

В диссертационный совет 24.2.312.08,
созданный на базе ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский
технологический университет»

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Хасанова Нияза Аделевича

«Моделирование замкнутых систем массового обслуживания с трехкомпонентным потоком заявок и ограничением по времени ожидания заявки в очереди», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертационного исследования

Современные технологические системные комплексы нуждаются в эффективной автоматизации процессов. Важной целью является сокращение убытков, связанных с их простоями и неравномерной загруженностью. Для компаний, действующих в разных секторах экономики, уменьшение времени задержек в сервисе является определяющим условием увеличения рентабельности и сохранения лояльности клиентов. Это подчеркивает значимость разработки математических моделей, которые принимают во внимание различный характер запросов на сервис и балансировку ресурсов, что обеспечивает стабильную работу реальных систем. Формулировка подобных проблем зачастую сопряжена с введением разнообразных ограничений на число обслуживающих элементов и длительность их работы. Теория очередей, или теория массового обслуживания (ТМО), занимается поиском решений задач подобного рода.

В ТМО наибольшее внимание уделяется системам открытого типа с упрощенными условиями относительно заявок, тогда как замкнутые системы изучены гораздо меньше. В частности, для замкнутых систем массового обслуживания (СМО) актуальными остаются модели, достоверно описывающие системы с различным поведением заявок: одни готовы ждать, другие требуют немедленного обслуживания, а остальные покидают очередь, если время ожидания превышает допустимый предел.

Сочетание замкнутости системы, лимита на время ожидания и разнотипность поступающих запросов – характерная черта современных технических систем. Анализ и настройка таких моделей часто основываются на упрощенных представлениях об их поведении и необходимых ограничениях, что не всегда соответствует реалиям.

В диссертационной работе Хасанова Н. А. проведено исследование замкнутой СМО, учитывающей различные типы генерируемых запросов на обработку, одни из которых могут ожидать обслуживания, а другие имеют ограничения по времени пребывания в очереди. Учет разной степени нетерпеливости запросов позволит планировать эффективную работу сети и снизить потери запросов на обработку. Диссертационная работа имеет неоспоримую практическую ценность, а решаемые соискателем задачи являются весьма актуальными.

Характеристика содержания диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 96 источников и трех приложений.

Во введении показана актуальность темы диссертационного исследования, формулируются цель и задачи, научная новизна, положения, выносимые на защиту соискателем, и краткое описание основного текста диссертации.

Первая глава посвящена обзору научных результатов в области построения открытых и замкнутых СМО, функционирующих с различными ограничениями, методов нахождения их вероятностных и временных характеристик. Приводится описание исследуемой в диссертации математической модели в виде замкнутой СМО с источником генерации терпеливых и нетерпеливых заявок, очередью и m каналами обслуживания. Перечисляются основные вероятностные и временные характеристики функционирования исследуемой системы.

Во **второй главе** соискателем выписана система дифференциальных уравнений Колмогорова для распределения вероятностей состояний СМО, которая решена в стационарном случае. Приводятся формулы расчета вероятностей немедленного обслуживания, отказа в обслуживании, ожидания в обслуживании терпеливой заявки, сгенерированной источником заявок, основные числовые и временные характеристики системы, функционирующей в стационарном режиме.

В **главе три** предлагается имитационная модель замкнутой СМО с тремя типами заявок, с помощью которой определяются характеристики исследуемой системы, функционирующей в нестационарном режиме. Программа разработана с использованием метода Монте-Карло и языка программирования Python. Применяя метод производящих функций получено аналитическое решение системы дифференциальных уравнений Колмогорова для частного случая, когда в системе нет нетерпеливых заявок, интенсивности обслуживания и ухода частично нетерпеливых

заявок равны между собой, вероятность нахождения в блоке обслуживания всех заявок стремится к нулю. Это решение используется для анализа точности построенной имитационной модели.

Четвертая глава посвящена расчету числовых и временных характеристик исследуемой системы, функционирующей в стационарном режиме. Проведен анализ влияния параметров модели на ее основные характеристики в различных режимах работы.

В **пятой главе** соискатель приводит алгоритм поиска эффективных режимов работы предложенной замкнутой СМО с ограничением по времени ожидания заявки в очереди в стационарном режиме. По результатам многочисленных экспериментов построены графики зависимостей для основных параметров системы при обеспечении требуемого уровня обслуживания по параметру относительной пропускной способности и среднему времени ожидания.

В **главе шесть** даны практические рекомендации по применению результатов диссертационного исследования для анализа реальных систем.

В **заключении** изложены ключевые результаты проведенного исследования.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Достоверность основных положений, выводов и рекомендаций подтверждается использованием математического инструментария, охватывающего методы теории вероятностей, марковских случайных процессов, теории массового обслуживания, методов численного и имитационного моделирования.

Научная новизна диссертации заключается в разработке замкнутой математической модели с терпеливыми и нетерпеливыми заявками, формулах расчета вероятностных и временных характеристик системы, функционирующей в стационарном режиме, разработке имитационной модели исследуемой СМО, которая обеспечивает расчет этих характеристик в нестационарном режиме, в формулах расчета времени выхода системы на квазистационарный режим. Разработан комплекс проблемно-ориентированных программных средств расчета основных характеристик исследуемой СМО и оценки эффективности ее функционирования в стационарном и нестационарном режимах.

Таким образом, результаты диссертации обладают достаточной степенью достоверности и содержат научную новизну, что вносит вклад в развитие теории очередей и теории телетрафика.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертации, подтверждается строгими математическими доказательствами, подкреплённые результатами масштабных вычислительных экспериментов и их сопоставлением с итогами имитационного моделирования, проведенного соискателем.

Полученные в работе результаты апробированы на всероссийских и международных конференциях, что также свидетельствует о достоверности и обоснованности изложенных выводов.

Научная новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В диссертации получены следующие **основные** новые научные результаты, определяющие теоретическую ценность проведенного исследования:

1. Разработана новая математическая модель замкнутой СМО с потоком генерируемых требований, которая обладает свойством ограничения на время ожидания заявки в очереди. Получены аналитические выражения для расчета вероятностных, числовых и временных характеристик СМО в стационарном режиме функционирования.

2. Разработан численный алгоритм поиска эффективных режимов работы исследуемой системы.

3. Разработана имитационная модель СМО с использованием языка программирования Python и метода Монте-Карло, позволяющая производить вычисление характеристик системы в нестационарном режиме функционирования.

4. Разработан комплекс проблемно-ориентированных программных средств для проведения вычислительных экспериментов, отличающийся возможностью расчета характеристик замкнутых СМО и оценки её эффективности.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость исследования заключается в расширении аппарата теории массового обслуживания и математической теории телетрафика. Область применения результатов работы охватывает широкий спектр отраслей, включая производственно-техническую сферу, торговлю, управление производством и производственными процессами, телефонию и связь, а также логистику. Полученные результаты применимы для систем, где разнородные типы заявок могут существенно

влиять на эффективность обслуживания. В таких системах часто встречаются различные типы требований, направленных на применение различного подхода к организации обслуживания.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертационной работы достаточно полно отражены в известных печатных изданиях, в том числе 4 статьях, опубликованных в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, 4 работах в журналах и сборниках трудов всероссийских и международных конференций, зарегистрирован 1 электронный ресурс.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации. Ключевые аспекты, рассматриваемые в диссертации, подробно освещены в автореферате, что позволяет читателю получить полное представление о проведенных исследованиях и их значимости.

Дискуссионные положения работы, замечания и рекомендации:

1. На мой взгляд, не следует использовать термин «входящий поток» для замкнутой системы массового обслуживания. В замкнутой системе циркулирует конечное число заявок, которое не меняется. Лучше использовать термин «случайный поток событий» (стр. 22 диссертации).

2. В описании математической модели, заявки, которые находятся в очереди все являются нетерпеливыми, что не согласовывается с постановкой задачи, но упрощает исследование предложенной модели. Было бы интересно провести исследование двумерного процесса числа терпеливых и нетерпеливых заявок.

3. При построении математической модели автор использует допущение о пуассоновском характере генерации требований. Однако для замкнутых систем с конечным числом источников интенсивность генерации заявок зависит от числа заявок в блоке обслуживания. В строгом математическом смысле после возвращения заявок в источник генерации заявок поток перестает быть пуассоновским. Проверяться ли адекватность этого допущения при высоких значениях загрузки системы?

4. В формуле (2.1) и далее по тексту диссертации используется индекс $(i - m)$, который не определен в тексте. В формуле (13) автореферата используется символ Похгаммера $(k - m + 1)_j$. Стоило бы дать краткое пояснение или привести развернутую запись введенных обозначений. Так же в этих формулах используются комбинаторные выражения вида $N!/(N - i)!$, которые при больших значениях N могут приводить к вычислительным проблемам. Это оставляет открытым вопрос о работоспособности алгоритмов в области больших значений параметра N .

5. Для рассматриваемой замкнутой СМО, функционирующей в нестационарном режиме, реализована имитационная модель на языке Python. Проводилась ли верификация и расчет машинного времени работы имитационной модели?

Указанные выше замечания не снижают научную ценность результатов, теоретическую и практическую значимость, а также общее положительное впечатление о диссертационной работе.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Область представленного диссертационного исследования соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки): п.6. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей; п.8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента; п.9. Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий.

Диссертационная работа Хасанова Нияза Аделевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения по повышению эффективности функционирования замкнутых систем массового обслуживания с трехкомпонентным потоком заявок и ограничением по времени ожидания заявки в очереди, что имеет существенное значение для развития страны.

Диссертация обладает внутренним единством, отличается новизной подходов решения поставленной задачи.

Автореферат правильно и верно отражает основное содержание и результаты диссертации. По форме и содержанию диссертация, и автореферат, полностью соответствуют требованиям ВАК.

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Хасанова Нияза Аделевича «Моделирование замкнутых систем массового обслуживания с трехкомпонентным потоком заявок и ограничением по времени ожидания заявки в очереди» соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842; в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, Хасанов Нияз Аделевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент, Пауль Светлана Владимировна, доктор физико-математических наук (1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), доцент, профессор кафедры теории вероятностей и математической статистики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

«10» марта 2026 г.

тел. +7 913-828-12-14; email: paulsv82@mail.ru

Пауль Светлана Владимировна

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36.

Тел.: +7 (3822) 529-585

E-mail: rector@tsu.ru

Страница в интернете: <http://www.tsu.ru>

Подпись Пауль С. В. заверяю

Учёный секретарь Ученого совета ТГУ

«10» марта 2026 г.



/ Т. Ю. Осипова

Вход. № 05-8852
« 14 » 03 2026 г.
подпись