

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Семёновой Ольги Валерьевны

на диссертационную работу Кущазли 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

Проведенное диссертационное исследование Кущазли Анны Ивановны посвящено решению важной научно-практической задачи – разработке и исследованию стохастических моделей и вычислительных алгоритмов для оценки эффективности миграции виртуальных машин и пользовательских сервисов, имеющей существенное теоретическое значение в контексте стратегического развития распределенных инфокоммуникационных инфраструктур.

Развитие современных инфокоммуникационных систем определяется быстрым ростом объемов пользовательского трафика, увеличением числа сервисов, чувствительных к задержке, а также переходом от централизованных облачных вычислений к распределенным гранично-облачным архитектурам. С появлением и активным развертыванием технологии граничных вычислений (Multi-access Edge Computing, MEC), призванной приблизить вычислительные ресурсы непосредственно к конечным пользователям, архитектурные принципы построения сетей претерпели качественные изменения. Это критически важно для обслуживания принципиально новых классов услуг со строгими требованиями к качеству обслуживания (Quality of Service, QoS). В сетях пятого и последующих поколений особое значение приобретают сервисы дополненной и виртуальной реальности (AR/VR), облачного гейминга, интерактивных приложений, а также другие классы трафика, для которых требуется обеспечение заданных показателей качества обслуживания, включая сквозную задержку, пропускную способность и устойчивость работы при изменяющейся нагрузке.

Одним из ключевых механизмов управления ресурсами в таких системах является миграция виртуальных машин и сервисов. В облачной инфраструктуре миграция позволяет перераспределять виртуальные машины между физическими серверами, снижать требуемую пропускную способность и повышать эффективность использования вычислительных ресурсов. В гранично-облачной архитектуре миграция сервисов и перераспределение пользователей между MEC-узлом и облачными серверами позволяют уменьшать суммарную межконцевую задержку и адаптировать размещение сервисов к текущей нагрузке.

Вместе с тем задача анализа эффективности миграции является существенно более сложной, чем задача статического размещения ресурсов. Она требует учета стохастического характера поступления заявок, ограниченности ресурсов граничного узла, взаимодействия различных классов сервисов, а также выбора моментов принятия решений о миграции. Динамический характер переноса виртуальных машин и сервисов в распределенной инфраструктуре порождает жесткий компромисс между минимизацией текущей сквозной задержки и накладными расходами на саму процедуру миграции. Новая парадигма функционирования MEC-сред требует построения принципиально иных многомерных математических моделей, способных учесть сложную динамику перераспределения ограниченных емкостей серверов и транспортных каналов.

В диссертационной работе Кушазли А.И. указанные вопросы рассматриваются на основе аппарата теории массового обслуживания, марковских процессов, математической теории телеграфика и матрично-аналитических методов. Работа направлена на разработку моделей систем массового обслуживания (СМО) для анализа миграции виртуальных машин в облачной инфраструктуре и миграции сервисов в гранично-облачной архитектуре, в том числе с учетом коррелированного входного потока заявок, описываемого марковски модулированным пуассоновским процессом (Markov-Modulated Poisson Process, MMPP).

С учетом вышеизложенного, считаю, что тема диссертационной работы Кушазли Анны Ивановны «Модели массового обслуживания для анализа эффективности миграции сервисов в граничных облачных вычислениях» является актуальной и полностью соответствует специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика» (по физико-математическим наукам).

Содержание диссертации

Диссертационная работа Кушазли А.И. состоит из введения, трех глав, заключения, списка основных обозначений и списка литературы. Работа изложена на 101 странице, содержит 37 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 145 наименований. Структура работы является логически выстроенной и отражает последовательное решение поставленных во введении задач.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ миграции сервисов и моделирования трафика в граничных облачных вычислениях. Рассмотрены особенности облачных и гранично-облачных архитектур, включая МЕС, описаны основные принципы миграции виртуальных машин и сервисов, а также роль миграции как механизма динамического управления ресурсами. Отдельное внимание уделено анализу сетевого трафика: рассмотрена классификация трафика по типам сервисов на основе динамических портов, исследованы методы прогнозирования профиля трафика с использованием моделей временных рядов, а также подробно рассмотрено моделирование сетевого трафика в виде марковского потока. Обсуждена необходимость применения коррелированных входных потоков для описания характера нагрузки иммерсивных сервисов. Проведена параметризация моделей входящих MMPP- и MAP-потоков на основе эмпирических данных трафика Vodafone. Оценивание матриц интенсивностей переходов осуществлено методом максимального правдоподобия на основе EM-алгоритма с применением специализированного пакета *marfit* в среде статистического программирования R. Глава завершается постановкой общей задачи исследования и описанием трех взаимосвязанных моделей миграции, рассматриваемых в последующих разделах работы.

Во второй главе разработана модель миграции виртуальных машин в облачной инфраструктуре. Рассматриваемая система описывается как система массового обслуживания с перемещением заявок между группами приборов. В модели виртуальная машина переносится между облачными сервер-узлами вместе со всеми пользователями и выполняемыми задачами на нее. В качестве критерия эффективности используется минимизация загрузки серверов. Предложены алгоритмы миграции, различающиеся моментом оценки занятости приборов – до и после размещения поступившей заявки. Проведен детальный анализ политики миграции по числу задач на сервере, а также введены показатели эффективности миграции, включая вероятность миграции виртуальной машины и среднюю высвобождаемую пропускную спо-

способность сервера. Глава завершается численным анализом разработанной модели для сценария обслуживания иммерсивных сервисов.

В третьей главе разработаны модели миграции сервисов в гранично-облачной архитектуре. В первой части главы исследована система с перемещением заявок между общей группой приборов, соответствующей МЕС-узлу, и индивидуальными группами приборов, соответствующими облачным серверам. Предложена политика миграции сервисов, направленная на минимизацию суммарной сквозной задержки по всем пользователям. Для данной модели получено оптимальное распределение заявок между группами приборов в виде функции от числа заявок в системе, а также доказано, что стационарное распределение вероятностей состояний имеет мультипликативный вид, с учетом принятых в модели допущений.

Во второй части главы построена и исследована модель миграции сервиса с коррелированным входным потоком заявок, описываемым ММРР-потоком. В модели учтена зависимость политики миграции от фазы входного потока: в фазе высокой интенсивности решение о миграции пересматривается при каждом событии, а в фазе низкой интенсивности – только при поступлении заявки или смене фазы управляющей цепи. Матрица интенсивностей переходов марковского процесса представлена в блочно-трехдиагональном виде, на основе чего разработан матричный рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения. Глава завершается численным анализом модели с использованием параметров реального сетевого трафика.

В заключении сформулированы основные научные результаты диссертационного исследования.

Диссертационная работа Куцазли А.И. характеризуется логической последовательностью, четкостью изложения материала и завершенностью.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Характеризуя научную ценность проведенного исследования, следует отметить, что в диссертационной работе получен ряд новых результатов в области анализа систем гранично-облачных вычислений, среди них:

1. Разработана математическая модель миграции виртуальных машин в облачной инфраструктуре, формализованная в виде системы массового обслуживания с перемещением заявок между группами приборов, отличающаяся учетом переноса контекста совместно с текущей нагрузкой и выполняемыми задачами пользователей, а также алгоритмами оценки занятости ресурсов до и после размещения запроса.
2. Сформулирована политика миграции пользовательских сервисов в гетерогенной гранично-облачной архитектуре, минимизирующая суммарную сквозную задержку, для которой аналитически найдено оптимальное распределение интенсивности обработки и доказан мультипликативный вид стационарного распределения вероятностей.
3. Построена математическая модель миграции сервиса в гранично-облачной архитектуре, учитывающая коррелированный характер входного потока в виде ММРР и реализующая адаптивную политику управления, зависящую от фазы нагрузки (в фазе высокой интенсивности решение пересматривается при каждом событии, в фазе низкой – только при поступлении заявки или смене фазы). В отличие от существующих МЕС-моделей с простейшим пуассоновским потоком, в разработанной модели впервые реализована динамическая адаптация алгоритма миграции к текущему фазовому состоянию трафика.

Выводы и рекомендации, сформулированные в работе, обладают высокой степенью объективности, что подтверждается комплексным подходом к верификации разработанного математического аппарата, включающим:

1. Применение при доказательстве утверждений и теорем общепринятых методов теории массового обслуживания, марковских случайных процессов и матричных аналитических методов, а также опорой на анализ и обобщение актуального отечественного и зарубежного опыта в области миграции ресурсов в облачных и граничных архитектурах.
2. Установление качественного совпадения частных случаев разработанных моделей с классическими системами телетрафика – в частности, при отсутствии миграции модели сводятся к классическим многоканальным СМО с потерями.

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

Сформулированные в диссертации научные положения и выводы хорошо обоснованы как теоретически, так и экспериментально. Обоснованность обеспечивается последовательным применением аппарата теории массового обслуживания, марковских процессов и матрично-аналитических методов, что соответствует стохастической природе исследуемых процессов. Полученные теоретические результаты подкреплены серией численных экспериментов, подтверждающих корректность разработанных моделей и их применимость для решения практических задач.

Ценность для науки и практики результатов работы

Полученные результаты применимы при решении задач проектирования и эксплуатации облачных и гранично-облачных вычислительных систем. Теоретическая ценность работы заключается в расширении класса моделей массового обслуживания с перемещением заявок между группами приборов. В диссертации предложены стохастические модели, учитывающие специфику миграции виртуальных машин и сервисов, критерии минимизации занимаемой пропускной способности и сквозной задержки, а также фазозависимую политику миграции в условиях коррелированного входного потока.

Практическая значимость результатов работы определяется применимостью разработанных моделей и алгоритмов для оценки эффективности переноса виртуальных машин между облачными серверами, выбора политики размещения пользователей между МЕС-узлом и центральным облаком, расчета показателей сквозной задержки, а также для анализа влияния коррелированного характера входного трафика на качество обслуживания. Предложенный математический аппарат и программный инструментарий могут быть использованы операторами связи, провайдерами облачных и граничных сервисов при проектировании и эксплуатации инфокоммуникационных сетей для расчета параметров динамического управления ресурсами и повышения эффективности использования инфраструктуры граничных вычислений.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Основные научные результаты диссертационной работы Куцазли А.И. достаточно полно отражены в печатных трудах. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и Scopus. Среди них – публикации в высокорейтинговых международных журналах, входящих в первый и второй квартили

(Q1/Q2): «Mathematics», «Future Internet» и «Journal of Sensor and Actuator Networks». По результатам исследования получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты диссертации прошли широкую апробацию на международных конференциях за рубежом и в России, а также на всероссийских форумах и научных семинарах. Высокий уровень и значимость проводимых исследований подтверждаются победой Кущазли А.И. в конкурсе на соискание стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов (2024–2025 гг.).

Количество и академический уровень публикаций полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Представленный автореферат диссертационного исследования Кущазли А.И. адекватно и полно отражает основное содержание, структуру и результаты диссертационной работы. Текст оформлен в строгом соответствии с установленными требованиями и позволяет составить целостное и объективное представление о выполненном научном исследовании.

Замечания по работе

Диссертация выполнена на высоком научно-методическом уровне, отличается качественным оформлением и логичной структурой. Тем не менее, по содержанию работы имеются следующие замечания:

1. В первой главе проведен анализ реального сетевого трафика, включая классификацию сервисов, прогнозирование временных рядов и обсуждение марковских моделей потоков. При этом связь между полученными характеристиками трафика и параметризацией аналитических моделей в главах 2 и 3 могла бы быть раскрыта более последовательно, особенно в части перехода от МАР-описания к ММРР-модели, используемой в третьей главе. Кроме того, из текста диссертации не до конца ясно, чем обусловлен выбор именно ММРР-потока вместо более общего МАР-потока для описания коррелированного входного трафика.
2. В диссертации преобладают модели с пуассоновскими входными потоками, что в свою очередь, упрощает анализ, но не всегда соответствует реальному поведению современного трафика. Следовало бы провести исследования влияния корреляции входного трафика для разных моделей (глава 2 и глава 3, разделы 3.1. – 3.3.).
3. В модели с ММРР-потоком учитывается зависимость политики миграции от фазы входного потока. Вместе с тем в численном анализе было бы полезно более подробно исследовать влияние коэффициента корреляции входного потока и соотношения интенсивностей фаз.
4. В диссертации представлены схематические описания моделей (рисунки 2.1, 3.1, 3.5) и диаграммы интенсивностей переходов для модели с ММРР-потоком (рисунки 3.6, 3.7). Однако для модели миграции виртуальных машин (глава 2) и для модели с несколькими сервисами (разделы 3.1–3.3) детальные графы переходов между состояниями, особенно для частных случаев (например, для 2 серверов и 3 ВМ в главе 2), отсутствуют. Желательно было бы для каждой модели дополнительно представить граф интенсивностей переходов из центрального состояния. Это позволило бы наглядно показать логику миграции при различных событиях.
5. В работе также присутствует ряд опечаток и редакционных недочетов.

Приведенные замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и численного эксперимента, не снижают теоретической и практической значимости полученных результатов, а также общую положительную оценку выполненной диссертационной работы.

Заключение

Диссертационное исследование Куцазли Анны Ивановны на тему «Модели массового обслуживания для анализа эффективности миграции сервисов в граничных облачных вычислениях» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи разработки моделей массового обслуживания для анализа эффективности миграции виртуальных машин и сервисов в облачных и гранично-облачных вычислениях.

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

Семёнова Ольга Валерьевна, доктор физико-математических наук (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), ведущий научный сотрудник, заведующий лаборатории 69 телекоммуникационных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук», тел.: +7 495 198-17-20, E-mail: olga.semenova@ipu.ru

«29» мая 2026 г.

 Семёнова Ольга Валерьевна

Подпись Семёновой Ольги Валерьевны заверяю

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук»

Адрес: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, стр. 2

Телефон: +7 495 334-89-10,

Факс: +7 495 334-93-40, +7 499 234-64-26,

e-mail: dan@ipu.ru

Страница в интернете: <https://www.ipu.ru>

Подпись Семёновой
ЗАВЕРЯЮ

Зав. Общим отделом



