состояния оператора АРМ КВО будет заключаться в снижении вероятности отказа потенциально опасного или стратегически важного объекта критической инфраструктуры государства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном исследовании решена научная задача разработки модели звена СПД, алгоритма оптимизации его характеристик в условиях совместного обслуживания в СПД как протокольных блоков данных традиционных услуг связи, так и информации в многомодальном представлении, а также научно-технических предложений по применению систем передачи многомодальной информации в СПД.

Разработанная модель обладает научной новизной, так как обеспечивает с учетом специфики реализации абсолютного приоритета и градиентного резервированием канального ресурса формальное описание процессов обслуживания двух неординарных потоков ($\text{ПБД}_{\text{тус}} + \text{ПБД}_{\text{мод}}$) в звене СПД, представляя собой явные аналитические зависимости между системными свойствами звена (вероятностью отказа в обслуживании заявки) и его управляемыми параметрами (функции блокировки).

Разработанный алгоритм оптимизации параметров звена СПД обладает научной новизной, так как позволяет за удовлетворительное время с требуемой точностью определить оптимальную функцию блокировки для системы коммутации в условиях поступления на обслуживание n неординарных потоков заявок от ограниченной группы источников с абсолютными приоритетами, отказами и градиентным резервированием канального ресурса.

В совокупности, применение разработанного научно-методического инструментария способствует достижению целей исследования – повышению степени использования ресурсов пропускной способности каналов СПД системы мониторинга КВО государства за счет организации в них дополнительных трактов обмена информацией в многомодальном представлении с обеспечением заданного качества обслуживания абонентов СПД традиционными услугами связи.

Направлениями дальнейших исследований в данной предметной области целесообразно считать:

разработку модели системы распределения информации СПД на уровне протокольных блоков данных, учитывающих специфику формирования, передачи и дисконтирования сообщений модальностей;

разработку алгоритмов оптимизации характеристик системы распределения информации СПД на уровне протокольных блоков данных, учитывающих специфику формирования, передачи и дисконтирования сообщений модальностей;

разработку способа и устройств совместной коммутации протокольных блоков данных типовых услуг связи и протокольных блоков данных сообщений модальностей, учитывающих специфику формирования и передачи последних.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АКСО	– агент контроля состояния оператора;
АТ	– абонентский терминал;
АПСС	– аппаратно-программные средства связи;
АРМ	– автоматизированное рабочее место;
БД	– база данных;
ДЛ	– должностное лицо;
ДМА	– динамическая многомодальная аутентификация;
ЕКР	– единица канального ресурса;
ИАС	– информационно-аналитическая система;
ИСПБ	– информация по скорости передачи бит;
КВО	– критически важный объект;
КК	– коммутация каналов;
КП	– коммутация пакетов;
КС	– канал связи;
КСИ	– кадр служебной информации;
МК	– мультиплексированный кадр;
ОИК	– общий информационный кадр;
ОУ	– орган управления;
ПБД	– протокольный блок данных;
ПИКС	– полимодальная инфокоммуникационная система;
ПФО	– психофизиологическое обследование;
СК	– система коммутации;
СМ	– сигналы модальностей;
СМО	– система массового обслуживания;
СН	– специального назначения;
СП	– система передачи;
СПД	– сеть передачи данных;
СПИ	– система передачи информации;

СППР	– система поддержки принятия решения;
ТГ	– теория графов;
ТМО	– теория массового обслуживания;
ТУС	– традиционные услуги связи и приложения;
ФСМ	– Федеральная система мониторинга (критически важных объектов и потенциально опасных объектов инфраструктуры);
E2E	– End-to-End (из конца в конец);
ICMP	– Internet Control Message Protocol (протокол межсетевых управляющих сообщений);
IP	– Internet Protocol;
MPLS	– Multiprotocol label switching;
NP	– Network Performance (качество сети);
QoS	– Quality of Service (качество услуги связи);
RLA	– Reduced Load Approximation (метод «просеянной» нагрузки);
SLA	– Service Level Agreement (соглашение об уровне услуг);
StTDM	– Statistical Time Division Multiplexing (статистическое временное мультиплексирование);
SyTDM	– Synchronous Time Division Multiplexing (синхронное временное мультиплексирование);
VPN	– Virtual Private Network (виртуальная частная сеть).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон РФ № 68-ФЗ от 21.12.1994 (с изменениями от 8.03.2015) «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» / М.: Собрание законодательства РФ, 2017.
2. Федеральный закон РФ № 187-ФЗ от 26.07.2017 «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» / М.: Собрание законодательства РФ, 2017.
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 14 августа 2020 г. № 1225 «Об утверждении правил разработки критериев отнесения объектов всех форм собственности к критически важным объектам» / <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74423898>.
4. Распоряжение правительства Российской Федерации № 1314-Р от 27.08.2005 г. «Об одобрении Концепции федеральной системы мониторинга критически важных объектов и потенциально опасных объектов инфраструктуры» / <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=84425>.
5. Концепция управления качеством связи в Российской Федерации (проект). – М.: Министерство связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, 2015.
6. Шнепс-Шнеппе М. А. Телекоммуникации Пентагона: цифровая трансформация и киберзащита / М. А. Шнепс-Шнеппе. - М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 272 с.
7. Степанов, С. Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения / С. Н. Степанов – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 868 с.
8. Васильев, В. Информационная безопасность критически важных объектов // PC Week Review: ИТ-безопасность, сентябрь 2013.
9. Методические рекомендации по категорированию объектов критической информационной инфраструктуры, принадлежащих субъектам критической информационной инфраструктуры, функционирующим в сфере связи. – М.: ОГО «АДЭ», 2019. – 108 с.
10. Басов, О. О. Методологические основы синтеза полимодальных инфокоммуникационных систем государственного управления : монография / О.О.

Басов, А.А. Карпов, И.А. Сайтов – Орёл : Академия ФСО России, 2015. – 263 с.

11. Хахамов, П.Ю. Методики исследования функционального состояния, психологических и психофизиологических качеств специалистов информационно-телекоммуникационного обеспечения / П.Ю. Хахамов, О. О. Басов, Д. В. Жердев, М. М. Давыдов // Вестник Московского университета МВД, 2015. – № 10. – С. 371–380.

12. Карпов, А.А. Аудиовизуальные речевые интерфейсы в ассистивных информационных технологиях: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.11 / Карпов Алексей Анатольевич. – СПб.: СПИИ РАН, 2013. – 299 с.

13. Ронжин, А.Л. Речевой и многомодальный интерфейсы / А.Л. Ронжин, А.А. Карпов, И.В. Ли. – М.: Наука, 2006. – 173 с.

14. Носов, М.В. Повышение эффективности управления в условиях изменения психофизиологического состояния персонала / М.В. Носов, О.О. Басов, П.Ю. Хахамов // Труды СПИИРАН. – 2014. – Вып. 3 (34). – С. 112–135.

15. Zeng, H. EmotionCues: Emotion-Oriented Visual Summarization of Classroom Videos // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, doi: 10.1109/TVCG. – 2019. 2963659.

16. Трегубов, Р.Б. Теоретические основы анализа и оптимизации иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем : монография /Р.Б. Трегубов, И.А. Сайтов. – Орёл : Академия ФСО России, 2017. – 587 с.

17. Рогозинский, Г.Г. Мультидоменные полимодальные коммуникации и киберфизические среды / Г.Г. Рогозинский, А.Д. Сотников // Материалы 4-ой Международной конференции «Технологическая перспектива в рамках евразийского пространства». – СПб : ЦНИТ «Астерион» – 2018. – С. 34–38.

18. Kleinrock, L. Queueing Systems: Volume I – Theory. New York. Wiley Interscience, 1975. 417 p

19. Захаров, Г.П. Методы исследования сетей передачи данных / Г.П. Захаров. – М.: Радио и связь, 1982. – 208 с.

20. Степанов, С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей / С.Н. Степанов. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 392 с.

21. Защита критически важных объектов инфраструктуры от террористических атак: Сборник передового опыта // Контртеррористическое управление Организации Объединенных Наций (КТУ ООН). – 2018. – 148 с.

22. ГОСТ-Р 22.2.06-2016 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Менеджмент риска чрезвычайной ситуации. Оценка риска чрезвычайных ситуаций при разработке паспорта безопасности критически важного объекта и потенциально опасного объекта.

23. Восьмая научно-техническая и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике» // Материалы конференции / Ред. Ю. В. Цапко — СПб.: Изд-во ВВМ, 2017 — 424 с.

24. Сайтов, С.И. Использование методов голографии и Фурье-оптики для организации непрерывного контроля волоконно-оптических линейных трактов / С.И. Сайтов, Д.Ю. Музалевский // Вестник РГРТУ. – Выпуск № 4 (26), 2008 – С. 24–28.

25. Сайтов, С.И. Модель ВОЛТ с мультиплексированием по длине волны и волоконно-оптическими усилителями как объекта непрерывного контроля / С.И. Сайтов, Н.И. Мясин, Р. Б. Трегубов // Вестник РГРТУ. – Выпуск № 1 (35), 2011 – С. 86–93.

26. Saitov, S.I. Neural Network System for Monitoring State of a High-Speed Fiber-Optical Linear Path / S.I. Saitov, O.O. Basov, Bizin M.M. // Springer International Publishing Switzerland 2016. L. Cheng et al. (Eds.): ISSN 2016, LNCS 9719, 2016, – pp. 1–8.

27. Saitov, S.I. Neural Network System for Monitoring State of a Optical Telecommunication System / S.I. Saitov, O.O. Basov, A.I.Saveliev // 9-th Conference ruSMART 2016. – Springer International Publishing Switzerland. S. Balandin et al. (Eds.): ru SMART 2016, LNCS 9388, 2016. – pp. 191–199.

28. Основные направления государственной политики в области обеспечения безопасности автоматизированных систем управления производственными и

технологическими процессами критически важных объектов инфраструктуры Российской Федерации (утв. Президентом РФ 03.02.2012) № 803.

29. Саитов, С.И. Реализация услуг дополненной реальности в интересах должностных лиц пограничных органов / С.И. Саитов, О.О. Басов, А.Л. Ронжин // Сборник трудов IX Всероссийской научно-практической конференции «Территориально распределенные системы охраны». – Калининград : КПИ, 2016 г. – С. 41 – 45.

30. Водопьянова, Н. Е. Синдром выгорания: диагностика и профилактика / Н.Е. Водопьянова, Е.С. Старченкова. – СПб.: Питер, – 2005. – 350 с.

31. Саитов, С.И. Применение нейрооптических систем для биометрического контроля легитимности абонентов инфокоммуникационной системы специального назначения / С.И. Саитов, А.А. Кузькин // Сборник "Проблемы развития технологической основы системы специальной связи и специального информационного обеспечения: Материалы 7-й ВНК", Ч. 2. – Орел: Академия ФСО России, 2011. – С. 20 – 22.

32. Басов, О. О. Оценка ложности передаваемой информации по динамике параметров невербального поведения абонента / О. О. Басов // Вестник РГРТУ. № 1 (выпуск 51). – Рязань, 2015. – С. 24-29.

33. Приказ ФСТЭК России от 14 марта 2014 г. № 31 «Об утверждении Требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды» (в ред. Приказа ФСТЭК России от 9 августа 2018 г. № 138).

34. Саитов, С. И. Многомодальная динамическая аутентификация технического персонала критически важных объектов // «Современные материалы, техника и технологии», № 4 (12), Курск, 2017, – С. 36–39.

35. Отчет об исследовании утечек конфиденциальной информации аналитического центра компании InfoWatch за 2016 г. – <http://infowatch.ru/report2016>, дата обращения 23.03.2017 г.

36. Гнидко, К.О., Ломако А.Г. Контроль потенциального опасного взаимодействия на индивидуальное и групповое сознание потребителей мультимедийного контента / К.О.Гнидко, А.Г. Ломако // Труды СПИИРАН, 2015. – №1. – С. 9 – 33.

37. Боброва, Н.Л. Обоснование использования комплекса диагностических методик для оценки психофизиологического состояния человека // АСУ и приборы автоматики. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2014. – Вып. 61. – С. 49-53.

38. Саитов, С.И. Частные задачи оптимизации функциональных характеристик полимодальных инфокоммуникационных систем / С.И. Саитов, О.О. Басов, М.В. Носов // Журнал «Научные ведомости БелГУ», 2015. – С.

39. Носов, М.В. Оценивание психофизиологического состояния человека по сигналам различных каналов взаимодействия с техническими средствами автоматизированных рабочих мест / М.В. Носов, О.О. Басов // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «Современные инновации в науке и технике» (Курск, 18 апреля 2014 года) – Курск, 2014. – Т. 2. – С.72–75.

40. Саитов, С.И. База данных клавиатурного почерка для исследования психофизиологического состояния оператора / С.И. Саитов, О.О. Басов, М.В. Носов // Свидетельство о регистрации № 2017621143 от 03.10.2017.

41. Саитов, С.И. Программа аутентификации пользователя по клавиатурному почерку / С.И. Саитов, И.А. Саитов, А.А. Логвин // Свидетельство о регистрации № 2018660834 от 28.08.2018.

42. Болл Руд М. и др. Руководство по биометрии // Москва, Техносфера, 2007 – 368 с.

43. Никитин В. В. Многомодальная аутентификация пользователя системы специальной связи: дис. канд. техн. наук. – Орел, 2017. – 122 с.

44. Ронжин, А.Л. Проектирование интерактивных приложений с многомодальным интерфейсом / А.Л. Ронжин, А.А. Карпов // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21), часть 1. – С. 124–127.

45. ГОСТ Р 53724–2009. Качество услуг связи. Общие положения. – Введ. 2011–01–01. – М. : Стандартинформ, 2011. 12 с.

46. Rec. E.800. Definitions of terms related to quality of service. – 2008–09. – Geneva : ITU-T, 2009. 30 p.

47. EG 202 009-1. User Group; Quality of telecom services; Part 1: Methodology for identification of indicators relevant to the Users. – v. 1.3.1. – 2014–12. – ETSI, 2014. – 49 p.

48. ГОСТ Р 53731–2009. Качество услуг связи. Термины и определения. – Введ. 2011–01–01. – М. : Стандартинформ, 2011. – 8 с.

49. Rec. E.802. Framework and methodologies for the determination and application of QoS parameters. – 2007–02. – Geneva : ITU-T, 2007. – 38 p.

50. Лохмотко, В.В. Модели и методы оптимизации структуры телекоммуникационных сетей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.14 / Лохмотко Владимир Васильевич. – СПб.: СПбГУТ, 1998. – 290 с.

51. Кофман, А. Массовое обслуживание (теория и приложения) / А. Кофман, Р. Крюон. Пер. с фр. под ред. И. Н. Коваленко. – М.: Мир, 1965. – 302 с.

52. Филлипс, Д. Методы анализа сетей / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас. – М.: Мир, 1984.

53. Майника, Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах / Э. Майника. – М.: Мир, 1981.

54. Сайтов, С.И. Представление иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем в теоретико-множественном базисе / С.И. Сайтов, Р.Б. Трегубов, Ю. Г. Алексиков // Труды СПИИРАН. 2016. – № 3(46) – С. 139-168.

55. Сайтов, С.И. Теоретико-множественный базис и система моделей многопутевых многоадресных инфокоммуникационных систем / С.И. Сайтов, Р.Б. Трегубов, И. А. Сайтов // Труды СПИИРАН. 2017. № 2(51) – С. 35–59.

56. Пасечников, И. И. Методология анализа и синтеза предельно нагруженных информационных сетей. Монография / И. И. Пасечников. – М.: "Машиностроение-1", 2004. – 216 с.

57. Городецкий, А. Я. Информатика. Фрактальные процессы в компьютерных сетях : учебное пособие / А. Я. Городецкий, В. С. Заборовский. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000 – 102 с.

58. Назаров, А. Н. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения / А. Н. Назаров, К. И. Сычев. – Красноярск: Изд-во ООО "Поликом", 2010. – 389 с.

59. Корнилов, С. А. Модель звена мультисервисной сети следующего поколения с приоритетной дисциплиной обслуживания / С. А. Корнилов, А. В. Королев // Журнал "Телекоммуникации". – 2017. – № 10. – С. 35–42.

60. Соколов, Н.А. Однолинейные системы телетрафика : учебное пособие / Н.А. Соколов, А.Н. Соколов, В.С. Зайцев – СПб.: Изд-во СПбГУТ, 2019 – 118 с.

61. Бушуев С.Н., Осадчий А.С., Фролов В.М. Теоретические основы создания информационно-технических систем / СПб. : ВАС, 1998. – 404 с.

62. Саитов, С. И. Повышение степени использования канального ресурса при предоставлении услуг видеоконференцсвязи / С.И. Саитов, О.О. Басов, А.В. Рындин // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Проблемы фундаментальной и прикладной информатики в управлении, автоматизации и мехатронике». – Курск, 2017. – С. 120–124

63. Саитов И.А. Методика расчета показателей качества обслуживания в приоритетных системах распределения информации с резервированием канального ресурса / И.А. Саитов, А.Е. Миронов // Сборник научных трудов ученых Орловской области. Вестник науки. Вып. 4. – Орел: ОГТУ, 1999. – С. 202–204.

64. Форд Л.Р., Фалкерсон Д.Р. Потоки в сетях. М.: Мир, 1966 – 277 с.

65. Наумов В. А. Теория телетрафика мультисервисных сетей. – М., РУДН, 2007. – 191 с.

66. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок – М.: Машиностроение, 1979 – 432 с.
67. Амосов А. А. Вычислительные методы для инженеров / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова. – М. : Высшая школа, 1994. – 544 с.
68. Воеводин, В. В. Матрицы и вычисления / В. В. Воеводин, Ю. А. Кузнецов. – Москва : Наука, 1984. – 320 с.
69. Самарский, А. А. Численные методы : Учеб. пособие для вузов / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – Москва : Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 432 с.
70. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – Москва : Бином, 2003. – 632 с.
71. Kaufman, L. Matrix methods for queueing problems // SIAM J. Sci. Stat. Comput. – 1983. – V. 4. – P. 525–552.
72. Сайтов, С.И., Будков В.Ю., Левоневский Д.К., Денисов А.В. Моделирование сети передачи данных полимодальной системы контроля критически важных объектов государства // Журнал «Вестник Санкт-Петербургского Университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления», Том 16 (1), СПбГУ, г. Санкт-Петербург, 2021, С. 59 – 72.
73. Сайтов С.И. Моделирование гетерогенной сети передачи данных с коммутацией пакетов как системы массового обслуживания с абсолютным приоритетом и резервированием канального ресурса / Сайтов А.И. // Журнал «Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт», ООО «Издательский дом Медиа Пабlishер», № 11, 2021, С. 45 – 52.
74. Kopei V.B. Component-oriented acausal modeling of the dynamical systems in Python language on the example of the model of the sucker rod string / V.B. Kopei, O.R. Onysko, V.G. Panchuk // PeerJ Computer Science, – 2019. – Vol. 5. – P.e227.
75. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : Учеб. для вузов. – 6-е изд. стер. / Е. С. Вентцель. – Москва : Высшая школа, 1999. – 576 с.

76. Юсупов, Р. М. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Р. М. Юсупов [и др.] ; под ред. Р. М. Юсупова. – Ленинград : МО СССР, 1984. – 563 с.

77. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – Москва : Высшая школа, 1972. – 368 с.

78. Карпов, Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Г. Карпов. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2009 – 400 с.

79. Боев, В. Д. Компьютерное моделирование : Пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic 7. – Санкт-Петербург : ВАС, 2014. – 432 с.

80. Боев, В. Д. Имитационное моделирование систем : учеб. пособие для прикладного бакалавриата / В. Д. Боев. – Москва : Издательство Юрайт, 2017. – 253 с

81. Саркисян С.А., Каспин В.И., Лисичкин В.А. и др. Теория прогнозирования и принятия решения. Учеб. пособие. / Под ред. С.А. Саркисяна. – М.: Высшая школа, 1977. – 351 с.

82. Дмитриев А.К., Мальцев П.А. Основы теории построения и контроля сложных систем. – Л.: Энергоиздат, 1988. – 234 с.

83. Вознюк М.А. Теоретические основы квалиметрии информационных систем / М.А. Вознюк, А.А. Мусаев, А.В. Елшин – СПб.: ВУС, 1999. – 108 с.

84. Сайтов С.И., Сайтов А.И. Модель звена сети передачи данных с градиентным резервированием канального ресурса для описания передачи многомодальной информации // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2020. № 12. С. 110-117.

85. Iversen V. B. Teletraffic Engineering and Network Planning. DTU Fotonik, 2015, 382 p.

86. Аттетков А. В. Методы оптимизации : учебник для вузов / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 2-е изд., стереотип. / А. В. Аттетков, С. В. Галкин, В. С. Зарубин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 440 с.

87. Кнут Д. Э. Искусство программирования для ЭВМ. Том 3. Сортировка и поиск : Пер. с англ. / под ред. В. Т. Тертышного, И. В. Красикова. – 2-е изд. / Д. Э. Кнут. – М. : Вильямс, 2007. – 832 с.

88. Сайтов С.И., Сайтов А.И. Алгоритмы оптимизации параметров звена сети передачи данных с резервированием канального ресурса для передачи сообщений в многомодальном представлении // Журнал «Телекоммуникации», ООО «Наука и технологии», № 1, 2021, С 2 – 9.

89. ГОСТ 19.701-90. Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения. – Введ. 1992.01.01. – М : ФГУП "Стандартинформ", 2010. – 22 с. – (Межгосударственный стандарт).

90. ГОСТ 34.201-89. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем. – Введ. 1990.01.01. – М.: ФГУП "Стандартинформ", 2008. – 11 с. – (Межгосударственный стандарт).

91. Kelly, F.P. Blocking Probabilities in Large Circuit-Switched Networks // Adv. Appl. Prob. – 1986. – V.18 – P. 473–505.

92. Ross, K.W. Multiservice Loss Models for Broadband Telecommunications Networks. – London: Springer-Verlag, 1995. – 343 p.

93. Мейкшан, В.И. Оценка показателей качества функционирования мультисервисных сетей связи при фиксированной маршрутизации / В.И. Мейкшан, Столяров В.В. // Информационные технологии. – Том 4. – № 4, 2006. – С. 44–48.

94. Бочков, М. В. Проектирование автоматизированных систем обработки информации и управления / М. В. Бочков, Е. И. Новиков, О. В. Тараканов ; под ред. М. В. Бочкова. – Орел, 2007. – 406 с.

95. Морозова, Н. Н. Математическая логика и теория алгоритмов / Н.Н. Морозова. – Орел, 2014. – 303 с.

96. Perez, A. IP, Ethernet and MPLS Networks. Resource and Fault Management / A. Perez. John Wiley & Sons Limited, 2011. – 288 p.

97. Саитов, С.И. Способ измерения показателей качества функционирования сети связи с коммутацией пакетов и устройство для его осуществления / С.И. Саитов, Р.Б. Трегубов, К.И. Мясин // Патент № 2663704 от 08.08.2018 г.

98. Саитов, С.И. Способ мультиплексирования цифровых сигналов при многомодальном представлении информации / С.И. Саитов, О.О. Басов, В.К. Игольников, И.А. Саитов // Патент № 2674463 от 11.12.2018.

99. Саитов, С.И. Способ передачи многомодальной информации на критически важных объектах / С.И. Саитов, О.О. Басов, И.А. Саитов // Патент № 2696221 от 31.07.2019.

100. Саитов, С.И. Программа вычисления оптимального значения функции блокировки коммутатора / С.И. Саитов, О.О. Басов, И.А. Саитов, А.В. Рындин // Свидетельство № 2020618430 от 28.07.2020.

101. Грешилов А. А. Математические методы принятия решений. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 584 с.

102. Nadja, M. The effect of interactive analytical dashboard features on situation awareness and task performance / M. Nadja, A. Maedchea, C. Schiederb // Decision Support Systems. – Volume 135, – August 2020, – <https://doi.org/10.1016/j.dss.2020.113322>.

103. Саитов, С.И. Способ определения истинности речевой информации / В.К. Игольников, О.О. Басов, В.А. Дамм // Патент № 2679217 от 06.02.2019 г.

104. Шелухин, О. И. Цифровая обработка и передача речи / О.И. Шелухин, Н.Ф. Лукьянцев. – М.: Радио и связь, 2000 – 456 с.

105. Takahara Y.; Mesarovic M. Organization Structure: Cybernetic Systems Foundation // Springer. New York, 2012. – 288 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты имитационного моделирования СПД, обслуживающей сообщения как традиционных услуг связи, так и в многомодальном представлении

Таблица А.1 – Результаты опытов при $\varphi_2(0, \dots, 10) = 0$

№ опыта	π_1	π_2	Количество сгенерированных заявок
1.	0,176	0	49987
2.	0,179	0	50006
3.	0,178	0	50024
4.	0,176	0	50049
5.	0,178	0	49996
6.	0,176	0	49903
7.	0,178	0	50090
8.	0,178	0	49970
9.	0,179	0	50113
10.	0,178	0	49858
11.	0,175	0	49976
12.	0,178	0	49991
13.	0,176	0	50037
14.	0,174	0	49808
15.	0,179	0	49992
16.	0,178	0	49911
17.	0,178	0	50024
18.	0,178	0	49975
19.	0,177	0	50095
20.	0,178	0	50017
21.	0,177	0	49904
22.	0,178	0	49999
23.	0,177	0	49938
24.	0,175	0	50028
25.	0,179	0	50089
26.	0,177	0	50125
27.	0,177	0	50125
28.	0,176	0	50072
29.	0,177	0	49918
30.	0,175	0	50045

Таблица А.2 – Результаты опытов при $\varphi_2(0, \dots, 7) = 0$,
 $\varphi_2(8) = 0,1$, $\varphi_2(9) = 0,2$, $\varphi_2(10) = 0,3$

№ опыта	π_1	π_2	Количество сгенерированных заявок
1.	0,148	0,041	49961
2.	0,147	0,04	50011
3.	0,149	0,041	49938
4.	0,148	0,042	50120
5.	0,149	0,043	50010
6.	0,149	0,039	49981
7.	0,147	0,038	49933
8.	0,149	0,039	49897
9.	0,151	0,04	49955
10.	0,148	0,041	50038
11.	0,147	0,041	50028
12.	0,149	0,037	50002
13.	0,148	0,038	49940
14.	0,147	0,039	49973
15.	0,149	0,038	50002
16.	0,145	0,039	50120
17.	0,147	0,041	50122
18.	0,148	0,042	50047
19.	0,147	0,039	49940
20.	0,148	0,038	49984
21.	0,148	0,039	49921
22.	0,149	0,041	50041
23.	0,147	0,042	49994
24.	0,148	0,04	50067
25.	0,148	0,039	50102
26.	0,149	0,041	50032
27.	0,147	0,042	49961
28.	0,149	0,041	50065
29.	0,151	0,039	50084
30.	0,149	0,039	50017

Таблица А.3 – Результаты оценки при доверительной вероятности $P_\alpha = 0,99$

	$\varphi_2(0, \dots, 10) = 0$		$\varphi_2(0, \dots, 7) = 0,$ $\varphi_2(8) = 0,1, \varphi_2(9) = 0,2, \varphi_2(10) = 0,3$	
π_k	π_1	π_2	π_1	π_2
$\bar{\pi}_k - \delta$	0,17649	0	0,14754	0,03920
$\bar{\pi}_k$	0,17716	0	0,14816	0,03996
$\bar{\pi}_k + \delta$	0,17784	0	0,14878	0,04073
δ	0,00068	0	0,00062	0,00077

В Приложении А представлены результаты имитационного моделирования. Опыты проводились при следующих исходных данных: $n = 2$, $b_1 = 192$ кбит/с, $b_2 = 364$ кбит/с, $\alpha_1 = 0,2$ Эрл, $\alpha_2 = 1$ Эрл, $\pi_2^* \leq 0,05$, $V = 1920$ кбит/с. В таблице А.1, А.2 представлены значения вероятности потерь заявок и общего числа сгенерированных заявок. Затем, по распределению Стьюдента на основе полученных данных при доверительной вероятности $P_\alpha = 0,99$ была определена точность оценок вероятности потерь заявок и найдены левые и правые границы для оценки математического ожидания, эти данные представлены в таблице А.3. Результаты имитационного моделирования были использованы при проверке адекватности разработанной математической модели.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчет вероятностей потерь ПБД_{МОД} и ПБД_{ТУС} при использовании
градиентных функций внутренней блокировки $\varphi_2(i)$

Таблица Б.1 – Результаты при $\pi_2 \leq \pi_2^*$ ($\pi_2^* = 0,05$)

№ п/п	№ строки матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$	Градиентная функция внутренней блокировки $\varphi_2(i)$					Показатели качества обслуживания заявок	
		$\varphi_2(0, \dots, 6)$	$\varphi_2(7)$	$\varphi_2(8)$	$\varphi_2(9)$	$\varphi_2(10)$	π_1	π_2
1.	1	0	0	0	0	0	0,17698	0
2.	2	0	0	0	0	0,1	0,17356	0,00527
3.	3	0	0	0	0,1	0,1	0,16852	0,01139
4.	4	0	0	0,1	0,1	0,1	0,16094	0,02354
5.	5	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15516	0,03604
6.	12	0	0	0	0	0,2	0,16999	0,01065
7.	13	0	0	0	0,1	0,2	0,16489	0,01684
8.	14	0	0	0,1	0,1	0,2	0,15747	0,02851
9.	15	0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,15174	0,04088
10.	22	0	0	0	0,2	0,2	0,15955	0,02329
11.	23	0	0	0,1	0,2	0,2	0,15207	0,03496
12.	24	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,14662	0,04701
13.	31	0	0	0,2	0,2	0,2	0,14449	0,04647
14.	67	0	0	0	0	0,3	0,16628	0,01614
15.	68	0	0	0	0,1	0,3	0,16110	0,02241
16.	69	0	0	0,1	0,1	0,3	0,15385	0,03358
17.	70	0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,14818	0,04582
18.	77	0	0	0	0,2	0,3	0,15570	0,02893
19.	78	0	0	0,1	0,2	0,3	0,14839	0,04011
20.	122	0	0	0	0,3	0,3	0,15005	0,03574
21.	123	0	0	0,1	0,3	0,3	0,14267	0,04691
22.	287	0	0	0	0	0,4	0,16240	0,02175
23.	288	0	0	0	0,1	0,4	0,15716	0,02810
24.	289	0	0	0,1	0,1	0,4	0,15008	0,03876
25.	297	0	0	0	0,2	0,4	0,15168	0,03470
26.	298	0	0	0,1	0,2	0,4	0,14454	0,04536
27.	342	0	0	0	0,3	0,4	0,14595	0,04159
28.	507	0	0	0	0,4	0,4	0,13996	0,04877
29.	1002	0	0	0	0	0,5	0,15835	0,02749
30.	1003	0	0	0	0,1	0,5	0,15304	0,03392
31.	1004	0	0	0,1	0,1	0,5	0,14615	0,04406

№ п/п	№ строки матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$	Градиентная функция внутренней блокировки $\varphi_2(i)$					Показатели качества обслуживания заявок	
		$\varphi_2(0, \dots, 6)$	$\varphi_2(7)$	$\varphi_2(8)$	$\varphi_2(9)$	$\varphi_2(10)$	π_1	π_2
32.	1012	0	0	0	0,2	0,5	0,14748	0,04060
33.	1057	0	0	0	0,3	0,5	0,14167	0,04758
34.	3004	0	0	0	0	0,6	0,15413	0,03337
35.	3005	0	0	0	0,1	0,6	0,14873	0,03987
36.	3006	0	0	0,1	0,1	0,6	0,14204	0,04949
37.	3014	0	0	0	0,2	0,6	0,14309	0,04665
38.	8009	0	0	0	0	0,7	0,14970	0,03939
39.	8010	0	0	0	0,1	0,7	0,14422	0,04598
40.	19449	0	0	0	0	0,8	0,14507	0,04557

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты о реализации научных результатов



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО «НИИ «Рубин»

С.С. Степанов

2021 г.



Акт

о реализации диссертационных исследований на соискание ученой степени
кандидата технических наук Саитова Сергея Игоревича

Комиссия в составе: председателя Врио начальника научно-исследовательского отдела Бухарина Владимира Владимировича и членов комиссии: главного научного сотрудника научно-исследовательского отдела Комашинского Владимира Владимировича, ведущего научного сотрудника научно-исследовательского отдела Кривова Олега Анатольевича составила настоящий акт о внедрении результатов диссертационного исследования Саитова Сергея Игоревича.

Комиссия подтверждает, что предложенная автором в работе модель звена сети передачи данных, имеет практическую значимость и используется в научно-исследовательской деятельности АО «НИИ «Рубин».

Разработанное в диссертационном исследовании научно-методическое обеспечение при внедрении позволит повысить эффективность использования ресурсов пропускной способности звена сети передачи данных.

Председатель: д.т.н, доцент В.В. Бухарин

Члены комиссии: к.в.н, с.н.с. О.А. Кривов

к.т.н, доцент В.В. Комашинский

«18» сентября 2021 г.



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
научно - технический центр высокоскоростных систем передачи
Супертел ДАЛС

197101, Санкт-Петербург, Петроградская наб., 38А
тел. (812) 232-73-21; факс (812) 497-36-82; E-mail: supertel_dals@supertel.ru; www.supertel-dals.ru
ОКПО 13193532 ОГРН 1037828015048 ИНН 7813179558 КПП 781301001

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «НТЦ ВСП «Супертел ДАЛС»

кандидат технических наук

старший научный сотрудник

И. А. Лукин

10 июня 2021 года



Акт

**о реализации диссертационных исследований на соискание ученой степени
кандидата технических наук Саитова Сергея Игоревича**

Комиссия в составе: председателя – директора по спецпроектам Мельникова Сергея Васильевича (к.т.н., доцент) и членов комиссии: начальника отдела №630 Титовой Ольги Викторовны (к.т.н.), начальника отдела №660 Елисеева Дениса Константиновича (к.т.н.) составила настоящий акт о внедрении результатов диссертационного исследования Саитова Сергея Игоревича.

Комиссия подтверждает, что предложенный автором алгоритм оптимизации характеристик звена сети передачи данных, обеспечивающий заданное качество обслуживания протокольных блоков данных традиционных услуг связи в условиях реализации дополнительных трактов передачи многомодальных сообщений, имеет практическую ценность и использован в научно-исследовательской и практической деятельности АО «НТЦ ВСП «Супертел ДАЛС».

Разработанный в диссертационном исследовании научно-методический инструментальный позволяет повысить эффективность использования ресурсов пропускной способности звена сети передачи данных.

Председатель комиссии: Кандидат технических наук,
доцент

Мельников С.В.

Члены комиссии:

Кандидат технических наук

Титова О.В.

Кандидат технических наук

Елисеев Д.К.