

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Степанова Сергея Николаевича

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

Представленная диссертационная работа Куцазли А.И. «Модели массового обслуживания для анализа эффективности миграции сервисов в граничных облачных вычислениях» посвящена решению актуальной научной задачи разработки моделей массового обслуживания для анализа миграции виртуальных машин в облачной инфраструктуре и сервисов в гранично-облачной архитектуре. Актуальность темы обусловлена стремительным развитием технологий пятого и шестого поколений (5G/6G), широким внедрением иммерсивных сервисов (дополненной, виртуальной и смешанной реальности), облачного гейминга, а также систем видеоконференцсвязи и автономного управления транспортными средствами. Внедрение концепции периферийных граничных вычислений (Multi-access Edge Computing, MEC) меняет подход к организации распределенной обработки данных. Вынос вычислительных мощностей на периферию сети позволяет существенно снизить задержки передачи пакетов.

Новые классы сервисов требуют строгого соблюдения нормативов качества обслуживания (QoS) и качества восприятия (QoE). В первую очередь это касается сквозной задержки (End-to-End delay, E2E-delay), которая для интерактивных приложений должна составлять единицы миллисекунд. Централизованные облачные платформы из-за значительного удаления дата-центров не всегда способны выполнить эти условия.

Ключевой задачей при построении таких распределенных сред является разработка эффективных алгоритмов управления ресурсами и правил принятия решений о миграции. Вопросы переноса виртуальных машин между серверами облачной инфраструктуры и миграции пользовательских сессий между граничными MEC-узлами и центральными серверами требуют строгого математического обоснования. Ситуация усложняется характером реального трафика иммерсивных приложений и систем видеоконференцсвязи, в том числе систем телеприсутствия. Ему свойственны выраженная коррелированность. Классические модели теории телетрафика на основе простейших пуассоновских потоков здесь неприменимы, так как они систематически занижают оценки задержек и вероятностей потерь. Для более точного анализа необходима разработка моделей с коррелированными входными потоками (в частности, ММРР).

Работа Куцазли А.И. полностью соответствует паспорту научной специальности 1.2.3.

Содержание диссертации

Диссертационная работа Куцазли А.И. содержит введение, три главы (первая и вторая главы включают по 5 разделов, а третья – 6 разделов), заключение, список основных обозначений и список литературы.

Во введении формулируется тема исследования, связанная с развитием граничных облачных вычислений и необходимостью эффективного управления миграцией виртуальных машин и пользовательских сервисов в сетях 5G/6G. Особое внимание уделено обоснованию научной новизны, теоретической и практической значимости работы, а также формулировке положений, выносимых на защиту.

Первая глава содержит анализ особенностей миграции сервисов в граничных облачных вычислениях. В ней также рассмотрена классификация сетевого трафика по типам сервисов на основе номеров портов с применением методов машинного обучения (kNN, случайный лес, градиентный бустинг). При этом наилучший результат по метрике macro-averaged F1 показала реализация градиентного бустинга XGBoost ($F1 = 0,97$, Accuracy = 0,97). Представлены профили трафика с использованием моделей временных рядов. Для прогнозирования интенсивности нисходящего трафика применены модели SARIMA и Holt-Winters с оценкой точности прогноза по метрике средней абсолютной ошибки в процентах (MAPE). Модель Holt-Winters обеспечила точность MAPE $\approx 11,2\%$, а модель SARIMA – MAPE $\approx 15\%$. Далее на основе реальных данных мобильного оператора также выполнена параметризация марковских потоков (MAP/ММРР). В рамках первой главы сформулированы конкретные задачи исследования для достижения цели диссертационной работы.

Вторая глава посвящена разработке модели миграции виртуальных машин в облачной инфраструктуре в виде системы массового обслуживания с перемещением заявок между группами приборов. С целью минимизации пропускной способности (загрузки) серверов предложены два алгоритма управления ресурсами: алгоритм с прогнозируемой загрузкой, осуществляющий оценку состояния после размещения задачи, и алгоритм с текущей загрузкой, проводящий оценку до размещения требований. Для предотвращения эффекта избыточных повторных миграций введено условие, согласно которому решение о переносе виртуальной машины принимается строго в моменты поступления новых заявок. В главе также получены аналитические выражения для вероятности миграции и основных вероятностно-временных характеристик исследуемой системы. Достоверность полученных результатов подтверждена проведенным численным анализом модели для сценария обслуживания иммерсивных сервисов.

Третья глава посвящена двум моделям миграции сервисов в гранично-облачной архитектуре. В первых трех разделах рассматривается система с перемещением заявок между общей группой приборов (МЕС-узел) и индивидуальными группами приборами (облачные серверы). Здесь объектом миграции является сервис, при этом пользователи перераспределяются между МЕС-узлом с обслуживанием только одного класса заявок и облачным сервером. Решение о такой миграции принимается в любой момент системы. Доказана теорема об опти-

мальной политике миграции, минимизирующей суммарную сквозную задержку. Показано, что при применении данной политики стационарное распределение вероятностей имеет мультипликативный вид. Получены явные аналитические выражения для расчета основных вероятностно-временных характеристик системы.

В последующих трех разделах третьей главы модель расширена на случай коррелированного входного потока с адаптивной фазо-зависимой политикой миграции. Главной особенностью предложенного подхода является динамическое изменение интенсивности пересмотра решений о миграции в зависимости от фазы нагрузки. В периоды высокой интенсивности необходим непрерывный пересмотр состояния, т.е. при каждом изменении состояния системы. В периоды низкой нагрузки интенсивность поступления снижается, и решения принимаются только в моменты поступления заявок или смены фазы. Для такой модели разработан матричный рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения вероятностей на основе блочно-трехдиагональной структуры матрицы интенсивностей переходов. Численный анализ выполнен с параметрами ММРР-потока, оцененными по реальному сетевому трафику, рассмотренному ранее в разделах 1.3 и 1.4 для различных типов сервисов.

В заключении суммируются основные результаты исследования.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Достоверность основных результатов диссертационной работы подтверждается корректным применением методов теории массового обслуживания, марковских случайных процессов, матричных аналитических методов и методов статистического оценивания параметров по реальным данным, что гарантирует применимость разработанных моделей в практике проектирования граничных облачных систем.

Научной новизной обладают следующие результаты:

1. Модель миграции виртуальных машин в облачной инфраструктуре, включающая два алгоритма минимизации занимаемой пропускной способности серверов (с прогнозируемой и текущей загрузкой) с фиксацией момента принятия решения о миграции только в моменты поступления задач на виртуальные машины.
2. Модель миграции сервисов в гранично-облачной архитектуре с оптимальной политикой минимизации суммарной сквозной задержки, для которой доказано существование мультипликативной формы стационарного распределения вероятностей. Это позволяет получить явные аналитические выражения для прямого расчета основных вероятностно-временных характеристик системы без использования приближенных или численных методов
3. Модель миграции с коррелированным ММРР-потокком и адаптивной фазо-зависимой политикой, для которой разработан матричный рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения на основе блочно-трехдиагональной структуры матрицы

интенсивностей переходов. Это обеспечивает высокую вычислительную устойчивость и существенно снижает размерность решаемой системы уравнений.

Следует отметить, что диссертационная работа Кушазли А.И. сочетает в себе научную новизну теоретических подходов и достоверность полученных результатов. Предложенные аналитические методы и алгоритмы миграции виртуальных машин и сервисов полезны для повышения качества обслуживания в перспективных беспроводных сетях.

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

Сформулированные в диссертационной работе научные положения, выносимые на защиту, и выводы хорошо обоснованы, что повышает их достоверность и значимость для дальнейших исследований и практического применения

Ценность для науки и практики результатов работы

Результаты работы имеют научную и практическую ценность, способствуют развитию соответствующих областей знаний и могут быть применены при проектировании и анализе распределенных беспроводных сетей.

Предложенные в исследовании подходы могут представлять интерес для провайдеров облачных услуг и операторов граничных облачных вычислений при формировании стратегий миграции виртуальных машин и сервисов, что потенциально способствует повышению качества обслуживания и снижению сквозных задержек. Разработанные модели также создают предпосылки для адаптивной настройки политик миграции с учетом специфики различных сценариев использования (включая иммерсивные сервисы, облачный гейминг или кооперативные автомобильные системы), что может способствовать более эффективному распределению ограниченных ресурсов непосредственно граничных узлов.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертационного исследования достаточно полно опубликованы в 12 научных работах. В их числе 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и Scopus, а также входящих в Перечень ВАК, К-1/К-2, и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (К-3).

Материалы работы неоднократно докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях. Публикационная активность полностью отражает содержание диссертации и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Автореферат диссертации Кушазли А.И. в полной мере отражает содержание работы. В нем последовательно изложены актуальность, цель и задачи исследования, научная новизна,

теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Основные положения, выносимые на защиту, сформулированы в автореферате четко и соответствуют тексту диссертации. Приведенные в автореферате сведения о структуре работы, апробации результатов и публикациях являются точными и достаточными. Несоответствий между содержанием автореферата и полным текстом диссертации не выявлено.

Замечания по работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. В диссертации используются два ключевых понятия: «виртуальная машина» (глава 2) и «сервис» (глава 3). Для более четкого понимания моделей было бы полезно явно разграничить эти понятия в рамках концепции систем массового обслуживания, пояснив, каким образом миграция сервиса соотносится с миграцией виртуальной машины. Кроме того, при рассмотрении граничного вычислительного узла (edge) его местоположение относительно пользователей и центрального облачного дата-центра в сетевой топологии описано недостаточно детально.
2. В главе 2 при сравнении двух политик миграции виртуальных машин (на основе прогнозируемой и текущей загрузки) на рисунках 2.13–2.14 (сценарий 1) и 2.21–2.22 (сценарий 2) графически представлена разница в загрузке серверов и виртуальных машин. Однако на указанных графиках отсутствуют подписи осей, и не пояснено, в каких единицах измеряется данная разница (в процентах, абсолютных значениях или долях от общей пропускной способности). Кроме того, сам факт наличия расхождений не сопровождается развернутым качественным выводом о том, какая из политик и в каких конкретно условиях является более предпочтительной.
3. В главе 3, в модели миграции сервисов из разделов 3.1–3.3 предполагается, что каждый сервис имеет собственный облачный сервер с фиксированной задержкой d_k . Однако в реальных гранично-облачных архитектурах задержка до магистрального облака зависит от текущей загрузки транспортной сети или географического расположения пользователя, которое также может меняться во времени. Учет динамической составляющей задержки мог бы расширить область применимости модели.
4. В тексте диссертации при формулировке лемм, теорем и утверждений не всегда строго выдерживается общепринятый математический стиль. В ряде случаев условие и заключение теорем приведены в виде связного текста без явного выделения их логической структуры.
5. В работе встречаются незначительные стилистические погрешности, опечатки и редакционные неточности (в частности, дублирование строк в формулах и единичные нарушения сквозной нумерации).

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

Заключение

Диссертационное исследование Куцазли А.И. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение актуальной научной проблемы разработки математических моделей и алгоритмов управления миграцией виртуальных ресурсов и пользовательских сервисов в облачно-граничных вычислительных архитектурах, имеющей важное значение для повышения эффективности использования сетевой инфраструктуры и обеспечения качества обслуживания в беспроводных сетях пятого и последующих поколений.

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

Степанов Сергей Николаевич, доктор технических наук (на стыке 05.25.01 — Теоретические основы информатики, 05.12.14 — Сети, узлы связи и распределение информации), профессор, заведующий кафедрой Интеллектуальные сетевые и облачные технологии факультета Сетевая инженерия Ордена Трудового Красного Знамени Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики», тел.: +7 (495) 957-77-99, доб. 665, e-mail: stpvnvsrg@gmail.com.

Степанов Сергей Николаевич

« 28 » мая 2026 г.

Подпись Степанова Сергея Николаевича заверяю
проректор по науке МТУСИ
доктор технических наук



Кленов Николай Викторович

« 28 » мая 2026 г.

Ордена Трудового Красного Знамени Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики»

Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, 8а
Тел.: +7 (495) 957-77-31. Факс: +7 (495) 925-04-35.,
e-mail: mtuci@mtuci.ru

Страница в интернете: <https://mtuci.ru>