

На правах рукописи

УГЛОВ ИВАН ВАЛЕРЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ СИГНАЛЬНОГО ОБМЕНА В
КОНВЕРГЕНТНОЙ СЕТИ**

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
«Центральный научно-исследовательский институт связи» (ФГУП ЦНИИС)

Научный руководитель: **Ефимушкин Владимир Александрович**
кандидат физико-математических наук,
доцент

Официальные оппоненты: **Ромашкова Оксана Николаевна**
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой, ФГБОУ ВПО Московский
городской педагогический университет

Шалагинов Виктор Алексеевич
кандидат технических наук,
главный специалист,
ОАО «Ростелеком».

Ведущая организация: **ФГБУН Институт проблем управления**
им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Защита диссертации состоится «__» _____ 2015 г. в ____⁰⁰ на заседании
диссертационного совета Д 219.001.03 при Московском техническом
университете связи и информатики по адресу: 111024, Москва,
ул. Авиамоторная, дом 8а, МТУСИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО МТУСИ.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д219.001.03
к.т.н., доцент

Ерохин С.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

При проектировании новой и модернизации существующей КС, либо фрагмента КС, включающего несколько логически связанных элементов, возникает задача оценки параметров функционирования КС или ее фрагмента, что приводит к необходимости создания аналитических, либо имитационных моделей. Создание аналитических моделей предпочтительнее, т.к. они позволяют получить приемлемые оценки параметров КС без задействования больших вычислительных ресурсов. Анализ вероятностно-временных характеристик (ВВХ) модели КС дает возможность выявить и устранить ошибки на этапе проектирования, позволяя избежать избыточных затрат при строительстве. Таким образом, исследование ВВХ процессов сигнального обмена в КС является **актуальной задачей**.

Исследование вопросов моделирования сетей связи нашло широкое отражение в работах отечественных и зарубежных ученых: Башарина Г.П., Вишневого В.М., Гольдштейна Б.С., Деарта В.Ю., Докучаева В.А., Ефимушкина В.А., Кучерявого А.Е., Назарова А.Н., Нетеса В.А., Печинкина А.В., Пшеничникова А.П., Ромашковой О.Н., Самуйлова К.Е., Семенова Ю.В., Соколова Н.А., Степанова С.Н., Сычева К.И., Шоргина С.Я., Шнепс-Шнеппе М.А., Яновского Г.Г., Baskett F., Chandy K.M., Cox C., Janevski T., Lagenbach-Belz M., Mayer G., Muntz R.R., Palacios F.G., Whitt W. и др.

Наиболее перспективной сетью, в которой возможно оказание широкого спектра услуг связи, в том числе традиционных, является сеть последующего поколения (NGN, Next Generation Network). Переход к NGN инициирует процессы конвергенции фиксированных и мобильных сетей с различным уровнем взаимопроникновения, приводящие в результате к формированию КС.

Исследованию особенностей построения и функционирования подобных сетей посвящены работы Гольдштейна Б.С., Гордиенко В.Н., Кучерявого А.Е., Кучерявого Е.А., Самуйлова К.Е., Соколова Н.А., Степанова С.Н., Шалагинова В.А., Boucherie R.J., Dijk N.M., Kramer W., Poikselka M. и др.

Процессы обмена сигнальной информацией и ее обработки в КС являются достаточно сложными, что не позволяет использовать для описания функционирования КС и ее фрагментов простые системы массового обслуживания (СМО), для этого требуется рассматривать СМО и сети массового обслуживания (СеМО) сложной структуры.

На этапе проектирования наиболее часто возникают задачи исследования процессов обмена сигнальной информацией и ее обработки во фрагментах КС, состоящих из нескольких элементов, которые следует рассматривать в совокупности, как единый функциональный элемент, что приводит к необходимости построения и анализа моделей фрагментов КС, являющихся, таким образом, обобщенными моделями.

Оценку качества работы КС на этапе эксплуатации проводят на основе экспериментального исследования информационных потоков, что одновременно позволяет решать следующие актуальные задачи: проводить оценку качества услуг, использовать экспериментально полученные данные и результаты их обработки в качестве исходных при проектировании новых объектов, создании аналитических и имитационных моделей. Методы экспериментального анализа информационных потоков должны обеспечивать решение следующих актуальных задач: минимизации влияния средств экспериментального изучения КС на ее работу,

оценки характеристик работы сети и ее отдельных узлов, определения качества предоставляемых услуг, формирования достаточного объема информации о структуре информационных потоков и режимах работы сетевых узлов.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для решения перечисленных задач.

Объектом исследования является КС, обеспечивающая аудио и видео связь, ее фрагменты, потоки сигнальной информации в ней.

К **предмету исследования** в диссертации относятся характеристики функционирования КС и ее фрагментов в процессе обмена сигнальной информацией.

Цель исследования заключается в разработке обобщенных аналитических моделей функционирования КС и ее фрагментов в процессе обмена сигнальной информацией при организации аудио и видео вызовов, экспериментальном анализе характеристик процессов сигнального обмена, позволяющих повысить эффективность функционирования КС.

Для достижения цели исследования при решении поставленных **задач** были получены следующие результаты:

- проведен анализ существующих архитектур и основных сценариев предоставления услуг, используемых технологий и протоколов в КС;
- разработаны обобщенные аналитические модели фрагментов КС, позволяющие исследовать характеристики функционирования коммутационного ядра КС;
- разработан механизм формализации процессов сигнального обмена в КС при построении СеМО;
- на основе предложенного механизма формализации построена аналитическая модель процессов сигнального обмена в типовой КС при установлении голосовых вызовов с использованием возврата к технологии канальной коммутации (CSFB, Circuit Switched FallBack);
- исследованы экспериментальные способы изучения характеристик КС;
- предложена методика и получены результаты экспериментального исследования характеристик потоков сигнальной информации на транзитных направлениях крупной КС.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые предложены обобщенные аналитические модели фрагментов ядра КС и проведено их исследование. Разработаны рекомендации по выбору параметров элементов КС в зависимости от интенсивности нагрузки и ее типа, что позволяет при заданной величине потерь на элементах получить соотношения для производительности элементов моделируемых фрагментов и обеспечить их равномерную загрузку.

2. Предложен новый механизм формализации процессов сигнального обмена в КС и построения с использованием данного механизма СеМО с входящими потоками общего вида и узлами в виде многопроцессорных систем с произвольными дисциплинами обслуживания. Модель позволяет оценить основные ВВХ КС и исследовать процесс организации исходящего вызова с использованием технологии CSFB на сети. Предложены и исследованы типовые конфигурации КС, проведен анализ применимости моделей узлов различных типов для описания элементов КС. Это позволяет использовать разработанные в диссертации рекомендации в проектных расчетах для повышения эффективности КС и ее фрагментов.

3. Экспериментально подтверждено наличие в КС потоков сигнальных сообщений высокой интенсивности не пуассоновского типа. Определены характеристики подобного потока между сетью агрегации трафика и контактными центрами (КЦ), основные сценарии и особенности установления вызовов, что может быть использовано при выборе параметров входящего потока сигнальных сообщений в аналитических моделях.

Практическая значимость работы заключается в следующем: аналитические модели для оценки характеристик узлов сети и рекомендации по выбору ее элементов, алгоритм анализа потоков сигнальных сообщений и его программная реализация, результаты экспериментального анализа потоков сигнальных сообщений могут использоваться научно-исследовательскими и проектными организациями при проведении исследований и разработок в области КС, операторами связи при оценке характеристик функционирования создаваемых и модернизируемых фиксированных сетей и сетей сотовой подвижной связи в КС в целях повышения качества услуг и эффективности функционирования.

Методы исследования. В диссертации используются методы теории сетей связи, теории вероятностей, теории массового обслуживания, теории телетрафика, линейной алгебры и модельный эксперимент.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлена корректным применением математических и алгоритмических методов исследования, соответствием результатов аналитических моделей и численных экспериментов на реальных сетевых объектах.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и форумах:

- II, III, IV, VI, VII Отраслевые научные конференции «Технологии информационного общества» в 2008-2010 гг., 2012-2014 гг., г. Москва;
- 4-я Ежегодная конференция «Конвергенция в телекоммуникациях» в 2010 г., г. Москва;
- 17-я Международной конференции DCCN-2013 «Распределенные компьютерные и коммуникационные сети: управление, вычисление, связь», ИПУ РАН, 2013 г., г. Москва;
- XII Всероссийское совещание по проблемам управления, 2014 г., г. Москва.

Публикации. По результатам исследований опубликованы 17 работ, в том числе 8 работ в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, и 2 в зарубежном журнале.

Реализация результатов работы. Разработанные в диссертации модели и методы были использованы для анализа и улучшения характеристик сети оператора ОАО «МТС», что подтверждено соответствующими документами. Полученные в диссертации результаты исследований использованы в спецкурсе «Конструктивно-технологическое обеспечения средств связи», читаемом на кафедре компьютерной и информационной безопасности Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики. Программное обеспечение, реализующее разработанные в диссертации методы анализа сигнальных сообщений КС, имеет с свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013661814 РФ: МПК-2014.01

Н 04 Q 1/10. Данное программное обеспечение использовалось в рамках работ по гранту РФФИ 13-07-00665 А, 2013-2014 гг.

Основные положения работы, выносимые на защиту:

1. Разработанная обобщенная аналитическая модель фрагмента ядра КС позволяет определить критерии выбора параметров его элементов и при заданном уровне потерь обеспечить их равномерную загрузку.

2. Разработанная аналитическая модель Р-И-CSC позволяет установить критерий выбора параметра, определяющего схему обработки заявок на узле, при которой возможно снижение вероятности потерь как приоритетных заявок (ПЗ), так и неприоритетных заявок (НЗ).

3. Разработанный механизм формализации задачи моделирования процессов сигнального обмена в КС с пошаговым алгоритмом позволяет осуществить переход от инженерного описания процессов сигнального обмена в КЦ к СеМО.

4. Разработанная модель типовой КС позволяет определить СМО, наиболее корректно отражающие изменения временных характеристик обработки сигнальных сообщений. Для моделирования элементов коммутационного ядра предлагается использовать СМО $\bullet/M/m$, либо $GI/G/m$; для базовых станций сетей подвижной связи – СМО $\bullet/G/1$, для множества абонентских устройств и других сетей – СМО $\bullet/G/\infty$, здесь и далее « \bullet » обозначает один или несколько входящих потоков.

5. Полученные характеристики потоков сигнальных сообщений между сетью агрегации вызовов и КЦ подтверждают наличие в КС потоков не пуассоновского типа высокой интенсивности и необходимость их учета при моделировании.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 139 наименований. Диссертация содержит 132 страницы, 38 рисунков, 6 таблиц и имеет шесть приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы основные задачи исследования, определена актуальность диссертационной темы, ее научная новизна и практическая ценность. Описана структура, представлены краткое содержание диссертации и положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертационной работы посвящена исследованию архитектуры КС и механизмов взаимодействия ее элементов, протоколам передачи сигнальной информации и пользовательских данных. Введено понятие КС – сеть, использующая широкий спектр технологий передачи информации для организации доступа к ресурсам сети и ее услугам, взаимную интеграцию услуг и технологий. Такая сеть может состоять из нескольких сегментов, использующих технологии коммутации каналов (КК), либо коммутации пакетов (КП), объединять собой сети разных поколений подвижной радиотелефонной связи, рис. 1.

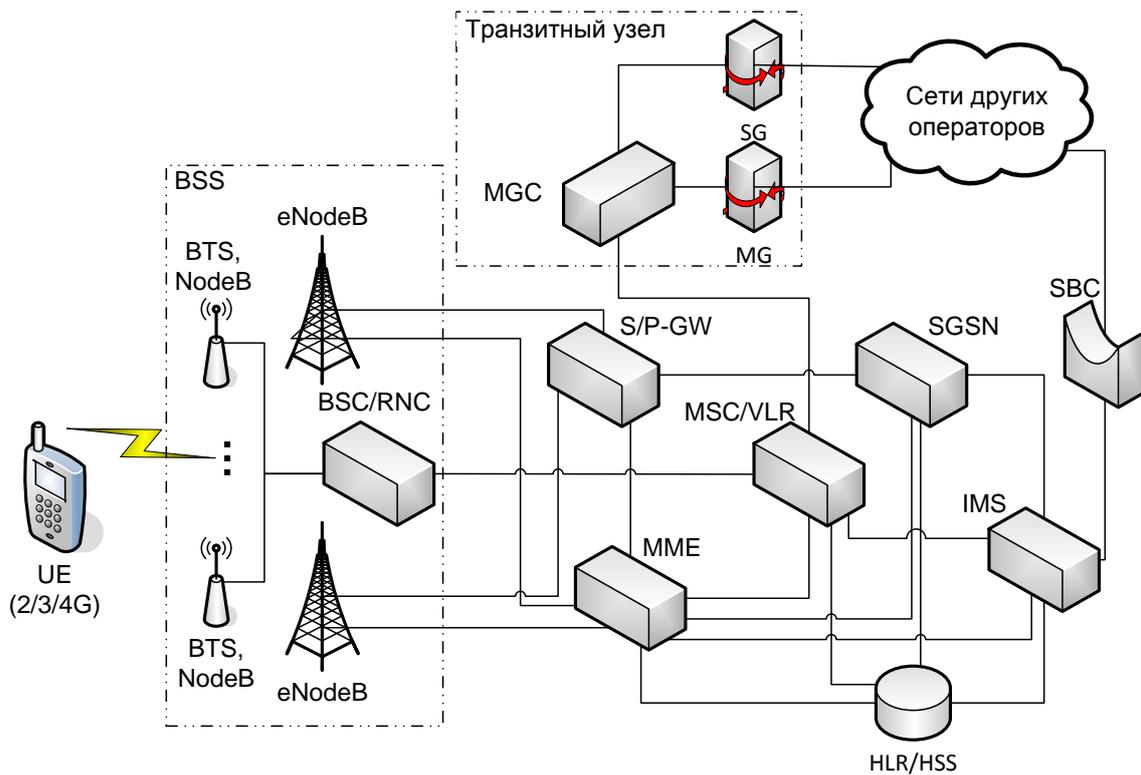


Рис.1. Архитектура КС на базе платформы IMS, включающая сегменты мобильной и фиксированной сети

При организации сеансов передачи пользовательских данных в КС на сегментах КП широко используется протокол инициализации сеансов (SIP, Session Initialization Protocol), на сегменте КК – общеканальная система сигнализации № 7 (ОКС 7). Передача и конвертация сигнальных сообщений на стыках сегментов технологий КП и КК обычно обеспечивается сигнальными шлюзами, входящими в состав программно-аппаратного коммутационного узла Softswitch в составе контроллера управления шлюзами (MGC, Media Gateway Controller) и двух шлюзов: транспортного (MG, Media Gateway) и сигнального (SG, Signal Gateway).

Базовая подсистема (BSS, Base Station System) сетей подвижной связи 2-го, 3-го и 4-го поколений организована с использованием базовых станций (BTS, Base Transceiver Station), элементов NodeB и e-NodeB, соответственно. В BSS входят контроллеры базовых станций (BSC, Base Station Controller) в сети 2-го поколения и контроллеры радиосети (RNC, Radio Network Controller) в сети 3-го поколения. В сети 4-го поколения управление элементами e-NodeB организует узел управления мобильностью (MME, Mobile Management Entity), а управление пакетными сессиями и передачу пользовательских данных – обслуживающий шлюз (SGW, Serving Gateway) и пакетный шлюз (PGW, Packet Gateway). В сетях 3-го поколения пакетными сессиями управляет узел обслуживания абонентов пакетной сети (SGSN, Serving GPRS Support Node).

Вопросы координации сеансов с использованием мультимедийной IP подсистемы (IMS, IP Multimedia Subsystem) и передача информации в BSS остаются за рамками исследования. Отметим основные элементы КС, участвующие в обработке сигнальных сообщений в рамках управления сеансом (здесь и далее остановимся на анализе сценариев управления сеансами передачи голосовых и других видов потоковых данных в режиме реального времени):

- при отсутствии IMS основными элементами, участвующими в обработке сигнальной информации являются центр мобильной коммутации (MSC, Mobile Switching Center) с гостевым реестром местоположения (VLR, Visitor Location Registry), домашний реестр местоположения (HLR, Home Location Registry) либо сервер домашней подписки (HSS, Home Subscriber Server); при некоторых сценариях возможно использование элемента SBC и транзитных узлов;
- при отсутствии IMS все сеансы передачи голосовой информации в подвижных сетях на основе технологии LTE организуются при помощи технологии CSFB, т.е. при организации подобных сеансов пользовательское устройство (UE, User Equipment) временно возвращается в подвижную сеть 2-го или 3-го поколения;
- организация точек обмена данными с сетями других операторов, использующих технологии КП, требует использование SBC.

Для сетей LTE, построенных в Российской Федерации, целевой технологией обеспечения голосовых вызовов является CSFB, что приводит к значительному (по сравнению с сетями 2-го и 3-го поколений) усложнению сигнального обмена при организации вызовов. Как следствие, возрастает задержка между временем начала процедуры установления вызовов и моментом начала предответной фазы соединения, когда вызывающий абонент слышит сигнал контроля посылки вызова.

Анализ архитектуры КС и процессов обмена сигнальной информацией в ней позволил сформулировать актуальные задачи исследования в диссертации. Сформулирована основная задача исследования второй главы диссертационной работы: анализ механизмов работы и разработка обобщенной аналитической модели фрагмента КС, включающего элементы MSC, VLR, HLR/HSS, и фрагмента КС, включающего элементы P-I-CSC. Описание КС в виде фрагментов оправдано, в случае, если является важным исследование совокупная работы узлов КС. В ходе решения данной задачи были предложены аналитические модели фрагмента КС MSC/VLR/HLR и P-I-CSC, позволившие оценить параметры входящих в фрагмент элементов в целях снижения потерь, дать соотношения для выбора параметров элементов фрагмента MSC/VLR/HLR для обеспечения их равномерной загрузки при заданном уровне потерь.

Аналитические модели фрагментов КС, предложенные в главе 2 диссертации, как и модели узлов, предложенные другими исследователями, не дают понимания характеристик функционирования КС как единого объекта, которые, в итоге, определяют качество предоставляемых на ней услуг. Это позволило сформулировать задачу третьей главы диссертационной работы: изучение вопросов возникновения задержек в КС при установлении соединений. В виду актуальности организации вызовов в сетях LTE, было решено остановиться на рассмотрении их с использованием технологии CSFB.

Необходимой составляющей исследований КС является получение актуальных данных о реальных объектах сети, которые могут использоваться в качестве входных параметров для аналитических моделей, что определило задачу исследования четвертой главы: разработка методов получения и обработки сигнальной информации с КС, нагруженной трафиком, определение характеристик работы узлов КС и потоков сигнальной информации в ней.

Вторая глава диссертационной работы посвящена изучению механизмов работы двух фрагментов коммутационного ядра КС, включающих элементы MSC, VLR, HLR/HSS и P-I-CSC методами теории массового обслуживания (ТМО).

Первый объект моделирования – фрагмент MSC/VLR/HLR, объединивший функционал элементов MSC, VLR, HLR/HSS, выбран не случайно: в архитектурах сетей 2-го и 3-го поколения сетевые элементы MSC, VLR, HLR/HSS играют ключевую роль при организации вызовов. Предлагаемая модель (рис. 2) использует для описания элементов фрагмента СМО $\frac{\bullet}{\lambda} / \frac{M}{\mu'_i} / m_i / r_i$, $0 < r_i < \infty$, где $i = \overline{1,3}$ – номер элемента согласно рис.2. Конечная емкость БН_{*i*} обуславливает потери, вероятность которых обозначается π_i , $i = \overline{1,3}$. Входящий поток предполагается пуассоновским. Анализ вызовов подвижных сетей 2-го и 3-го поколений позволил сделать вывод, что для поступающего на вход сетевого фрагмента сообщения, возможны три основных сценария обработки, что позволило упростить модель и оперировать заявками одного типа, разыгрывая распределение заявки на выходе из MSC, рис.2. Пусть вероятность поступления во внешнем потоке сообщения, которое сразу покинет MSC, есть c_1 , а вероятность того, что сообщение инициирует запрос к VLR есть c_2 , вероятность того, что ответ от VLR, поступивший на MSC после обработки на нем, покинет MSC есть \tilde{c}_1 , и вероятность того, что ответ от VLR после обработки на MSC инициирует запрос к HLR есть \tilde{c}_3 .

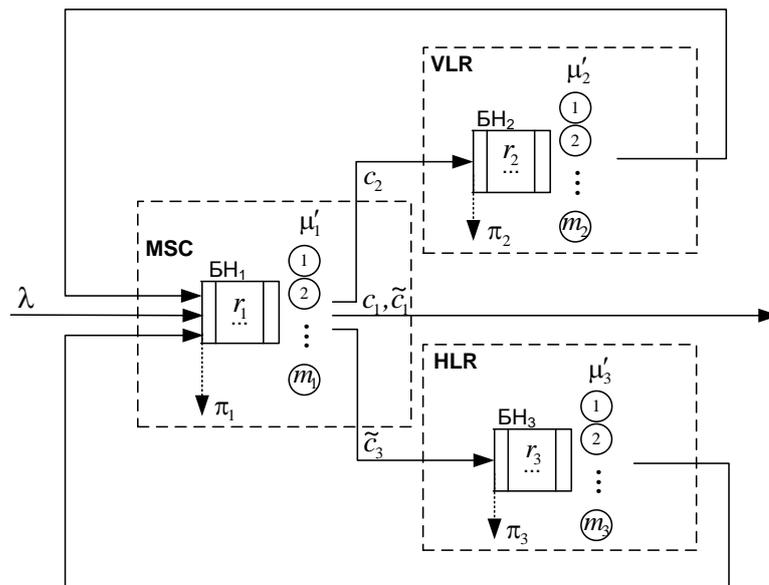


Рис.2. Обобщенная модель работы сетевого фрагмента MSC/VLR/HLR

Был рассмотрен пятимерный МП, составлена диаграмма интенсивностей переходов, описана матрица инфинитезимального оператора \mathbf{Q} и выписана система уравнений равновесия $\vec{p}^T \mathbf{Q} = \vec{0}^T$, что при учете нормировочного условия $\vec{p}^T \vec{1} = 1$, позволило определить вектор стационарных вероятностей состояний системы, $\vec{0}^T = (0, \dots, 0)$, $\vec{1}^T = (1, \dots, 1)$.

Для уменьшения требуемых при расчете вычислительных ресурсов и, соответственно, расширения диапазона изменения параметров модели, был предложен алгоритм решения уравнения $\vec{p}^T \mathbf{Q} = \vec{0}^T$ с учетом нормировочного условия и учитывающий разреженную структуры \mathbf{Q} .

Распределение $\bar{\mathbf{p}}$ позволяет получить основные ВВХ фрагмента. Проведенный анализ предложенной модели показал, что для обеспечения равномерной загрузки элементов исследуемого фрагмента необходимо при подборе производительности каждого из них использовать соотношение:

$$(1 + c_1 + c_1 \tilde{c}_3) / c_2 / \tilde{c}_3 = m_1 \mu_1 / m_2 \mu_2 / m_3 \mu_3 \quad (1)$$

Для тестовых значений $m_i = 2$, $r_i = 2$, $i = \overline{1,3}$ и максимальном уровне потерь в 0.01 результаты численного анализа представлены на рис.3.

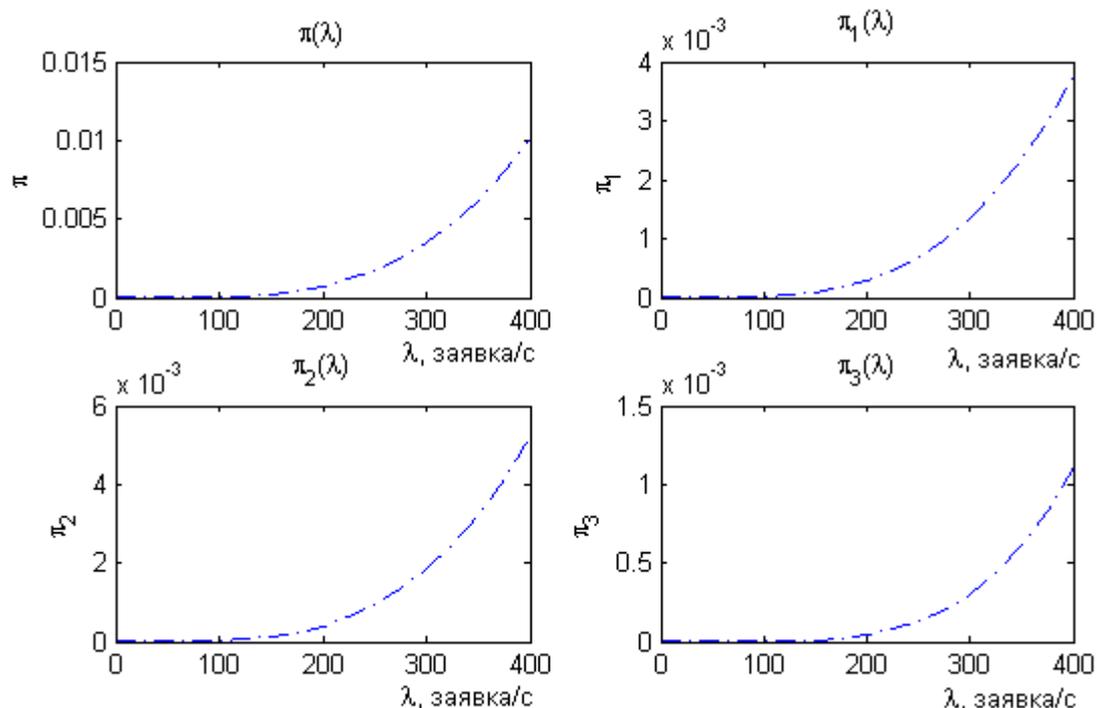


Рис.3. Графики для ВВХ системы MSC/VLR/HLR с предварительным выбором мощности элементов фрагмента

Второй объект, для которого была предложена аналитическая модель – фрагмент, содержащий элементы Р-Л-CSC, и функционирующий в качестве SBC, рис.4. Основной задачей SBC является обработка потоков сигнальной информации и реализация точки обмена трафиком для двух или более КП-сегментов КС. В диссертации рассматриваются процессы обработки сообщений SIP на SBC. В качестве модели предложена СМО $\frac{\bullet}{\lambda} / \frac{M}{\mu} / m / \bar{\mathbf{r}}$, $\bar{\lambda}^T = (\lambda_1, \lambda_2)$, $\bar{\mathbf{r}}^T = (r_1, r_2)$, $0 < m$,

$r_i < \infty$, $i = \overline{1,2}$. Вектор $\bar{\lambda}$ определяет интенсивности входящих потоков ПЗ и НЗ – сообщений SIP, приходящих от надежных и ненадежных источников, соответственно. Потоки ПЗ и НЗ предполагаются пуассоновскими вследствие наличия большого количества их независимых источников. Рассматривается дисциплина абсолютного приоритета при обслуживании, вероятность потери НЗ при обслуживании обозначена – π'_2 .

Заявки ПЗ и НЗ обслуживаются m приборами по следующему алгоритму:

- если количество заявок в БН₁ меньше r'_1 , то для обслуживания ПЗ выделяются m_1 приборов, $m_1 < m$, $0 < r'_1 \leq r_1$;

- если количество заявок в БН₁ больше, либо равно r'_1 , то ПЗ обслуживаются m приборами. При этом в первую очередь занимают свободные приборы, и, если свободных нет, ПЗ занимает занятый НЗ прибор, при этом НЗ теряется;
- НЗ обслуживаются только свободными приборами с номерами от $m_1 + 1$ до m .

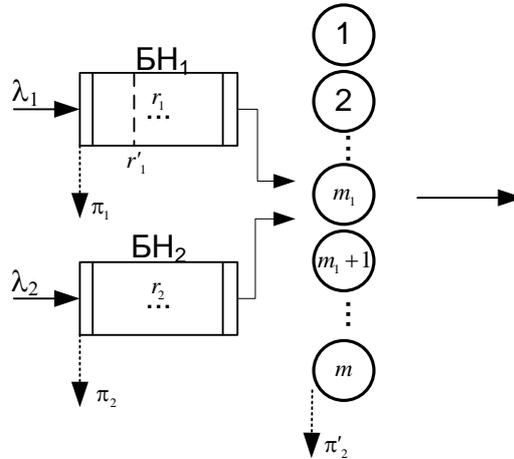


Рис.4. Обобщенная модель работы Р-Л-СРС

Для получения аналитического решения был построен четырехмерный МП, составлена диаграмма интенсивностей переходов, описана матрица инфинитезимального оператора Q и выписана система уравнений равновесия $\vec{p}^T Q = \mathbf{0}^T$, что при учете нормировочного условия $\vec{p}^T \mathbf{1} = 1$, позволило определить стационарное распределение для состояний системы. Для оценки поведения системы достаточно расчетов для небольших значений параметров r_1, r_2, m . Поведение для больших значений будет иметь тот же характер. В диссертационной работе приведен расчет для $m = 8, m_1 = 6, r_1 = r_2 = 20, \lambda_1 = 1000$ заявок/с, $\lambda_2 = 300$ заявок/с и переменном значении параметра r'_1 , основные результаты расчетов представлены на рис. 5. Из рис.5 (график 1) видно, что при постоянных λ_1, λ_2 вероятность простоя СМО имеет выраженный максимум, что, при незначительном уровне π_1, π_2, π'_2 (рис.5, графики 2–4), позволяет говорить о наилучшем значении параметра r'_1 .

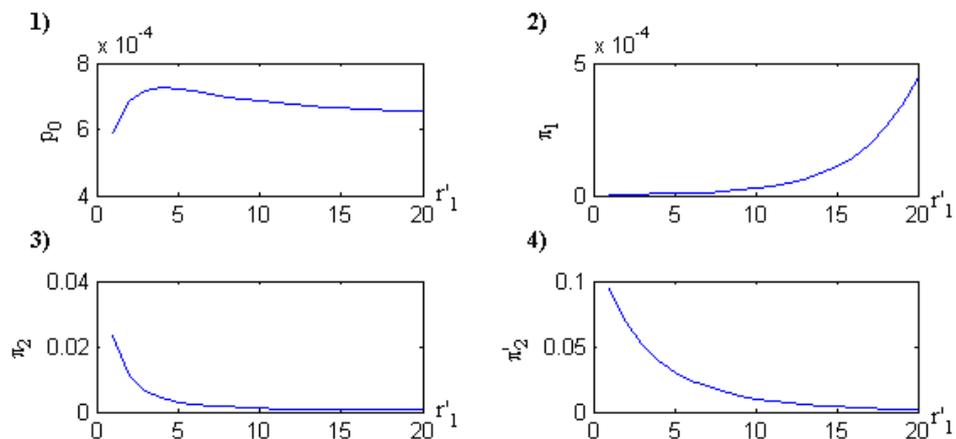


Рис.5. Графики ВВХ функционирования СМО

В третьей главе исследуются вопросы возникновения задержек в КС при установлении соединений. Формализуется подход к моделированию процессов сигнального обмена в КС, дающий пошаговый метод перехода от диаграмм процессов сигнального обмена в КС к описанию СеМО, являющейся обобщенной моделью функционирования основных элементов КС в их взаимодействии.

Предложенный подход применяется для моделирования КС. Исследуется КС (рис.1) и процесс организации вызовов между абонентами сети 2-го и 4-го поколений с применением технологии CSFB и абонентами телефонной сети связи общего пользования (ССОП) в соответствии с диаграммой CSFB¹.

Для моделирования КС использовалась сеть ВСМР, содержащая 8 узлов и 1 виртуальный узел, являющийся источником заявок, приходящих в СеМО, и 20 классов заявок, рис.6. Узлы $i = 1,8$, соответствующие терминальному абонентскому оборудованию и ССОП, предполагались бесконечно-линейными $\bullet/G/\infty$.

Были рассмотрены следующие варианты КС.

Вариант 1 соответствует случаю, когда ресурсы BSS ограничены одной базовой станцией (БС) GSM BTS и одной БС LTE (eNodeB), зоны покрытия которых совпадают. Данный вариант показателен, если БС является «узким местом» КС, поэтому в качестве моделей БС сетей GSM и LTE (узлы $i = \{2,3\}$ СеМО) взята СМО $\bullet/G/1$. Элементы коммутационного ядра (узлы $i = \overline{4,7}$) могут моделироваться СМО $\bullet/G/\infty, IS$ в силу малой нагрузки, генерируемой абонентами одной БС.

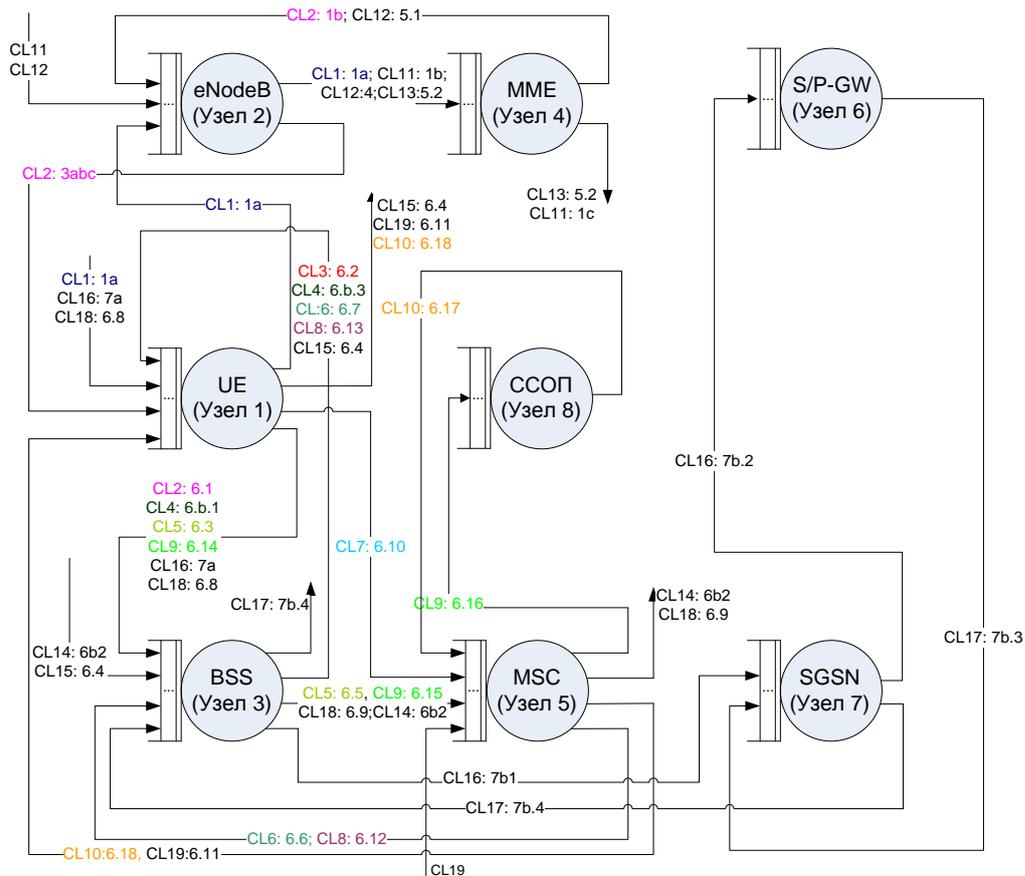


Рис. 6. СеМО для конвергентной сети 2-го и 4-го поколения и процесса вызова абонента LTE с использованием CSFB в сеть GSM без поддержки процедуры пакетного хендвера

¹ Представлена в документе ETSI TS 123 272 v. 10.6.0, ch. 6.3, fig 6.3.

Вариант 2 описывает ситуацию, в котором количество БС не ограничено, и потенциальным «узким местом» являются элементы коммутационного ядра. В качестве моделей узлов радиоподсистемы можно использовать СМО $\bullet/G/\infty$. Для моделирования узлов коммутационного ядра $i = \overline{4,7}$ можно использовать СМО $\bullet/G/1, PS$.

Вариант 3 рассматривает условия, аналогичные условиям варианта 2, но в предположении, что все узлы коммутационного ядра есть устройства с модульной архитектурой, поэтому в качестве узлов $i = \overline{4,7}$ рассмотрены СМО $\bullet/M/m, FCFS$; для остальных – СМО $\bullet/G/\infty, IS$.

Вариант 4 рассматривает случай, когда все элементы сети работают в сильно недогруженном режиме. Данный вариант необходим для оценки минимальных значений задержки при выполнении рассматриваемого процесса. В качестве всех узлов СеМО рассматриваются СМО типа $\bullet/G/\infty, IS$.

Для всех вариантов СеМО были выписаны уравнения баланса потоков, и после применения метода декомпозиции узлов с использованием принципа равнозначности классов заявок, были получены оценки для среднего времени V_I и V_{II} установления соединения вызова с обновлением местоположения (LAU, Location Area Update) и без обновления, соответственно:

– для варианта 1 существенным является только время осуществления исходящего вызова без использования LAU:

$$V_{II} = 6\mu_1^{-1} + 2(\mu_2^{-1} + w_2) + 5(\mu_3^{-1} + w_3) + \mu_4^{-1} + 4\mu_5^{-1} + \mu_8^{-1}, \quad (1)$$

– для варианта 2 и 3:

$$\begin{aligned} V_I &= 7\mu_1^{-1} + 2\mu_2^{-1} + 6\mu_3^{-1} + (\mu_4^{-1} + w_4) + 4(\mu_5^{-1} + w_5) + \mu_8^{-1}, \\ V_{II} &= 6\mu_1^{-1} + 2\mu_2^{-1} + 5\mu_3^{-1} + (\mu_4^{-1} + w_4) + 4(\mu_5^{-1} + w_5) + \mu_8^{-1}, \end{aligned} \quad (2)$$

– для варианта 4:

$$\begin{aligned} V_I &= 7\mu_1^{-1} + 2\mu_2^{-1} + 6\mu_3^{-1} + \mu_4^{-1} + 4\mu_5^{-1} + \mu_8^{-1}, \\ V_{II} &= 6\mu_1^{-1} + 2\mu_2^{-1} + 5\mu_3^{-1} + \mu_4^{-1} + 4\mu_5^{-1} + \mu_8^{-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где w_i – среднее время ожидания на узле i , $i = \overline{1,8}$. Для СМО $\bullet/G/\infty IS$ время ожидания нулевое по определению, для СМО $\bullet/G/1 PS$ $w_i = \frac{\rho_i}{(1-\rho_i)\mu_i}$, а для СМО

$$\bullet/M/m FCFS - w_{ik} = \frac{m_i^{m_i-1} \rho_i^{m_i}}{(1-\rho_i)\mu_{ik} m_i!} \left((1-\rho_i) \sum_{p=0}^{m_i-1} \frac{(m_i \rho_i)^p}{p!} + \frac{(m_i \rho_i)^{m_i}}{m_i!} \right)^{-1}.$$

Результаты численного анализа и сравнение их с данными о работе реальных сетевых элементов позволили заключить следующее: поведение БС лучше всего описывается СМО вида $\bullet/G/1 PS$, для узлов коммутационного ядра целесообразно использование СМО $\bullet/M/m FCFS$.

Также в главе 3 диссертационной работы исследуются СеМО с узлами типа $GI/G/m$ и $GI/G/\infty, IS$ в целях определения выражений для среднего времени установления соединения в КС. Система уравнений баланса потоков для такой СеМО будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 c_{a,i}^2 \lambda_i - \sum_{j \in N_m} \lambda_{ji} q_{ji} (1 - \rho_j^2) (c_{a,j}^2 - 1) = \\
 = \sum_{j \in N_m} \lambda_{ji} \left\{ \frac{q_{ji} \rho_j^2}{\sqrt{m_j}} (c_{s,j}^2 - 1) + 1 \right\} + \sum_{j \in N_{IS}} \lambda_{ji} \{ q_{ji} (c_{a,j}^2 - 1) + 1 \},
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $c_{a,i}$ – коэффициент вариации потока, входящего в i -й узел, $c_{d,i}$ – коэффициент вариации потока, исходящего из i -го узла, $c_{s,i}$ – коэффициент вариации времени обслуживания заявок в узле i ; q_{ij} , λ_{ij} – вероятность и интенсивность перехода из узла i в узел j , соответственно, ρ_i – коэффициент использования, N_{IS} – множество узлов, моделируемых СМО типа $GI/G/\infty$, IS, N_m – множество узлов, моделируемых СМО типа $GI/G/m_i$, где m_i , $m_i < \infty$.

Для определения средних временных характеристик использовались аппроксимации Крамера и Лангенбаха–Белтца – для СМО $GI/G/m$ при $m=1$, и Вайтта – при $m>1$. Расчетные формулы были получены для четырех вариантов СеМО: основного (узлы сети $i=1,8$ моделировались СМО $GI/G/\infty$, IS остальные СМО $GI/G/m$) и трех других, аналогичных по конфигурации КС вариантам 1, 2, 4, описанным выше.

Здесь приведем решение только для основного варианта:

$$\begin{aligned}
 V_I = 7\mu_1^{-1} + 2(\mu_2^{-1} + w_2) + 6(\mu_3^{-1} + w_3) + (\mu_4^{-1} + w_4) + 4(\mu_5^{-1} + w_5) + \mu_8^{-1}, \\
 V_{II} = 6\mu_1^{-1} + 2(\mu_2^{-1} + w_2) + 5(\mu_3^{-1} + w_3) + (\mu_4^{-1} + w_4) + 4(\mu_5^{-1} + w_5) + \mu_8^{-1},
 \end{aligned} \tag{5}$$

при $m=1$ для $i = \overline{2,7}$:

$$w_i = \frac{\rho_i (c_{a,i}^2 + c_{s,i}^2)}{2\mu_i (1 - \rho_i)} g(\rho_i, c_{a,i}, c_{s,i}), \quad g(\rho_i, c_{a,i}, c_{s,i}) = \begin{cases} \exp \left\{ -\frac{2(1 - \rho_i)(1 - c_{a,i}^2)^2}{3\rho_i (c_{a,i}^2 + c_{s,i}^2)} \right\}, & c_{a,i}^2 < 1 \\ \exp \left\{ -\frac{(1 - \rho_i)(c_{a,i}^2 - 1)^2}{c_{a,i}^2 + 4c_{s,i}^2} \right\}, & c_{a,i}^2 \geq 1 \end{cases}. \tag{6}$$

при $m>1$ (справедливо при $\rho_i \rightarrow 1$):

$$w_i(c_{a,i}^2, c_{s,i}^2, m_i / GI/G/m_i) = \left(\frac{c_{a,i}^2 + c_{s,i}^2}{2} \right) w_i(M/M/m_i), \quad i = \overline{2,7}. \tag{7}$$

Для $i=1,8$ основного варианта $w_i = 0$ по определению СМО $GI/G/\infty$, IS.

В **четвертой главе** проводится экспериментальное изучение КС и процессов передачи сигнальной информации в ней. В разделе 4.1 определяется целевая схема регистрации данных реальной сети для последующего ее применения в изучении потоков сообщений протокола SIP и задержек при их обработке на элементе SBC в КС. Основными критериями выбора системы сбора данных стали:

- возможность записи сообщений до и после элемента SBC без влияния на процесс установления соединения;
- достаточная для гарантирования отсутствия потерь производительность всех элементов системы сбора данных;
- решение проблемы синхронизации времени при использовании более чем одной точки сбора и записи информации.

Данные критерии позволили определить целевую систему для организации экспериментального исследования фрагментов КС и ее узлов.

В разделе 4.2 анализируются характеристики потоков сообщений протокола SIP в рамках организации сеансов между абонентами и контактными центрами (КЦ) обработки вызовов. Данная задача актуальна в свете тенденции к переводу КЦ на протокол SIP и необходимости подтверждения наличия потоков сигнальных сообщений высокой интенсивности в КС не обладающих свойством пуассоновости. Для исследования был выбран типовой участок сети оператора, использующего КЦ на основе протокола SIP рис.7. Потоки сообщений записывались в точке их агрегации – на транзитном SIP-прокси узле в течение 14 суток.

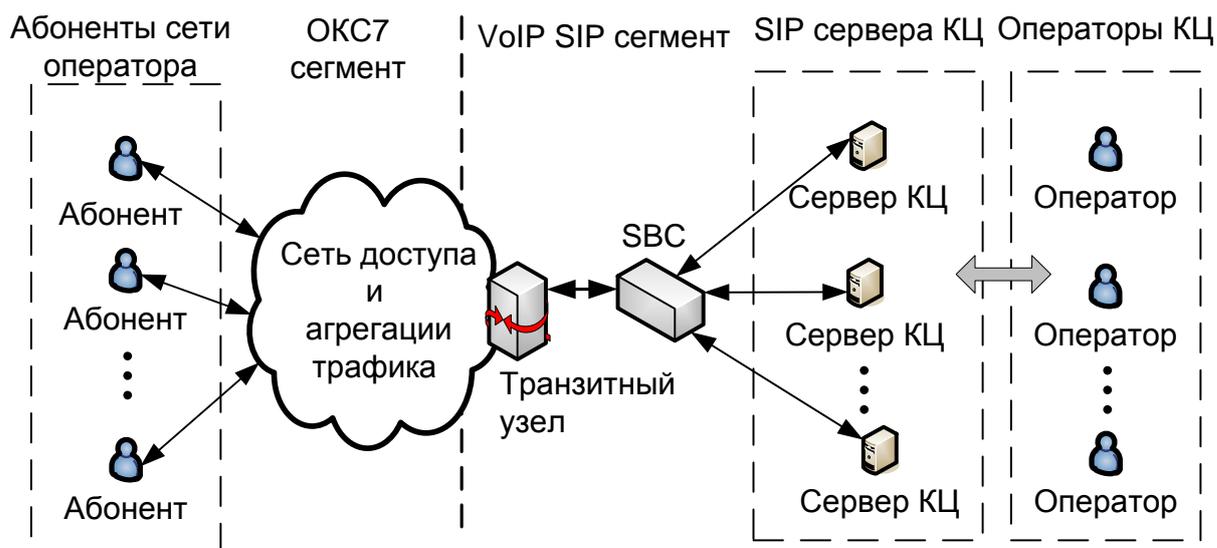


Рис. 7. Схема прохождения сигнального SIP трафика КЦ

Результатами статистического анализа полученной информации являлись:

- процент SIP сообщений по типам и направлениям (от КЦ и к КЦ) относительно общего количества SIP сообщений в исследуемой выборке;
- возможные сценарии установления вызовов и их процентная доля к общему количеству установленных за время наблюдения соединений;
- характеристики потока сообщений (среднее время между поступающими сообщениями, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации).

Результаты статистического анализа, представленные в четвертой главе диссертационной работы могут быть использованы при создании аналитических и имитационных моделей, прогнозов роста нагрузки на КЦ.

В приложениях приведены дополнительные материалы, акты об использовании результатов диссертационной работы, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013661814 РФ: МПК-2014.01 Н 04 Q 1/10 / Разумчик Р.В., Углов И.В.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена обобщенная аналитическая модель фрагмента MSC/VLR/HLR, позволяющая проводить анализ ВВХ основных элементов коммутационного ядра КС, таких как MSC, VLR, HLR, HSS. Даны рекомендации по выбору емкостей БН, позволяющие снизить потери при обработке сигнальных сообщений. Получено соотношение, позволяющее определить производительность каждого элемента исследуемого фрагмента и обеспечить равномерную их загрузку.
2. Предложена обобщенная аналитическая модель фрагмента КС Р-И/СSC с двумя независимыми БН для приоритетных и неприоритетных заявок, соответственно, от надежных и ненадежных источников с механизмом порогового контроля интенсивности поступающего потока. Анализа численных результатов позволил сформулировать рекомендации по выбору порогового параметра управления сценариями обработки заявок, что при незначительном росте вероятности потерь ПЗ обеспечивает повышение вероятности простоя системы при неизменной интенсивности входящего потока.
3. Предложен механизм формализации задачи моделирования процессов сигнального обмена в КС, с его помощью построена СеМО ВСМР типовой КС и исследован процесс организации исходящего голосового вызова из сети LTE с применением технологии CSFB. Получены расчетные формулы для средних задержек при установлении соединения и времени ожидания в очереди, что может использоваться при проектировании КС. Разработаны рекомендации по выбору СМО для моделирования основных элементов КС. Для построенной СеМО ВСМР исследуется также случай, когда в качестве узлов сети рассматриваются СМО общего вида $GI/G/1$, $GI/G/m$ и $GI/G/\infty$, для которого получены значения средних времен установления соединения и ожидания на узле, что позволяет применять полученные результаты для КС, в которых существуют потоки сообщений не пуассоновского вида.
4. Проведено исследование проблем, возникающих при организации систем сбора данных о трафике в процессе проведения измерений в КС, находящейся в коммерческом использовании. Определены основные схемы организации измерений, отмечены особенности и даны рекомендации к применению. Использование результатов анализа позволило организовать систему сбора данных в КС одного из российских операторов без влияния на качество устанавливаемых соединений.
5. Проведены измерения для потоков сигнальных сообщений SIP в точке их агрегации между абонентскими сетями и КЦ. Определены основные статистические характеристики потоков сообщений, установлены сценарии установления соединений, состав по типам сообщений, что позволило подтвердить наличие в КС потоков сообщений высокой интенсивности не пуассоновского вида. Результаты этого исследования могут использоваться при выборе характеристик входящих потоков при аналитическом моделировании КС.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях из списка ВАК

1. Ефимушкин В.А., Углов И.В. Архитектура QoS для конвергентных сетей и особенности ее применения // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2010. – № 7. – С. 162-163.
2. Ефимушкин В.А., Углов И.В. Механизмы взаимодействия функциональных элементов конвергентной сети при предоставлении инфокоммуникационных услуг // Электросвязь. – 2010. – № 8. – С. 29-32.
3. Углов И.В. Перспективы создания виртуальных конвергентных сетей // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2012. – № 7 – С. 215-218.
4. Углов И.В. Методология организации измерения временных характеристик VoIP сети. // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2012. – № 7. – С. 211-214.
5. Ефимушкин В.А., Углов И.В. Анализ задержек обработки сообщений протокола SIP-I в оборудовании ИВС // Электросвязь. – 2013. – № 1. – С. 37-43.
6. Углов И.В. Оптимизация маршрутов прохождения голосового трафика при предоставлении NGN-услуг в распределенных сетях доступа // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2013. – № 11.– С. 158-160.
7. Абаев П.О., Разумчик Р.В., Углов И.В. Анализ модели SIP-трафика контактного центра по результатам обработки данных сетевых измерений // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2013. – № 11. – С. 4-10.
8. Углов И.В. Исследование вероятностно-временных характеристик организации вызовов в конвергентных сетях LTE/GSM с использованием технологии CSFB // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2014. – № 5. – С. 56-62.

В других изданиях

9. Углов И.В. Исследование архитектур конвергентных сетей общего пользования // В кн.: Труды II Отраслевой научной конференции «Технологии информационного общества», 13-15 февраля 2008 г. – М.: МТУСИ, 2008. – С. 90-93.
10. Углов И.В. Сравнительный анализ сценариев функционального взаимодействия элементов конвергентной сети // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2009. – Спецвыпуск, часть 1. – С. 29-31.
11. Ефимушкин В.А., Углов И.В. Анализ сценариев взаимодействия функциональных элементов конвергентной сети при предоставлении различных услуг // В кн.: Материалы 4-й ежегодной конференции «Конвергенция в телекоммуникациях», 7 октября 2010 г. – М., Экспо-Телеком, 2010. – С. 23.

12. Abaev P., Razumchik R., Uglov I. Statistical analysis and modeling of SIP traffic for parameter estimation of server hysteretic overload control // *Journal of Telecommunications and Information Technology*. – 2013. – № 4. – Pp.22-31.
13. Abaev P., Razumchik R., Uglov I. Some results of measurement based statistical analysis of SIP traffic // В кн.: Тр. 17-й Международной конференции «Распределенные компьютерные и коммуникационные сети: управление, вычисление, связь», 7-10 октября 2013 г, ИПУ РАН. – М.: ИПУ РАН, 2013. – С.226-230.
14. Программа обработки данных SIP трафика, определения последовательностей сообщений в рамках установления соединения и частоты их появления: свидетельство 2013661814 РФ: МПК-2014.01 Н 04 Q 1/10 / Разумчик Р.В., Углов И.В.; правообладатель: ФГБУН ИПИ РАН. – № 2013619644; заявл. 24.10.2013; дата гос. рег. 16.12.2013; опубл. 20.01.2014.
15. Abaev P., Razumchik R., Uglov I. Statistical analysis of message delay in SIP proxy server // *Journal of Telecommunications and Information Technology*. – 2014. – № 4. – Pp.1-9.
16. Углов И.В. Модели функционирования узлов конвергентной сети при обработке сигнальной информации. [Электронный ресурс] / Научно-просветительский портал «Академия современных инфокоммуникационных технологий», ЭЛ № ФС 77-50669. – Режим доступа: http://www.acikt.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/OP.16.pdf (дата обращения 04.11.2014). – 47 с.
17. Ефимушкин В.А., Углов И.В. Моделирование процессов управления исходящими голосовыми вызовами в сетях LTE с использованием технологии CSFB в GSM // В кн.: Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. – 2014. – С. 8674-8685.

Иван Валерьевич Углов (Россия)

Разработка обобщенных аналитических моделей процессов сигнального обмена в конвергентной сети

В диссертационной работе проведено исследование конвергентных сетей и их фрагментов, а также потоков сигнальных сообщений в них. Предложены и исследованы обобщенные аналитические модели обработки потоков сигнальных сообщений в конвергентных сетях, разработано программное обеспечение. Проведенное исследование позволило проанализировать зависимости вероятностно-временных характеристик от нагрузочных и системных параметров узлов конвергентной сети и ее фрагментов, оценить эффективность процедур работы узлов сети и выработать рекомендации по ее повышению.

Ivan V. Uglov (Russia)

Development of generalized analytical models of signal exchange processes in converged networks

This thesis studies converged networks and their fragments, and signaling flows in them. There were proposed and researched generalized analytical models of processing signaling messages flows in the converged networks, software was developed too. The study allowed analyzing the dependence of probability-time characteristics of the load and system parameters of converged network nodes, network fragments, to estimate efficiency of the mechanisms of the network nodes performance and to make recommendations on its rise.

Подписано в печать __. __. 2015. Формат 60390 1/16. Бумага 80 г/м²
Гарнитура «Times New Roman». Ризография. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство ООО «ИнСвязьИздат».
111024, Москва, ул. Авиамоторная, дом 8.