



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»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Орёл – 2021 г.

Работа выполнена в государственном казенном военном образовательном учреждении высшего образования «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», г. Орёл (ФГКВОУ ВО Академия ФСО России).

Научный руководитель **Басов Олег Олегович**
доктор технических наук, доцент,
профессор факультета цифровых трансформаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (г. Санкт-Петербург)

Официальные оппоненты **Малашенко Юрий Евгеньевич**
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,
главный научный сотрудник отдела Имитационных систем и Исследования операций ФИЦ «Информатика и управление» РАН

Соколов Николай Александрович
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
директор по науке ООО «Протей СпецТехника»

Ведущая организация ПАО «Информационные телекоммуникационные технологии»
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «14» июня 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.384.01 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан «11» мая 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.384.01

кандидат технических наук, доцент



Овчинников Андрей Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Такие объекты в большинстве случаев являются структурно-сложными и распределенными системами, а многие из них принято относить к критически важным объектам (КВО) государства, так как отказ или повреждение их элементов приводит к существенным негативным военно-политическим и экономическим последствиям, а иногда к многочисленным человеческим жертвам.

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 информационной безопасности. 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, 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.).

В рамках функционирования таких систем мониторинга развернуты сети передачи данных (СПД), имеющие специфические архитектуры, профили нагрузки и технологии передачи трафика. Из экономических соображений передача идентификационной информации об операторах АРМ КВО осуществляется по тем же каналам и трактам СПД, которые используются для предоставления им и должностным лицам органов управления (ДЛ ОУ) традиционных услуг связи (ТУС) и информационных приложений. Таким образом, профиль обслуживаемого трафика в СПД КВО 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 о состоянии КВО в условиях:

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

Однако для практической реализации концепции ПИКС требуется решение целого ряда модельных и алгоритмических задач, обусловленных новизной предметной области. Разработанный к настоящему времени научно-методический инструментарий в области передачи и обработки гетерогенного трафика не в полной мере учитывает специфику функционирования СПД КВО.

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. Решены задачи ранжирования модальностей по их вкладу в распознавание свойств индивида, существенных с точки зрения контекста обследования (ситуации). Однако задачи кодирования и передачи модальностей через каналы и сетевые 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. Однако для передачи информации в многомодальном 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., Рогозинского Г.Г., Рослякова А. В., Самуйлова К. Е., Соколова Н. А., Степанова С. Н., Цитовича И. И., Шнепса М. А., Iversen V., Ross K., Virtamo J. и др., 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 в последнее время часто наблюдаются ситуации, когда 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. 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 блоков данных через СПД, реализующих как предоставление ТУС, так и передачу контрольной информации от операторов АРМ КВО в многомодальном представлении, до сих пор отсутствуют.

В связи и изложенным можно сделать вывод, что тема настоящего диссертационного исследования является актуальной.

Объект исследования – звено СПД в системе мониторинга КВО 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.

Целью исследования является 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, алгоритмов оптимизации его характеристик и практическая реализация разработанного инструментария.

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 резервированием канального ресурса (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.

Степень достоверности результатов обусловлена корректностью постановок решаемых задач, принятых допущений и ограничений, сделанных выводов, применением апробированного математического аппарата, непротиворечивостью результатам предшествующих исследований для сопоставимых условий, а также полученными реализациями и апробациями.

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 [1-6], 3 патентах РФ на изобретение [9-11], 2 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ [12,13], 1 свидетельстве о государственной регистрации базы данных для ЭВМ [14].

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована цель диссертационной работы, обоснована актуальность и раскрыто содержание научной задачи, перечислены научные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов диссертации, а также приведены сведения о публикациях, апробациях и реализациях полученных результатов.

В первом разделе диссертации производится анализ современного состояния и направлений совершенствования систем мониторинга и СПД КВО государства. С целью разрешения сложившегося противоречия формулируется задача разработки математической модели и алгоритма оптимизации характеристик звена СПД с учетом дисциплины обслуживания с приоритетами, прерыванием и РКР, обеспечивающих требуемое качество обслуживания заявок разных категорий. Входными данными для представленной задачи выступают: 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; i – общее число занятых единиц канального ресурса (ЕКР) V в момент поступления заявки k -го потока, $i = \overline{0, V}$; $\varphi_k(i)$ – градиентная функция внутренней блокировки для заявок k -го потока, $\varphi_k(i) = [0, 1)$. Вышеперечисленные входные данные для разрабатываемой модели СМО в работе сведены в вектор параметров поступающей на обслуживание нагрузки $\vec{Z}_k = [b_k, N_k, \alpha_k, \mu_k]^T$.

В соответствии с выбранной дисциплиной обслуживания рассматриваются два потока заявок: ресурсоемкие заявки ТУС ($k = 2$) обслуживаются с повышенным приоритетом относительно заявок с характеристиками состояния оператора ($k = 1$). При поступлении очередной заявки во время занятости всех ЕКР заявкой равной категории она теряется и в дальнейшем на систему никакого влияния не оказывает. Если же во время поступления приоритетной заявки в системе на обслуживании находится заявка нижестоящей категории, то система прерывает ее обслуживание, а освободившийся ресурс предоставляет приоритетной заявке. Заявки, обслуживание которых было прервано вызовами абонентов вышестоящих категорий, не дообслуживаются и считаются потерянными из-за приоритетного прерывания.

В качестве дополнительного инструмента перераспределения объема пропускной способности используется градиентная (неубывающая) функция внутренней блокировки $\varphi_2(i)$, определяющая вероятность отказа в обслуживании заявкам высокоприоритетного потока в зависимости от общего числа занятых канальных единиц i объема канального ресурса V .

Данная дисциплина определяет выходные данные – показатели качества обслуживания заявок, в качестве основного из которых выступает вероятность потерь заявок k -го потока π_k , показывающая долю заявок, потерянных по причине занятости канального ресурса, приоритетного прерывания и резервирования.

С учетом входных и выходных данных показано, что для достижения цели исследования необходимо:

1. Разработать математическую модель звена СПД, учитывающую дисциплину обслуживания заявок разных категорий с приоритетами, прерыванием и РКР, определяющую зависимость:

$$\pi_k = \bar{F}(\bar{Z}_k, V, n, \varphi_2(i)). \quad (1)$$

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

$$\rho_c = V(t_c) / V > \rho_{c_{\text{тек}}}, \pi_k \leq \pi_k^*, \quad (2)$$

где π_k^* – требуемая вероятность потерь заявок k -го потока.

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

Для решения поставленной научной задачи введен ряд ограничений и допущений, не изменяющих физического смысла протекающих процессов в СПД:

- процесс обслуживания заявок рассматривается на уровне соединения;
- в соответствии со спецификой СПД КВО для описания поступающих входящих информационных потоков от большого числа источников нагрузки используется модель примитивного потока с параметром α_k ($N_k \leq 100$);
- длительность обслуживания заявок k -го потока имеет экспоненциальное распределение с параметром μ_k ;
- потери заявок k -го потока обусловлены занятостью канального ресурса, приоритетным прерыванием и функцией внутренней блокировки;
- градиентная функция внутренней блокировки $\varphi_2(i)$ неубывающая и $\varphi_2(i) \neq 1$;
- при свободном канальном ресурсе в момент поступления потока заявок ТУС ($i = 0$) функция блокировки не используется ($\varphi_2(0) = 0$);
- порядок занятия канального ресурса и выбора прерываемого низкоприоритетного соединения случайный;
- обслуживание заявок, потерянных по причине занятости канального ресурса или приоритетного прерывания, не возобновляется.

Во втором разделе разработана математическая модель (ММ) звена СПД, позволяющая установить зависимость вероятности потерь заявок для каждого информационного потока от заданных параметров входящей нагрузки, приоритетов пользователей и объема канального ресурса, отличающаяся от известных учетом дисциплины обслуживания разноскоростных заявок разных категорий с приоритетами, прерыванием и РКР. Данная модель обозначена в соответствии с символикой Кендалла–Башарина как $\bar{M}_i / \bar{M}_b / V / L / PRA$. Входными данными ММ, описывающих обслуживание заявок в звене СПД с приоритетами, прерыванием и РКР (рис. 1), являются: $\bar{Z}_k, V, n, \varphi_2(i)$ где $k = \bar{1}, n$; выходными – π_k .

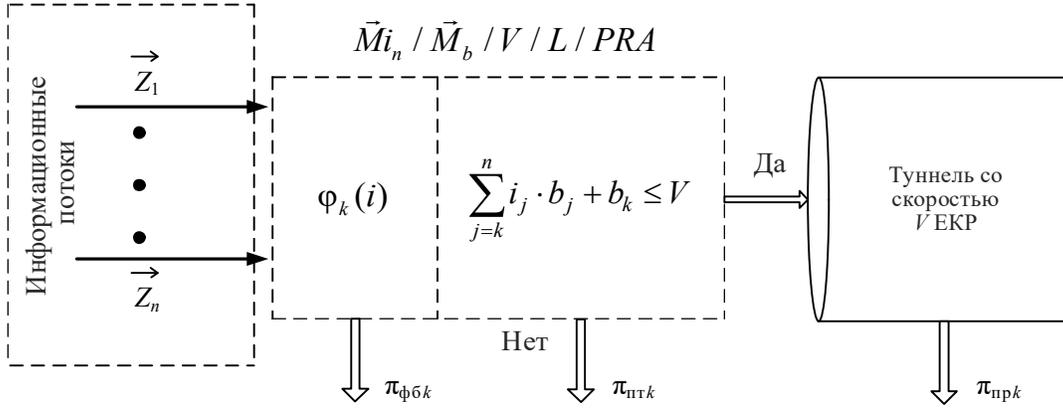


Рис. 1. Формализованное представление звена СПД с дисциплиной обслуживания с приоритетами и прерыванием

Сформулированная постановка задачи определяет вид пространства состояний исследуемой двухпоточковой модели звена СПД и структуру случайного процесса, описывающего динамику их изменения. Через $i_1(t)$ обозначены 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 описана двумерным случайным процессом $r(t) = (i_1(t), i_2(t))$, определенным на конечном пространстве состояний $\Omega = \{(i_1, i_2) : i \leq V\}$.

Пусть $p(i_1, i_2)$ – стационарная вероятность того, что на обслуживании находится известное число заявок каждого потока. В соответствии с интерпретацией стационарных вероятностей марковского процесса $r(t)$ значение вероятности $p(i_1, i_2)$ представляет собой долю времени пребывания звена в состоянии (i_1, i_2) . Приведенная интерпретация позволила определить искомые характеристики качества обслуживания поступающих потоков заявок. К ним относятся вероятности потери заявок на передачу низкоприоритетного трафика сообщений в многомодальном представлении $\pi_1 = \pi_{пт1} + \pi_{пр}$ и вероятности потерь высокоприоритетного трафика ТУС $\pi_2 = \pi_{пт2} + \pi_{фб}$, где:

$\pi_{пр}$ – вероятность потерь низкоприоритетного трафика из-за прерывания соединения заявкой более высокого приоритета, определяемая как отношение интенсивностей соответствующих событий

$$\pi_{пр} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_2} \left(\left\lceil \frac{b_2 - (V - i)}{b_1} \right\rceil \right) \cdot p(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} p(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1}, \quad (3)$$

где B_2 – множество состояний, в которых заявка k -го потока может быть прервана; $\pi_{пт1}$ – вероятность потерь низкоприоритетного трафика из-за занятости всего канального ресурса обслуживанием заявок обоих потоков, определяемая как отношение интенсивности потерянных заявок к интенсивности поступивших заявок

$$\pi_{\text{пт1}} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_1} p(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} p(i_1, i_2) \cdot (N_1 - i_1) \cdot \alpha_1}, \quad (4)$$

$\pi_{\text{пт2}}$ – 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

$$\pi_{\text{пт2}} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_3} p(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))}{\sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} p(i_1, i_2) \cdot (N_2 - i_2) \cdot \alpha_2 \cdot (1 - \varphi_2(i))}, \quad (5)$$

где B_1, B_3 – множество состояний, в которых заявка k -го потока получает отказ; $\pi_{\text{фб}}$ – вероятность потерь высокоприоритетного трафика из-за функции блокировки

$$\pi_{\text{фб}} = \sum_{(i_1, i_2) \in \Omega} p(i_1, i_2) \cdot \varphi_2(i). \quad (6)$$

Для оценивания характеристик ММ в соответствии с введенными выражениями (3)–(6) составлены системы уравнений равновесия (СУР), связывающие значения ее ненормированных решений $P(i_1, i_2)$

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

В связи с реализацией механизма прерывания для рассматриваемой ММ не выполняется критерий Колмогорова, следовательно, процесс $r(t)$ не обладает свойством обратимости, поэтому распределение вероятностей состояний системы не может быть представлено в мультипликативном виде. В связи с этим для решения СУР использован итерационный метод Гаусса–Зейделя.

Выражения (3)–(6) устанавливают связь между входными и выходными данными разработанной ММ, описывающей обслуживание заявок в звене СПД с учетом дисциплины обслуживания с приоритетами, прерыванием и РКР.

Адекватность предлагаемых ММ подтверждается результатами имитационного моделирования, проведенного с помощью разработанной программы для ЭВМ в среде AnyLogic, а также сходимостью результатов моделирования при одинаковых условиях (входных данных) к известным моделям с аналогичной дисциплиной обслуживания.

На основе разработанной ММ проведено исследование влияния параметров входящей нагрузки, приоритетов пользователей и объема канального ресурса на показатели качества обслуживания заявок в СПД (рис. 2).

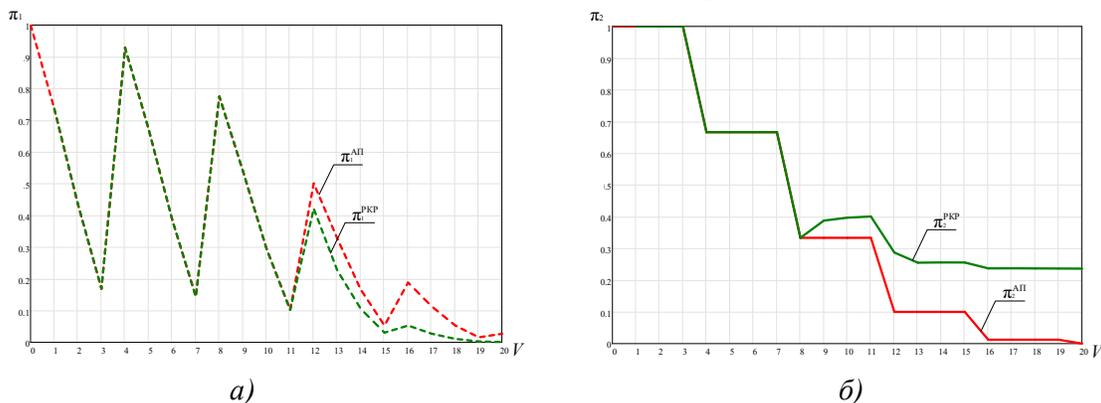


Рис. 2. Зависимости: а) вероятности потерь низкоприоритетных заявок известной (π_1^{AP}) и предлагаемой модели (π_1^{PKP}) от канального ресурса V ; б) вероятности потерь высокоприоритетных заявок известной (π_2^{AP}) и предлагаемой модели (π_2^{PKP}) от канального ресурса V

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 идентификационными характеристиками оператора АРМ КВО, так и соответствующее качество ТУС в зависимости от актуальной оперативной обстановки.

Исследование характеристик аналитической и имитационной моделей позволили сделать вывод (рис. 3), что разработанные формализмы соответствуют требованиям, предъявляемым к моделям. 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.

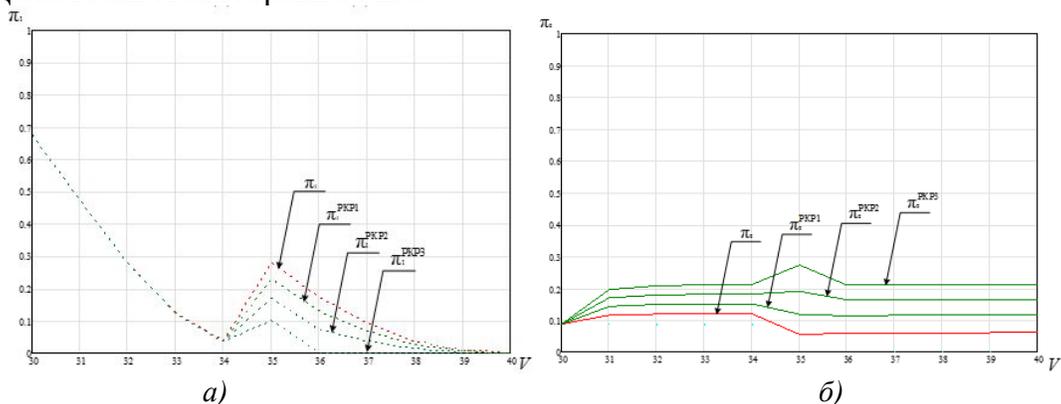


Рис. 3. Проверка модели на чувствительность к объему канального ресурса и значениям функции блокировки

Разработанная ММ может быть использована в задачах анализа и синтеза СПД, что подтверждается их результативностью и применимостью при решении научно-практических задач на этапах проектирования и эксплуатации действующих сетей.

В третьем разделе диссертационного исследования проведен анализ особенностей и методов решения задачи (2), обоснована корректность 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 заявок ТУС, i – общее число занятых канальных единиц объема канального ресурса V в момент поступления заявки k -го потока. Соответственно, целевая функция может быть записана в виде:

$$\varphi_{2\text{опт}}(i) = \varphi_2(i) : \pi_2 \leq \pi_2^*, \pi_1 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Для решения задачи (7) выбран пассивный метод вычисления оптимальной градиентной функции внутренней блокировки $\varphi_{2\text{опт}}(i)$. В исследовании установлено, что использование других методов в условиях большой размерности управляемых характеристик используемой математической модели либо невозможно, либо приведет к неконструктивному усложнению решения данной задачи, когда полученный результат трудно интерпретировать. Вышеизложенное позволило разработать обобщенный алгоритм оптимизации параметров звена СПД (рис. 4). Для вычисления оптимальной функции блокировки необходимо:

1. В зависимости от исходных данных составить и решить СУР методом Гаусса–Зейделя для проверки возможности применения алгоритма.

2. Рассчитать количество аргументов функции блокировки $m = \frac{1}{l} + 1$,

где l – изменение аргумента градиентной функции блокировки.

3. Рассчитать количество возможных неубывающих функций блокировки:

$$s = \bar{C}_m^V = \frac{(m+V-1)!}{V!(m-1)!}.$$

4. Сформировать матрицу $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$, где s – количество возможных неубывающих градиентных функций блокировки

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

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

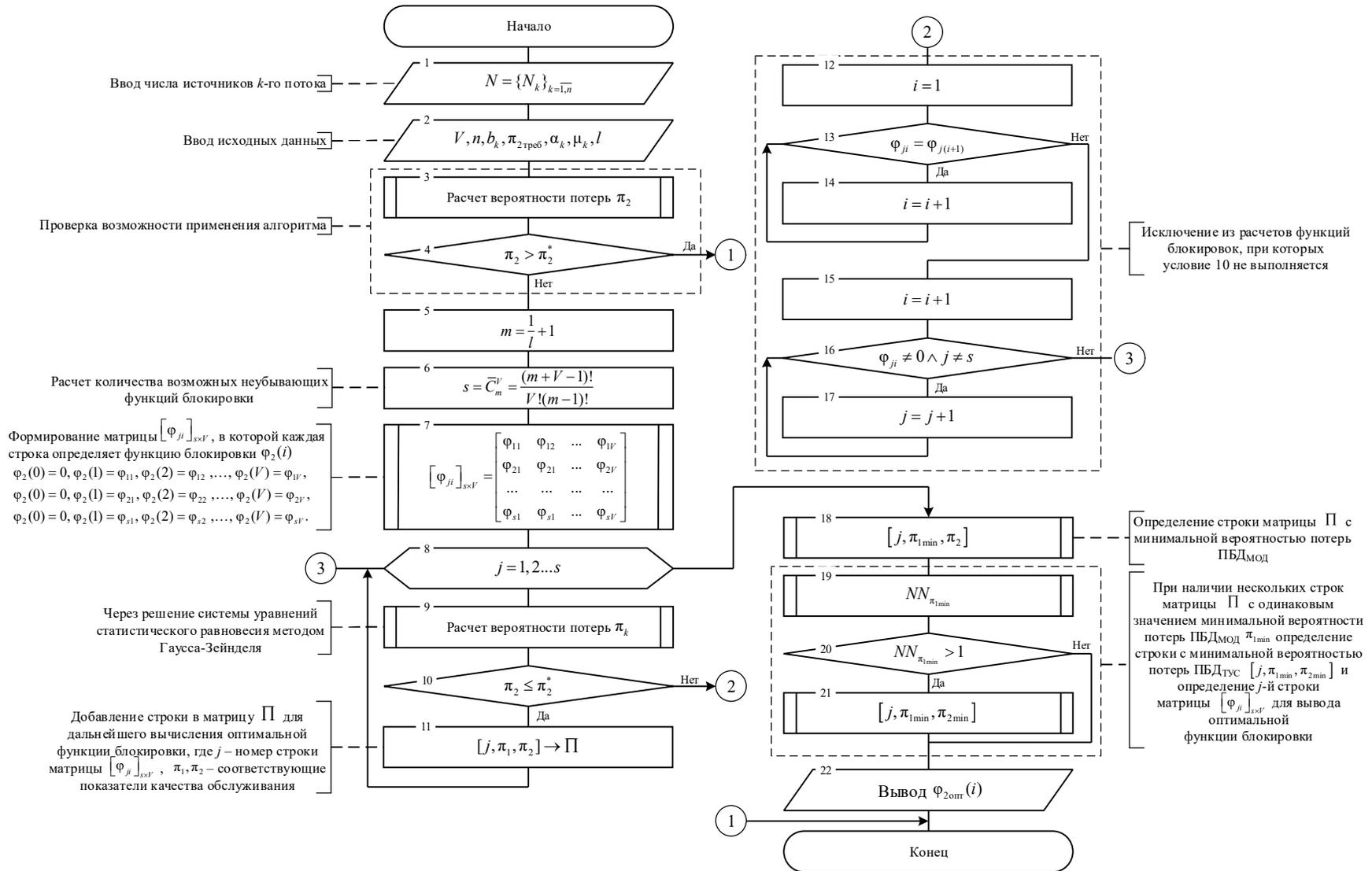


Рис. 4. Схема обобщенного алгоритма оптимизации параметров (определения оптимальной функции блокировки) звена СПД

5. Вычислить j -ю строку матрицы $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$, определяющую оптимальную функцию блокировки $\varphi_{2\text{опт}}(i)$, удовлетворяющей условиям (7). При этом, алгоритм позволяет исключить из расчетов такие функции блокировок, при которых условие $\pi_2 \leq \pi_2^*$ не выполняется. Данная особенность алгоритма позволяет значительно уменьшить количество итераций по сравнению с полным перебором.

Приведенные в работе результаты исследования свойств алгоритма доказывают, что он является корректным, относится к классу алгоритмов с полиномиальной вычислительной сложностью и может применяться на практике.

Пример результатов работы алгоритма по расчету необходимого объема канального ресурса для следующих исходных данных: $n = 2$, $b_1 = 1$ ЕКР, $b_2 = 2$ ЕКР, $\alpha_1 = 0,2$ Эрл, $\alpha_2 = 1$ Эрл, $\pi_{2\text{треб}} \leq 0,05$, $V = 10$ ЕКР, алгоритм выводит следующие значения оптимальной функции внутренней блокировки $\varphi_{2\text{опт}}(i)$:

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

При этом, в процессе работы алгоритма сформирована матрица $[\varphi_{ji}]_{s \times V}$, состоящая из 184757 строк ($s = 184757$). Результат (8) достигнут через 57 итераций. Изменения вероятностей потерь заявок обоих потоков в зависимости от используемой функции блокировки представлены в таблице 1.

Табл. 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 (8) можно посчитать выигрыш в качестве обслуживания перспективных услуг, при обеспечении требуемого качества обслуживания 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 $\pi_1^{\text{РКР}}$ – показатель качества обслуживания ПБД с модальностями оператора при использовании оптимальной градиентной функции блокировки $\varphi_{2\text{опт}}(i)$ и π_1 без нее.

На основании полученных результатов сделаны выводы, что при неэффективном использовании пропускной способности звена СПД существует возможность перераспределения канального ресурса в пользу идентификационной информации о состоянии оператора. При этом, разработанный алгоритм позволяет определить оптимальную функцию блокировки, которая в условиях заданного объема канального

ресурса обеспечит требуемое качество обслуживания двухмерного потока заявок в СМО с абсолютными приоритетами, отказами и градиентным РКР.

В четвертом разделе проведена оценка научно-технического эффекта при использовании разработанной модели и алгоритма, представлены предложения по их реализации в виде программ для ЭВМ. На основе примеров решения практических задач показана возможность использования разработанных программных продуктов для обеспечения требуемого качества обслуживания заявок в СПД.

Условием применения разработанных модели и алгоритма является наличие такой текущей ситуации в СПД, при которой ресурс пропускной способности расходуется неэффективно. В разработанных для определения неэффективности использования пропускной способности 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.

Разработанные в ходе исследования модель звена СПД и алгоритм оптимизации его параметров, реализованные в составе системы поддержки принятия решений, позволяют принимать более обоснованные решения на модернизацию СПД (ее проектирование) с точки зрения повышения степени использования канальных ресурсов.

В исследовании представлены примеры применения предлагаемого инструментария для различных управленческих ситуаций в задачах проектирования новых СПД. В данных примерах сравнивался существующий (экстенсивный) подход к организации дополнительного тракта передачи многомодальных сообщений и разработанный подход к организации такого тракта с реализацией дисциплины обслуживания с абсолютным приоритетом и РКР.

В соответствии с целевыми установками диссертационной работы данное сравнение осуществлено по показателям степени 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: $N_1 = N_2 = 5$, $b_1 = 1$ 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. С использованием разработанных ММ и алгоритма оптимизации характеристик звена СПД:

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

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

Таким образом, в данной предпроектной ситуации при использовании разработанного инструментария появилась 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 позволила перераспределить объем канального 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 являлись: $N_1 = N_2 = 5$, $b_1 = 3$ 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 степени использования канального ресурса имелся 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. Это подтверждает практическую значимость полученных результатов.

«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 заключении сформулированы полученные в работе научные и практические результаты, раскрываются степень их новизны и значение для теории и практики, предлагаются направления дальнейших исследований, ориентированные на разработку моделей и алгоритмов звена СПД на уровне протокольных блоков данных, учитывающих специфику формирования, обработки и передачи сообщений модальностей.

Основные результаты диссертационного исследования:

1. Проведен анализ состояния звена СПД в системах мониторинга КВО государства.

2. Определены условия и возможности реализации дополнительного тракта передачи сообщений с модальностями оператора по текущим параметрам ресурса пропускной способности, их загрузки и качества обслуживания ПДБ ТУС;

3. Разработана математическая модель СМО $\bar{M}_i / \bar{M}_l / V / L / PRA$ с градиентным РКР 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 двумерного потока заявок от управляемых параметров системы коммутации. Применение модели целесообразно для выбора оптимальных параметров при проектировании СПД системы мониторинга КВО государства.

4. Разработана имитационная модель звена СПД для процессов обслуживания гетерогенного трафика в программной среде AnyLogic. 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*.;

5. Разработан и реализован в виде программы для ЭВМ алгоритм оптимизации характеристик звена СПД, обеспечивающий заданное качество обслуживания ПДБ ТУС в условиях реализации дополнительных трактов передачи многомодальных сообщений;

6. Разработанные в ходе исследования модели звена СПД и алгоритмы оптимизации его параметров, реализованные в составе системы поддержки принятия решений, позволяют принимать более обоснованные решения на проектирование (модернизацию) СПД с точки зрения эффективности использования канальных ресурсов.

7. Запатентованные физические модули СПД, разработанные в ходе исследований, позволяют на практике обеспечить формирование из сообщений, генерируемых АКСО в модальном представлении, получить поток ПДБ такого формата, который соответствует сетевой технологии, применяемой в современной СПД.

8. Проведены исследования, подтверждающие достоверность результатов и достижение цели диссертационного исследования. В соответствии с рассмотренными примерами применения разработанного инструментария, для различных управленческих ситуаций в задачах проектирования новых СПД возможно

повысить степень использования пропускной способности канального ресурса на 13% и 34%.

В приложении А представлены результаты имитационного моделирования звена СПД, обслуживающей сообщения как ТУС, так и в многомодальном представлении.

В приложении Б представлен расчет вероятностей потерь блоков данных с характеристиками модальностей и ПБД ТУС при использовании градиентных функций внутренней блокировки $\varphi_2(i)$.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы:

а) в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в Scopus:

1. 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.

б) в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК:

2. Сайтов С.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.

3. 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-Сотт – Телекоммуникации и Транспорт», ООО «Издательский дом Медиа Паблишер», № 11, 2021, С 45–52.

в) в других изданиях:

4. 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.

5. 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.

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

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

8. Сайтов, С. И. Повышение степени использования канального ресурса при предоставлении услуг видеоконференцсвязи / С.И. Сайтов, 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.

г) в официальных изданиях патентного ведомства (изобретения):

9. Сайтов, С.И. Способ измерения показателей качества функциони-рования сети связи с коммутацией пакетов и устройство для его осуществления / С.И. Сайтов, Р.Б. Трегубов, К.И. Мясин // Патент РФ № 2663704 от 08.08.2018 г.

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

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

д) в официальных изданиях патентного ведомства (программы для ЭВМ):

12. Сайтов, С.И. Программа аутентификации пользователя по клавиатурному почерку / С.И. Сайтов, И.А. Сайтов, А.А. Логвин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660834 от 28.08.2018.

13. Сайтов, С.И. Программа вычисления оптимального значения функции блокировки коммутатора / С.И. Сайтов, О.О. Басов, И.А. Сайтов, А.В. Рындин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618430 от 28.07.2020.

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