

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Куцазли Анны Ивановны на тему «Модели массового обслуживания для анализа эффективности миграции сервисов в граничных облачных вычислениях», представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность темы диссертационной работы Куцазли А. И. обусловлена фундаментальными изменениями в архитектуре современных телекоммуникационных систем и вычислительных инфраструктур. Диссертация посвящена разработке аналитических моделей миграции виртуальных машин и сервисов в облачных и гранично-облачных архитектурах. Данная задача имеет ключевое значение в условиях развертывания сетей связи нового поколения (5G/6G).

Современные стандарты беспроводной связи, обеспечивающие сверхнадежную связь с малой задержкой (URLLC) и улучшенный мобильный широкополосный доступ (eMBB), предъявляют беспрецедентные требования к распределенной вычислительной инфраструктуре. Централизованные облачные центры обработки данных (ЦОД) не способны обеспечить необходимый уровень качества обслуживания (QoS) для приложений реального времени (дополненная и виртуальная реальность, автономное управление транспортом, телемедицина) из-за высоких задержек передачи данных, обусловленных удаленностью облачных мощностей от реального места предоставления услуги.

В ответ на этот вызов сформировалась концепция граничных облачных вычислений (Multi-access Edge Computing, MEC), предполагающая вынос дополнительных ограниченных вычислительных мощностей непосредственно к границе сети. В результате гибридная связка «центральное облако – граничный узел» становится базовой платформой для предоставления иммерсивных сервисов. Ключевым механизмом динамического управления такой сложной распределенной системой является миграция – перенос виртуальных машин или пользовательских сессий между серверами.

Как показывает анализ научной литературы, некорректный выбор момента для инициации миграции может приводить к возникновению осцилляций – циклических перемещений виртуальных машин или сервисов между узлами. Это явление зачастую существенно ухудшает показатели эффективности системы, увеличивая накладные расходы и нестабильность. Поэтому политики миграции должны учитывать этот возможный эффект.

В отличие от упрощенных пуассоновских моделей, современные исследования подчеркивают необходимость использования коррелированных потоков (таких как MAP и MMPP) для адекватного описания нагрузки. Диссертация Куцазли А.И., в которой предлагаются модели с перемещением заявок между группами приборов и фазозависимой политикой миграции при коррелированной характере нагрузки, органично развивает это научное направление.

Ввиду вышеизложенного, можно заключить, что тема диссертационной работы Кушазли Анны Ивановны «Модели массового обслуживания для анализа эффективности миграции сервисов в граничных облачных вычислениях» является актуальной, соответствует профилю специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика» и обладает высокой междисциплинарной значимостью для развития сетей 5G/6G.

Характеристика содержания диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списков основных обозначений, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 101 страницу, работа содержит 37 рисунков и 13 таблиц, а список литературы содержит 145 источников.

Во **введении** обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проводится анализ миграции сервисов и моделирование трафика. Разделы 1.2–1.3 посвящены классификации трафика с использованием машинного обучения и прогнозированию профиля нагрузки. В разделе 1.4, где выполнена параметризация MAP- и MMPP-потоков по реальным сетевым данным, используемых в последующих главах.

Вторая глава посвящена построению модели миграции виртуальных машин в облачной инфраструктуре между серверами. Предложена математическая модель перемещения виртуальных машин со всеми задачами на них в виде системы массового обслуживания с несколькими блоками обслуживания и с групповым перемещением заявок между ними. Формализованы две политики миграции (минимизация прогнозируемой и текущей загрузки), выведена общая формула для расчета вероятности миграции. Проведен численный анализ для работы виртуальных машин с голографическим сервисом и сервисом расширенной реальности, который показал зависимость показателей качества обслуживания от выбора политики миграции.

Третья глава продолжает исследование на предмет моделирования миграции в гранично-облачной архитектуре. В разделах 3.1-3.3 построена модель перемещения задач одного из сервисов между MEC-узлом и облаком при пуассоновском законе возникновения нагрузки. Сформулирована и доказана теорема, определяющая оптимальную политику минимизации задержки. Также показано, что стационарное распределение числа пользователей разных сервисов в системе при фиксированной политике миграции имеет мультипликативный вид. В разделах 3.4-3.6 разработана модель с MMPP-потоком поступающей нагрузки и зависимостью миграции от состояния управляющего процесса входящего трафика. Предложен матричный рекуррентный алгоритм, выполнен численный анализ с параметрами входной нагрузки, которые были найдены в главе 1 на основании данных реального трафика.

В заключении подведены итоги и сформулированы основные научные результаты

Достоверность и новизна результатов диссертации

Достоверность основных результатов диссертационной работы подтверждается корректным применением математического аппарата цепей Маркова, теории массового обслуживания, матрично-аналитических методов, а также результатами численных экспериментов.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Модель миграции виртуальных машин со своими задачами между серверами в виде системы массового обслуживания с несколькими блоками обслуживания ограниченной пропускной способности. В предложенной модели решение о миграции принимается только в момент поступления новой заявки и формализовано в рамках теории массового обслуживания в отличие от существующих подходов (двойные пороги, задержки между миграциями).

2. Для гранично-облачной архитектуры предложена модель с перемещением заявок между общей и индивидуальными группами приборов, где оптимальная политика миграции (минимизация суммарной межконцевой задержки) получена аналитически в виде функции состояния системы. Показано, что при использовании этой политики стационарное распределение вероятностей состояний системы имеет мультипликативный вид.

3. Построена модель миграции с коррелированным ММРР-поток, учитывающая фазу нагрузки: в фазе высокой интенсивности решение пересматривается при каждом событии, в фазе низкой – только при поступлении или смене фазы. Разработан матричный рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения.

Таким образом, результаты диссертации обладают высокой степенью достоверности и содержат значительную научную новизну, что делает их ценным вкладом в развитие теории и практики беспроводных сетей пятого и последующих поколений.

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

Обоснованность научных положений и выводов, представленных в диссертации, обеспечивается строгим последовательным применением математического аппарата теории массового обслуживания и теории цепей Маркова при доказательстве теорем, лемм и утверждений. Для большинства теоретических результатов в работе проводятся численные эксперименты.

В главе 2 формализованы детерминированные политики миграции в облачной инфраструктуре (алгоритмы 2.1 и 2.2). Вероятность миграции (Утверждение 2.1) выведена корректно с использованием формулы полной вероятности

В главе 3 для гранично-облачной архитектуры доказан вид оптимальной политики миграции по минимизации межконцевой задержки (Теорема 3.1). Установлено, что стационарное распределение имеет мультипликативный вид (Утверждение 3.1). Для модели с коррелированным трафиком доказана блочно-трехдиагональная структура матрицы интенсивностей переходов (Лемма 3.2) и

разработан матричный рекуррентный алгоритм расчета стационарных характеристик (Теорема 3.2).

Таким образом, представленные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации являются полностью обоснованными.

Ценность для науки и практики результатов работы

Научная ценность диссертации заключается в развитии теории массового обслуживания и математической теории телетрафика применительно к задачам миграции в облачных и облачно-граничных системах. Автором предложена модель СМО с перемещением классов заявок между группами приборов, где решение о миграции принимается только в момент поступления новой заявки. Для гранично-облачной архитектуры получено оптимальное правило распределения пользователей между МЕС-узлом и облачными серверами в явном аналитическом виде (теорема 3.1), а также доказано, что стационарное распределение вероятностей имеет мультипликативную форму (утверждение 3.1). Для модели с коррелированным ММРР-поток предложено матричный рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения (теорема 3.2).

Практическая ценность работы определяется ее прямой ориентированностью на решение актуальных задач телекоммуникационной отрасли и облачных провайдеров. Предложенные политики миграции могут позволить сократить занятую пропускную способность серверов. Для операторов это означает возможность обслуживать большее число пользователей на том же оборудовании без дополнительных капитальных затрат.

Разработанные модели и алгоритмы предоставляют операторам и провайдерам инструмент для количественной оценки показателей QoS на этапе проектирования сети и в процессе ее эксплуатации.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Основные научные результаты диссертационной работы Куцазли А.И. отражены в 12 печатных трудах, в том числе: 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus (включая журнал Mathematics, Q1, а также Future Internet, Q2, с высоким уровнем цитируемости); 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, что подтверждает практическую реализацию разработанных алгоритмов; остальные публикации представлены в виде докладов на всероссийских и международных конференциях (NEW2AN, ITMM, ICST, DCCN, «Ломоносов» и др.). Публикации охватывают все три основных результата, выносимых на защиту

Число и уровень публикаций соответствуют требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.2.3 (Теоретическая информатика, кибернетика).

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата на диссертацию Куцазли А.И. соответствует всем основным положениям диссертации. Ключевые аспекты, рассматриваемые в диссертации, подробно освещены в автореферате, что позволяет читателю получить

полное представление о проведенных исследованиях и их значимости, а также основных научных результатов и положений, выносимых на защиту. Несовпадений между содержанием автореферата и основным текстом диссертации не выявлено.

Замечания по диссертационной работе

Диссертационная работа представляет собой хорошо оформленную и логично структурированную работу. Однако, по диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. В разделах 1.2–1.4 представлены результаты классификации сетевого трафика по типам сервисов, прогнозирование профиля трафика и параметризация MAP- и MMPP-потоков по реальным данным. Однако в задачах исследования, сформулированных во введении, и в положениях, выносимых на защиту, анализ реального трафика не упоминается, а связь этих разделов с моделями, рассматриваемыми в главах 2 и 3, прослеживается не в полной мере. Желательно более явно обосновать место разделов 1.2-1.4 в логике диссертационного исследования.

2. В главе 2 модель миграции виртуальных машин сформулирована в общем виде, однако стационарное распределение $\pi(x)$ для общего случая не выписано, а существование стационарного режима не обсуждается.

3. На некоторых рисунках не подписаны оси, что затрудняет интерпретацию графиков.

4. В формуле (1.8) для MMPP-потока диагональные элементы матрицы D_1 практически равны (8,79526 и 8,79553), что означает слабую зависимость интенсивности поступления от фазы управляющей цепи. Такой MMPP вырождается в пуассоновский поток. В разделе 3.4 постулируется условие $\lambda_1 > \lambda_0$ для моделирования коррелированной нагрузки, однако в численных параметрах, приведенных в формулах (3.63)–(3.67) и в таблице 3.8, для большинства сервисов λ_0 и λ_1 отличаются лишь в четвертом-пятом знаке. В результате поток ведет себя почти как пуассоновский, что снижает иллюстративность фазозависимой политики миграции.

5. В работе предложены вычислительные алгоритмы, в частности матричный рекуррентный алгоритм (Теорема 3.2) и алгоритмы миграции 2.1 и 2.2. Однако для них не проведен анализ вычислительной сложности и масштабируемости при увеличении размерности системы. Для практического применения разработанных алгоритмов в крупных облачных инфраструктурах (с тысячами пользователей и десятками серверов) оценка времени выполнения и требований к памяти является существенной.

6. Не сильно удачным и интерпретируемым является термин «пропускная способность сервера», который используется в работе.

7. В работе также присутствует ряд опечаток.

Приведенные замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и не влияют на ее положительную оценку.


Заключение

Диссертационное исследование Куцазли А. И. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой содержится новое решение актуальной научной задачи – разработки аналитических моделей миграции виртуальных машин и пользовательских сервисов в облачной и гранично-облачной архитектурах. Полученные модели позволяют рассчитывать показатели качества обслуживания при ограниченных вычислительных ресурсах и коррелированном характере трафика.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно пункту 2.2 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного Ученым советом РУДН, протокол УС-1, 22.01.2024, а ее автор, Куцазли Анна Ивановна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

Официальный оппонент, Лапатин Иван Леонидович, кандидат физико-математических наук (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), доцент кафедры прикладной информатики Института прикладной математики и компьютерных наук Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

«02» июня 2026 г.


Лапатин Иван Леонидович

тел. +7 903-955-85-91; email: ilapatin@mail.ru

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 И. Л. Лапатина удостоверяю.

Ученый секретарь Ученого совета ТГУ

«02» июня 2026 г.





Т. Ю. Осипова