

На правах рукописи

Редругина Наталия Михайловна

**Модели и методы оценки характеристик телекоммуникационных  
комбинированных слабосвязанных услуг**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре инфокоммуникационных систем.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Зарубин Антон Александрович**

Официальные  
оппоненты: **Кучерявый Евгений Андреевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Московский институт  
электроники и математики, профессор

**Маркелов Олег Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра  
радиотехнических систем, доцент кафедры

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»,  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 29 ноября 2023 года в 16.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте [www.sut.ru](http://www.sut.ru).

Автореферат разослан 29 сентября 2023 года.

И.о. ученого секретаря  
диссертационного совета 55.2.004.01,  
д-р техн. наук, доцент

А.И. Парамонов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** В современном информационном обществе, где пользователи ожидают высокое качество предоставления услуг, разработка методов повышения эффективности телекоммуникационных сетей и систем становится особенно важной задачей. Рост разнообразия и увеличение глубины проникновения информационно-телекоммуникационных услуг сопровождается развитием их концепций и технологических решений, а также совершенствованием подходов к их проектированию и разработке. Эти процессы обусловлены, в том числе, увеличением объемов данных, повышением требований к функциональности, масштабируемости, надежности, безопасности и удобству использования телекоммуникационных услуг.

Распределенные системы, в том числе системы, основанные на микросервисной архитектуре (МСА), становятся все более востребованными при проектировании и развертывании высоконагруженных информационных комплексов. Вместе с тем, применение таких систем требует специальных исследований, особенно в части их временных характеристик и производительности, чтобы обеспечить эффективное соотношение уровней затрат и удовлетворения пользователей от предоставления телекоммуникационных услуг.

В этом смысле, решение задач проектирования, разработки и предоставления современных телекоммуникационных услуг требует применения инструментов моделирования для прогнозирования характеристик услуг и, более того, может предполагать создание специальных цифровых двойников для систем предоставления цифровых услуг.

В свою очередь, эффективность предоставления телекоммуникационных услуг является совокупностью критериев и параметров, которые могут быть оценены с точек зрения конечных пользователей и поставщиков услуг, создаваемых и предоставляемых на глобальных рынках с различающимися условиями соглашений об уровне обслуживания (SLA).

Эти тезисы свидетельствуют об актуальности исследований, связанных с оценкой качественных характеристик телекоммуникационных услуг на всех этапах их проектирования, разработки и предоставления. В связи с этим в диссертационной работе исследуются модели и методы оценки временных характеристик телекоммуникационных услуг с учетом различных

архитектурных подходов к их реализации. Особое внимание уделяется микросервисной архитектуре и её влиянию на эффективность предоставления услуг.

**Степень разработанности темы.** Телекоммуникационные сети и их операторы переживают очередную активную фазу роста количества и разнообразия услуг, их разработчики и научное сообщество активно публикуют научные работы, посвященные анализу вероятностно-временных характеристик (ВВХ) различных архитектурных и функциональных решений, в том числе современным микросервисным архитектурам высоконагруженных систем. На данный момент множество ученых обратились к тематике моделирования услуг инфо- и телекоммуникаций, среди них можно выделить работы авторов Б.С. Гольдштейна, А.Е. Кучерявого, А.Б. Гольдштейна, А.А. Зарубина, К.Е. Самуйлова, М.А. Шнепс-Шнеппе, В.И. Вишневого, Р.В. Киричка и А.И. Парамонова.

Множество статей, научных публикаций и диссертаций посвящены исследованию производительности и повышению эффективности телекоммуникаций в различных областях их применения. Однако, существующие исследования оставляют место для дальнейшей проработки определенных аспектов, таких как анализ требований к архитектурным решениям, сравнение различных сценариев реализации процесса предоставления услуги, получение качественных характеристик методами математического и имитационного моделирования для принятия обоснованных решений на этапах создания телекоммуникационных услуг.

Представленная диссертационная работа реализует важное дополнение к существующей литературе в области анализа телекоммуникационных услуг и инфокоммуникационных систем. Она фокусируется на исследовании временных характеристик и производительности при различных архитектурных подходах, включая микросервисную архитектуру. Использование имитационного моделирования дает возможность получить более точные результаты для различных сценариев работы систем. Полученные результаты могут служить основой для принятия обоснованных решений по управлению качественными и количественными показателями на всех этапах проектирования и эксплуатации телекоммуникационных услуг, что вносит значительный вклад в развитие данной области.

**Объект и предмет исследования.** *Объектом исследования* являются телекоммуникационные слабосвязанные комбинированные услуги обслуживания пользовательских сеансов и реализации транзакционных рабочих процессов, разрабатываемые на микросервисной архитектуре. *Предметом исследования* являются модели и методы оценки вероятностно-временные характеристики различных сценариев реализации рабочих процессов транзакционных услуг и пользовательских сеансов.

**Научная задача.** Разработка моделей и методов их применения для оценки характеристик слабосвязанных услуг с целью повышения качества обслуживания и возможности принятия обоснованного решения, по управлению количественными показателями систем.

**Цель и задачи исследования.** *Цель диссертации* состоит в повышении эффективности проектирования и предоставления телекоммуникационных услуг путем применения новых моделей и методов расчета временных характеристик систем обслуживания пользовательских сеансов и рабочих процессов в микросервисных архитектурах.

Для достижения поставленной цели в работе были поставлены следующие задачи:

- 1) Разработка модели оценки временных характеристик услуг, реализующих поддержку пользовательских сеансов.
- 2) Разработка модели для расчета вероятностно-временных характеристик рабочих процессов транзакционных услуг с параллельной обработкой запросов.
- 3) Разработка модели с применением методов аппроксимации для расчета вероятностно-временных характеристик сетей систем общего вида  $G/G/1$ .
- 4) Разработка методов расчета вероятностно-временных характеристик комбинированных слабосвязанных услуг.
- 5) Разработка комплекса имитационных моделей и библиотеки структурных элементов для апробации и расчета характеристик услуг.

**Научная новизна результатов** исследования обусловлена:

– новым подходом к моделированию телекоммуникационных услуг с разделением их на услуги реализующие пользовательские сеансы и рабочие процессы выполнения транзакций, а также их интеграция в комбинированные телекоммуникационные услуги.

– разработкой моделей для расчета характеристик последовательных сетей систем, реализующих рабочие процессы транзакционных слабосвязанных услуг с внедрением математического аппарата параллельной обработки запросов Fork-Join в том числе систем произвольного вида систем G/G/1.

– внедрением оригинального метода аппроксимации для определения характеристик выходного потока в сетях системах произвольного вида G/G/1, для моделирования последовательных сетей систем массового обслуживания.

– отсутствием аналогов разработанного комплекса имитационных моделей, в том числе для оценки характеристик системы параллельной обработки запросов Fork-Join для коэффициента репликации более двух.

### **Теоретическая и практическая значимость**

*Теоретическая значимость* работы состоит в разработке метода применения моделей для оценки вероятностных характеристик сценариев рабочих процессов транзакционных услуг с применением аппарата параллельной обработки, в применении методов аппроксимации для определения верхних и нижних границ временных характеристик рабочих процессов в последовательных сетях систем произвольного вида и синтеза с инструментами имитационного моделирования, для комплексного анализа систем. В разработке модели на базе математического аппарата сетей Джексона для оценки характеристик многопользовательских услуг, поддерживающих пользовательские сеансы, а также для их синтеза в рамках комбинированных услуг.

*Практическая значимость* работы заключается в разработке методов применения математических и комплекса имитационных моделей для расчета вероятностно-временных характеристик, которые могут быть внедрены в основу подхода к планированию и проектированию, с разработкой требований к предоставлению телекоммуникационных слабосвязанных услуг, основанного на оригинальных моделях, полученных в целях прогнозирования и повышения эффективности качественных характеристик.

**Методология и методы исследования.** Выполненные в работе исследования основаны на положениях теории массового обслуживания, теории вероятностей и математической статистики, методах гибридного (имитационно-аналитического) моделирования дискретных событийных систем. Разработка семейства имитационных моделей, выполненных с использованием

программного обеспечения Anylogic. Расчет сложных математических моделей и результатов аппроксимации были реализованы на ПО Mathcad.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Эффективный метод применения разработанных моделей расчета временных характеристик при предоставлении телекоммуникационных комбинированных слабосвязанные услуг.

2. Модели для расчёта временных характеристик транзакционных услуг с параллельной обработкой запросов, эффективны для систем с экспоненциально распределенными процесса поступления и обслуживания, с величиной расхождения не более 1% между имитационным моделированием и аналитическим расчётом. Разработанные модели так же эффективны для расчёта сетей систем произвольного вида G/G/1.

3. Комплекс имитационных моделей сеансовых услуг и элементов рабочих процессов транзакционных услуг, обеспечивающий выявление искомых временных характеристик в условиях не экспоненциального характера протекающих процессов в моделируемых системах.

**Степень достоверности и апробация результатов.** *Достоверность полученных результатов* подтверждена результатами аналитических расчётов и имитационного моделирования. Результаты, полученные в ходе выполнения исследования, не противоречат ранее полученным данным, опубликованным в открытых источниках.

*Апробация работы.* Результаты работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО). (Санкт-Петербург, 2021, 2022).

*Публикации.* По теме данной диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, в том числе в 4 работы в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень, рекомендованный ВАК при Минобрнауки России, 4 в других изданиях и материалах конференций. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Диссертационная работа соответствует пунктам 1, 2, 4 и 5 паспорта научной специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций. Проведенные исследования соответствуют формуле специальности.

**Личное участие соискателя.** Все научные результаты получены соискателем лично.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (всего 145 источников) и 1 приложения. Общий объем работы – 153 страниц, включающих 120 страниц основного текста, 65 рисунков, 2 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится обоснование актуальности выбранной темы диссертационного исследования и степень её разработанности, сформулированы цель, задачи и положения, выносимые на защиту, описывается новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

**В первой главе** сформулирована проблематика данной работы следующим образом: важно не только обеспечить высокое качество базовых услуг сети, но также необходимо обеспечить высокое качество услуг, которые используют сетевую инфраструктуру что позволить полностью реализовать преимущество новых технологий.

В процессе эволюции сетей связи наблюдается положительная корреляция между их пропускной способностью и функциональностью их услуг. Функциональность, в свою очередь, оказывает влияние на требования, предъявляемые к разработке системы их предоставления. При этом сложность архитектуры возрастает с увеличением характеристик, необходимых для удовлетворения этих требований.

Для решения поставленных в работе задач необходимо выполнить следующие этапы: этап 1 – анализ требований, этап 2 – выбор соответствующих методов моделирования, этап 3 – создание семейства моделей с учетом слабой связи между структурными

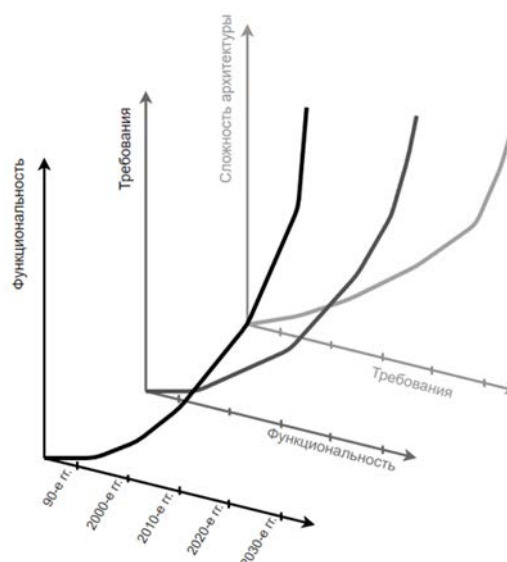


Рисунок 1 – Проблематика разработки телекоммуникационных услуг



элементами, этап 4 – оценка и валидация разработанных моделей, этап 5 – прогнозирование и анализ характеристик.

Для решения поставленной научной задачи и достижения цели работы, была представлена следующая структура диссертационной работы (рисунок 2), с учетом необходимости применения гибридных имитационно-аналитических моделей для оценки получения комплексного решения для оценки качественных характеристик моделируемых услуг

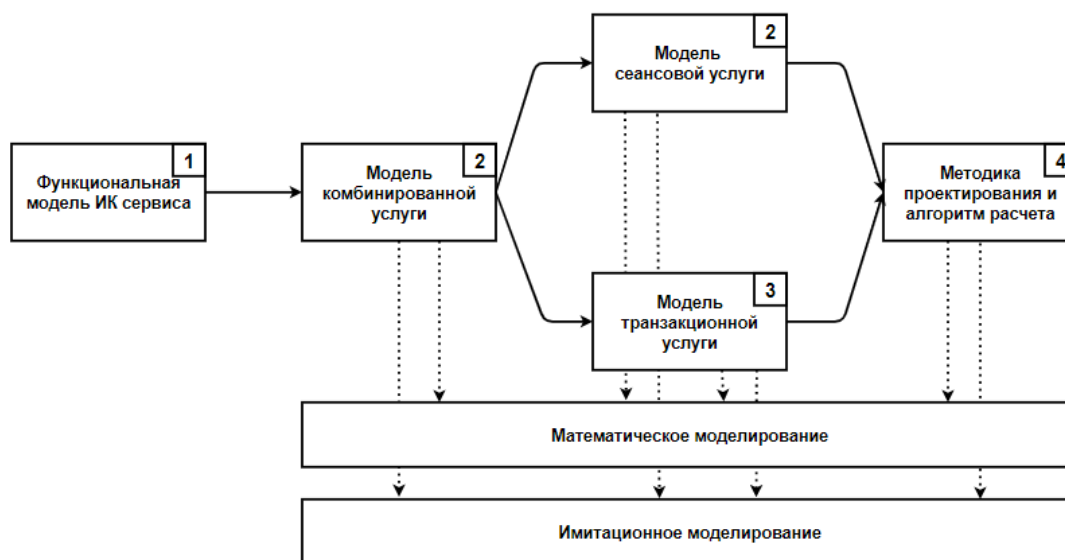


Рисунок 2 – Структура диссертационной работы

Для выбора правильной стратегии моделирования предложена классификация телекоммуникационных услуг и анализ микросервисной архитектуры и её особенностей для дальнейшего моделирования. Введено понятие «слабосвязанные сервисы в ограниченном контексте» для описания микросервисов, которое в контексте данной работы определяет элементы структуры сервисов и услуг построенных на микросервисной архитектуре, а также описан принцип построения рабочих процессов как на (рисунок 3).

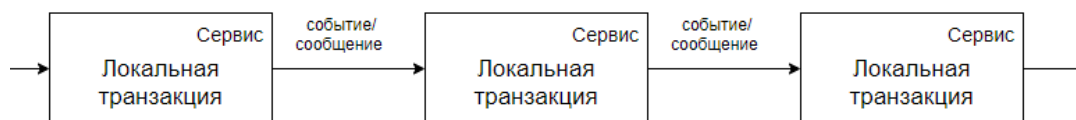


Рисунок 3 – Шаблон проектирования рабочего процесса в микросервисной архитектуре

**Во второй главе** предложен подход к разделению услуг на сеансовые (SE) и транзакционные (TR), в зависимости от типа взаимодействия между пользователем и системой. Основное различие заключается в подходе к обеспечению требований по качеству обслуживания, таких как время

предоставления услуги, возможность масштабирования и увеличения производительности системы. Для SE-услуг необходимо грамотное распределение серверных ресурсов и возможность дальнейшего масштабирования, для транзакционных услуг необходима высокая производительность, и возможность изменения характеристик программно-аппаратных средств.

Сервис может предоставлять несколько услуг различного типа в рамках единой инфраструктуры. При этом, данные услуги могут взаимодействовать друг с другом и образовывать комбинированные услуги, которые могут являться более функциональными и удобными для конечного пользователя.

В работе проведено моделирование сеансовой услуги, которое включает в себя использование математического аппарата сетей Джексона.

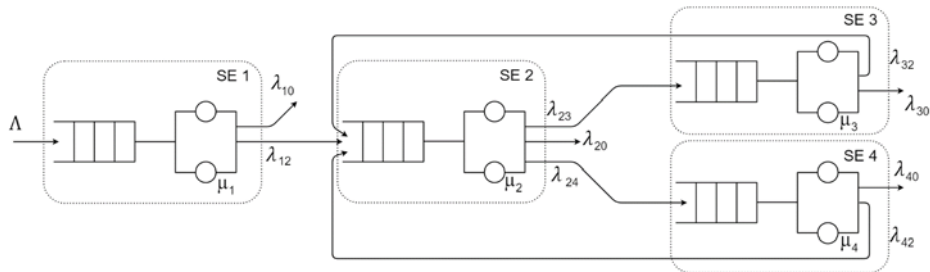


Рисунок 4 – Математическая модель сеансовой услуги

Полученные данные позволяют определить интенсивности входных потоков систем массового обслуживания (СМО),  $\lambda_i = \Lambda \times a_i$ , которые, в свою очередь, необходимы для оценки качества функционирования рассматриваемых телекоммуникационных услуг, за счет получения таких выходных характеристик как: коэффициенты загрузки узлов сети СМО  $\rho_i$ , средняя длина очереди  $L_i$  и время ожидания  $W_i$ .

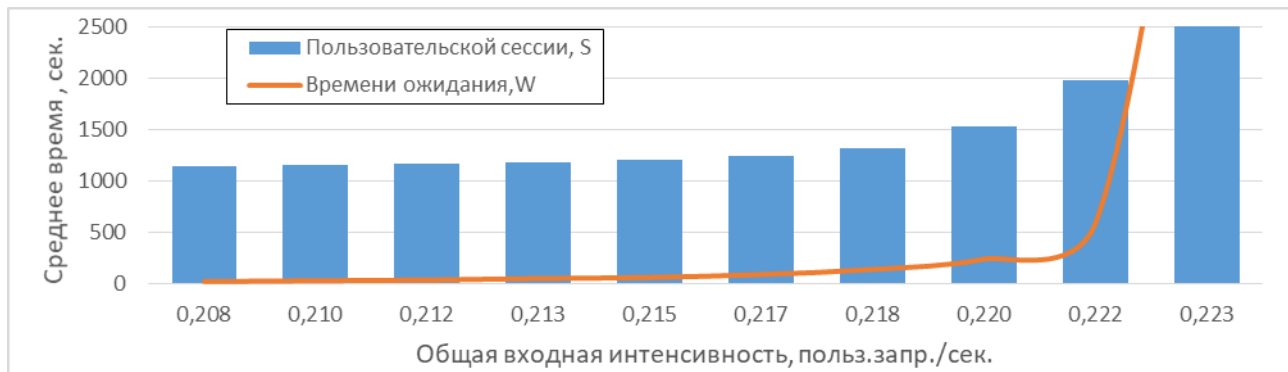


Рисунок 5 – Оценка временных характеристик сети СМО

Для оценки влияния структуры сети систем массового обслуживания и количественных параметров её элементов был проведен ряд экспериментов, в которых сравнивались временные характеристики пользовательских сеансов при изменении общей входной интенсивности запросов на обслуживание и горизонтальном масштабировании систем для профилактики возникновения высоконагруженных узлов – «узких мест».

Результаты проведенного моделирования позволяют сделать вывод о том, что для обеспечения высокого уровня качества обслуживания для пользовательских сессий необходимы грамотное распределение серверных ресурсов и возможность дальнейшего горизонтального масштабирования – увеличения серверных ресурсов как системы в целом, так и её элементов.

Результаты, полученные в данной главе, указывают на зависимость качества обслуживания пользовательских сессий от временных задержек в рассматриваемых узлах.

**В третьей главе** рассматриваются вопросы моделирования рабочих процессов в сценариях транзакционных слабосвязанных услуг, с возможностью внедрения математического аппарата параллельной обработки запросов Fork-Join. Рабочий процесс описывает сценарий обслуживания запроса цепочкой локальных транзакций, т.е. последовательное выполнение действий для решения поставленной задачи. Транзакция — это логическая единица работы в указанном рабочем процессе. Обладает свойствами атомарности, согласованности, изолированности, устойчивости, которые повторяют отличительные особенности микросервисов, что позволяет утверждать о рациональности

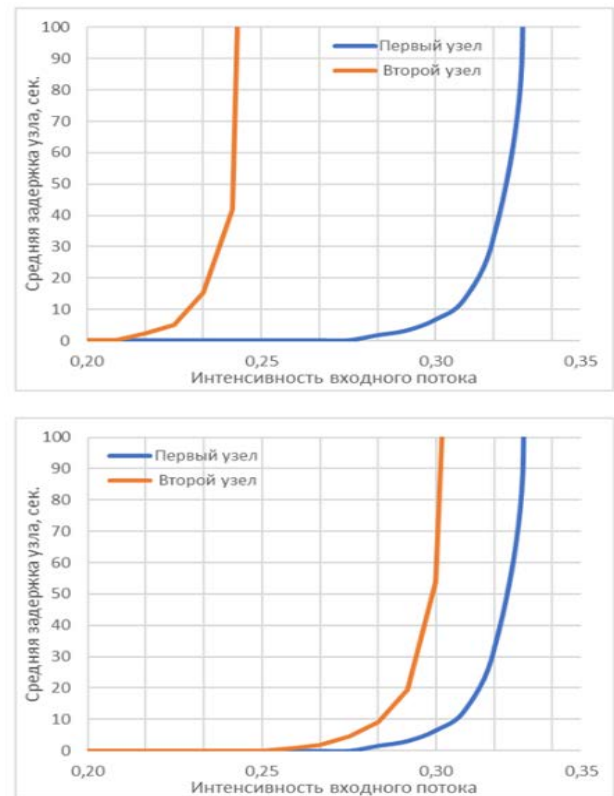


Рисунок 6 – Графики значений средних задержек для первого и второго узла в СеМО для разных вероятностей переходов  $p_{j2} = 0,4$  и  $0,2$

использования данных моделей слабосвязанных структур для расчета характеристик услуг разработанных на микросервисной архитектуре.

В данной работе были определены структуры, включающие параллельную обработку запросов. Отказоустойчивый и спекулятивный параллелизм, а также инструмент параллельного обслуживания Fork-Join, которые позволяют реализовывать идеи *эквивалентности* микросервисов.

Так для систем параллельной обработки Fork-Join было получено выражение для ПРВ времени параллельной обработки двумя системами типа М/М/1 и имитационная модель для оценки характеристик системы параллельной обработки запросов Fork-Join для коэффициента репликации ( $N > 2$ ).

$$f_{FJ2}(s) = \frac{8\mu^3 - 16\lambda\mu^2 + (\lambda s + 8\lambda^2)\mu - \lambda^2 s}{4\mu(\mu + s - \lambda)(2\mu + s - 2\lambda)}. \quad (1)$$

Для последовательной цепочки возможно использования свойства сцепления и преобразования сети систем в один эквивалентный узел с ФРВ времени прохождения  $F_x(t)$ .

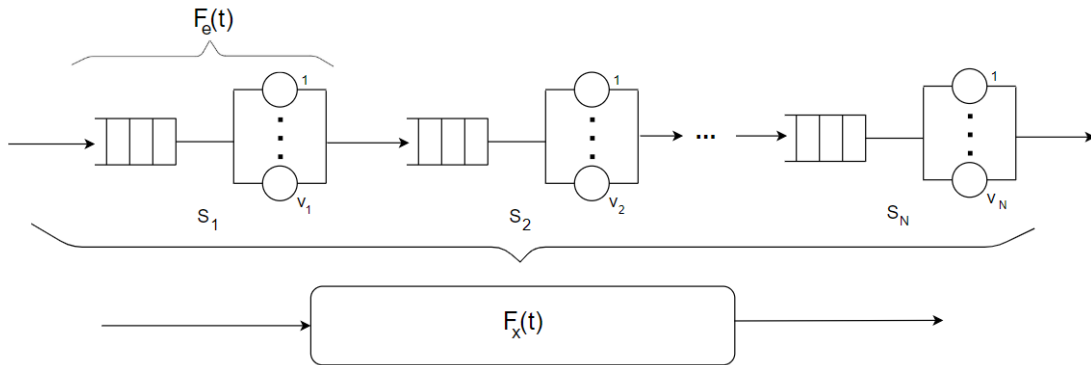


Рисунок 7 – Модель цепочки локальных транзакций в рабочем процессе услуги

ФРВ времени реализации рабочего процесса определяется сверткой ФРВ времени нахождения в каждой СМО:

$$F_x(t) = F_{e1}(t) * F_{e2}(t) * F_{e3}(t) * \dots * F_{eN}(t). \quad (2)$$

Для расчета ФРВ времени окончания обслуживания необходимо так же использовать процедуру свертки ФРВ времени ожидания и времени обслуживания:

$$F_e(t) = F_w(t) * F_s(t). \quad (3)$$

Для оценки применимости предложенной модели проведен расчет рабочего процесса последовательной цепочки с внедрением элемента параллельного обслуживания ForkJoin.

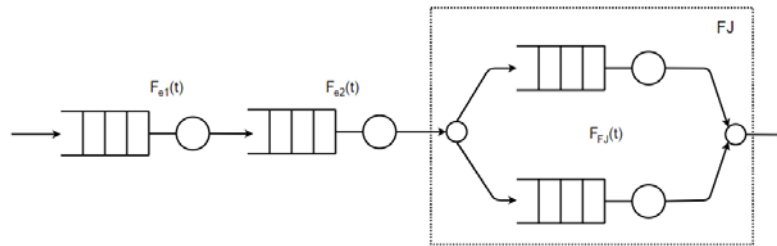


Рисунок 8 – Модель рабочего процесса с параллельной обработкой запроса

Так плотность распределения вероятности времени прохождения запросом цепочки рис. последовательных систем М/М/1 определяется выражением:

$$f_x(t) = \frac{1}{8\mu} \times (\mu - \lambda) * e^{t(\lambda-\mu)} \times (4\lambda^2 t + \lambda^3 * t^3 - 6\lambda^2 t^2 \mu - 15\lambda t^2 \mu^2 - 4\lambda e^{t(\lambda-\mu)} + 12\lambda t \mu - 16\mu e^{t(\lambda-\mu)} + 4\lambda + 8t^2 \mu^3 - 16t \mu^2 + 16\mu. \quad (4)$$

Получены ПРВ возможных сценариев работы системы и проведена оценка точности математической модели с помощью аппарата имитационного моделирования.

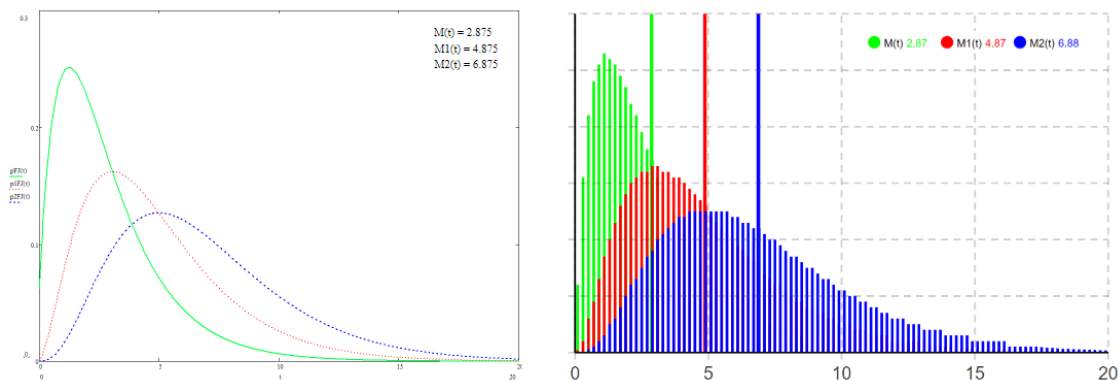


Рисунок 9 – Результаты математического и имитационного моделирования

Следует отметить, что по результатам проведенного моделирования и оценки результатов изменения количественных параметров системы был сделан вывод о том, что для улучшения временных характеристик транзакционных услуг эффективным является метод *вертикального масштабирования* – увеличение пропускной способности, иначе говоря манипуляция программными аппаратными характеристиками.

Моделирование последовательной сети систем произвольного вида G/G/1 требует решения следующих задач:

*Аппроксимация сложных распределений и экспериментальных данных* для последующего применения в процедурах расчета, а также оценка аппроксимационных моделей критериями точности и сложности.

Были предложены различные методы аппроксимации позволяющие обойти сложности при аналитическом моделировании и при математических расчетах цепочек систем массового обслуживания. Так для распределений с «длинными хвостами» таких как Парето и Вейбулла-Гнеденко, которые трудно поддаются анализу предложена аппроксимация гиперэкспоненциальным распределением. Так же для процессов в которых ФРВ не определена в явном виде возможно использование ступенчатой функции и эмпирического метода, данные процессы зачастую формируются при оценке реальных данных на этапе проектирования телекоммуникационных услуг.

*Расчет ФРВ времени ожидания в СМО произвольного типа*

Для систем произвольного типа было использовано спектральное решение интегрального уравнения Линдли.

$$W(y) + W_-(y) = \begin{cases} \int_{-\infty}^y W(y-u)dC(u) & y \geq 0, \\ 0 & y < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Данное уравнение решается при переносе получившихся нулей и полюсов, полученных при построении графиков функции 3.26, на комплексную плоскость.

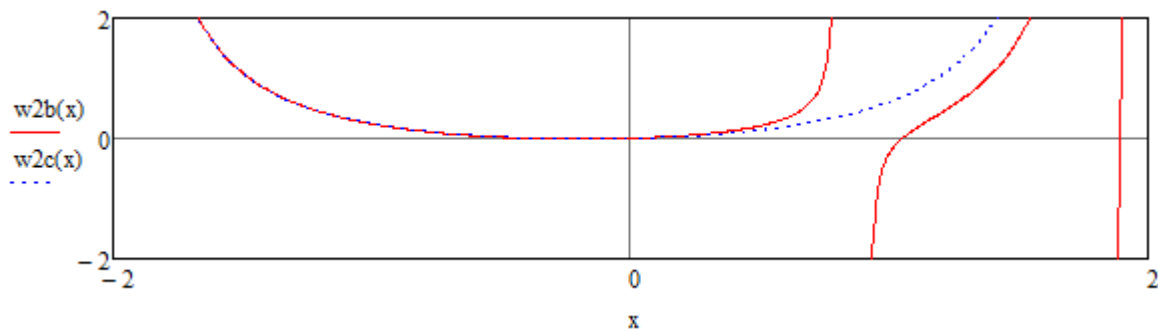


Рисунок 10 – Графики искомых функции

Решение для ФРВ времени ожидания, заданное выражением:

$$W(t) = 1 - \left(1 - \frac{x}{\mu}\right) e^{-xt}, \quad t \geq 0, \quad (6)$$

где  $x = \mu \times \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\Psi_+(s)}{s}$ .

В области высоких значений времени ожидания при  $\rho \approx 1$ :

$$W(t) \approx 1 - \exp\left(-\frac{2\bar{t}(1-\rho)}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} t\right), \quad (7)$$

где  $\sigma_a^2$  – дисперсия времени поступления запросов,  $\sigma_b^2$  – дисперсия времени обслуживания,  $\rho$  – коэффициент загрузки.

Однако вопрос применения данного подхода в расчете цепочки локальных транзакций формирует проблему, связанную с определением ФРВ времени между поступлением запросов на последующие узлы  $j$  ( $j = 2 \dots Y$ ) в последовательной сети систем.

*Расчет характеристик выходного потока*

Так для последовательных цепочек систем произвольного типа важно определить характеристики выходного потока. Точного общего решения для таких систем при разных значениях нагрузки нет. Основой для оценки данной временной характеристик было выражение преобразование Лапласа-Стилтьеса ФРВ выходного потока  $D(s)$  с неопределенным параметром  $\Gamma(s)$  определяющим время до поступления следующего требования в систему – время простоя. При анализе доступных методов оценки было выбрано два метода аппроксимации искомой величины:

*Метод «b»* для определения выходного потока:

$$D(s) = (1 - \rho)\Gamma(s)B(s) + \rho B(s), \quad (8)$$

где  $B(s)$  – ПЛС ФРВ времени обслуживания,  $\Gamma(s) = A(s)$  – ПЛС ФРВ времени между поступлением запросов

*Метод «с»* для определения ПЛС ФРВ остаточного времени:

$$\Gamma(s) = \begin{cases} \frac{1 - I_a(s)}{s\bar{x}} & \text{при } \rho \leq 0,5, \\ \frac{1 - B(s)}{s\bar{m}} & \text{при } \rho > 0,5, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\bar{m}$  – среднее время обслуживания,  $I_a(s)$  – аппроксимация ПЛС ФРВ остаточного времени  $A(s) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + s}$ ,  $\varepsilon = 1/\bar{x} = 1/(\bar{t} - \bar{m})$ ,  $\bar{x}$  – среднее значение остаточного времени,  $\bar{t}$  – среднее время между поступлением запросов.

Данные методы позволяют реализовать модель оценки верхней и нижней границы временных характеристик рабочих процессов транзакционных услуг как на рисунке 11.

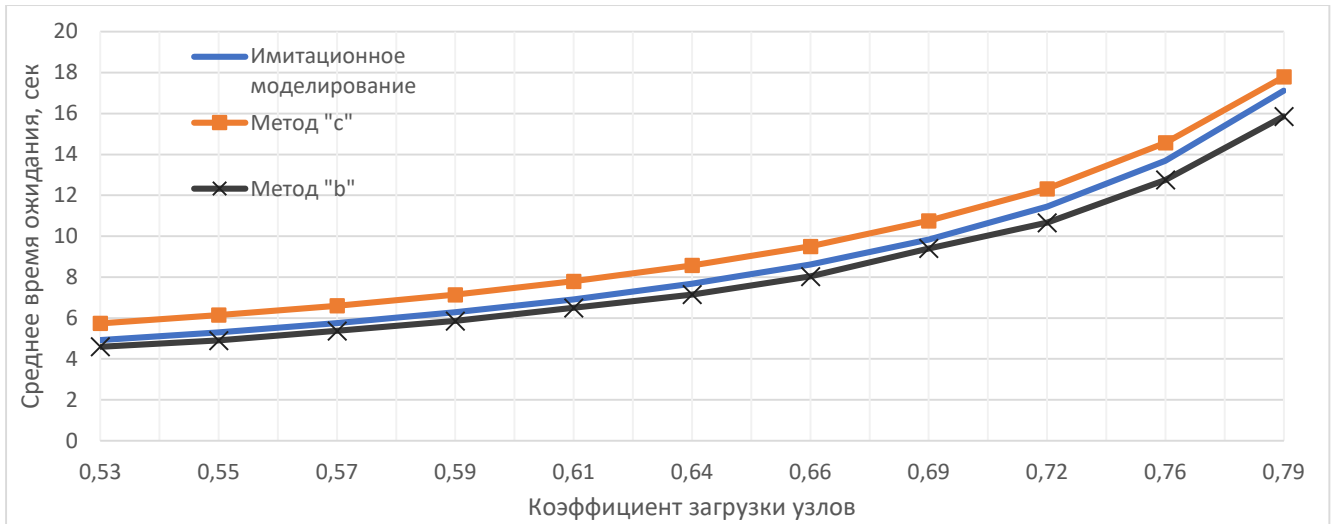


Рисунок 11 – Оценка задержки для средних значений нагрузки

Полученные результаты характеризуются значениями ошибки аппроксимации для метода «б» постоянными в границах 6–8%, а для метода «с» более высокими значениями ошибки на средних значениях и уменьшающейся с увеличением коэффициента загрузки систем, что обусловлено выражением для оценки выходного потока.

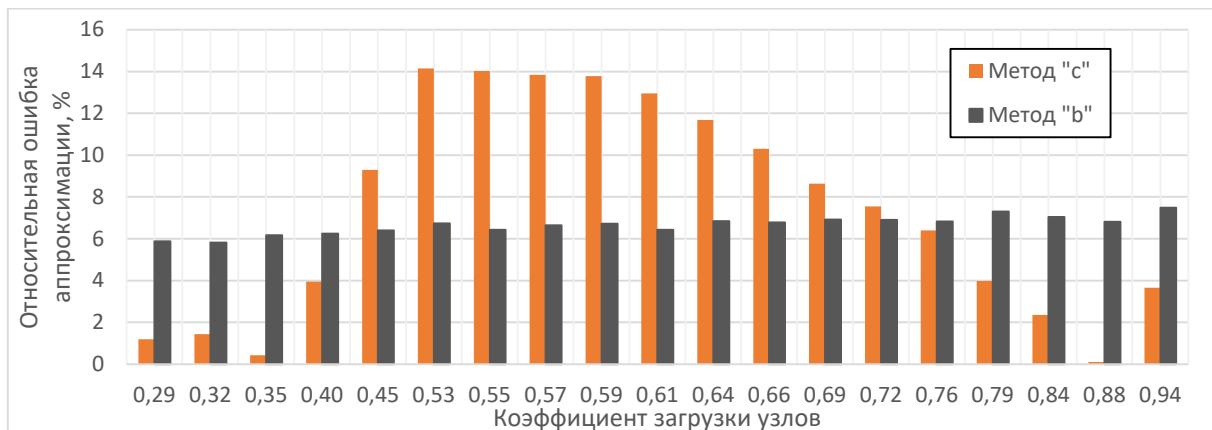


Рисунок 12 – Относительная ошибка аппроксимации для двух методов моделирования к результатам имитационного моделирования

Экспериментальным путем доказано, что чем больше нагрузка тем выше скорость приближения формы выходного потока к форме закона распределения для времени обслуживания в рабочем процессе систем типа G/M/1.

В четвертой главе была реализована общая методика проектирования телекоммуникационных систем. На этапе планирования возможно использование аналитического моделирования, представляющего из себя аппроксимационный расчет на основе систем M/M/1 со стационарными и ординарными процессами без последствия. Это позволит определить



возможные параметры системы в том числе этапы возникновения узких мест в выделенных рабочих процессах. Возможно дальнейшее проектирование систем, на основе данных реального рабочего процесса, полученных экспериментальным путем, которое может повлечь изменение входных характеристик и появление необходимости расчета сетей систем произвольного вида  $G/G/1$ .

Для последующего моделирования систем возможно использование разработанной имитационной модели или методов моделирования систем, включающих не экспоненциальные распределения с высоким коэффициентом вариации. Имитационное моделирование позволит получить точные характеристики системы, без применения методов аппроксимации.

Данные цели и результаты полученные в 1–3 главе диссертационной работы позволили разработать алгоритм применения реализации метода оценки временных характеристик комбинированных услуг с использованием разработанных моделей для сеансовых и транзакционных услуг (рисунок 13, см. ниже).

Отдельно представляется к рассмотрению алгоритм применения метода оценки временных характеристик рабочих процессов транзакционных услуг (рисунок 14, см. ниже), которые могут иметь множество сценариев реализации, качественная оценка которых позволит принимать обоснованные решения на всех этапах планирования и проектирования услуг без и с учетом реальных входных данных.

В рамках разработанных методов возможно применение средств имитационного моделирования для оценки точности разработанных математических моделей и расчете входных характеристик систем, которые не были определены в явном виде.

Комбинирование аналитических расчетов и имитационного моделирования, позволяет уменьшить сложность оценки множества итераций и предоставить более точные данные для оценки качественных характеристик сложных комплексных систем.

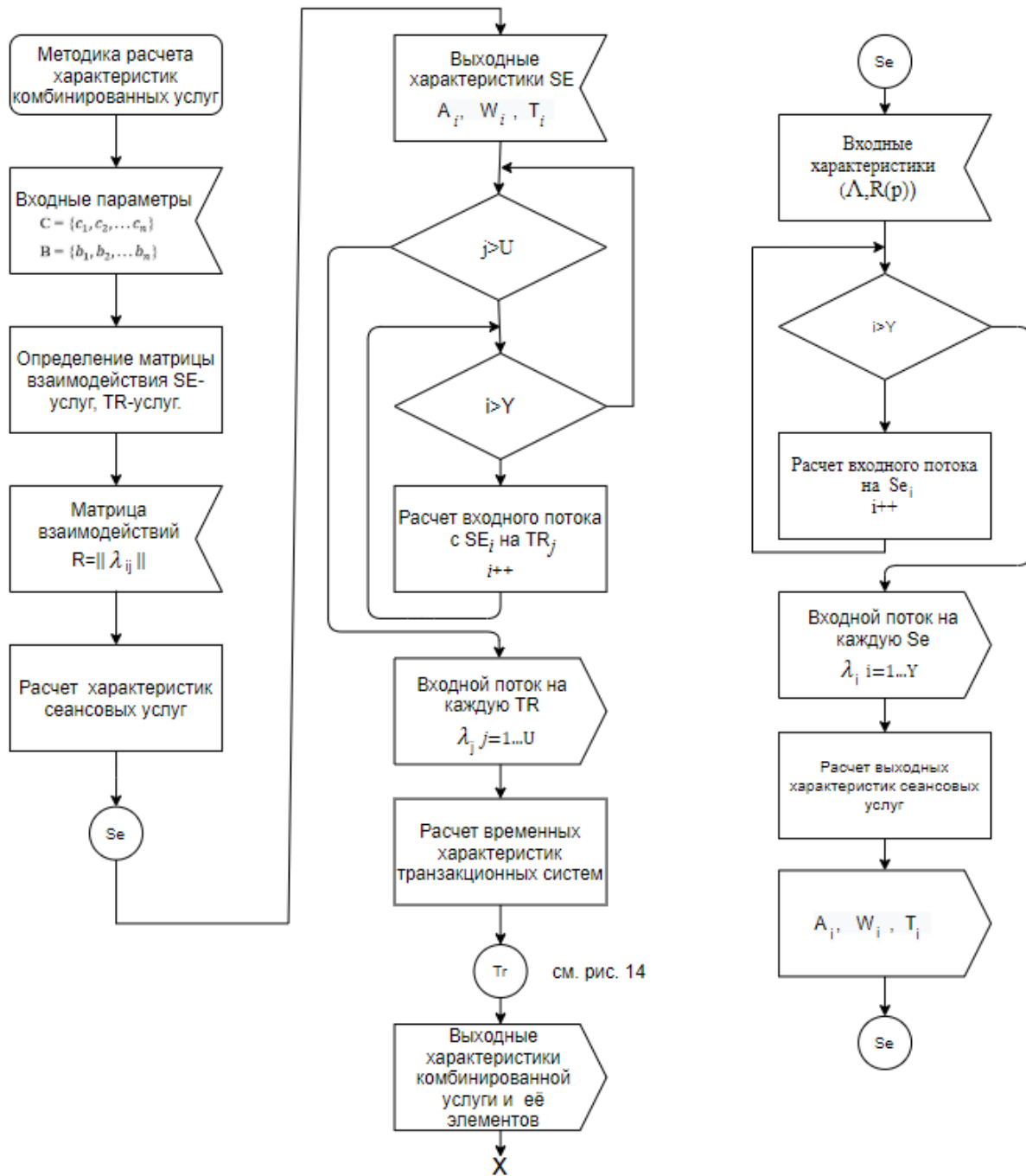


Рисунок 13 – Алгоритм применения метода для расчета качественных характеристик комбинированных услуг

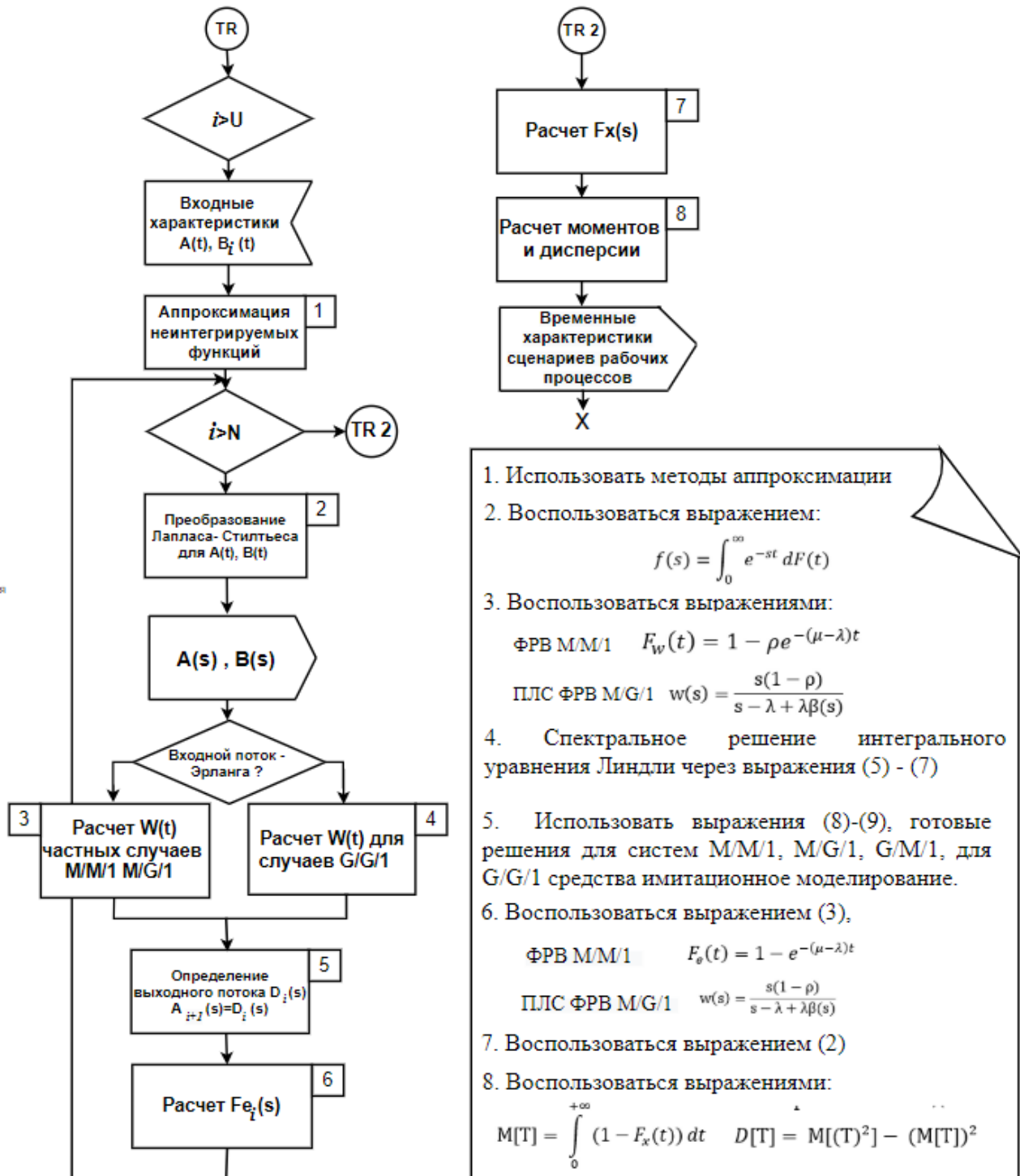


Рисунок 14 – Алгоритм применения метода для расчета рабочих процессов транзакционных услуг

В качестве примера применения комплексного моделирования была проведена оценка временных характеристик двух сценариев реализации рабочего процесса услуги «Авторизации». Результаты моделирования позволяют принимать обоснованные решения при выборе количественных и качественных параметров проектируемых телекоммуникационных услуг.

Представленный в диссертации комплекс имитационных моделей выполнен в программе Anylogic 8.8.3 Professional, разработанные структурные элементы могут быть использованы для интеграции в моделирование существующих и разрабатываемых телекоммуникационных комплексных услуг, как например комбинированная услуга на рисунке 16.

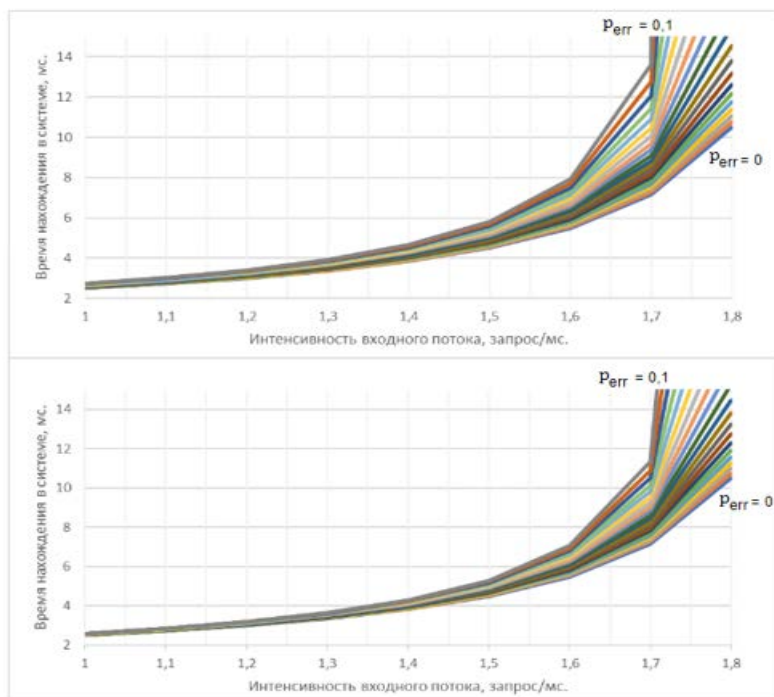


Рисунок 15 – Зависимость  $T_c$  от  $\Lambda$  при разных коэффициентах ошибки

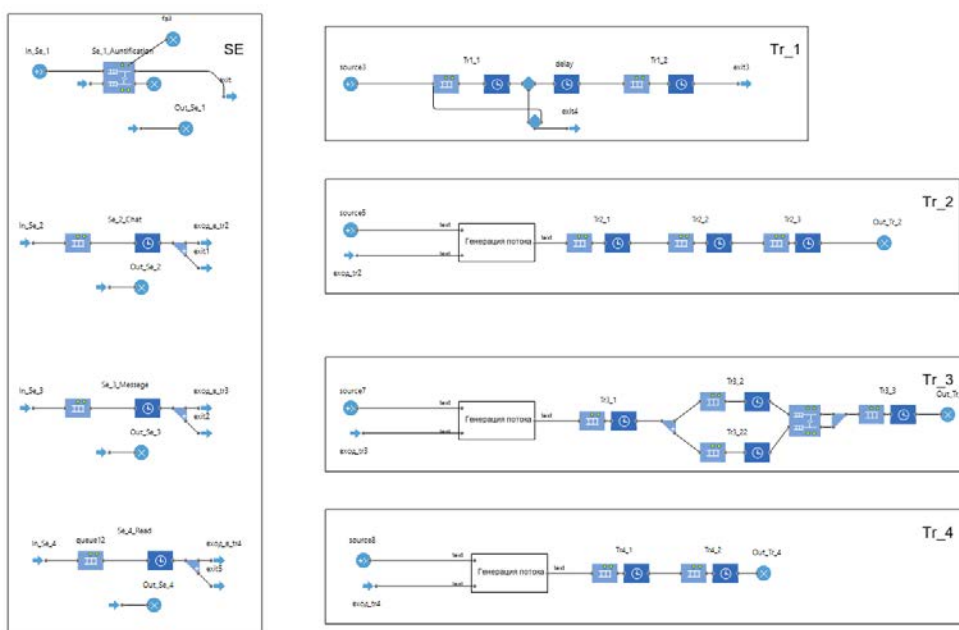


Рисунок 16 – Имитационная модель комбинированной телекоммуникационной услуги

В **заключении** приведены основные результаты диссертационного исследования.

В **приложении** приведены акты о внедрения результатов диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка методов оценки качественных характеристик с целью прогнозирования возможностей на этапах проектирования, разработки и предоставления современных телекоммуникационных услуг в эпоху быстрого роста функциональных возможностей как самих услуг, так и их сетевой инфраструктуры, является актуальной и важной задачей.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты, имеющие теоретическое и практическое значение:

1. Разработан подход к моделированию телекоммуникационных услуг с разделением их на услуги реализующие поддержку пользовательских сессий, рабочих процессов транзакционных услуг и интеграция их в комбинированные телекоммуникационных услуги.

2. Разработаны математическая и имитационная модель сеансовой телекоммуникационной услуги, которые позволяют принимать обоснованные решения по изменению количественных параметров системы, для улучшения качества предоставления услуг.

3. Разработаны модели и методы расчета временных характеристик рабочих процессов транзакционных слабосвязанных услуг с внедрением математического аппарата, параллельной обработки запросов Fork-Join.

4. Предложены методы аппроксимации для расчета временных характеристик систем произвольного вида  $G/G/1$ , и проведена оценка их применимости для расчета последовательных сетей систем вида  $G/M/1$ . Основным результатом являются верхняя и нижняя границы значений временных характеристик для последовательных сетей систем данного вида.

5. На основе разработанных моделей для сеансовых и транзакционных услуг, был синтезирован обобщенный алгоритм реализации метода расчета вероятностно-временных характеристик комбинированных телекоммуникационных систем.

6. Разработана комплекс имитационных моделей, структурные элементы которых возможно интегрировать для создания различных моделей существующих и разрабатываемых телекоммуникационных услуг

Результаты данной работы могут являться практическими рекомендациями и основой для принятия обоснованных решений при проектировании и повышении эффективности телекоммуникационных услуг, что способствует повышению их производительности и улучшению качества обслуживания пользователей. Это имеет большое значение для различных областей, включая телекоммуникации, облачные сервисы, электронную коммерцию и многие другие, где качество и эффективность услуг являются ключевыми факторами успеха и конкурентоспособности.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых изданиях из перечня ВАК:**

1. Редругина Н.М. Метод вычисления временных характеристик обслуживания в сервисных платформах инфокоммуникационных транзакционных услуг с параллельной обработкой запросов // Труды учебных заведений связи. – 2023. Т. 9. № 3. – С. 82-90.

2. Редругина Н.М. Модели и методы вычисления задержек при предоставлении услуг пользователем на сервисных платформах сеансовых инфокоммуникационных услуг // Computing, Telecommunications and Control.– 2023. Т. 16. № 2. – С. 29-39.

3. Редругина Н.М. A set of simulation models of workflow elements for transactional services of infocommunication systems // Computing, Telecommunications and Control. – 2023. Т. 16. № 2. – С. 29-39.

4. Редругина Н.М., Зарубин А.А. Моделирование игровых многопользовательских сервисов // Вестник связи. – 2020. № 8. – С. 11-16.

### **Свидетельства о результатах интеллектуальной деятельности:**

5. Редругина Н.М., Зарубин А.А. Программный модуль для расчета качественных характеристик комбинированных инфокоммуникационных услуг поддерживающих обслуживание пользовательских сессий и обработку системных транзакций в среде Anylogic. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023663195, 20.06.2023. Заявка № 2023662354 от 14.06.2023.

6. Редругина Н.М., Зарубин А.А. Программный модуль для расчета характеристик систем параллельной обработки транзакций, разработанный в среде

Anylogic. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023618304, 21.04.2023. Заявка № 2023616789 от 07.04.2023.

**Публикации в других изданиях и конференциях:**

7. Бусаров Ю.О., Редругина Н.М., Швидкий А.А. Анализ способов повышения качества обслуживания приложений электронной коммерции // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. X Юбилейная международная научно-техническая и научно-методическая конференция : сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2021. – С. 131-135.

8. Бусаров Ю.О., Редругина Н.М., Шаненко Д.Е. Анализ результатов исследования игрового трафика и сценариев поведения в многопользовательских игровых сервисах // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023). XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция : сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2023. – С. 390-394.

9. Зарубин А.А., Редругина Н.М., Швидкий А.А. Эгоистичные распределительные алгоритмы как алгоритмы управления нагрузкой в РСХД // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022). XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция : сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2022. – С. 469-473.

10. Алексеева Н.Н., Редругина Н.М., Савельева А.А., Тарабанов И.Ф. Математическая модель записи информации на узлы распределенной системы хранения данных // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022). XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция : сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2022. – С. 65-70.