


На правах рукописи



Сущенко Николай Анатольевич

**Повышение эффективности использования ограниченных ресурсов  
при оказании конвергентных инфокоммуникационных услуг**

Специальность: 05.12.13 Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском институте радио (ФГУП НИИР)

**Научный руководитель:** **Сарьян Вильям Карпович**, академик НАН РА, д. т. н., ФГУП НИИР, директор Научно-образовательного центра по использованию перспективных технологий в радиоотрасли.

**Официальные оппоненты:** **Кучерявый Андрей Евгеньевич**, д. т. н., проф., ФГБОУ СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных.

**Мещеряков Роман Валерьевич**, д. т. н., проф., ФГБОУ ВПО «ТУСУР», заместитель начальника научного управления.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт связи».

Защита состоится «1» июля 2015 г. в 16.00 в ауд. 301-3 на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, пр-т Строителей, 3/7, ВлГУ, ФРЭМТ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета и на сайте ВлГУ: <http://www.vlsu.ru>

Автореферат разослан «20» апреля 2015 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ, 600000, г. Владимир,

Ученый секретарь диссертационного совета, д.т.н., профессор



Самойлов А. Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время происходит формирование единой информационной среды, в которой ранее различные информационные средства, такие как телефония, телерадиовещание, передача данных, интегрируются с использованием общих интерфейсов и единых терминалов. Одним из проявлений этого процесса является возникновение конвергентных инфокоммуникационных (ИК) услуг, которые предполагают использование различных видов сетей связи и вещания, медийных носителей (голоса, данных, видео), мобильных и стационарных терминалов. Целью формирования конвергентных ИК услуг является обеспечение удобства, надежности и безопасности для пользователя и в конечном итоге повышение его уровня жизни. Все большее распространение конвергентные ИК услуги получают сейчас в таких областях, как электронное правительство, электронная торговля, навигация, управление при чрезвычайных ситуациях.

Появление конвергентных ИК услуг делает вновь актуальными ряд вопросов, которые уже были решены для традиционных ИК услуг. В частности, возникает проблема повышения эффективности использования ограниченных ресурсов (ЭИОР), например, радиочастотного спектра, времени занятия каналов связи, электроэнергии, времени, затрачиваемого обслуживающим персоналом и пользователями. В результате того, что данные ограниченные ресурсы распределяются на основе традиционных методов оценки ЭИОР, не учитывающих конвергенцию, эффективность использования этих ресурсов снижается.

**Степень разработанности темы.** Вопросами повышения ЭИОР при оказании ИК услуг занимается целый ряд международных организаций, включая Международный союз электросвязи (МСЭ). Для многих традиционных ИК услуг к настоящему моменту уже сформирован набор хорошо зарекомендовавших себя показателей ЭИОР. Однако возникает проблема их использования для конвергентных ИК услуг, поскольку такие показатели зачастую имеют весьма ограниченную область применения и не учитывают возможность использования различных видов сетей, медийных носителей и терминалов.

**Целью диссертационной работы** является разработка показателей ЭИОР, позволяющих повысить ЭИОР при применении их для распределения ограниченных ресурсов при оказании конвергентных ИК услуг.

Поставленная цель определила необходимость решения следующих задач:

- анализ существующих подходов к оценке ЭИОР в области ИКТ;
- разработка модели конвергентной ИК услуги;
- разработка показателей ЭИОР, основанных на предложенной модели и применимых для конвергентных ИК услуг;
- разработка методик расчета предложенных показателей ЭИОР, в том числе при помощи имитационного моделирования;

- выполнение расчета предложенных показателей ЭИОР для узла сенсорной сети и сравнение его результатов с другими методиками оценки ЭИОР.

**Объектом исследования** являются конвергентные ИК услуги.

**Предметом исследования** являются вопросы распределения ограниченных ресурсов и оценки ЭИОР, модели ИК услуг, методы многокритериальной оценки альтернатив.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в том, что в ней впервые решены следующие проблемы:

1. Разработана модель конвергентной ИК услуги, в основу которой по сравнению с известными моделями положен понятийный аппарат теории целеустремленных систем.

2. Предложена методика расчета показателей ЭИОР в режиме реального времени для системы индивидуализированного управления при чрезвычайных ситуациях.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе используются методы теории вероятностей, тензорного анализа сетей, анализа иерархий, теории целеустремленных систем.

**Теоретическую основу исследования** составили работы по развитию ИКТ А. С. Аджемова, В. В. Бутенко, А. Е. Кучерявого, Р. В. Мещерякова, А. П. Назаренко, В. К. Сарьяна, проектированию информационно-телекоммуникационных сетей А. А. Зацаринного, конвергентным ИК услугам Г. П. Яновского, исследованию сложных систем Г. Крона, Н. Н. Талеба, С. Л. Саважа, теории принятия решений Т. Л. Саати, теории целеустремленных систем Р. Акоффа и Ф. Эмери и др.

**Практическая значимость** состоит в том, что разработанные модели и методики позволяют при эксплуатации систем, сетей и устройств телекоммуникаций производить оценку ЭИОР в режиме реального времени без необходимости привлечения экспертных суждений, а при внедрении новых ИКТ – сократить количество необходимых экспертных суждений до 75%, тем самым повышая объективность и снижая трудозатраты при проведении оценки ЭИОР.

**Внедрение результатов работы.** Полученные в диссертации модели и методы использовались:

- для выбора показателей эффективности использования ИКТ в Приднестровской Молдавской Республике (ПМР) с учетом планов по внедрению конвергентных ИК услуг и разработки методики их расчета по заказу Приднестровского государственного университета им. Т. Г. Шевченко;

- в научно-исследовательской работе «Разработка Методики измерения степени развитости ИКТ» по заказу Всероссийского научно-исследовательского института проблем вычислительной техники и информатизации (ФГУП ВНИИПВТИ);

- при разработке проектного предложения в Азиатско-Тихоокеанское экономическое сотрудничество (АТЭС) от Администрации связи России “Indicators of infor-

mation society development in the APEC region”.

- для выбора каналов передачи данных системы доставки высокоточной эфемеридно-временной информации по наземным каналам связи (в рамках научно-исследовательской работы «Исследование вопросов эффективности применения высокоточной ЭВИ, передаваемой потребителю по каналам связи в реальном времени», проводимой в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы»);

- в учебном процессе кафедры Радио и информационных технологий факультета Радиотехники и кибернетики Московского физико-технического института (государственного университета), а также при чтении лекций, проведении практических и лабораторных работ по дисциплине «Управление IT-сервисами и контентом» в Приднепровском государственном университете им. Т. Г. Шевченко.

**Соответствие диссертационной работы паспорту научной специальности.** Диссертационная работа содержит исследование вопросов создания новых методов обеспечения эффективного функционирования систем, сетей и устройств телекоммуникаций и соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 05.12.13: «2. Разработка эффективных путей развития и совершенствования архитектуры сетей и систем телекоммуникаций и входящих в них устройств», «11. Разработка научно-технических основ технологии создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования», «12. Разработка методов эффективного использования сетей, систем и устройств телекоммуникаций в различных отраслях народного хозяйства».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Модель конвергентной ИК услуги, позволяющая определить качественные и количественные характеристики конвергентных ИК услуг.
2. Показатели ЭИОР для конвергентных ИК услуг.
3. Методика расчета показателей ЭИОР при помощи имитационного моделирования.
4. Методика расчета показателей ЭИОР в режиме реального времени для системы индивидуализированного управления при чрезвычайных ситуациях.
5. Результаты расчета оптимизированного распределения ограниченных ресурсов при проектировании узла сенсорной сети.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов работы подтверждается корректным применением математического аппарата и широким спектром публикаций. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на 51-й, 52-й, 53-й, 54-й, 55-й, 56-й Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе» МФТИ (Долгопрудный, 2008—2013); 4-й, 5-й, 6-й, 7-й, 8-й научной конференции «Технологии информационного общества» МГУСИ (Москва, 2010—

2014); 12-й международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, 2011). Подход к определению полезного эффекта от оказания конвергентных ИК услуг обсуждался на 23-й европейской конференции Международного телекоммуникационного общества (Вена, Австрия, 2012). Методика расчета показателей ЭИОР в режиме реального времени была представлена на международной конференции МСЭ «Калейдоскоп-2014» (Санкт-Петербург, 2014). Результаты применения разработанных показателей для оценки эффективности сенсорных управленческих сетей изложены в техническом документе «Applications of wireless sensor networks in Next Generation Networks» (МСЭ, Швейцария, 2014). Практические рекомендации по выбору показателей для измерения информационного общества в ПМР, учитывающие планы по внедрению конвергентных ИК услуг, были представлены на республиканской научно-практической конференции «Роль государства в развитии экономики на современном этапе» (г. Тирасполь, ПМР, 2014).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 22 работы. Из них 10 статей в журналах из перечня журналов, рекомендованных ВАК, 11 докладов в материалах всероссийских и международных конференций, 1 международный технический документ. Также по тематике работы автором получено 4 патента Российской Федерации на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка литературы, включающего 105 наименований, и приложения. Работа изложена на 158 страницах без приложения, содержит 28 рисунков, 5 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи; определены объект, предмет и методы исследования; раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, ее апробация, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** производится анализ опыта по повышению ЭИОР в области ИКТ. Отмечается, что существует два основных подхода: разработка и внедрение новых технологий и более рациональное распределение ограниченных ресурсов при эксплуатации существующих технологий. Важным условием успешного применения обоих подходов является правильная оценка ЭИОР.

Рассмотрены особенности конвергентных ИК услуг, определяющие особые требования к оценке ЭИОР.

Проанализирована система показателей развития ИКТ МСЭ. Показано, что данная система не учитывает появления и широкого распространения конвергентных ИК услуг. Также рассмотрен метод анализа иерархий (МАИ), поскольку он часто приме-

няется для оценки ЭИОР. Автор показывает, что недостатки МАИ, связанные необходимостью экспертных суждений и низкой устойчивостью в отношении ошибок при оценке маловероятных рисков, приводят к неверным результатам при применении МАИ ко многим задачам оценки ЭИОР при оказании конвергентных ИК услуг.

Проведенный анализ позволил сформулировать основные требования, которым должны удовлетворять разрабатываемые показатели ЭИОР, и определить набор необходимых моделей и методик.

**Во второй главе** построена модель конвергентной ИК услуги. Данная модель состоит из совокупности понятий, необходимых для формального описания процесса оказания любой ИК услуги, и четырех показателей ЭИОР, позволяющих определить его количественные характеристики. В качестве основы для построения модели выбрана теория целеустремленных систем, где даются определения многих необходимых понятий, таких как субъект, окружение выбора, способ действий (СД), результат, целеустремленное состояние, вероятность выбора СД, эффективность СД, удельная ценность. Данная основа была расширена автором понятиями, специфичными для ИК услуг: пользовательская задача, подзадача, реализация и решение подзадачи, услуга (в т. ч. ИК услуга, конвергентная ИК услуга), пользователь, оператор услуги, важность и предпочтительность СД, эффективность оператора услуги, администрирование услуги, лицо, принимающее решение (ЛПР).

Пользовательская задача представляется в виде совокупности из одной или нескольких подзадач, так что для каждой подзадачи существует определенное число различных СД. В разрабатываемой модели отдельный СД является минимальным элементом, внутренняя структура которого не рассматривается в рамках модели и из которого складываются все другие элементы. При этом, однако, какой-то конкретный СД можно рассмотреть как отдельную пользовательскую задачу, выделив в нем подзадачи и более детальные СД. Такая иерархическая декомпозиция позволяет формализовать как принципиальные отличия между ИК услугами (разный набор подзадач), так и особенности реализации (использование различных СД для одних и тех же подзадач).

В модели автором предлагается рассматривать ограниченные ресурсы различных типов: частотный спектр, каналы связи, вычислительные машины, обслуживающий персонал и т. п. *Выделенными ограниченными ресурсами* предлагается называть вектор  $\theta$ , компонентами которого являются величины ограниченных ресурсов разных типов, которыми пользователь и оператор услуги могут располагать при реализации той или иной подзадачи, а *необходимыми ограниченными ресурсами* — вектор  $\xi$  с компонентами, равными минимальному количеству выделенных ограниченных ресурсов, достаточных для реализации подзадачи.

В качестве одного из типов ограниченных ресурсов предлагается считать риск неуспешной реализации. Выделенный ограниченный ресурс  $\theta_1$  для него равен вероятно-

сти неуспешной реализации в случае, если всех остальных ограниченных ресурсов будет достаточно, а необходимый ограниченный ресурс  $\xi_1$  моделируется случайной величиной, равномерно распределенной от 0 до 1.

Тогда вероятность  $\alpha$  того, что реализация будет успешной, равна вероятности того, что ни одна из компонент  $\xi$  не превысит соответствующую компоненту  $\theta$ , кроме первой компоненты, для которой условие обратное:

$$\alpha = (\xi_1 \geq \theta_1 \cap_{h=2}^H \xi_h \leq \theta_h), \quad (1)$$

где  $H$  — число типов ограниченных ресурсов.

Предложенная модель применяется к узлу сенсорной сети, изображенному на Рисунке 1.

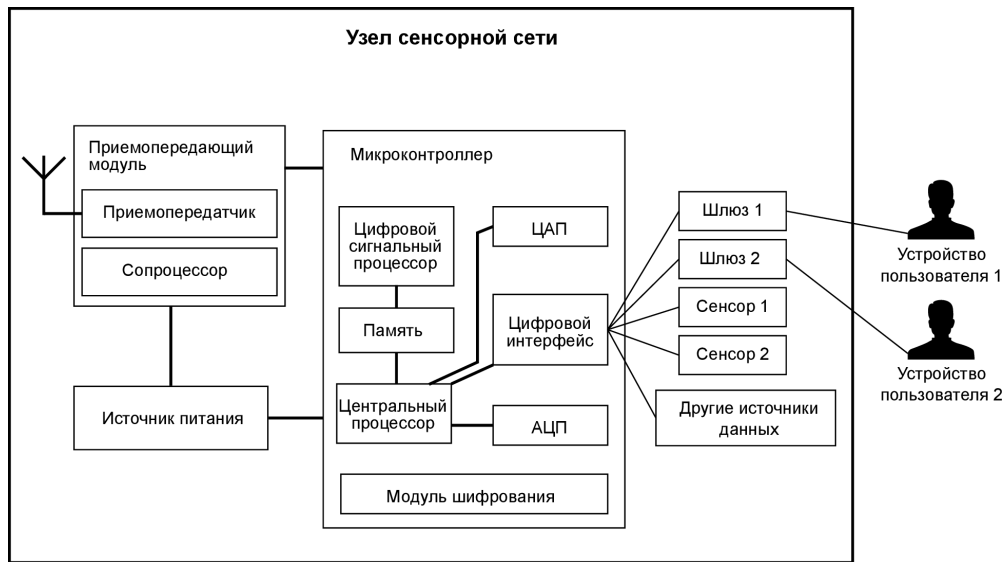


Рисунок 1 — Схема узла сенсорной сети

Узел состоит из приемопередающего модуля, микроконтроллера, подключенных к нему сенсоров, измеряющих физические величины, и шлюзов, передающих данные из других сетей. Ограниченными ресурсами в такой системе являются пропускная способность канала, объем памяти микроконтроллера для очереди, время нахождения в активном режиме (от него зависит энергопотребление), а также, как было предложено, риск неуспешной реализации. Выделенные ограниченные ресурсы для такой системы — вектор  $\theta$  с компонентами  $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\}$ , где  $\theta_1$  — вероятность ошибки при передаче сообщения,  $\theta_2$  — максимальная пропускная способность канала в бит/с,  $\theta_3$  — размер очереди в байтах,  $\theta_4$  — время нахождения в активном режиме в секундах. Реализация признается неуспешной, если произошла необнаруженная ошибка при передаче, либо сообщение было отброшено на входе системы из-за недостатка свободной памяти в очереди, либо суммарное время ожидания в очереди и передачи сообщения оказалось больше времени активного периода. Необходимые ограниченные ресурсы — вектор  $\xi$  с компонентами  $\{\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4\}$ , где  $\xi_1$  — случайное число от 0 до 1,  $\xi_2$  — размер сооб-



щения в битах, деленный на время, выделяемое на передачу этого сообщения,  $\xi_3$  — размер сообщения в байтах,  $\xi_4$  — суммарное время ожидания в очереди и передачи сообщения. Если хоть одна из компонент  $\xi$  превосходит соответствующую компоненту  $\theta$ , то реализация признается неуспешной. Если ЛПР не может увеличить максимальную пропускную способность канала, объем памяти или время нахождения в активном периоде (то есть  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  или  $\theta_4$ ), оно вынуждено уменьшить вероятность успешной реализации на величину вероятности нехватки соответствующего ресурса, тем самым увеличив  $\theta_1$ .

В модели предлагаются следующие показатели ЭИОР:

1. Требуемое число реализаций — минимальное число реализаций, при котором выполнение пользовательской задачи признается эффективным.

2. Функция ограниченных ресурсов (ФОР) — функция требуемого числа реализаций, равная отношению требуемого ограниченного ресурса данного типа к требуемому числу реализаций при заданном количестве выделенных ограниченных ресурсов других типов. Под требуемым ограниченным ресурсом подразумевается минимальное количество ограниченных ресурсов данного типа, которое необходимо выделить на требуемое число реализаций (считая выделенные ограниченные ресурсы других типов фиксированными), чтобы вероятность выполнения всех этих реализаций была не ниже заранее определенного числа, называемого уровнем доверия. Таким образом, требуемый ограниченный ресурс определяется как  $\alpha$ -квантиль величины ресурсов, необходимых для требуемого числа реализаций. Физическим смыслом ФОР является то, что она показывает, какое количество ограниченных ресурсов требуется затратить, чтобы увеличить требуемое число реализаций на единицу.

3. Полезный эффект — ожидаемая величина полезности от успешного выполнения требуемого числа реализаций, выраженная в единицах какого-либо ограниченного ресурса.

4. Коэффициент ЭИОР — величина, показывающая, во сколько раз ожидаемый полезный эффект превышает количество ограниченных ресурсов, которое потребуется выделить в худшем случае с выбранным уровнем доверия.

В тех случаях, когда использование ограниченного ресурса при одной реализации не приводит к уменьшению выделенного ограниченного ресурса, доступного при последующих реализациях, расчет ФОР и коэффициента ЭИОР может быть произведен аналитически. Примером такого ресурса является время активного периода. Требуемый ограниченный ресурс для конкретной реализации определяется тем, через какое время после начала активного периода по запросу микроконтроллера приходят сообщения от сенсоров и шлюзов. Рассматривается два распределения требуемых ограниченных ресурсов, которым приблизительно удовлетворяет время формирования сообщений для однотипных и разнотипных источников данных соответственно: экспоненциальное распределение и распределение Парето.

В результате расчетов получена ФОР для экспоненциального распределения:

$$E(I) = \frac{1}{I\mu} \ln(1 - \alpha^{1/I}), \quad (2)$$

и для распределения Парето:

$$E(I) = \frac{\theta_m}{I} (1 - \alpha^{1/I})^{1/\beta}, \quad (3)$$

где  $\mu$ ,  $\theta_m$ ,  $\beta$  — параметры распределений. Для узла сенсорной сети, к которому подключено несколько шлюзов Bluetooth 2.1, значения параметров составляют: для  $\mu$  — от 600 до 1000 мс,  $\theta_m$  — 400 мс,  $\beta$  — 1 и более. Графики ФОР для указанных значений параметров приведены на Рисунке 2.

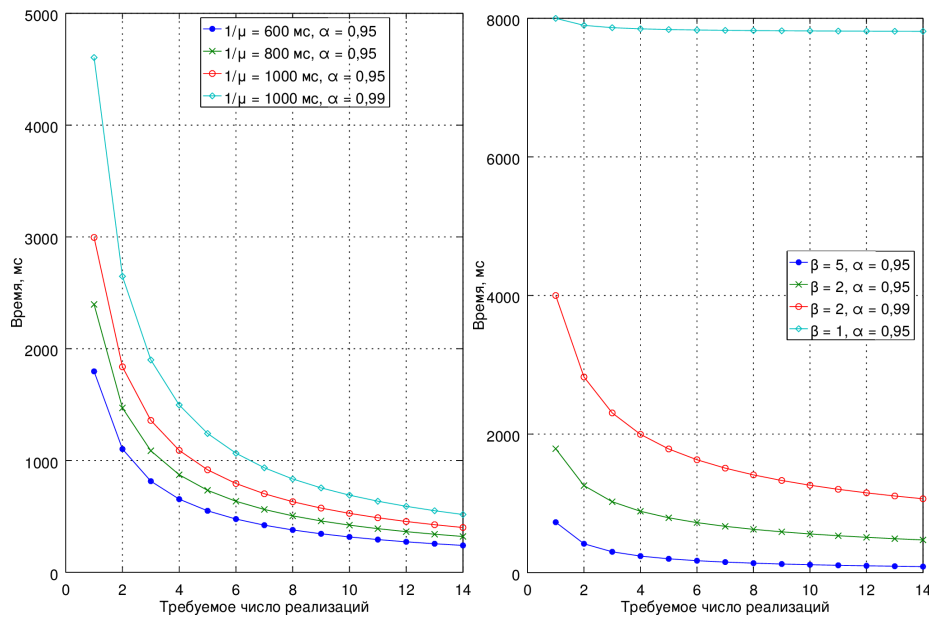


Рисунок 2 — ФОР для времени активного периода при подключении к сенсорному узлу пользовательских устройств по протоколу Bluetooth 2.1 (слева — для однотипных пользовательских устройств, справа — для разнотипных пользовательских устройств)

На основе расчета было выбрано время активного периода в 16 секунд при периоде опроса 300 секунд, что обеспечило успешный опрос всех пользовательских устройств с вероятностью 95%. Результаты измерений показали, что применение спящего режима с выбранными характеристиками продлевает время работы пользовательских устройств на 15% по сравнению с постоянным нахождением в активном режиме.

**Третья глава** посвящена методике расчета предложенных показателей ЭИОР при помощи имитационного моделирования.

Методика включает в себя несколько этапов. На первом этапе необходимо применить описанную выше модель конвергентной ИК услуги к имеющимся альтернативам. В задаче проектирования узла сенсорной сети альтернативы определялись четырьмя

комбинациями двух сенсорных приемопередатчиков (DigiMesh XBee и MeshLogic) и двух микроконтроллеров (ATmega328 и ATmega2560), причем приемопередатчики различаются по используемым протоколам передачи данных, микроконтроллеры — по объему памяти.

После этого нужно осуществить формализацию алгоритма реализации пользовательской задачи, то есть сформулировать правила, по которым при каждой реализации определяются необходимые и выделенные ограниченные ресурсы каждого типа. Данные правила могут включать в себя вычисление различных переменных, генерацию случайных величин с теми или иными функциями распределения, условные ветвления, циклы или другие управляющие конструкции. Такой алгоритм для пользовательской задачи узла сенсорной сети изображен на Рисунке 3.

Следующим этапом методики является генерация большого количества наборов случайных чисел, характеризующих отдельную реализацию. В рассматриваемой пользовательской задаче такими случайными числами являются время формирования сообщения, его «эффективная длина», равная отношению максимальной пропускной способности приемопередатчика к фактическому времени передачи сообщения, а также случайное число с равномерным распределением от 0 до 1, характеризующее возникновение необнаруженной ошибки при передаче сообщения. Всего было сгенерировано  $N = 5000$  таких наборов из трех выборочных значений случайных величин.

Затем для каждого набора производится вычисление требуемого ограниченного ресурса определенного типа (в случае сенсорного узла — пропускной способности). Для этого набор подается на вход алгоритма реализации пользовательской задачи вместе с ограничениями по ресурсам, а также требуемым числом реализаций. Если в результате выполнения алгоритма обнаруживается, что указанным ограничениям удовлетворить нельзя, ограничение по выбранному типу ресурса ослабляется, в противном случае — усиливается. В результате этих итераций ищется минимальное значение ограниченного ресурса в расчете на одну реализацию, при котором ограничения еще удовлетворяются.

В результате для каждого требуемого числа реализаций имеется массив из  $N$  подобных значений — по одному для каждого набора. Значение ФОР ищется как квантиль путем сортировки массива, и выбора элемента, имеющего порядковый номер  $\alpha N$ , начиная с наименьшего ( $\alpha$ , как и ранее, — уровень доверия).

Подобная процедура проводится для различного требуемого числа реализаций. Полученная в результате функция является оценкой ФОР. Точность оценки можно определить при помощи метода ресэмплинга (jackknife resampling).

Для практической реализации вышеописанной методики расчета показателей ЭИОР была разработана программа для среды Matlab/GNU Octave.

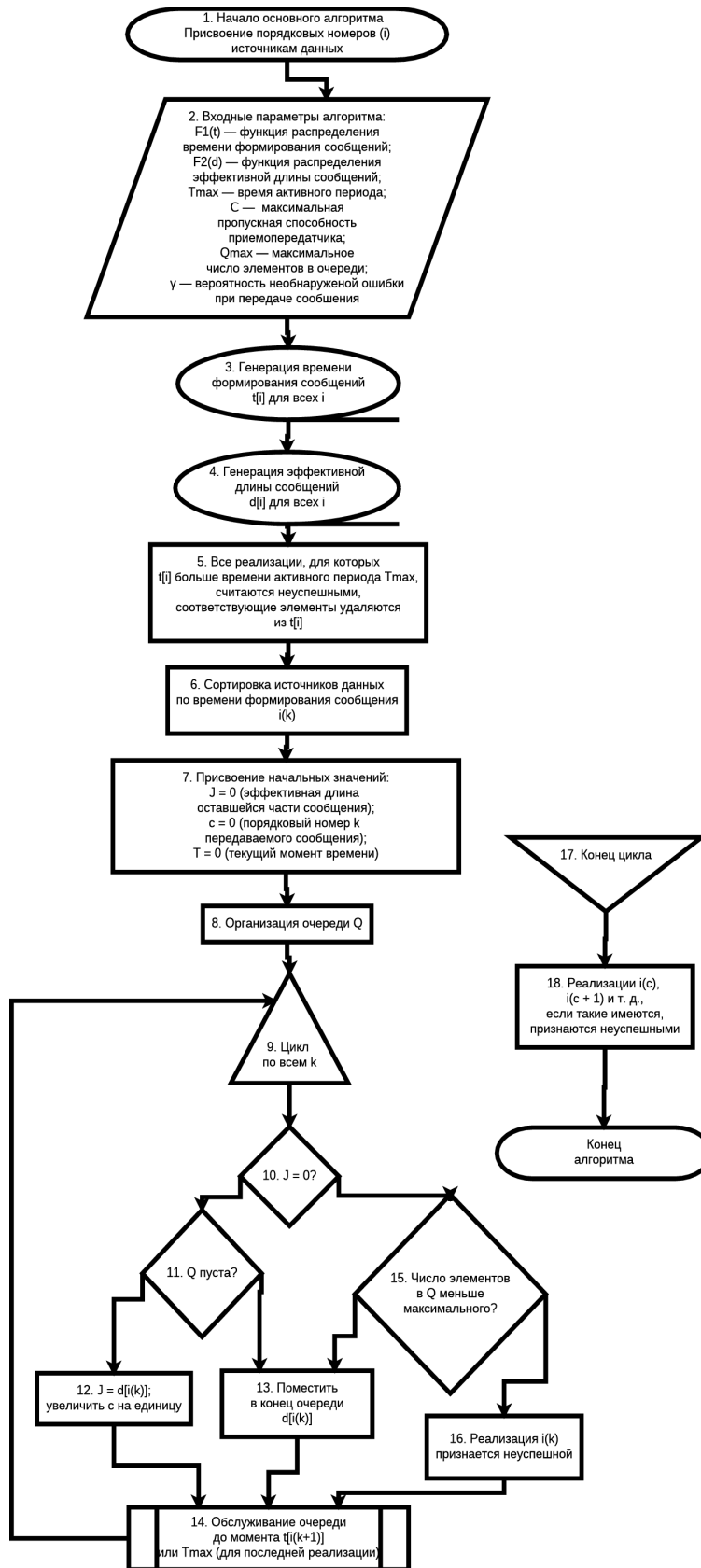


Рисунок 3: Схема алгоритма реализации пользовательской задачи узла сенсорной сети

На Рисунке 4 показана рассчитанная ФОР для четырех имеющихся альтернатив.

Из графика видно, что в рассматриваемом диапазоне требуемого числа реализаций (в данном случае числа источников данных) ФОР заметно отличается лишь для альтернативы DigiMesh Xbee + ATmega328 (наиболее доступного по цене). Поскольку меньшие требования к пропускной способности определяют возможность работы сенсорного узла в условиях большого количества других устройств, работающих в диапазоне 2,4 ГГц, был выбран второй по доступности вариант — MeshLogic + ATmega328.

В четвертой главе рассмотрены вопросы практической применимости предложенных показателей ЭИОР. Методика расчета показателей ЭИОР при помощи имитационного моделирования для расчета ФОР в одной точке требует проведения имитации большого количества  $N$  реализаций, причем для каждой реализации расчет требу-

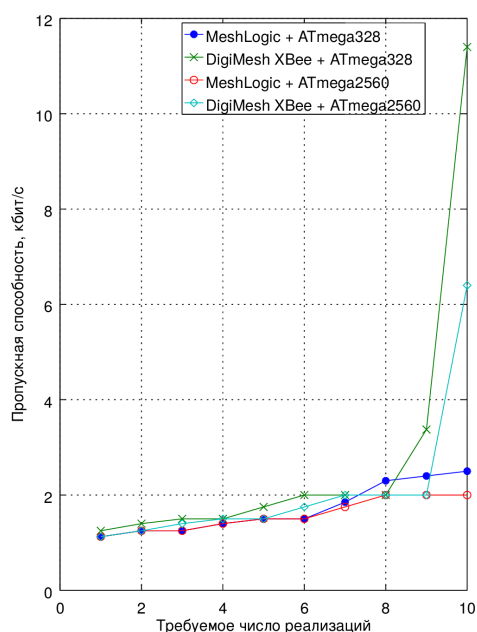


Рисунок 4: Результаты расчета ФОР

емого ограниченного ресурса производится в несколько (около 5 – 10) итераций.

В свою очередь, для проведения каждой имитации реализации необходимы довольно значительные вычислительные ресурсы. Все это налагает ограничения на использование метода имитационного моделирования в тех случаях, когда значение ФОР должно быть получено для большого количества подзадач и СД либо когда вычисления должны проводиться в режиме реального времени.

Для таких случаев автором предлагается методика расчета показателей ЭИОР, основанная на *тензорном анализе сетей* (далее сокращенно обозначаемым как ТАС). ТАС предоставляет способ для организации большого количества переменных и их функций таким образом, чтобы существенно облегчить расчет этих функций за счет ряда упрощающих предположений. При этом применяется линейное приближение ФОР.

Доказывается, что ФОР и требуемое число реализаций являются контрвариантным и ковариантным тензорами соответственно. Вводится тензор  $\mathbf{z}$ , диагональные элементы которого — коэффициенты наклона ФОР, а недиагональные — величины, характеризующие взаимосвязь между подзадачами и СД. Полученные тензорные уравнения позволяют производить переход от ФОР отдельных СД и подзадач к ФОР для всей пользовательской задачи без необходимости заново проводить имитационное моделирование. В результате данная методика может использоваться для расчета показателей ЭИОР в режиме реального времени.

Далее исследуются вопросы устойчивости разработанных показателей ЭИОР с точки зрения ошибок в оценке маловероятных рисков. Такой анализ необходим, поскольку при больших значениях требуемого числа реализаций ФОР определяется вероятностью наступления событий, приводящих к увеличению требуемых ограниченных ресурсов: возникновения неблагоприятных внешних условий, выхода из строя оборудования, ошибок обслуживающего персонала и других внештатных ситуаций.

Проводится сравнительный анализ устойчивости результатов, получаемых при использовании разработанных автором показателей ЭИОР и широко распространенного метода анализа иерархий (МАИ). В МАИ ошибка в определении приоритета альтернативы будет того же порядка, что и ошибка в оценке величины  $R=pV$ , где  $p$  — вероятность возникновения риска,  $V$  — затраты в случае возникновения риска. Исследования показывают, что ущерб от маловероятного события может быть определен с гораздо лучшей точностью по сравнению с его вероятностью. Автором доказывается, что если величина ущерба подчиняется распределению Парето (что соответствует многим практическим случаям), то ФОР при значениях  $R \ll \theta_m$  будет иметь следующий вид:

$$E(i) \approx \frac{\theta_m}{I(1 - \alpha^{1/i})} \left( 1 + \frac{\theta_m}{R} \ln(1 - \alpha^{1/i}) \right). \quad (4)$$

Данная функция зависит от параметра  $\theta_m$ , который характеризует величину последствий риска, а член, зависящий от вероятности возникновения риска, будет исчезающе мал при больших значениях  $R$ .

Поскольку плотности вероятностей многих других часто встречаемых распределений (нормального, экспоненциального, логнормального, пуассоновского) при больших значениях аргумента убывают быстрее, чем распределение Парето, устойчивость для них также обеспечивается.

Таким образом, если известен масштаб последствий от негативного события, предлагаемые автором показатели ЭИОР будут давать более устойчивые результаты по сравнению с МАИ.

**В пятой главе** даются рекомендации, полученные в результате применения разработанных моделей и методик к различным практическим задачам. Задачи выбраны таким образом, чтобы продемонстрировать возможности применения на различных

уровнях.

*В первом параграфе* главы рассматриваются вопросы оценки эффективности использования ИКТ с учетом планов по внедрению конвергентных ИК услуг. Автором было предложено 8 показателей развитости ИКТ, основанных на подсчете ограниченных ресурсов, необходимых пользователю для доступа к наиболее важным ИК услугам. Для всех показателей была разработана методология расчета, не требующая участия экспертов для расчета текущих значений показателей ЭИОР и основанная на результатах измерений.

Практические рекомендации, предложенные в настоящем разделе, были использованы при подготовке проектного предложения в Азиатско-Тихоокеанское экономическое сотрудничество (АТЭС) от Администрации связи России “Indicators of information society development in the APES region”, а также применялись в Приднестровском государственном университете имени Т. Г. Шевченко для разработки показателей эффективности использования ИКТ, стимулирующих внедрение новых ИКТ в Приднестровской Молдавской Республике (ПМР) для улучшения уровня жизни социально незащищенных слоев населения.

*Второй параграф* посвящен оценке эффективности системы управления при чрезвычайных ситуациях (ЧС) с использованием сенсорных управленческие сетей (СУС). СУС впервые были предложены в Рекомендации МСЭ-Т У.2222, в разработке которой принимал участие автор. Данный класс сетей является модификацией беспроводных сенсорных сетей (БСС), которые уже получили широкое распространение.

Управление при ЧС является примером конвергентной ИК услуги, поскольку при ее оказании параллельно используются различные терминалы и различные каналы связи, передающие данные сразу нескольких типов. В данной услуге выделяется четыре подзадачи: обнаружение ЧС, оповещение о факте возникновения ЧС, организация эвакуации и руководство спасательными работами.

Особенностью конвергентной услуги управления при ЧС является то, что распределение ограниченных ресурсов в ней проводится в том числе в режиме реального времени. Предложенные в диссертационной работе методики были использованы для разработки программы для микроконтроллера сенсорных узлов, осуществляющих управление людскими потоками с целью повышения эффективности использования имеющихся путей эвакуации.

*В третьем параграфе* показан пример использования разработанных показателей ЭИОР для многокритериальной оценки альтернатив при принятии решений — выбор в рамках НИР наземного канала для системы доставки высокоточной эфемеридно-временной информации (СДВЭВИ). Данная система позволяет существенно повысить точность местоопределения систем ГЛОНАСС и GPS. Был проведен анализ возможных ИК услуг, для которых требуется повышенная точность местоопределения, и для каждой из них построена модель, позволяющая оценить полезный эффект для потре-

бителя в зависимости от условий доставки ЭВИ. Все рассмотренные ИК услуги являются конвергентными, поскольку они используют как минимум два канала передачи данных (спутниковый и наземный). В качестве альтернативных СД в моделях рассматривалось 4 различных наземных канала доставки ЭВИ. Применение предложенных показателей ЭИОР позволило сократить число необходимых экспертных оценок по сравнению с широко известным методом анализа иерархий на 75%.

**Заключение.** Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Разработана модель конвергентной ИК услуги, в которой конвергентная ИК услуга представляется как средство решения задачи, стоящей перед пользователем. Модель позволяет описать структуру пользовательской задачи через подзадачи и способы действий.

2. Предложено четыре показателя ЭИОР: требуемое число реализаций, функция ограниченных ресурсов, полезный эффект и коэффициент ЭИОР. Доказано, что показатели удовлетворяют сформулированным в начале работы требованиям: многокритериальности, применимости на всех уровнях, связь технических показателей и показателей качества ИК услуг, применимости для конвергентных и традиционных ИК услуг, минимальной необходимости в экспертных суждениях.

3. Разработано несколько методик расчета показателей ЭИОР. Из них основной является методика имитационного моделирования, в которой определение требуемых ограниченных ресурсов производится путем многократной имитации реализации пользовательской задачи при варьируемых ограничениях на выделенные ресурсы.

4. Предложенная методика имитационного моделирования была применена при проектировании узла сенсорной сети, что позволило узлу обслуживать на 10% больше пользователей. Также было выбрано время активного периода в 16 секунд при периоде опроса 300 секунд, что обеспечило успешный опрос всех пользовательских устройств с вероятностью 95%. Применение спящего режима с выбранными характеристиками продлевает время работы пользовательских устройств на 15% по сравнению с постоянным нахождением в активном режиме.

5. Разработанная методика расчета показателей ЭИОР в режиме реального времени была использована при разработке программы для микроконтроллера сенсорных узлов, осуществляющих управление людскими потоками с целью повышения эффективности использования имеющихся путей эвакуации. Кроме того, предлагаемые показатели ЭИОР использовались для выбора показателей эффективности использования ИКТ в Приднестровской Молдавской Республике, оценки эффективности сенсорных управленческих сетей и проведения обоснованного выбора наземного канала доставки высокоточной ЭВИ. За счет этого удалось сократить количество необходимых экспертных суждений до 75% по сравнению с широко применяемым для подобных задач методом анализа иерархий.



## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В периодических изданиях, входящих в перечень ВАК*

1. Сущенко Н. А. Использование имеющихся статистических данных для расчета полезного эффекта от использования радиотехнологий // Труды НИИР. – 2011. – № 4. – С. 14–19.
2. Сущенко Н. А. Применение теории типовых процессов для оценки эффективности использования ограниченных ресурсов // Труды НИИР. – 2011. – № 1. – С. 24–28.
3. Сарьян В. К., Сущенко Н. А. Разработка модели инфокоммуникационных услуг на основе теории целеустремленных систем // Труды НИИР. – 2014. – № 2. – С. 16–25.
4. Сарьян В. К., Сущенко Н. А. Перспективы использования Больших Данных для определения показателей развития ИКТ // Труды НИИР. – 2012. – № 4. – С. 30–35.
5. Сарьян В. К., Лутохин А. С., Сущенко Н. А. Сенсорные управленческие сети как новое приложение для сетей следующего поколения // Труды НИИР. – 2011. – № 1. – С. 20–23.
6. Сарьян В. К., Сущенко Н. А. Использование Data Envelopment Analysis (DEA) для расчета эффективности использования частотного спектра в инфокоммуникационной среде (ИКС) // Труды НИИР. – 2009. – №1. – С. 75–79.
7. Назаренко А.П., Сарьян В.К., Сущенко Н.А., Лутохин А.С. Использование современных инфокоммуникационных технологий для спасения людей при чрезвычайных ситуациях // Электросвязь. — 2014. — № 10. — 4 с.
8. Назаренко А.П., Сарьян В.К., Сущенко Н.А. Единый критерий оценки эффективности использования частотного спектра // Электросвязь. – 2009. – №10. – С. 24–28.
9. Сарьян В. К., Сущенко Н. А., Дубнов И. А., Дубнов Ю. А., Сахно С. В., Лутохин А. С. Прошлое, настоящее и будущее стандартизации Интернета вещей // Труды НИИР. – 2014. – № 1. – С. 1–7.
10. Бутенко В. В., Назаренко А. П., Сарьян В. К., Лутохин А. С., Сущенко Н. А. Проблемы, возникающие при внедрении новых технологий в инфокоммуникационном сообществе // Труды НИИР. – 2011. – № 1. – С. 12–19.

### *В других изданиях*

11. Suschenko N., Nazarenko A., Sarian V., Lutokhin A. Assessment of new information and communication technologies using activity-based costing and tensor analysis of networks // Proceedings of ITU Kaleidoscope 2014, St. Petersburg, Russian Federation, 3–5 June 2014 / International Telecommunication Union. – Geneva: ITU, 2014. – P. 269–274. – ISBN 978-92-61-14421-0.
12. Applications of Wireless Sensor Networks in Next Generation Networks : technical paper / International Telecommunication Union, ITU-T ; developed by V. Butenko, A. Nazarenko, V. Sarian, N. Sushchenko and A. Lutokhin. – [Geneva] : ITU-T, 2014. – 94 p.

13. Nazarenko A., Sarian V., Suschenko N., Lutokhin A. Sensor control networks and their // Internet of Things and its Enablers : conference, State University of Telecommunication, St. Petersburg, Russia, June 3–4, 2013 : proceedings / SUT. – SPb. : Lubavich, 2013. – P. 29–45. – ISBN 978-5-86983-940-4.

14. Butenko V., Nazarenko A., Sarian V., Suschenko N. Issues affecting the evaluation of the beneficial effect of new technologies and ways to solve these issues // Proceedings of 23rd European Regional ITS Conference, Vienna, 1-4 July, 2012 / Vienna : International Telecommunication Society. – 2012. – P. 12–19.

15. Сущенко Н. А. Разработка модели оценки эффективности использования ограниченных ресурсов в области инфокоммуникаций // VIII Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества» : прогр. науч.-техн. секций. – М. : МТУСИ. – 2014. – С. 33.

16. Сарьян В. К., Иванкович М. В., Куракова Т. П., Сущенко Н. А. Социотехнические стандарты как средство управления глобальным развитием инфокоммуникационных технологий // VIII Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества» : прогр. науч.-техн. секций. – М. : МТУСИ. – 2014. – С. 33.

17. Сущенко Н. А. Формализация задачи оценки эффективности использования ограниченных ресурсов в информационно-управленческих сетях // VII Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества» : прогр. науч.-техн. секций. – М. : МТУСИ. – 2013.

18. Сущенко Н. А. Построение тензорной модели сенсорной управленческой сети для оценки эффективности использования ограниченных ресурсов // VII Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества» : прогр. науч.-техн. секций / М. : МТУСИ. – 2013.

19. Сущенко Н. А. Применение тензорного анализа сетей для различных задач оценки эффективности в сенсорных управленческих сетях // Труды 56-й научной конференции МФТИ. – М : МФТИ. – 2013.

20. Сущенко Н. А., Лутохин А. С. Выбор модулей беспроводной сенсорной сети для системы обеспечения индивидуальной безопасности // Труды 56-й научной конференции МФТИ, – М : МФТИ. – 2013.

21. Сарьян В.К., Сущенко Н. А. Применение тензорного исчисления для определения эффективности использования ограниченных ресурсов // Труды 55-й научной конференции МФТИ. – М : МФТИ. – 2012.

22. Бутенко В. В., Назаренко А. П., Сарьян В. К., Сущенко Н. А. Оценка эффективности использования ограниченных ресурсов по критерию оказанных услуг // Программа двенадцатой международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». – Одесса : Издат. центр «Политехперіодика». – 2011. – С. 11.

**Патенты РФ на изобретение**

1. Способ обеспечения безопасности жизнедеятельности людей : пат. 2445708 РФ / В. В. Бутенко, А. П. Назаренко, В. К. Сарьян, А. Л. Шишкин, А. С. Лутохин, Н. А. Сущенко, Е. А. Ильяич, В. И. Травуш, С. Н. Трубицин ; ФГУП НИИР. — № 2009130733/08 ; опубл. 20.02.2012, приоритет 12.08.2009. — 6 с.

2. Способ обеспечения взаимодействия мобильных терминалов с сенсорной сетью и терминал сенсорной сети, обеспечивающий взаимодействие мобильных терминалов с сенсорной сетью : пат. 2455775 РФ / В. В. Бутенко, А. П. Назаренко, В. К. Сарьян, А. С. Лутохин, Н. А. Сущенко, О. И. Хегай ; ФГУП НИИР. — № 2011123087/08 ; опубл. 10.07.2012, приоритет 08.06.2011. — 9 с.

3. Способ оповещения мобильных коммуникационных устройств о чрезвычайных ситуациях и устройство, его реализующее : пат. 2460143 РФ / В. В. Бутенко, А. П. Назаренко, В. К. Сарьян, А. С. Лутохин, Н. А. Сущенко, О. И. Хегай ; ФГУП НИИР. — № 2011119729/08 ; опубл. 27.08.2012, приоритет 17.05.2011. — 6 с.

4. Способ приёма абонентом программы действий при чрезвычайной ситуации (варианты) : пат. 2400819 РФ / В. В. Бутенко, А. П. Назаренко, В. К. Сарьян, Н. А. Сущенко, А. С. Лутохин ; ФГУП НИИР. — № 2009126327/11 ; опубл. 27.09.2010, приоритет 10.07.2009. — 11 с.

Подписано в печать: 17.04.2015  
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз.  
Заказ № 118

Отпечатано в типографии «Реглет»  
119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 39  
(495) 363-78-90; www.reglet.ru