

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Зейналлы Теймура Эйюб оглы
«Координация периодического выполнения задач в распределённых системах
обработки данных через хранилище ключ-значение»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Актуальность диссертационного исследования определяется современными тенденциями в развитии корпоративных информационных систем, а именно, переходом к облачным и микросервисным архитектурам. В таких системах широко распространён вид обработки данных, основанный на выполнении задач с заданной периодичностью. Управление запуском задач в условиях динамического изменения числа узлов и их доступности является прямой потребностью бизнеса для поддержания непрерывности бизнес-процессов. Существующие подходы к организации периодического выполнения задач, которые, как правило, опираются на применение централизованных планировщиков или использование транзакционных возможностей реляционных баз данных для координации, демонстрируют ограничения при масштабировании по количеству узлов системы. Рост числа взаимодействующих узлов и частоты запуска операций приводит к увеличению накладных расходов на их координационные механизмы. Данный фактор обуславливает необходимость исследования альтернативных методов, способных поддерживать корректность выполнения операций.

В этом контексте диссертационное исследование, посвящённое применению хранилищ типа «ключ-значение» для реализации механизмов координации, является перспективным направлением. Хранилища данного типа широко используются в распределённых системах для координации и хранения состояния, что в сочетании с их малым потреблением аппаратных ресурсов делает их логичной основой для построения координационных механизмов управления периодическими задачами. Следовательно, диссертационное

исследование, посвящённое разработке методик координации и балансировки периодического выполнения задач с использованием хранилища «ключ-значение», является актуальным.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

Разработана методика координации выполнения периодических задач в распределённых системах, представляющая собой комплекс решений для различных типов планирования. Ключевой отличительной особенностью и научным результатом является то, что применение данной методики обеспечивает низкие координационные накладные расходы. Это, в свою очередь, позволяет добиться снижения интервала между запусками задачи в условиях высокочастотных задач с короткой длительностью выполнения, сохраняя при этом устойчивость к частичной недоступности узлов и поддержку динамического масштабирования.

Предложена методика балансировки задач между узлами системы. Ключевой отличительной особенностью данной методики является то, что она исключает необходимость в центральном планировщике, что обеспечивает критически важную для диссертационного исследования свойство распределённых систем – динамическую масштабируемость по количеству узлов. При этом методика учитывает не только текущую загрузку вычислительных ресурсов, но и успешность выполнения задач на каждом узле.

Разработана методика проведения экспериментальных исследований, ориентированная на оценку зависимости характеристик распределённых систем от количества узлов, а также от сетевых и инфраструктурных сбоев. Ключевая отличительная особенность методики состоит в её комплексном подходе к эмуляции реальной среды эксплуатации, включающем имитацию сетевых ограничений, динамического изменения числа узлов и инфраструктурных сбоев. Применение инструментов контейнеризации в её основе позволяет формировать идентичную инфраструктуру во всех испытаниях, что

обеспечивает воспроизводимость результатов, важную для достоверности оценки характеристик разработанных в диссертации решений.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии научного инструментария для одноранговых распределённых систем с использованием хранилищ «ключ-значение». Предложены новые методики координации и балансировки периодических задач. Разработана математическая модель, которая формализует эти методики и позволяет оценивать характеристики систем с учётом различных типов планирования, отказов и динамического масштабирования.

Практическая значимость диссертационного исследования определяется тем, что предложенные методики координации и балансировки задач доведены до прикладной реализации и могут непосредственно использоваться при создании распределённых систем обработки данных. Разработанные решения реализованы в виде динамически подключаемых библиотек для платформы .NET, обеспечивающих координацию через хранилище «ключ-значение» etcd; программный продукт опубликован и доступен для подключения через пакетный менеджер. Результаты работы внедрены в учебно-научную деятельность и в практику разработки (в том числе в подразделения Московского политехнического университета и АО «Лаборатория Касперского»), что подтверждается соответствующими актами в диссертации (Приложение Д).

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается корректным использованием математического аппарата для формализации процессов в распределённых системах, а также применением натурных экспериментов для верификации предложенных методик. Достоверность полученных результатов обеспечивается согласованностью теоретических оценок с экспериментальными данными, полученными в ходе испытаний разработанного программного обеспечения. Полученные результаты не противоречат известным научным данным и прошли апробацию на 5 международных и всероссийских научно-практических конференциях.

Основные положения диссертации отражены в 6 печатных работах, в том числе в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и изданиях, индексируемых в базе Scopus.

Диссертация состоит из введения, 3 глав основного текста, заключения, выводов, списка литературы, состоящего из 224 источника, 5 приложений.

Во введении автор обосновывает актуальность темы, анализирует степень разработанности проблемы и указывает на ограничения существующих подходов. Автором сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет, а также представлены положения, выносимые на защиту. Отдельно обозначены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава диссертационной работы представляет собой аналитический обзор существующих методов обеспечения периодического выполнения задач в распределённых системах обработки данных. В нём детально рассмотрены ключевые особенности организации таких задач, включая их функциональные характеристики и классификацию. В рамках главы также изучено текущее состояние исследований в этой области, рассмотрены исторические аспекты развития распределённых систем и проанализированы применяемые архитектурные подходы для координации и планирования выполнения задач.

Проведённый анализ показывает, что существующие методы организации периодического выполнения задач сталкиваются с ограничениями по масштабируемости и устойчивости в динамичных распределённых средах. Главу завершает раздел, в котором на основании выявленных проблем формулируются цель и постановка задач диссертационного исследования – разработка высокопроизводительных и ресурсно-эффективных методик координации и балансировки задач в распределённых инфраструктурах, обеспечивающих динамическое масштабирование и устойчивость к отказам.

Во второй главе диссертационной работы на основе результатов аналитического обзора, сформирована теоретическая база для разработки

методик координации периодического выполнения задач и балансировки задач между узлами распределённой системы. В главе последовательно рассмотрены и обоснованы методики к координации с захватом блокировки на каждый запуск задачи и с захватом блокировки на серию запусков. Показано, что использование блокировки на серию запусков позволяет существенно снизить количество операций взаимодействия с хранилищем «ключ-значение» и, тем самым, уменьшить сетевые накладные расходы при высокочастотном выполнении задач. Установлено, что предложенные подходы обеспечивают выполнение задач при динамическом изменении числа узлов системы.

В главе предложена методика балансировки задач между узлами распределённой системы, учитывающая текущую загрузженность узлов и успешность выполнения задач. Рассмотрены особенности, связанные с временными рассинхронизациями данных о приоритетах узлов, и предложены способы снижения их влияния без усложнения архитектуры системы. Также предложена методика балансировки задач с прогнозированием нагрузки, позволяющая учитывать ожидаемую загрузженность узлов при распределении задач.

Разработанная математическая модель, основанная на аппарате теории массового обслуживания, позволяет формализовать процессы координации и балансировки и проанализировать влияние характеристик расписаний, отказов компонентов и масштабирования по количеству узлов. Полученные в главе результаты определяют область применения предложенных методик и служат теоретическим обоснованием для их дальнейшей экспериментальной оценки.

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты экспериментальной оценки методик координации и балансировки, а также модели определения приоритета, разработанных во второй главе. Эксперименты охватывают оценку производительности, сравнительный анализ с аналогичными решениями, исследование масштабируемости по количеству узлов и оценку модели прогнозирования нагрузки.

Показано, что при координации с захватом блокировки на каждый запуск задачи обеспечивается отсутствие пересечений запусков, однако минимальные интервалы и точность времени выполнения существенно зависят от сетевых факторов, что ограничивает применимость данного подхода для потоковых сценариев. Решение с захватом блокировки на серию запусков демонстрирует более устойчивые характеристики при сетевых ограничениях, обеспечивая меньшие минимальные интервалы выполнения.

Сравнительные испытания показывают высокую точность времени запусков и устойчивость системы при отказах отдельных узлов. В ходе оценки масштабируемости установлено, что подход с блокировкой на каждый запуск чувствителен к росту числа узлов, тогда как использование блокировки на несколько запусков сохраняет стабильность временных характеристик.

Полученные экспериментальные результаты согласуются с теоретическими выводами второй главы и подтверждают обоснованность предложенных решений.

В заключении подведены итоги проведённого исследования, сформулированы основные выводы и обобщены полученные результаты, подтверждающие достижение поставленной цели.

Замечания по диссертационной работе:

1. Работа сосредоточена на координации периодических задач, выполняющихся по расписанию. Однако в реальных системах обработки данных часто возникает необходимость в выполнении сложных процессов обработки, представляющих собой направленные ациклические графы зависимостей. В работе не представлен анализ того, как предложенный механизм координации может быть расширен или адаптирован для управления зависимостями между задачами (например, задача А должна запускаться только после успешного завершения задачи В).

2. Периодическое выполнение задач зависит от времени. В распределённых системам неизбежен дрейф системных часов между узлами.

Следовало бы подробнее рассмотреть влияние этого дрейфа на точность запуска задач.

3. Производительность и точность запуска задач зависят от ряда настраиваемых параметров, таких как интервал обновления состояния блокировок, длительность TTL ключей, параметры выбора узла хранилища. В работе следовало сформировать рекомендации для оптимальной настройки этих параметров в зависимости от масштаба системы (количества узлов), профиля задач (частота, длительность) и параметров сети.

4. Методика балансировки не учитывает, что задачи на практике имеют разную степень критичности. Теоретическую ценность работы усилило бы обобщение модели, позволяющее приоритизировать задачи по их критичности или весу.

5. В разделе 3.4.3, посвящённом экспериментальной оценке масштабируемости, на представленных графиках по оси абсцисс отложен номер испытания, а не фактическое количество узлов (N), которое является ключевым варьируемым параметром. Поскольку количество узлов, как указано, изменялось от испытания к испытанию с переменным шагом, такая форма представления затрудняет визуальный анализ характера зависимости измеряемых параметров (например, показателя точности запусков) от количества узлов.

Следует отметить, что данные замечания не опровергают результаты научных положений и выводов, приведенных автором в тексте диссертации. Диссертационная работа автора является завершённым научно-квалификационным исследованием, в котором предложено решение актуальной научно-технической задачи координации периодического выполнения задач в распределённых системах обработки данных через хранилище «ключ-значение».

Работа характеризуется логической последовательностью изложения и обоснованностью сформулированных выводов. В то же время следует отметить,

что изложение материала в ряде разделов перегружено сложными предложениями, что в отдельных местах затрудняет восприятие материала.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей. Диссертационная работа отвечает критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям и соответствует требованиям пп. 9-11, 13, 14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры
«Автоматизированные системы управления»

«19» января 2026 г.

Остроух Андрей Владимирович

Справочные данные:

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)».

Адрес: 125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64, тел. 8(499)346-01-68 доб.2421, e-mail: kafedra@asu.madi.ru

Ученая степень доктора технических наук присуждена по результатам защиты диссертации по научной специальности 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность).

Должность, ученую степень, ученое звание и подпись
Остроуха Андрея Владимировича заверяю:

Ученый секретарь
ученого совета Университета

«19» 01 2026 г.



Алексеева Марина Юрьевна