

**Мохаммед Омар Ахмед Абдулвасеа**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ  
СИСТЕМЫ ЭКСТРЕННЫХ СЛУЖБ**

Специальность

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2021 г.

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

**Научный руководитель:** **Степанова Ирина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Сети связи и системы коммутации» МТУСИ

**Официальные оппоненты:** **Цым Александр Юрьевич** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник научной лаборатории, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт связи» (ФГУП ЦНИИС)

**Казанский Николай Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Российской Федерации «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ))

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ПГУТИ)

Защита диссертации состоится «20» Мая 2021 года в 15 часов на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.04 при МТУСИ по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8-а, МТУСИ, ауд. А-448.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте

<http://www.srd-mtuci.ru/images/Dis-Omar/dis-Omar.pdf>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 219.001.04

доктор технических наук, доцент \_\_\_\_\_ М. В. Терешонок

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Важным элементом «Системы 112» является центр обслуживания (обработки) экстренных вызовов (ЦОВ). Многофункциональный комплекс оборудования ЦОВ должен обеспечивать прием и обработку входящих обращений от населения силами операторов «Системы 112», распределение заявок на реагирование между экстренными службами. Интеграция ресурсов экстренных служб в рамках «Системы 112» для предварительной обработки вызовов операторами «Системы 112» позволяет передавать в автоматизированном режиме данные экстренного вызова операторам таких служб как пожарная, скорая помощь, полиция, газовая служба, «Антитеррор». Непосредственно в ЦОВ «Системы 112» могут формироваться группы операторов для выполнения специальных задач. Предполагается, что развертывание «Системы 112» будет способствовать повышению оперативности взаимодействия между экстренными службами, уменьшать время реагирования на чрезвычайные ситуации (ЧС).

Перспективно использование в «Системе 112» средств профессиональной радиотелефонной связи и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для координации аварийно-спасательных работ, как при возникновении ЧС, так и при ликвидации ее последствий (доступ к мобильной связи может быть ограничен из-за угрозы терактов).

Как показывает мировой опыт, возникновение ЧС приводит к резкому повышению трафика реального времени в зоне чрезвычайной ситуации. Интенсивность потока экстренных вызовов может быть превышена в несколько раз относительно спокойного периода. Известен подход по ограничению трафика в зоне ЧС с целью защиты от перегрузок на отдельных участках «Системы 112» и, в частности, в центрах обслуживания вызовов единых дежурно - диспетчерских служб (ЕДДС). Отрицательная сторона такого подхода заключается в возможности потери контроля над развитием ситуации.

В данной диссертационной работе исследован другой подход, а именно – предлагается объединять в систему экстренных служб ресурсы нескольких ЦОВ для обслуживания трафика экстренных вызовов. Такая система взаимопомощи должна обеспечивать возможность перенаправления избыточного трафика от центра обслуживания вызовов из зоны ЧС (далее обозначаем его как ЦОВ – ЧС) в ЦОВ экстренных служб, которые не затронуты чрезвычайной ситуацией. Предполагается, что отказ в обслуживании вызова (направление вызова на интерактивные голосовые меню Interactive voice menu, IVR) наступает, если в момент поступления экстренного вызова в системе будут отсутствовать свободные и доступные операторы. Уменьшение доли вызовов, направляемых на IVR, будет способствовать снижению уровня паники.

Таким образом, переход от традиционного варианта организации независимых экстренных служб к единой информационной территориально-распределенной «Системе 112» открывает новые направления исследований. Актуальность исследования подтверждается необходимостью своевременного реагирования экстренных служб на обращения граждан, тенденцией быстрого роста трафика экстренных вызовов при возникновении ЧС, потребностью эффективного использования технических ресурсов «Системы 112».

### **Степень разработанности темы.**

Теория и основные принципы обслуживания трафика в сетях и системах связи

исследованы в трудах С. Н. Степанова, А. П. Пшеничникова, А. Е. Кучерявого, К.Е.Самуйлова, Г. П. Башарина, Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко, Л.Клейнрока, Т.Л. Саати и других авторов.

В работах А. П. Пшеничникова и М. А. Шнепса – Шнеппе описан метод теории телетрафика RDA, позволяющий проводить оценку пропускной способности альтернативных направлений связи для обслуживания избыточного трафика. Использование метода RDA для исследования системы экстренных служб связано с необходимостью учитывать особенности методов управления избыточным трафиком, рекомендованных МСЭ-Т для телекоммуникационных сетей, а именно таких методов как: пропуск маршрута Skip Route Control (SKIP); избыточное перенаправление вызовов Overflow Reroute (ORR); регулирование трафика в распределителе избыточной нагрузки Reroute Control.

В работах С. Н. Степанова, О.А.Новикова, С.И.Петухова исследовано групповое поступление требований на обслуживание.

Перспективность использования этого подхода связана с особенностями работы цифровых систем профессиональной радиотелефонной связи, а именно с использованием спасателями режимов полудуплексной, дуплексной и мультимедийной связи.

В работах А. К. Левакова и Н.А.Соколова показаны возможности ограничения роста трафика в режиме ЧС, в том числе – за счет ограничения доступа пользователей к системе экстренных служб. Возможности объединения ресурсов ЦОВ в систему экстренных служб не исследовались.

В работе С.Н.Степанова использован подход по представлению радиоинтерфейса базовой станции мобильной связи в виде системы уравнений, учитывающей наличие ресурса каналов для реализации функции handover, то есть «эстафетной передачи» пользователей от одной базовой станции к другой. Однако, проблематика формирования оперативного резерва в операторских подсистемах не изучена. Актуальность ее исследования связана с потребностью сохранения достаточно высокого уровня обслуживания экстренных вызовов в тех зонах, которые не затронуты ЧС, но ресурсы и оборудование которых задействованы в организации системы взаимопомощи.

Использование БПЛА в сочетании с возможностями мобильной и фиксированной связи исследовано в работах Р. В. Киричека, А. Е. Кучерявого, Altshuler,У. Проблематика использования БПЛА в качестве дополнительного ресурса системы цифровой профессиональной радиотелефонной связи не рассматривалась.

Таким образом, проблема повышения пропускной способности системы экстренных служб за счет направления избыточных вызовов в зоны, не затронутые ЧС, представляет интерес с позиции оценки разнонаправленного влияния различных факторов на качество обслуживания. Подходы к реализации «Системы 112» в Российской Федерации, к объединению ресурсов ЦОВ в систему экстренных служб представляют практический интерес для развивающихся стран и, в том числе, для Республики Йемен.

#### **Цель работы и задачи исследования.**

Цель: исследование и разработка метода повышения пропускной способности системы экстренных служб при возникновении чрезвычайной ситуации, учитывающего особенности организации взаимопомощи и возможность выделения оперативного резерва в центрах

обслуживания вызовов.

Предмет исследования: математические модели, формализующие процессы функционирования системы экстренных служб в условиях возникновения ЧС, а также математические модели, формализующие использование систем цифровой транкинговой связи с привлечением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как дополнительного ресурса связи в «Системе 112» при ликвидации последствий ЧС

Объект исследования: система экстренных служб, объединяющая операторские ресурсы центров обслуживания вызовов для обеспечения практически безотказного обслуживания вызовов из зоны ЧС.

Научная задача исследования состоит в исследовании влияния на пропускную способность системы экстренных служб совокупности таких факторов, как структура системы, методы распределения избыточного трафика, число ЦОВ в системе, емкость операторских подсистем, выделение оперативного резерва в ЦОВ системы, возможность исключения ЦОВ из цепочки маршрутизации, возможность привлечения ресурсов сторонних операторов.

Частные научные задачи исследования:

1. Анализ вариантов организации системы экстренных служб с привлечением перспективных методов распределения избыточного трафика, позволяющих повысить пропускную способность системы экстренных служб;

2. Разработка математической модели функционирования системы экстренных служб для аналитической оценки устойчивости к перегрузкам ЦОВ-ЧС;

3. Разработка математической модели функционирования цифровой системы профессиональной радиотелефонной связи в сочетании с БПЛА, позволяющей учесть особенности различных режимов ее использования при ликвидации последствий ЧС;

4. Проведение компьютерного моделирования функционирования системы экстренных служб в режиме on-line с использованием информационных массивов, в которых сгруппированы данные о поступлении заявок на обслуживание, продолжительности их обслуживания, наличии ресурса свободных операторов.

**Методы исследования.**

Основная часть диссертации выполнена с привлечением методов теории телетрафика, теории вероятностей и математической статистики.

При проведении аналитических расчетов и моделировании работы системы экстренных служб использован язык программирования C# среды Visual Studio 2017.

Корректность применения математического аппарата теории телетрафика, а также результаты компьютерного моделирования, подтверждают обоснованность научных положений и результатов исследований, рекомендаций и выводов, сделанных в диссертационной работе.

**Научная новизна работы.**

1. Разработка модели функционирования системы экстренных служб и проведенные на ее основе исследования с привлечением методов теории телетрафика и компьютерного программирования, впервые позволили учесть характер влияния совокупности факторов на пропускную способность системы в режиме чрезвычайной ситуации. Выполнено сравнение методов управления и распределения избыточного трафика, разработаны рекомендации по их

использованию в системе экстренных служб. Получена оценка влияния оперативного резерва в ЦОВ на качество обслуживания экстренных вызовов из зоны ЧС и в конкретных зонах ответственности. Получена оценка потенциальной устойчивости системы экстренных служб к перегрузкам с учетом возможности исключения ЦОВ из цепочки маршрутизации.

2. Получены оценки использования БПЛА, впервые рассматриваемого в качестве дополнительного ресурса для расширения возможностей системы профессиональной радиотелефонной связи в зоне ликвидации последствий ЧС.

3. Разработанный метод повышения пропускной способности экстренных служб впервые позволяет при выборе структуры системы и оценке необходимых технических ресурсов учитывать требования к потенциальной устойчивости ЦОВ в зоне ЧС к перегрузкам, а также особенности передачи избыточного трафика в зоны, не затронутые ЧС.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость работы заключается в аналитическом описании функционирования системы экстренных служб, представленной в соответствии с методом декомпозиции в виде совокупности систем массового обслуживания.

Предложенное аналитическое описание легло в основу компьютерного моделирования. Точность и достоверность моделирования оценивались по критерию Стюдента.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработаны рекомендации по использованию в системе экстренных служб комбинации методов управления трафиком;

- разработана методика объединения в систему экстренных служб ресурсов центров обслуживания экстренных вызовов, позволяющая оценить коэффициент потенциальной устойчивости ЦОВ-ЧС к перегрузкам с учетом емкости и числа центров обслуживания экстренных вызовов, входящих в систему взаимопомощи;

- разработаны рекомендации по использованию БПЛА совместно с оборудованием TETRA для организации эффективного взаимодействия спасательных служб при ликвидации последствий ЧС.

Результаты диссертации использованы в учебном процессе кафедры «Сети связи и системы коммутации» МТУСИ, что подтверждено соответствующим актом.

#### **Публикация и апробация результатов диссертационной работы.**

Результаты теоретических и экспериментальных научных исследований, выполненных в диссертационной работе, опубликованы в открытой печати – всего 15 публикаций. Из которых: 4 статьи в журнале T-Comm, входящем в список изданий ВАК; одна статья в журнале SUNHROINFO JOURNAL–INSTITUTE OF RADIO AND INFORMATION SYSTEMS (IRIS), Австрия; шесть публикаций - без соавторов.

Результаты диссертационной работы представлены в докладах на трех конференциях, в частности, на Международной научной конференции «2020 SYSTEMS OF SIGNALS GENERATING AND PROCESSING IN THE FIELD OF ON BOARD COMMUNICATIONS (IEEE Conference # 483710)» (Москва, 2020 г.) - материалы доклада опубликованы в сборнике, индексируемом Scopus. Результаты работы обсуждались на научных семинарах кафедры «Сети связи и системы коммутации» МТУСИ.

**Достоверность результатов, выводов и рекомендаций** обеспечивается корректностью применения математических методов теории телетрафика и подтверждается

результатами компьютерных расчетов и моделирования.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Сравнение вариантов построения системы экстренных служб и исследование методов управления ее ресурсами, проведенное в диссертации путем разработки моделей обслуживания вызовов и программирования, позволило оценить степень влияния на ее пропускную способность таких факторов как: выбор структуры системы; методы управления и распределения избыточного трафика; наличие оперативного резерва операторов.

2. Проведенные в диссертации аналитические расчеты и статистическое компьютерное моделирование аргументировали перспективность реализации псевдослучайного распределения избыточного трафика экстренных вызовов в системе экстренных служб с учетом объединения центров обслуживания вызовов разной емкости.

3. Сохранить заданный уровень обслуживания экстренных вызовов в  $j$ -ой зоне обслуживания, не затронутой ЧС, позволяет исключение части операторов  $V_{jрез}$  из системы взаимопомощи, то есть образование оперативного резерва. Результаты компьютерных расчетов на основе разработанной модели обслуживания экстренных вызовов отражены в рекомендациях по выбору величины максимально допустимого оперативного резерва.

4. Разработанная математическая модель функционирования системы профессиональной радиотелефонной связи позволяет учесть использование БПЛА в качестве дополнительного ресурса, а также особенности предоставления канального ресурса при полудуплексной, дуплексной и мультимедийной связи.

5. Разработан метод повышения пропускной способности системы экстренных служб при перегрузке центра обслуживания экстренных вызовов в зоне чрезвычайной ситуации, позволяющий учесть: требования к коэффициенту  $h$ , характеризующему потенциальную устойчивость системы к перегрузкам; структурные особенности системы; число рабочих мест  $V_j$  в центрах обслуживания вызовов; фактор недоступности или выхода из строя ЦОВ. Так, объединение операторов четырех ЦОВ в единый ресурс повысит устойчивость к перегрузкам до  $h = 4,42$  при числе рабочих мест в ЦОВ  $V_j = 24$  оператора; до  $h = 7,06$  при  $V_j = 30$  операторов.

**Личный вклад.** Результаты исследований, представленные в основных положениях, выносимых на защиту диссертационной работы, получены автором лично. Из опубликованных в открытой печати работ в основную часть диссертацию включены результаты, полученные автором единолично.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы из 109 наименований и семь приложений. Основная часть диссертации содержит 120 страницы текста с 44 иллюстрациями и 26 таблицами.

#### **Соответствие положений выбранной специальности.**

Выносимые на защиту положения диссертационной работы соответствуют формуле специальности «05.12.13. Системы, сети и устройства телекоммуникаций», в части утверждения «Комплексное решение научных и технических проблем, задач и вопросов организации сетей, систем и устройств телекоммуникаций состоит в создании новых принципов и методов информационного обмена...».

Положения относятся к определённым в паспорте специальности 05.12.13 областям исследований, а именно:

«Исследование путей совершенствования управления информационными потоками»;  
«Разработка методов эффективного использования сетей, систем и устройств телекоммуникаций в различных отраслях народного хозяйства».

#### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснованы выбор темы диссертации, ее актуальность, новизна, определены цель и задачи исследования, структура и объем диссертации, коротко изложено ее содержание.

**В первом разделе** рассмотрены варианты организации системы экстренных служб и методы расчета ее пропускной способности.

Пропускная способность системы экстренных служб характеризуется объёмом трафика (нагрузки), который может быть обслужен операторами системы с заданным качеством. Общепринятой практикой в организации работы центров обслуживания экстренных вызовов является переадресация избыточного трафика на интерактивное голосовое меню IVR. Однако, принятие решений в этом случае затягивается, может быть упущено время для оперативного реагирования.

Центры обслуживания экстренных вызовов являются неотъемлемой частью единых дежурно-диспетчерских служб (ЕДДС) и дежурно-диспетчерских служб (ДДС) «Системы 112». Объединение ресурсов центров обслуживания экстренных вызовов в единую систему взаимопомощи для перераспределения поступающего трафика в «Системе 112» является одним из перспективных подходов для устранения негативного влияния ЧС и обеспечения высокой вероятности успешного обслуживания экстренных вызовов операторами ЦОВ. Если в момент поступления экстренного вызова все операторы ЦОВ - ЧС будут заняты, то такой вызов может передаваться на обслуживание операторам другого ЦОВ, который не испытывает перегрузок в текущий момент времени.

При объединении в систему нескольких ЦОВ, входящих в состав ЕДДС, встает вопрос об организации оперативного резерва в каждом из ЦОВ для сохранения высокого качества обслуживания жителей тех зон обслуживания, в которые направляется избыточный трафик от ЦОВ-ЧС. Оперативный резерв рабочих мест операторов в ЦОВ j-ой зоны будет доступен только для жителей j-ой зоны (обслуживание «внутренних» вызовов).

На общие нужды в систему экстренных служб будет передаваться часть рабочих мест операторов в ЦОВ j-ой зоны обслуживания, которые:

будут обслуживать только «внешние» экстренные вызовы;

могут использоваться для «внешних» и «внутренних» вызовов j-ого района.

Должно выполняться требование – недопустимо существенное ухудшение качества обслуживания в j-ой зоне обслуживания, если часть рабочих мест операторов в ЦОВ j-ой зоны становится доступна для избыточного трафика от ЦОВ ЧС.

Предлагается применять при управлении потоками экстренных вызовов перспективные подходы, рекомендованные МСЭ-Т для телекоммуникационных сетей и систем.

Функциональная модель перенаправления избыточной нагрузки в системе экстренных служб представлена на рисунке 1. В распределителе избыточной нагрузки используется метод управления маршрута SKIP, распределяющий избыточный трафик на другие ЦОВ системы

пропорционально емкости операторских подсистем или с учетом их загруженности.

Метод управления трафиком Overflow Reroute (ORR) использован для формирования цепочки маршрутизации трафика в системе. При переходе любого ЦОВ системы взаимопомощи в режим блокировки (все операторы заняты, технический отказ оборудования) избыточный трафик передается на следующий в цепочке маршрутизации ЦОВ. В последнем в цепочке ЦОВ активизирована отмена метода ORR при помощи процедуры отмены избыточного перенаправления Cancel Reroute Overflow (CRO). Необслуженные вызовы направляются на интерактивное голосовое меню IVR.

Обозначим коэффициентом  $k_j$  долю избыточной нагрузки, направляемой на  $j$ -ый ЦОВ экстренных служб от ЦОВ-ЧС:

$$K_j = V_j / V_{\text{доступное}}, \quad (1)$$

где  $j$  - номер ЦОВ экстренных служб в системе взаимопомощи;

$j = 1 \dots W$ , где  $W$  - число ЦОВ экстренных служб, на которые может направляться избыточная нагрузка от ЦОВ-ЧС;

общее число ЦОВ в системе  $L = (W + 1)$ ;

$V_j$  - емкость операторской подсистемы  $j$ -ого ЦОВ;

$V_{\text{доступное}}$  - общее число операторов в системе, доступных для трафика из ЦОВ-ЧС.

Условие сохранения стационарного равновесия в  $j$ -й зоне обслуживания выполняется, если интенсивность потоков вызовов, поступающих на  $j$ -й ЦОВ  $\lambda_j$  общ не превышает число доступных операторов в  $j$ -м ЦОВ.

Интенсивность потока вызовов, поступающих на  $j$ -й ЦОВ, определим как:

$$\lambda_j \text{ общ} = \lambda_j + \lambda_{\text{изб}(j-1)}^* + \lambda_{\text{избыт}j}, \quad (2)$$

где  $\lambda_j$  - интенсивность вызовов от пользователей в зоне обслуживания  $j$ -ого ЦОВ;

$\lambda_{\text{изб}(j-1)}^*$  - интенсивность избыточной нагрузки от  $(j-1)$ -ого ЦОВ (перегрузка, технический отказ) на следующий  $j$ -ый ЦОВ в цепочке маршрутизации;

$\lambda_{\text{избыт}j}$  - интенсивность потока избыточных вызовов, поступающего на  $j$ -й ЦОВ от ЦОВ-  $\lambda_{\text{избыт}j} = \lambda_{\text{избыт}} \times k_j$ .

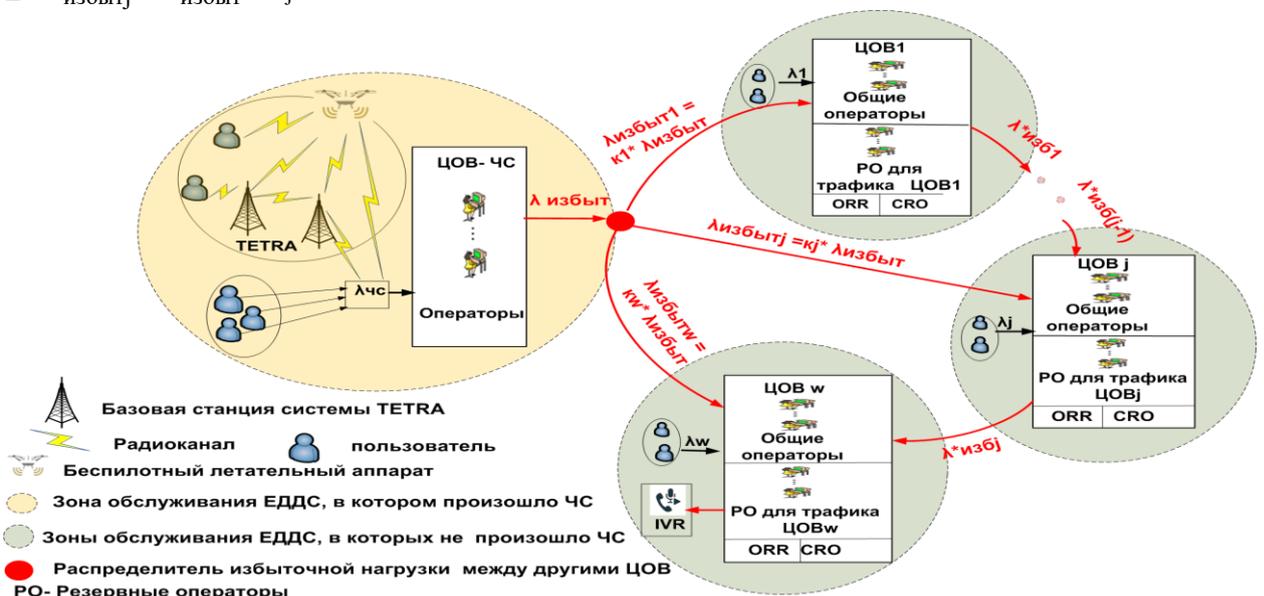


Рисунок 1. Обобщенная функциональная модель распределения трафика в системе экстренных служб

Во втором разделе представлены разработанные математические модели функционирования системы экстренных служб.

Для оценки устойчивости ЦОВ экстренных служб и всей системы в целом к перегрузкам применён метод RDA, широко используемый в теории телетрафика. Название метода RDA образовано системой используемых показателей: величина R обозначает среднее значение избыточной нагрузки; D – ее рассеяние (то есть разность дисперсии и среднего значения); A – интенсивность нагрузки.

Формализованное описание процессов предоставления услуг в системе взаимопомощи выполнено с привлечением метода декомпозиции путем представления элементов системы в виде отдельных систем массового обслуживания СМО.

В качестве примера на рисунке 2 представлена математическая модель системы экстренных служб, отображающая обобщенный вариант распределения избыточного трафика с возможностью перенаправления избыточного трафика между ЦОВ системы.

Распределитель избыточной нагрузки в ЦОВ-ЧС рассматривается как альтернативное направление связи.

Каждый центр обслуживания (обработки) экстренных вызовов ЦОВ с точки зрения теории массового обслуживания рассматривается как СМО, имеющая вид М/М/V/V. Первая буква М означает, что поступающие потоки являются пуассоновскими. Вторая М означает, что время обслуживания вызовов распределено по экспоненциальному закону. Признак V на третьей позиции показывает ограниченное число канальных ресурсов (в нашем случае – число операторов). Последний признак V означает, что отказ в обслуживании наступает, если все V каналов (все операторы) в момент поступления вызова заняты и вызов направляется в систему IVR.

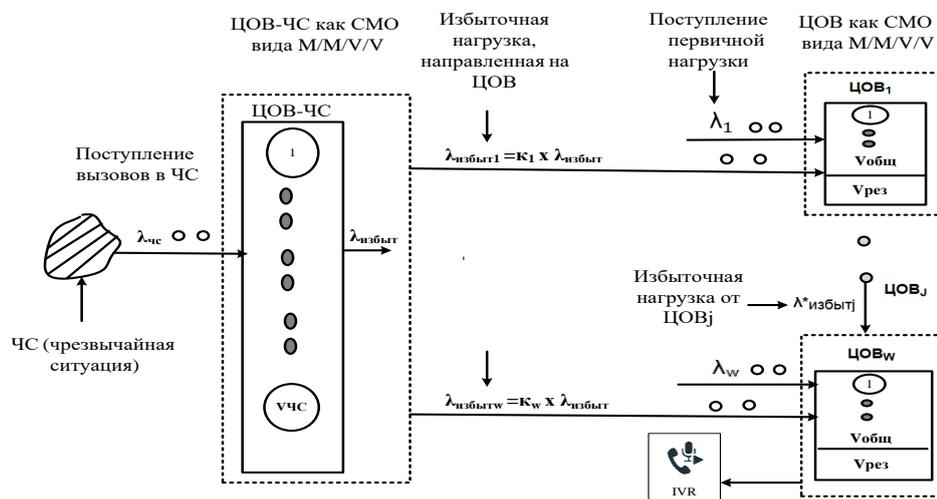


Рисунок 2. Математическая модель функционирования системы экстренных служб

При объединении в систему нескольких ЦОВ встает вопрос об организации оперативного резерва в каждом из ЦОВ для сохранения высокого качества обслуживания жителей тех районов обслуживания, в которые направляется избыточный трафик от ЦОВ-ЧС. Практически речь идет о том, что оперативный резерв рабочих мест операторов в ЦОВ j-ого района будет доступен только для жителей j-ого района (обслуживание «внутренних» вызовов). Модель на рисунке 2 предусматривает возможность выделения в каждом ЦОВ группы операторов, образующей оперативный резерв.

Диаграмма переходов случайного процесса, описывающего динамику изменения состояний модели с резервированием ресурса рабочих мест операторов в каждом из ЦОВ представлена на рисунке 3. Аналогичная модель была предложена Степановым С.Н. для описания систем мобильной связи с учетом функции «handover»

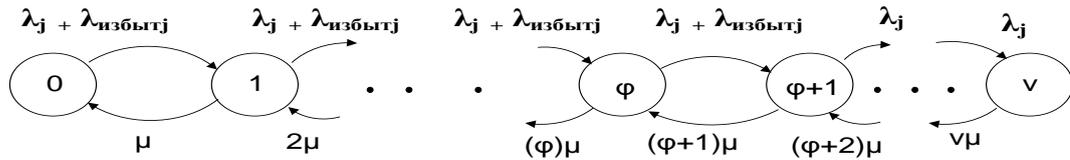


Рисунок 3. Диаграмма переходов случайного процесса, описывающего динамику изменения состояний модели с выделением оперативного резерва

Вызовы, поступающие на обслуживание в зоне своего центра с интенсивностью λ<sub>i</sub>, будут обслужены, если число занятых каналов не больше величин φ. То есть число занятых каналов принимает значения V = 0, 1, ..., φ. Вызовы от ЦОВ-ЧС обслуживаются любым свободным каналом 0, 1, ..., V<sub>i</sub>. Для определения числа резервируемых каналов используем соотношение V<sub>рез</sub> = V<sub>i</sub> - φ - 1, где φ = 0, 1, ..., (V<sub>i</sub> - 1).

Если φ = 0, то V<sub>рез</sub> = V<sub>i</sub> - 1, а при φ = (V<sub>i</sub> - 1), имеет место V<sub>рез</sub> = 0. Для упрощения модели обозначим λ<sub>избыт(j)</sub> = λ<sub>избыт</sub> × K<sub>j</sub>.

Система уравнения равновесия, описывающая модель и связывающая ненормированные вероятности имеет вид

$$\begin{aligned}
 P(0)(\lambda_j + \lambda_{избыт(j)}) &= P(1)\mu, & i=0; & \quad (3) \\
 P(i)(\lambda_j + \lambda_{избыт(j)} + i\mu) &= P(i-1)(\lambda_j + \lambda_{избыт(j)}) + P(i+1)(i+1)\mu, & i=1, 2..φ; \\
 P(i)(\lambda_j + i\mu) &= P(i-1)(\lambda_j + \lambda_{избыт(j)}) + P(i+1)(i+1)\mu, & i=φ+1; \\
 P(i)(\lambda_j + i\mu) &= P(i-1)\lambda_j + P(i+1)(i+1)\mu, & i=φ+2, φ+3, \dots V-1; \\
 P(V)V\mu &= P(V-1)\lambda_j.
 \end{aligned}$$

Система уравнений имеет рекурсивные соотношения, которые связывают значения P(i) между собой

$$\begin{aligned}
 P(i)(\lambda_j + \lambda_{избыт(j)}) &= P(i+1)(i+1)\mu, & i=0, 1..φ; & \quad (4) \\
 P(i)(\lambda_j) &= P(i+1)(i+1)\mu, & i=φ+1, φ+2, \dots V-1. \\
 P(V)V\mu &= P(V-1)\lambda_j.
 \end{aligned}$$

Система уравнений (4) имеет единственное решение и может быть решена с помощью методов линейной алгебры. Для решения использован метод итерации. Разработана программа расчета на языке C# (Visual Studio 2017), листинг которой приведен в Приложении.

Проведенные расчеты показали, что увеличение оперативного резерва V<sub>рез</sub> значительно снижает возможности обслуживания избыточного трафика из зоны ЧС. Но обслуживание экстренных вызовов из j –ой зоны будет сохраняться на достаточно высоком уровне. Выбор величины оперативного резерва существенно влияет на качество обслуживания экстренных вызовов в зоне ЧС и в соседних зонах, не затронутых ЧС.

На рисунке 4 представлен перспективный вариант использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве дополнительного ресурса в системах TETRA. Кластер состоит из четырех ячейки сети стандарта TETRA. При занятости всех каналов в

радиоинтерфейсе конкретной ячейки кластера может быть использован дополнительный ресурс каналов БПЛА.

Предлагается для описания функционирования радиоинтерфейса БПЛА использовать систему обслуживания вида  $G/M/V_{\text{доп бпла}}$ . На вход системы поступают потоки вызовов, оказавшиеся избыточными для ячеек системы TETRA (см. рис. 5).

Знак в первой позиции означает, что входящий поток имеет произвольное распределение. Экспоненциальный характер распределения времени обслуживания вызовов отображает знак  $M$  во второй позиции. Величина  $V_{\text{доп бпла}}$  характеризует количество каналов связи в этом направлении. С точки зрения теории массового обслуживания каждая ячейка системы TETRA - это совокупность нескольких полноступных пучков каналов, доступных пользователям этой ячейки, и имеет вид  $M/M/V$ . Сумма каналов во всех ячейках и каналов БПЛА  $V_{\text{доп бпла}}$  определяет пропускную способность сети.

Точка присутствия БПЛА может получать в системах радиосвязи, и, в том числе, в системе TETRA, статус направления связи. В разработанной модели метод RDA позволяет дать обоснование числу радиоканалов ( $V_{\text{доп бпла}}$ ) в направлении к БПЛА с учетом девиации нагрузки, поступающей на ячейки сети. Число каналов  $V_{\text{доп бпла}}$  определяется при условии, чтобы вероятность потерь была не более допустимой вероятности, то есть выполняется неравенство  $p_{\text{д.потерь}} > p_{\text{пот.доступ}}$ . Каждая ячейка рассматривается как система с полноступным пучком линий, состоящим из  $N_i$  радиоканалов. На вход каждой ячейки полноступного пучка поступает пуассоновский поток заявок на обслуживание с интенсивностью  $A_i$ ,  $i=1, \dots, n$ . БПЛА тоже рассматривается как система с полноступным пучком каналов, обслуживающим избыточные заявки от  $n$  ячеек.

Особенностью цифровых транкинговых систем является то, что часть трафика может быть направлена на сети общего пользования, в том числе - на телефонные сети общего пользования (ТфОП). Дуплексный режим связи рекомендован как актуальный вариант для обеспечения связи между транкинговыми системами и ТфОП. Дополнительным фактором является внедрение мультимедийных услуг. Учесть эти особенности позволил примененный подход к представлению радиоинтерфейса системы TETRA в виде системы массового обслуживания (СМО) с групповым поступлением заявок. Системы уравнений равновесия, описывающие состояния подобных систем, представлены в работах С.Н.Степанова, О.А.Новикова, С.И.Петухова. В стационарном режиме система уравнений равновесия представляется как система алгебраических уравнений.

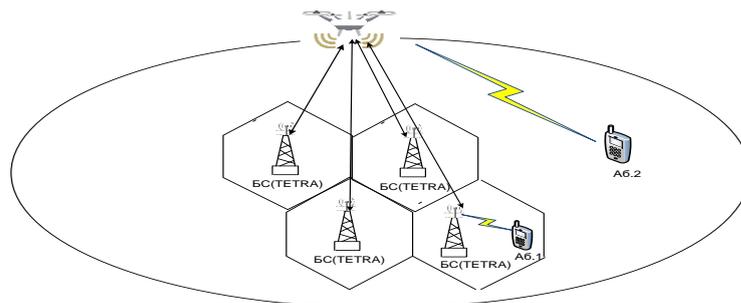


Рисунок 4. Использование БПЛА в качестве средства защиты от перегрузок на сети стандарта TETRA

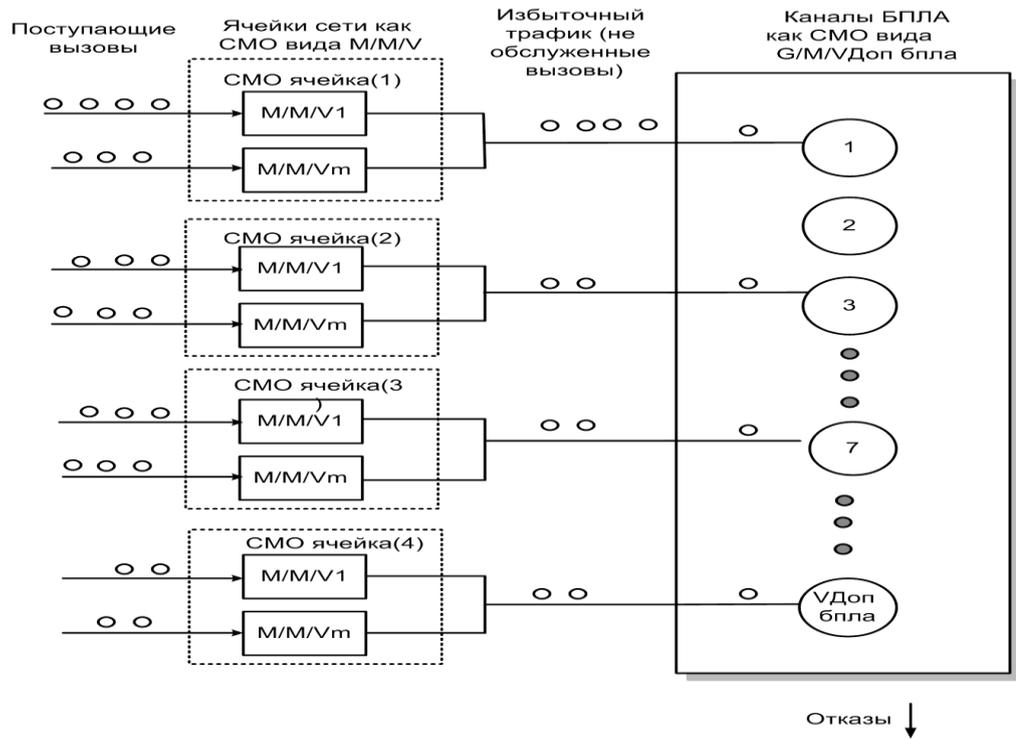


Рисунок 5. Математическая модель функционирования системы связи с БПЛА

Обозначим величиной  $\alpha_{\text{груп}} = \lambda/\mu$  - интенсивность нагрузки, поступающей на пучок каналов радиointерфейса  $V$ . Тогда получим

$$p_1 = \alpha_{\text{груп}} * p_0 ;$$

$$p_{i+1} = \left( \frac{\alpha_{\text{груп}} + i}{i+1} \right) * p_i - \left( \frac{\alpha_{\text{груп}}}{i+1} \right) \sum_{s=1}^i F_s * P_{i-s}, \quad i < v ; \quad (5)$$

.....

$$p_v = \frac{\alpha_{\text{груп}}}{v} \sum_{k=1}^v P_{v-k} \sum_{s=k}^i F_s ;$$

где  $V$  – общее число каналов;

$i$  - число занятых каналов в системе,  $i = 0, 1 \dots V$ ;

$F_s$ - вероятность поступления в группе  $s$  заявок;

$\lambda, \mu$  – параметры поступления и обслуживания групп вызовов при случайном составе заявок в группе.

Нормирующее условие для определения  $P_0$  запишем как  $\sum_{i=0}^v p_i = 1$ .

В соответствии принятой моделью учитываем, что существуют три потока вызовов с разными интенсивностями: полудуплекса  $\lambda_{\text{пол-дуп}}$ ; дуплекса  $\lambda_{\text{дуп}}$ ; мультимедиа  $\lambda_{\text{мульти}}$ . Плотность поступления групповых заявок равна:

$$\lambda = \lambda_{\text{пол-дуп}} + \lambda_{\text{дуп}} + \lambda_{\text{мульти}}. \quad (6)$$

Введем обозначения:  $F_{\text{пол-дуп}}$  - вероятность, с которой активный абонент требует один канал для обслуживания,  $F_{\text{пол-дуп}} = F_1 = \lambda_{\text{пол-дуп}} / \lambda$ ;

величина  $F_{\text{дуп}}$  - вероятность, с которой активный абонент требует два канала для обслуживания  $F_{\text{дуп}} = F_2 = \lambda_{\text{дуп}} / \lambda$ ;

величина  $F_{\text{мульти}}$  - вероятность, с которой активный абонент требует группу каналов для обслуживания  $F_{\text{мульти}} = \lambda_{\text{мульти}} / \lambda$

Для решения системы уравнений разработана программа, представленная в приложении. Система уравнений решена для вариантов использования радиointерфейса с выделением одного, двух или восьми каналов трафика, причем  $F_1 > F_2 > F_8$ ,  $F_1 + F_2 + F_8 = 1$ .

Усредненное значение интенсивности обслуживания вызова

$$\mu_{\text{сред}} = 1 / (F_{\text{пол-дуп}} * t_{\text{пол-дуп}} + F_{\text{дуп}} * t_{\text{дуп}} + F_{\text{мульти}} * t_{\text{мульти}}). \quad (7)$$

Отказ в полудуплексном режиме наступает, когда все  $V$  каналов заняты с вероятностью

$$P_{\text{отк(пол-дупл)}} = P_V = \frac{\lambda}{\nu \mu} \sum_{k=1}^V P_{V-k} \sum_{s=k}^i F_s, \quad (8)$$

где  $P_{V-k}$  определяется как решение системы уравнений равновесия.

Вероятность отказа в обслуживании вызова в дуплексном режиме:

$$P_{\text{отк(дупл)}} = P_V + P_{V-1}. \quad (9)$$

Обозначим величиной  $r$  ( $r > 1$ ) число каналов трафика для обслуживания вызовов мультимедиа (возможны значения  $r = 4, 8, 16$ ).

$$P_{\text{отк(мульти)} r>1} = \sum_{j=0}^r P_{V-j}. \quad (10)$$

Среднее значение вероятности отказа в системы вычисляется по формуле:

$$P_{\text{отк(сред)}} = F_1 * P_{\text{отк(пол-дупл)}} + F_2 * P_{\text{отк(дупл)}} + F_r * P_{\text{отк(мульти)}}. \quad (11)$$

**В третьем разделе** исследовано влияние различных факторов на пропускную способность системы обслуживания экстренных вызовов и ее элементов, выполненное на основе разработанных математических моделей.

Проведена оценка величины вероятности  $P_{\text{ЦОВ}}$  системы, характеризующей отказ в обслуживании вызова из-за занятости всех операторов и направление его на IVR для следующих вариантов построения системы экстренных служб:

образование объединенного ресурса операторов экстренной связи, предусматривающего возможность перенаправления избыточных вызовов от одного ЦОВ к другому по цепочке взаимопомощи (см. рис. 1). В последнем ЦОВ цепочки взаимопомощи предусмотрена маршрутизация необслуженных избыточных вызовов на интерактивное голосовое меню (IVR);

распределенная система взаимопомощи;

организация общего центра оперативного реагирования;

выделение оперативного резерва операторов в зонах обслуживания.

Совместное использование методов оперативного управления ORR и COR позволяет регулировать избыточный трафик, направляя его в операторские службы ЦОВ системы псевдослучайным образом с учетом их операторской емкости. За счет перенаправления избыточных вызовов от одного ЦОВ к другому образуется объединенный ресурс операторов экстренной связи.

При формировании цепочки маршрутизации необходимо учитывать особенности организации взаимопомощи, а именно – последовательный характер передачи избыточных вызовов между ЦОВ цепочки. Требуется уменьшать количество внутренних пересылок вызовов в системе, а также минимизировать вероятность передачи экстренных вызовов на IVR для уменьшения потока повторных вызовов.

Достоинствами данного варианта являются:

простота реализации, а также возможность существования связей между ЦОВ системы на постоянной основе (не только в режиме ЧС);

возможность предварительной оценки работы системы взаимопомощи с учетом емкости операторских систем ЦОВ и предполагаемого роста трафика в режиме ЧС.

Имеются недостатки, поскольку следует выполнять ряд требований:

чрезвычайная ситуация возможна в зоне обслуживания любой ЕДДС, должны быть составлены подробные матрицы маршрутизации;

пропускную способность транспортного уровня следует определять с запасом, коррелированным с ожидаемой величиной  $A_{\text{ЧС}}$  и матрицей маршрутизации.

На основе разработанной программы проведен расчет для таких вариантов:

цепочка взаимопомощи объединяет несколько ЦОВ одинаковой емкости (понятие «емкость»  $V_j$  – это число операторов в операторской системе конкретного ЦОВ);

формирование цепочки взаимопомощи выполняется в порядке убывания емкости

$V_j$ , то есть в начало цепочки включаются ЦОВ большей емкости;

формирование цепочки взаимопомощи выполняется в порядке возрастания емкости  $V_j$ , то есть в начало цепочки включаются ЦОВ меньшей емкости.

Для сравнения был также выполнен расчет для перспективного варианта распределенной системы, представленного на рисунке 6, исключающего пересылку избыточного трафика между ЦОВ системы. Результаты расчетов представлены в таблице 1 и на рисунке 7.

Сравнение результатов расчета позволило сделать вывод – объединение в цепочку взаимопомощи одинаковых по емкости ЦОВ не дает положительного эффекта. Например, при избыточном трафике в зоне ЧС  $A_{\text{ЧС}} = 60$  Эрл и среднем значении трафика ЧС в зоне обслуживания  $j$ -го ЦОВ  $A_j = 10$  Эрл получаем в отсутствие цепочки взаимопомощи  $P_{\text{ivr}j} = 0.002171$ , а при наличии цепочки взаимопомощи  $P_{\text{ivr посл}} = 0.002197$ . Аналогично – по остальным рассмотренным значениям.

Проводился расчет для вариантов (см. рис. 7):

формирование цепочки взаимопомощи выполняется в порядке убывания емкости  $V_j$ , то есть в начало цепочки включаются ЦОВ большей емкости;

формирование цепочки взаимопомощи выполняется в порядке возрастания емкости  $V_j$ , то есть в начало цепочки включаются ЦОВ меньшей емкости.

Были введены и использованы обозначения для вероятности направления экстренных вызовов на обслуживание в IVR последнего в цепочке ЦОВ:

$P_{\text{ivr} \downarrow \text{посл}}$  – если цепочка выстраивается в порядке убывания  $V_j$ ;

$P_{\text{ivr} \uparrow \text{посл}}$  – если цепочка выстраивается в порядке возрастания  $V_j$ .

Для сравнения был выполнен расчет системы, представленной на рисунке 6. Были введены и использованы обозначения:

$P_{\text{ivr}j}$  - вероятность направления вызовов на IVR  $j$ -ого ЦОВ системы;

$P_{\text{ivr ср}}$  – средняя по системе вероятность направления экстренных вызовов на обслуживание в IVR одного из ЦОВ системы

$$P_{\text{ivr ср}} = \sum_{j=1}^w k_j * P_{\text{ivr}j} ,$$

$k_j$  – доля избыточных вызовов, направляемых от ЦОВ-ЧС к ЦОВ $j$ .

Анализ полученных зависимостей позволил сделать выводы:

при включении ЦОВ разной емкости в систему взаимопомощи важное значение имеет последовательность размещения ЦОВ в цепочке маршрутизации:

при размещении ЦОВ в порядке убывания емкости операторских подсистем вероятность направления экстренных вызовов на IVR будет наибольшей по сравнению с другими вариантами. Причем именно последние в цепочке ЦОВ малой емкости будут наиболее негативно влиять на величину  $P_{IVR \downarrow \text{посл}}$ ;

при размещении ЦОВ в порядке возрастания емкости операторских подсистем вероятность направления экстренных вызовов на IVR существенно снижается по сравнению с другими вариантами, но имеет место быстрый рост  $P_{IVR \uparrow \text{посл}}$  при увеличении  $A_{ЧС}$ ;

объединение в цепочку взаимопомощи одинаковых по емкости операторских систем ЦОВ не дает положительного эффекта.

Выбор емкости ЦОВ  $V_j$  может производиться с учетом средней загрузки операторов. Расчеты, проведенные для значений  $A_j = 0,6 V_j$ , показали, что перспективно использование более простого в реализации варианта – без дополнительной маршрутизации избыточного трафика между ЦОВ, ограничившись распределением избыточного трафика из зоны ЧС пропорционально емкости операторских систем  $V_j$ .

Введем понятие коэффициент потенциальной устойчивости ЦОВ ЧС к перегрузкам

$$h = A_{ЧС \text{ доп}} / A_j, \quad (13)$$

где  $A_{ЧС \text{ доп}}$  - допустимая интенсивность нагрузки экстренных вызовов в зоне ЧС, которая рассчитывается с учетом требований по величине РЦОВ системы;

$A_j$  – среднестатистическое значение интенсивности нагрузки в  $j$ -ой зоне обслуживания, определяется как  $A_j = \lambda_j / \mu_j$ , где  $\lambda_j$  – интенсивность поступления экстренных вызовов от пользователей в  $j$ -ой зоне обслуживания;  $\mu_j$  - интенсивность обслуживания вызовов.

Таблица 1. Результаты расчета вероятности того, что экстренные вызовы из зоны ЧС будут направлены на систему IVR конкретного ЦОВ  $P_{IVRj}$  (вариант отсутствия взаимопомощи) и вероятности того, что экстренные вызовы будут направлены на обслуживание в IVR последнего в цепочке ЦОВ  $P_{IVR \text{ посл}}$ . Все ЦОВ системы имеют одинаковую емкость  $V_j=30$ ,  $V_{ЦОВ-ЧС} = 30$ ,  $W = 4$

Отсутствие взаимопомощи				Наличие цепочки взаимопомощи			
$A_j = 10$ Эрл		$A_j = 18$ Эрл		$A_j = 10$ Эрл		$A_j = 18$ Эрл	
$A_{ЧС}$ , Эрл	$P_{IVRj}$	$A_{ЧС}$ , Эрл	$P_{IVRj}$	$A_{ЧС}$ , Эрл	$P_{IVR \text{ посл}}$	$A_{ЧС}$ , Эрл	$P_{IVR \text{ посл}}$
50	0.002998	50	0,0325208	50	0.000300	50	0,034452
60	0.002171	60	0,0625965	60	0.002197	60	0,070586
70	0.009227	70	0,1010161	70	0.009686	70	0,122166
80	0.025999	80	0,1437527	80	0.029523	80	0,184581
90	0.054198	90	0,1874600	90	0.068852	90	0,250797
100	0.091576	100	0,2300102	100	0.129663	100	0,314860

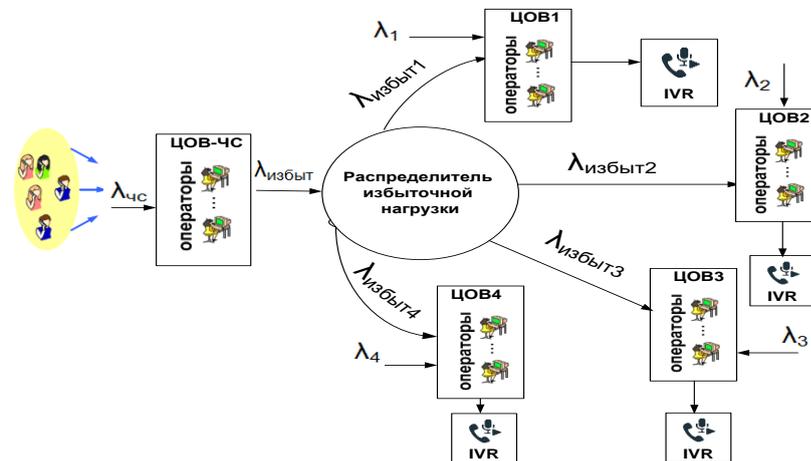


Рисунок 6. Распределенная система экстренных вызовов

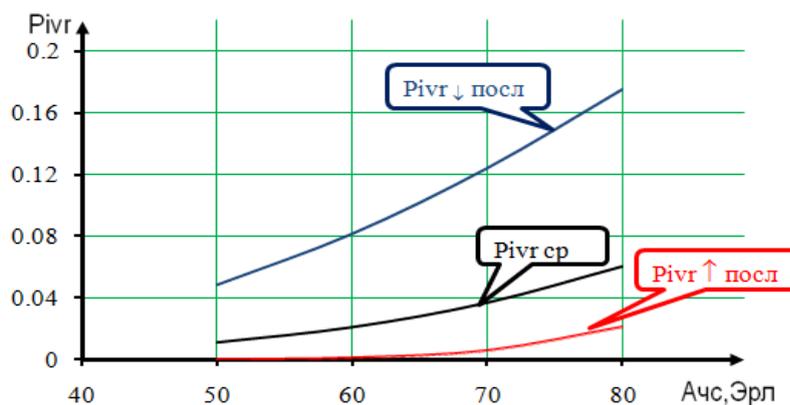


Рисунок 7. Зависимости вероятности  $P_{IVT}$  от величины  $A_{ЧС}$  при  $A_j = 15$  Эрл

Метод управления трафиком ORR в системе экстренных вызовов предусматривает возможность перераспределения трафика при выходе из строя или недоступности конкретного ЦОВ системы. На рисунке 8 представлены результаты расчета коэффициента  $h$  в зависимости от числа ЦОВ системы экстренных вызовов, которые будут недоступны для избыточного трафика  $\omega = 0, \dots, (W - 1)$ .

Таким образом, увеличение числа ЦОВ системы, недоступных для избыточного трафика ЦОВ ЧС, существенно снижает коэффициент потенциальной устойчивости ЦОВ ЧС к перегрузкам  $h$ . Крупные центры обслуживания вызовов в большей степени подвержены снижению устойчивости при уменьшении числа доступных ЦОВ, хотя и обладают большей устойчивостью к перегрузкам в ЧС.

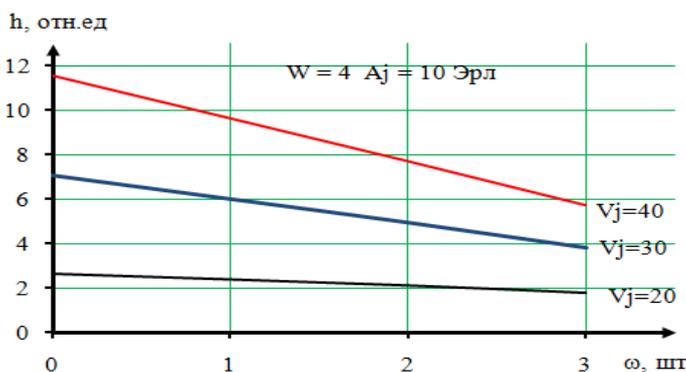


Рисунок 8. Зависимость коэффициента потенциальной устойчивости ЦОВ ЧС к перегрузкам  $h$  от числа ЦОВ в системе, недоступных для избыточного трафика,  $\omega$

Перспективность и возможность использования центров оперативного реагирования ЦОВ ОР, на которые могут направляться избыточные вызовы от ЦОВ различных ЕДДС в режиме ЧС, отражены в ряде документов МСЭ-Т и правительства РФ. Проведенные аналитические расчеты показали следующее.

Положительными моментами организации ЦОВ ОР являются: оказание оперативной помощи нескольким ЦОВ одновременно;

возможность использования географического фактора, включая в ЦОВ ОР центры обслуживания вызовов регионов, удаленных друг от друга, что снижает риск критических перегрузок при одновременном возникновении нескольких ЧС.

Перечислим отрицательные моменты организации ЦОВ ОР: нерациональное использование ресурсов ЦОВ ОР (только во время ЧС);

пропускная способность всей системы может увеличиваться только экстенсивно, за счет организации дополнительных рабочих мест в ЦОВ ОР.

Оценка оперативного резерва является сложной задачей, поскольку оказывает разнонаправленное влияние на работу всей системы. С одной стороны, для безотказного обслуживания поступающих от ЦОВ-ЧС вызовов требуется привлечение всего ресурса операторов ЦОВ<sub>j</sub>. Но, с другой стороны, нельзя допустить ухудшения работы ЦОВ<sub>j</sub> при обслуживании экстренных вызовов из j-ой зоны.

Как показали проведенные расчеты (см. рис. 9), увеличение оперативного резерва рабочих мест в j-ой зоне обслуживания  $V_{jрез}$  уменьшает возможности обслуживания избыточного трафика из зоны ЧС, что увеличивает вероятность направления вызовов из зоны ЧС на систему IVR в j-ой зоне  $P_{IVRj чс}$ . При этом вероятность направления на IVR вызовов из j-ой зоны обслуживания  $P_{IVRj}$  может сохраняться на низком уровне.

Современные инфокоммуникационные технологии позволяют объединять возможностей нескольких ЦОВ в единый ресурс. Для этого в ЦОВ-ЧС должна быть реализована программным путем возможность псевдослучайного распределения экстренных вызовов по ЦОВ системы взаимопомощи с учетом доступного ресурса операторов.

Предполагалось, что среднестатистический уровень трафика района находится на уровне 10 Эрл. Фактически, рассмотрен случай пятикратного роста трафика в районе ЧС до величины АЧС = 50 Эрл. Расчет необходимого совокупного ресурса рабочих мест операторов в системе был выполнен для заданных требований  $P_{системы} \leq 0,001$  и  $P_{системы} \leq 0,01$ , и определялся как  $V_{необх}$  (смотреть таблицу 2). Далее определялось число операторов, включаемых в систему взаимопомощи на каждом из ЦОВ  $V_{j пом}$ . В данном случае

$$V = V_1^{пом} + V_2^{пом} + V_3^{пом} . \quad (14)$$

Соответственно, оперативный резерв в каждом из ЦОВ системы составляет  $V_{jор} = V_j - V_j^{пом}$  . (15)

где  $V_j^{пом}$  - число операторов включаемых в систему взаимопомощи на каждом из ЦОВ для обслуживания избыточного трафика

Можно сделать вывод, что при пятикратном росте трафика система обеспечит качество обслуживания  $P_{системы} \leq 0,01$ , если в качестве оперативного резерва в каждом ЦОВ будут выделены по 4-5 рабочих мест операторов.

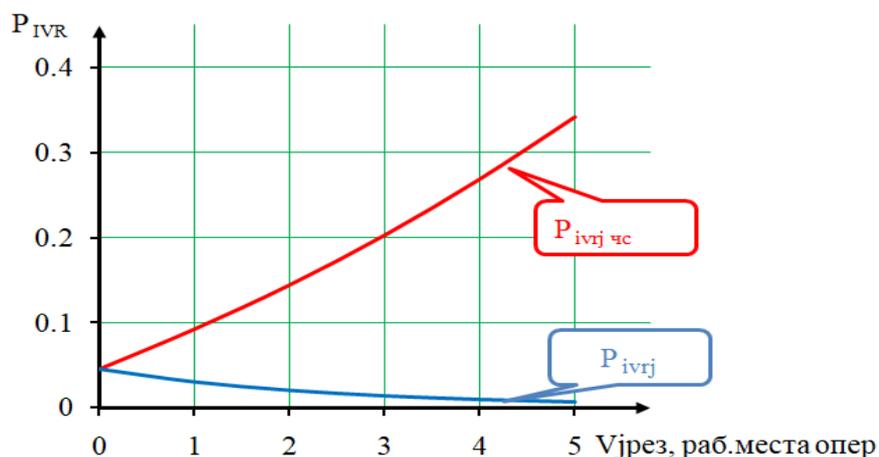


Рисунок 9. Зависимости вероятностей  $P_{IVR\ ЧС}$  и  $P_{IVR}$  от величины оперативного резерва  $V_{рез}$

Таблица 2. Результаты расчета необходимого числа рабочих мест операторов в системе взаимопомощи при возникновении ЧС в одном районе. Число каналов в ЦОВ-ЧС  $V_{ЦОВ-ЧС} = 20$ ,  $V_1 = V_2 = V_3 = 20$

Поступающая нагрузка в ЦОВ- ЧС, АчС, Эрл	$P_{системы} \leq 0,001$				$P_{системы} \leq 0,01$			
	$V_{необх}$	$V_1^{пом}$	$V_2^{пом}$	$V_3^{пом}$	$V_{необх}$	$V_1^{пом}$	$V_2^{пом}$	$V_3^{пом}$
20	18	6	6	6	14	5	5	4
30	29	9	10	10	24	8	8	8
40	41	14	14	14	35	12	12	11
50	53	18	18	17	46	16	15	15

При ликвидации последствий ЧС именно профессиональная радиотелефонная связь обеспечит скоординированную работу экстренных служб и подразделений МЧС. Перечислим особенности использования БПЛА в «Системе 112»:

средство получения оперативной информации путем использования радиоресурса для передачи мультимедийного трафика.

Использование БПЛА как дополнительного ресурса для связи абонентов в ячейках кластера при занятости всех радиоканалов в конкретной ячейке.

Результаты аналитических расчетов характеристик обслуживания вызовов в радиоинтерфейсе базовой станции стандарта TETRA с использованием разработанной программы на языке программирования C# представлены на рисунке 10.

Анализ полученных зависимостей позволил сделать вывод, что системы профессиональной радиотелефонной связи очень чувствительны к мультимедийному трафику.

Его наличие допустимо только в крупных системах с числом радиоканалов более 24 радио- каналов, то есть с учетом временного уплотнения в системе стандарта TETRA при

$V \geq 96$  информационных каналов.

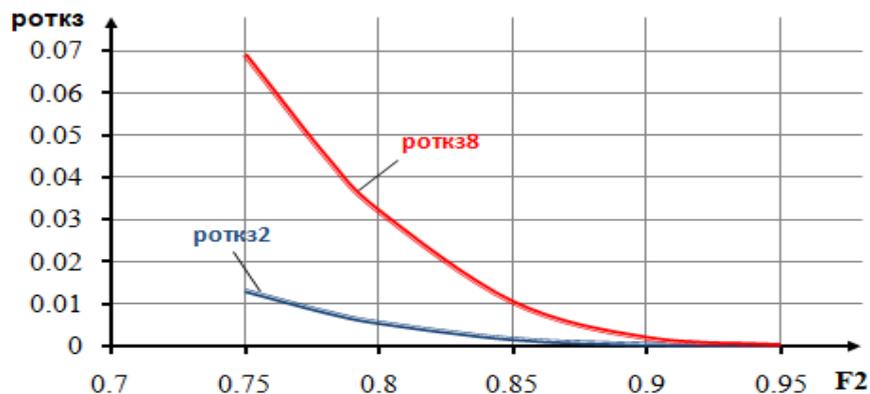


Рисунок 10. Зависимость вероятности отказов при дуплексной связи и мультимедиа от доли дуплексного трафика  $F_2$ , при  $F_2+F_8 = 1$

**В четвёртом разделе** представлен разработанный метод повышения пропускной способности системы экстренных служб.

По результатам проведенных исследований разработаны рекомендации по организации функционирования системы обслуживания экстренных вызовов с учетом оперативного резерва. На рисунке 11 представлена зависимость допустимого количества резервных операторов  $V_{jрез}$  от допустимой избыточной нагрузки  $A_{избыт доп}$ . Для данного варианта можно рекомендовать ограничить  $V_{jрез}$  величиной  $V_{jрез} = 4$ . Если выбрать оперативный резерв величиной  $V_{jрез} \geq 5$ , то получаем практически безотказное обслуживание экстренных вызовов в  $j$ -ом районе (ЦОВ $_j$  не перегружен), но коэффициент потенциальной устойчивости ЦОВ-ЧС к перегрузкам  $h \leq 4.72$ .

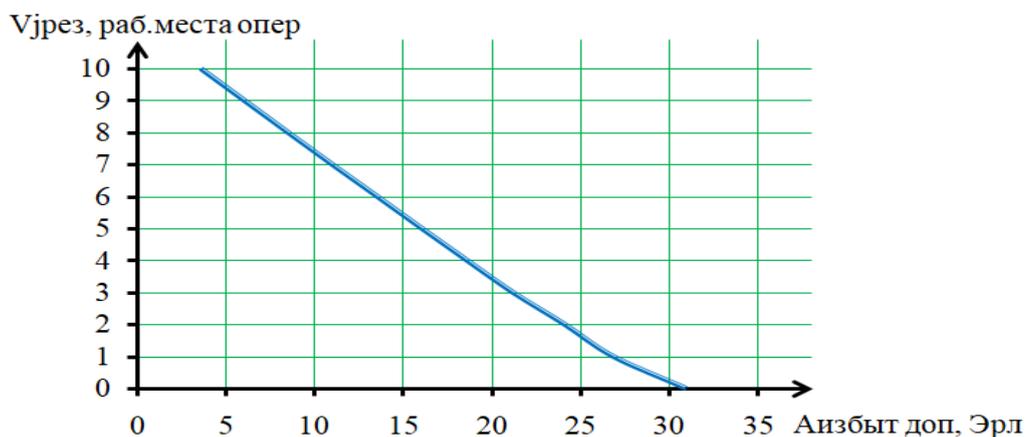


Рисунок 11. Зависимость количества оперативного резерва от допустимой избыточной нагрузки при  $V_j = 30$ ,  $W = 3$ ,  $A_j = 10$  Эрл  $P_{ЦОВ системы} \leq 0,001$   $P_{ЦОВ j} \leq 0,001$

Разработана методика, позволяющая по известному числу ЦОВ в системе взаимопомощи, и заданному коэффициенту устойчивости к перегрузкам  $h$  определять необходимое число рабочих мест  $V_j$  в центрах обслуживания вызовов.

На рисунке 12 представлены зависимости  $h = F(V_j)$ , полученные для распределенной системы взаимопомощи. Установлено, что существенное влияние на коэффициент  $h$  оказывает соотношение между  $V_j$  и ожидаемым средним значением интенсивности нагрузки  $A_j$ . Так, при

объединении в систему взаимопомощи шести ЦОВ различных ЕДДС ( $W = 5$ ) емкостью  $V_j = 40$  при  $A_j = 10$  Эрл получаем коэффициент  $h = 11,16$ , а при  $A_j = 20$  Эрл -  $h = 3,03$ . Влияние величины  $W$  на коэффициент  $h$  зависит от числа операторов в  $j$ -ом центре  $V_j$ .

Например, при  $V_j = 24$  операторов увеличение  $W$  от 1 до 6, мало влияет на коэффициент  $h$ . При  $V_j = 40$  операторов увеличение  $W$  от 1 до 6 обеспечивает рост коэффициента  $h$  в 2,4 раза.

Зависимость  $h$  от числа операторов  $V_j$  на рисунке 13 имеет линейный характер

$$h = a * V_j + b. \quad (16)$$

Используя метод линейной аппроксимации при  $A_j = 10$  Эрл и  $P_{\text{ЦОВ системы}} \leq 0,001$ : при  $W = 2$  получены величины  $a = 0,264$  и  $b = -3,44$ ; при  $W = 4$  -  $a = 0,446$  и  $b = -6,29$ ; при  $W = 6$  -  $a = 0,614$  и  $b = -9,96$ .

Если задано условие  $P_{\text{ЦОВ системы}} \leq 0,01$ : при  $W = 2$  получаем величины  $a = 0,279$  и  $b = -3,79$ ; при  $W = 4$   $a = 0,414$  и  $b = -6,84$ ; при  $W = 6$   $a = 0,564$  и  $b = -9,92$ .

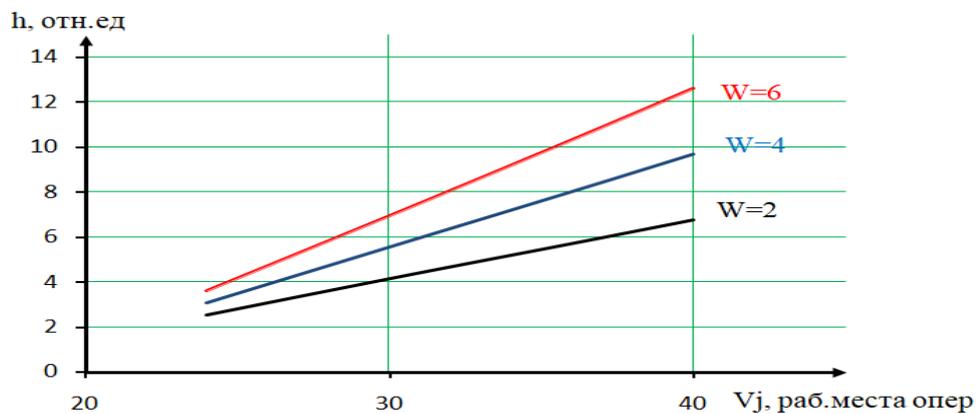


Рисунок 12. Зависимость коэффициента устойчивости к перегрузкам  $h$  от числа операторов в  $j$ -ом центре обслуживания экстренных вызовов при  $A_j = 10$  Эрл и  $P_{\text{ЦОВ системы}} \leq 0,001$

Определим этапы и основной функционал разработанного метода повышения пропускной способности системы обслуживания экстренных вызовов.

1 этап предусматривает анализ факторов для оценки перспективности объединения ЦОВ в систему взаимопомощи, уточнения количества ЦОВ, перспективности организации выделенного ЦОВ ОР.

2 этап предполагает выбор варианта организации взаимопомощи.

Наиболее перспективным представляется вариант на рисунках 6. Объем избыточного трафика от ЦОВ ЧС, направляемого через распределитель на ЦОВ системы взаимопомощи, устанавливается пропорционально емкости этих ЦОВ.

В простоте реализации перспективного варианта есть ряд преимуществ:

в работе распределителя можно учитывать такой фактор, как объединение в систему взаимопомощи центров обслуживания вызовов разной емкости;

возможно оперативное перераспределение потоков трафика при перегрузке или выходе из строя отдельных центров обслуживания экстренных вызовов;

взаимопомощь может быть реализована на постоянной основе.

На 3 этапе необходимо уточнить требования к величине  $h$  - коэффициенту потенциальной устойчивости ЦОВ-ЧС к перегрузкам, емкости операторских служб. По разработанной методике определяется число центров обслуживания экстренных вызовов, включаемых в систему взаимопомощи.

4 этап предусматривает выбор конкретного варианта оперативного резервирования ресурсов операторских систем в зонах ответственности ЕДДС.

5 этап предполагает выбор варианта построения системы экстренных вызовов с учетом результатов расчета показателей функционирования системы.

На 6 этапе предлагается использовать разработанную математическую модель и результаты аналитических расчетов системы профессиональной радиотелефонной связи, которая позволит в режиме ЧС обеспечивать взаимодействие между службами и подразделениями «Системы 112».

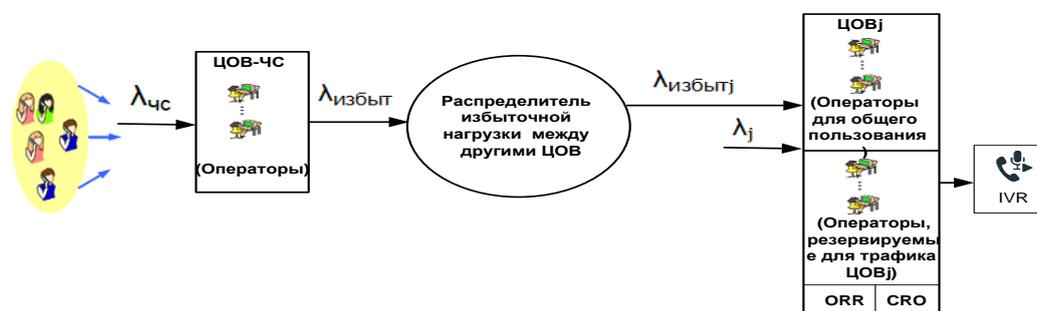


Рисунок 13. Вариант организации системы экстренных служб, для которого выполнено моделирование на языке программирования C# (Visual Studio 2017)

Результаты моделирования процесса обслуживания вызовов в системе взаимопомощи (с учетом выделения оперативного резерва), а также результаты аналитических расчетов представлены на рисунке 14. Точность и достоверность моделирования оценивалась по критерию Стьюдента.

Результаты моделирования для варианта, когда в систему экстренных служб включены пять центров обслуживания вызовов ( $W = 4$ ); оперативный резерв  $V_{jрез} = 4$ ;  $V_J = 30$  операторов следующие:

при  $\lambda_j = 360$  выз/час и  $\lambda_{ЧС} = 600$  выз/час  $P_{IVR ЧС} = 0,062479$  (аналитический расчет),  $P^*_{IVR ЧС \ominus} = 0,068338$  с доверительным интервалом (0,045296-0,091380);

$P_{IVR j} = 0,003955$  (аналитический расчет),  $P^*_{IVR j \ominus} = 0,003432$  (0,000967-0,005898);

при  $\lambda_j = 360$  выз/час и  $\lambda_{ЧС} = 900$  выз/час  $P_{IVR ЧС} = 0,156724$ ,  $P^*_{IVR ЧС \ominus} = 0,150175$  (0,185552 -0,122818);  $P_{IVR j} = 0,009922$ ,  $P^*_{IVR j \ominus} = 0,072005$  (0,005852-0,018877).

Таким образом, отклонение результатов аналитического расчета от результатов эксперимента не превышает 10% с доверительной вероятностью 0,95.

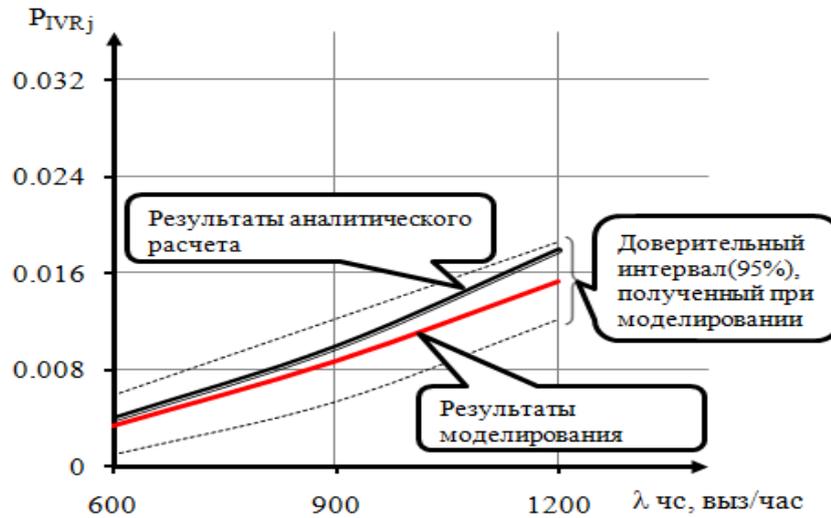


Рисунок 14. Результаты моделирования и аналитических расчетов вероятностей  $P_{IVRj}$  при  $VJ = 30$  [раб.места опер],  $W = 4$ ,  $\lambda_j = 360$  выз/час,  $\mu = 20$  [1/ час], число мест оперативного резерва  $V_{рез} = 4$  [раб.места опер]

Основные результаты работы приведены в **заключении**:

1. Развитие экстренных служб в мире и в РФ идет в направлении объединения их ресурсов в рамках «Системы 112». При возникновении ЧС резко возрастает объем трафика экстренных вызовов, превышая пропускную способность центров обслуживания вызовов. Возможности «Системы 112» по обслуживанию экстренных вызовов могут быть увеличены объединением ресурсов нескольких ЦОВ.
2. Для эффективной координации усилий спасателей во время ЧС необходимо получать оперативную информацию из зоны поражения. В качестве объекта исследования выбрана система экстренных служб, объединяющая ресурсы центров обслуживания экстренных вызовов для обеспечения практически безотказного обслуживания вызовов из зоны ЧС. Предлагается реализовать управление потоками избыточного трафика экстренных вызовов, используя методы, рекомендованные МСЭ-Т для телекоммуникационных сетей и систем.
3. Разработанные математические модели функционирования системы обслуживания экстренных вызовов и программы расчета на ЭВМ позволили:
  - дать сравнительную оценку эффективности организации взаимопомощи;
  - оценить влияние оперативного резерва в ЦОВ на качество функционирования системы взаимопомощи в целом и в конкретных зонах ответственности;
  - дать рекомендации по выбору структуры системы экстренных служб, методов управления избыточным трафиком и формированию цепочек маршрутизации.
4. Разработана методика, определяющая связь между коэффициентом устойчивости к перегрузкам, емкостью и числом ЦОВ в системе.
5. Разработанный метод повышения пропускной способности системы экстренных служб учитывает: особенности распределения избыточного трафика; устойчивость системы взаимопомощи к перегрузкам с учетом возможности исключения ЦОВ из цепочки маршрутизации; наличие оперативного резерва.

6. Математическая модель использования ресурса каналов системы TETRA с сочетанием с ресурсами БПЛА позволяет оценивать вероятность отказов в обслуживании при передаче мультимедийного трафика.

7. Статистическое моделирование подтвердило справедливость полученных аналитических соотношений для системы экстренных служб. Таким образом, поставленная цель достигнута, научные задачи исследования решены

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях из списка ВАК

1. Степанова, И. В. Анализ перспективных подходов к повышению надежности конвергентных корпоративных сетей связи / И.В.Степанова, **О.А.А Мохаммед**, Н. Жувен // Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт. - 2015. - Том 9, № 12. - С.44-51.
2. Степанова, И.В. Использование перспективных технологий для развития распределенных корпоративных сетей связи / И.В.Степанова, **О.А.А. Мохаммед** // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №6. С. 10-15.
3. **Mohammed, O.A.A.** (2020) Development of approaches to ensure reliable emergency communications in emergencies / O.A.A. Mohammed //T-Comm. – 2020. – Vol.14, № 1. –P.42-48.
4. **Mohammed, O.A.A.** (2020) Method for increasing the capacity of the emergency response system / O.A.A. Mohammed //T-Comm.–2020.–Vol.14, №5. – P. 62-68.

### Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus

5. Stepanova, I. V. Sharing TETRA System Resources and Unmanned Aerial Vehicles / I. V. Stepanova, **O. A. A Mohammed** // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109 /IEEE CON F48 371.2020.9078543.

### Публикации в других рецензируемых научных журналах и изданиях

6. **Мохаммед, О.А.А.** Методы резервирования для повышения надежности в системах профессиональной радиотелефонной связи / О.А.А Мохаммед, И.В.Степанова // Труды Международного форума информатизации (МФИ-2017). – М.: Горячая линия – Телеком. – 2017. - С.34-35.
7. Степанова, И.В. Методика проектирования систем профессиональной связи стандарта TETRA с учетом показателей надежности / **О.А.А. Мохаммед**, К.А. Адылбекова // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. – 2017. – Т 6. - №4. - С.36-41.
8. **Мохаммед, О.А.А.** Методика расчета центров обслуживания вызовов при внедрении программно-аппаратного комплекса «Система 112» / О.А.А Мохаммед, И.В.Степанова // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. – 2018. - Т 7, №3. - С.43-48.

9. **Мохаммед, О.А.А.** Стандарт профессиональной радиотелефонной связи цифрового стандарта TETRA для реализации системы-112 / О.А.А Мохаммед // Сборник трудов XII международной научно-технической конференции (технологии информационного общества). Москва, Московский технический университет связи и информатики(МТУСИ),14-15 МАРТА 2018г. В 2-х томах. М: «ИД Медиа Паблишер» Том 1, С.74-76.
10. Степанова, И.В. Методика организации и проектирования дежурно-диспетчерские служб / И.В.Степанова, **О.А.А. Мохаммед**, К.А. Адылбекова // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. – 2018. – Т7, №1.- С.52-55.
11. **Мохаммед, О.А.А.** Результаты расчета ресурса каналов БПЛА при использовании в системах профессиональной радиотелефонной связи // Международный форум информатизации (МФИ-2019): Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы». - Горячая линия - Телеком, Москва, 2019. - С.82-83.
12. **Мохаммед, О.А.А.** Организация обслуживания экстренных вызовов в дежурно-диспетчерских службах связи // Международный форум информатизации (МФИ-2019): Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы». - Горячая линия - Телеком, Москва, 2019. - С.83-85.
13. Степанова, И.В. Построение распределенных и централизованных систем профессиональной радиотелефонной связи стандартов DMR и TETRA / И.В. Степанова, **О.А.А. Мохаммед**, А.С. Серебряков // Технологии информационного общества. Сборник трудов XIII международной отраслевой научно-технической конференции « технологии информационного общества ». (20-21 марта 2019 г. Москва, МТУСИ). В 2-х томах. М: «ИД Медиа Паблишер», Том.1. С.85-88.
14. **Мохаммед, О.А.А.** Метод повышения пропускной способности системы 112 за счет объединения ресурсов единых дежурно-диспетчерских служб / О.А.А Мохаммед, И.В.Степанова // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. – 2019. – Т8, №3.- С.39-43.
15. **Mohammed, O.A.A.** COMPARISON OF OPTIONS FOR BUILDING AN EMERGENCY CALL SYSTEM/ O.A.A. Mohammed // SUNHROINFO JOURNAL – INSTITUTE OF RADIO AND INFORMATION SYSTEMS. – 2020. – Т.6, №1. P. 16-22.

Подписано в печать: 17.03.2021

Объем: 1,0 усл.п.л.

Тираж: 100 экз. Заказ № 3497

Отпечатано в типографии «Реглет»

125315, г. Москва, Ленинградский проспект д. 74, корп. 1

+7(495) 790-47-77 [www.reglet.ru](http://www.reglet.ru)