

На правах рукописи



РОЖКОВА Татьяна Сергеевна

**СПЕЦИАЛЬНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКОНФИГУРАЦИЕЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ НА БАЗЕ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 2.3.5. Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов
и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орёл – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном казенном военном образовательном учреждении высшего образования «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации».

Научный руководитель: **Лебеденко Евгений Викторович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Громов Юрий Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», директор Института автоматизации и информационных технологий
Пакулова Екатерина Анатольевна, кандидат технических наук, ФГАОУ «Южный федеральный университет», доцент Института компьютерных технологий и информационной безопасности

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский институт ИТМО» (Университет ИТМО)

Защита состоится «30» сентября 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.04, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский пр-т, 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» www.cchgeu.ru.

Автореферат разослан «25» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гусев Константин Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из основных тенденций развития технологий распределенных вычислений является переход от парадигмы обработки данных «on-premise» (на месте), построенной по классической схеме «клиент-сервер», к парадигме «on-cloud» (в облаке), особенностью которой является динамическое выделение клиенту вычислительных ресурсов в зависимости от текущих потребностей в них, реализованных в удаленном центре обработки данных. Подобная схема расширяет функциональность модели «клиент-сервер», но при этом ориентирована на решение традиционных вычислительных задач корпоративного уровня. Однако быстрое развитие мобильных терминалов различной функциональности, используемых в технологиях IoT (Internet of Things – Интернет вещей), Autonomous Vehicle Computing (вычисления автономных транспортных средств) и других подобных проектах, привело к подключению к глобальным распределенным вычислительным ресурсам миллиардов вычислительных устройств мобильного типа. В подобных условиях важной задачей является не только управление подключением этих устройств, но и решение задачи распределенной обработки больших объемов данных, формируемых этими устройствами. Использование парадигмы облачных вычислений при этом приводит к существенным задержкам результатов обработки, что критично для большинства процессов реального времени, выполняющихся на мобильных терминалах. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является выполнение вычислительных задач на инфраструктурах, динамически формируемых на базе самих мобильных терминалов. Такой подход именуется «Edge computing» (граничные вычисления). Он основан на возросших вычислительных возможностях мобильных терминалов, а также на развитии широкополосного доступа к сети Интернет, что позволяет динамически формировать многоузловые децентрализованные вычислительные системы (МДВС). Децентрализация функций управления процессом вычислений в них связана как с топологическими особенностями формирования вычислительной инфраструктуры (решения ad-hoc), так и с отсутствием централизованного координатора, поддерживающего целостность созданной инфраструктуры.

Существенный вклад в развитие предметной области МДВС, в частности математического и программного обеспечения для подобных систем, внесли А. С. Хританков, А. И. Тихомиров, В. И. Петренко, И. Голубев, А. Баранов, С. Goldman, S. Zilberstein, J. Vicente, J. Blakley, L. Hong, M. Yarvis.

Подавляющее большинство проблем, решаемых в этой предметной области, ориентировано или на повышение энергоэффективности вычислительного процесса МДВС в силу ограниченных возможностей мобильного электропитания, или на оптимизацию использования ограниченной пропускной способности каналов связи между мобильными терминалами. При этом требуют исследования задачи динамического формирования и поддержания децентрализованной вычислительной

инфраструктуры (динамической реконфигурации), в частности вопросы ее масштабируемости и устойчивости распределенного вычислительного процесса, связанные с известной проблемой «оттока узлов» (node churn) – динамического исключения вычислительных узлов из состава МДВС в силу объективных причин (проблемы энергопотребления, плохого качества канала связи и т.д.). Данные задачи требуют разработки соответствующих средств специального математического и программного обеспечения для реализации процесса распределенного управления.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования продиктована необходимостью создания средств специального математического и программного обеспечения процесса распределенных вычислений на множестве мобильных устройств в условиях отсутствия возможности эффективного использования облачной инфраструктуры.

Тематика диссертации соответствует одному из основных научных направлений ФГКВОУ ВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации» – Повышение эффективности функционирования распределенных вычислительных систем.

Целью работы является разработка средств специального математического и программного обеспечения многоузловой децентрализованной вычислительной системы на базе мобильных устройств, обеспечивающих эффективное управление вычислительной инфраструктурой в условиях ее динамической реконфигурации.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ состояния проблемы обеспечения динамической устойчивости процесса управления вычислительными ресурсами и потоками данных в многоузловых децентрализованных вычислительных системах.
2. Разработать теоретико-игровую модель взаимодействия вычислительных узлов многоузловой децентрализованной вычислительной системы в условиях динамической реконфигурации структуры системы.
3. Разработать алгоритм распределения вычислительных ресурсов и управления потоками данных протокола взаимного информационного согласования в многоузловой децентрализованной вычислительной системе в условиях ее динамической реконфигурации.
4. Разработать архитектуру многоузловой децентрализованной вычислительной системы, поддерживающую динамическую устойчивость процесса распределенных вычислений.
5. Разработать программное обеспечение процесса функционирования вычислительных узлов многоузловой децентрализованной вычислительной системы.
6. Провести численные эксперименты по оцениванию масштабируемости и динамической устойчивости распределенного вычислительного процесса на основе предложенных решений.

Объект исследования – многоузловая децентрализованная вычислительная система на базе мобильных устройств.

Предмет исследования – математическое и программное обеспечение процесса распределения вычислительных ресурсов и управления потоками данных в многоузловой децентрализованной вычислительной системе на базе мобильных устройств.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертации задач использовались методы теории системного анализа, построения распределенных вычислительных систем, теории множеств, теории игр, имитационного моделирования, математической статистики и планирования экспериментов.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки): п. 3 «Модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем»; п. 9 «Модели, методы, алгоритмы и программная инфраструктура для организации глобально распределенной обработки данных».

Научная новизна работы. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- теоретико-игровая модель взаимодействия вычислительных узлов, отличающаяся реализацией кооперативной стохастической игры на основе методов мультиагентного обучения с подкреплением, обеспечивающая их равновесное состояние в условиях динамической реконфигурации структуры системы;

- алгоритм распределения вычислительных ресурсов и управления потоками данных, отличающийся кворумным методом взаимного информационного согласования данных процесса распределенных вычислений на основе схемы «ведущий-ведомый» и обеспечивающий динамический выбор узла-ведущего в условиях динамической реконфигурации системы;

- имитационная модель процесса распределенных вычислений, отличающаяся представлением множества дискретных событий, связанных с изменением состояния системы глобальной схемой поведения множества децентрализованных агентов, и обеспечивающая получение значений параметров ее устойчивости в условиях динамической реконфигурации;

- архитектура многоузловой децентрализованной вычислительной системы, отличающаяся реализацией двухуровневой схемы вычислительной инфраструктуры и обеспечивающая поддержание логической целостности распределенных данных протокола взаимного информационного согласования, функционирующего поверх протокола межузловой маршрутизации;

- модульная структура программного обеспечения вычислительных узлов многоузловой децентрализованной вычислительной системы,

отличающаяся реализацией механизма межмодульного и межузлового взаимного информационного согласования доступных вычислительных ресурсов и сервисов процесса распределенных вычислений и обеспечивающая его динамическую устойчивость и целостность его информационных структур.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретико-игровая модель взаимодействия вычислительных узлов многоузловой децентрализованной вычислительной системы в условиях динамической реконфигурации структуры системы обеспечивает динамическую устойчивость сформированной вычислительной структуры за счет выбора агентами совокупности действий, приводящих к равновесному состоянию МДВС;

- алгоритм распределения вычислительных ресурсов и управления потоками данных обеспечивает реализацию машины состояний взаимного информационного согласования на основе динамически формируемого узла-ведущего;

- архитектура многоузловой децентрализованной вычислительной системы обеспечивает целостность распределенного реестра сеансов вычислительного процесса в условиях динамического исключения узлов из состава многоузловой децентрализованной вычислительной системы.

Практическая значимость исследования заключается в разработке средств специального математического и программного обеспечения децентрализованного управления распределением вычислительных ресурсов и потоков данных в многоузловой децентрализованной системе на основе теоретико-игрового подхода и технологии одноранговых вычислительных систем, обеспечивающих повышение динамической устойчивости формируемой вычислительной инфраструктуры. На элементы программных средств получено свидетельство о государственной регистрации в реестре Федеральной службы по интеллектуальной собственности. На способ распределения вычислительных ресурсов в многоузловой децентрализованной вычислительной системе получен патент на изобретение в Федеральном институте промышленной собственности.

Результаты внедрения. Основные положения и результаты диссертационной работы реализованы в виде специального программного модуля для прототипа вычислительного узла на базе мобильного устройства и нашли практическое применение в работе АО «Научно-технический центр «Атлас» для совершенствования программного обеспечения, реализующего вычислительный процесс в распределенной системе обработки информации. Также результаты внедрены в образовательный процесс Академии ФСО России в дисциплину «Информатика».

Апробация результатов диссертационного исследования. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XI Всероссийская межведомственная научная конференция «Актуальные направления развития систем охраны,

специальной связи и информации для нужд ОГВ РФ» (Академия ФСО России, Орел, 2018 г.), XXIV International Open Science Conference «Modern informatization problems in simulation and social technologies» (Yelm, WA, USA, 2019), IV Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых – будущее России» (ЮЗГУ, Курск, 2019 г.), XXV International Open Science Conference «Modern informatization problems in simulation and social technologies» (Yelm, WA, USA, 2020), Научная конференция «Научно-техническое и информационное обеспечение деятельности...» (ИКСИ Академии ФСБ России, Москва, 2020 г.), IX Между-народная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфо телекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО, Санкт-Петербург, 2020 г.), XXV Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2020» (ТУСУР, Томск, 2020 г.), Межведомственная научно-техническая конференция, посвященная теоретическим и прикладным проблемам развития и совершенствования автоматизированных систем управления и связи специального назначения «НАУКА И АСУ – 2020» (ЗАО «Научно-производственный центр информационных регио-нальных систем» Москва, 2020 г.), XXVII International Open Science Conference «Modern informatization problems in simulation and social technologies» (Yelm, WA, USA, 2021).

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 16 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, патент на изобретение, свидетельство о государственной регистрации программы, а также статья в издании, индексируемом в Scopus. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [2] – теоретико-игровая модель взаимодействия вычислительных узлов в многоузловой децентрализованной вычислительной системе; [6, 7] – алгоритм распределения вычислительных ресурсов и управления потоками данных в многоузловой децентрализованной вычислительной системе; [8, 10] – имитационная модель многоузловой децентрализованной вычислительной системы; [5, 16] – структурная модель взаимодействия программных модулей вычислительного узла многоузловой децентрализованной вычислительной системы; [1, 4, 9] – реализация математического обеспечения децентрализованного управления распределением вычислительных ресурсов; [12, 13] – реализация программного обеспечения децентрализованного управления распределением вычислительных ресурсов и потоков данных в многоузловой децентрализованной системе.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа изложена на 172 страницах машинописного текста, включая 38 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 119 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены основные научные результаты, а также приведены сведения об их апробации и внедрении.

В первой главе проведен анализ состояния проблемы обеспечения динамической устойчивости распределенной вычислительной инфраструктуры, формируемой на базе МДВС.

Исследование архитектуры существующих вариантов многоузловых вычислительных систем показало преимущественное использование централизованного подхода к управлению вычислительным процессом и потоками данных. Рассмотрены проблемы применения такой архитектуры в условиях высокой степени ее масштабируемости, а также существующие решения технологии граничных вычислений, в частности на основе кооперативного использования вычислительных ресурсов в одноранговых вычислительных системах. На основе проведенного анализа предложен вариант классификации распределенных вычислительных систем, определено место в ней многоузловой децентрализованной вычислительной системы. Рассмотрена проблема поддержания динамической устойчивости распределенной вычислительной инфраструктуры в условиях масштабируемости многоузловой децентрализованной вычислительной системы и процесса оттока ее узлов. Выдвинуто предположение о том, что решение указанной проблемы возможно на основе архитектуры одноранговой (ad-hoc) сети вычислительных узлов, реализующих протокол взаимного информационного согласования распределенного реестра сеансов вычислительного процесса.

Решению проблемы распределения ресурсов в системах с распределенным и децентрализованным управлением посвящено достаточно много исследований. Так, в распределенных системах хранения данных, а также в системах цифровых валют широкое распространение получила модель децентрализованного управления поиском ресурсов на основе распределенной хэш-таблицы (Distributed hash table – DHT). Главной особенностью DHT является то, что ответственность за хранение и поиск информации распределена среди множества узлов, объединенных в равноправную (одноранговую) сеть посредством логических ссылок. Другой класс задач, связанный с децентрализованным управлением распределенными ресурсами, базируется на проблеме ограничения производительности узлов систем Edge и Fog computing. В большинстве случаев вычислительные ресурсы узлов таких систем не предназначены для выполнения ресурсоемких приложений обработки данных, например Apache Spark. При этом альтернативное программное обеспечение обработки данных, например Apache Quarks, которое выполняется на ограниченных ресурсах узлов вычислительной системы, обладает низкой функциональностью. Таким образом, важной исследовательской задачей является устранение дисбаланса между

функциональностью и производительностью распределенных приложений для вычислительной системы.

Таким образом, рассмотрены подходы к реализации управления распределением ресурсов и потоками данных в многоузловых децентрализованных вычислительных системах, обеспечивающие решение проблемы обеспечения динамической устойчивости распределенной вычислительной инфраструктуры, формируемой на базе многоузловой децентрализованной вычислительной системы. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена разработке модели взаимодействия вычислительных узлов в многоузловой децентрализованной вычислительной системе в условиях ее динамической реконфигурации.

Рассмотрены существующие подходы к выбору показателей эффективности процесса функционирования многоузловой децентрализованной вычислительной системы. Анализ существующих систем распределенных вычислений, в частности систем с децентрализованным управлением, показал, что для решения задачи глобальной оптимизации используются такие показатели, как время пребывания задачи в системе и среднее время обработки множества задач, а целевой функцией является минимизация указанных показателей. Анализ применяемых моделей управления в рамках моделирования процесса функционирования отдельного вычислительного узла показал, что наиболее часто встречающимися показателями эффективности для задач поиска локального оптимума являются показатели утилизации вычислительных ресурсов узла, отражающие функцию потерь (суммарных затрат) узла, связанных с его участием в кооперативных вычислениях. Указанные задачи предложено рассматривать как для детерминированных условий функционирования МДВС (вычислительный процесс с расписанием) при отсутствии оттока узлов, так и для стохастических условий ее функционирования, связанных с нестационарностью поступления вычислительных задач и процесса оттока узлов.

Для детерминированных условий предложена модель распределенной децентрализованной вычислительной системы из $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ взаимосвязанных узлов, представленных мобильными устройствами. В общем случае каждый узел S_k реализует функцию формирования вычислительной задачи, подлежащей распределению. Пусть:

Z_k – задача k -го узла, которая описывается кортежем (D_k, B_k) ;

D_k – производительность (flops), необходимая для завершения задачи Z_k ;

B_k – размер задачи Z_k (количество бит, необходимых для кодирования Z_k);

f_k – производительность (flops), выделенная локальным процессором k -го узла для выполнения задачи Z_k .

Тогда задержка вычислений при решении задачи на k -м узле определяется следующим образом:

$$\tau_k = \frac{D_k}{f_k}. \quad (1)$$

Время пребывания задачи на k -м узле, в случае, когда задача полностью решается на узле, на котором она сформирована, определяется как

$$T_k(Z_k) = \sum_{k=1}^K \tau_k \left(\frac{1}{\mu_k - \lambda_k} \right), \quad (2)$$

где: λ_k – средняя интенсивность поступления задач на k -й узел;

μ_k – средняя интенсивность обработки задач в k -м узле.

В таком случае задача оптимизации для вычислительного узла может быть представлена следующим образом:

$$\min T_k(Z_k) \quad (3)$$

при $f_k \leq F_{k,\max}$, $\lambda_k < \mu_k$,

где $F_{k,\max}$ – максимальная производительность, которую k -й узел может выполнить за единицу времени.

Обозначим долю задачи, обрабатываемой на k -м узле, как z_k , $0 \leq z_k \leq 1$. При этом $z_k = 1$, если k -й узел обрабатывает задачу z_k самостоятельно, и $z_k = 0$, если k -й узел не обрабатывает поступающую задачу, а перенаправляет ее на j -й узел множества S .

Тогда время пребывания задачи на k -м узле в случае, если она перенаправляется на j -й узел, определяется следующим образом:

$$T_k(z_k = 0) = \tau_{k,j} + \tau_k, \quad (4)$$

где $\tau_{k,j} = \frac{B_k}{C_{kj}}$ – задержка передачи данных между k -м и j -м узлами;

C_{kj} – пропускная способность канала между k -м и j -м узлами.

Рассмотрим случай, когда для выполнения задачи z_k собственных вычислительных ресурсов k -го узла недостаточно. Тогда k -й узел перенаправляет часть $(1 - z_k) = d_k$ задачи z_k на j -й узел.

Тогда время пребывания задач на k -м узле в случае, если часть задачи перенаправляется на j -й узел, определяется выражением (5):

$$T_k(d_k, z_k) = \sum_{k=1}^K \tau_k d_k z_k \left(\frac{1}{\mu_k - z_k d_k \lambda_k} \right) + \sum_{k=1}^K \tau_k (1 - d_k) \times \quad (5)$$

$$\times z_k \left(\tau_{kj} + \frac{1}{\mu_j - \lambda_j - (1 - d_k) z_k \lambda_k} \right).$$

Задача оптимизации для такой многоузловой децентрализованной системы управления потоками данных мобильных устройств, когда произ-

водительность k -го узла может быть улучшена за счет перераспределения части задач на j -й узел, может быть представлена выражением (6):

$$\min_{\{f_k, z_k\}_{kj}} \max_{k \in S} \sum_{k=1}^K T_k(z_k) \quad (6)$$

при

$$0 \leq z_k \leq 1, \sum_{k=1}^K z_k = 1, \forall k;$$

$$\sum_{k=1}^K f_k \leq F_{k, \max}, f_k \geq 0, \forall k.$$

То есть, основываясь на модели распределения ресурсов (1-5), целью работы является оптимизация вычислительных ресурсов таким образом, чтобы минимизировать максимальную задержку вычислений задачи, поступившей на один из вычислителей системы (6).

Для стохастических условий функционирования МДВС предложено использование агентного подхода, при котором вычислительный узел представляется интеллектуальным агентом (ИА), а совокупность вычислительных узлов, с которыми ИА взаимодействует в конкретный момент времени, как среду, в рамках которой он функционирует (рисунок 1).

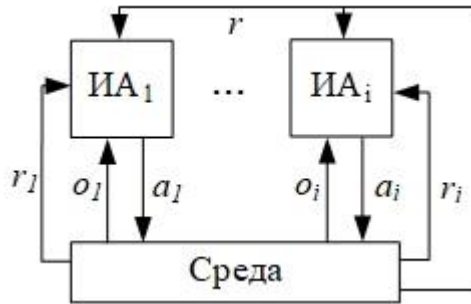


Рисунок 1 – Обобщенная схема агентной системы управления

Очевидно, что в условиях априорной неопределенности о состоянии среды (недостаточно полной информации о поведении других ИА системы) ИА должен реализовать процесс обучения, который существенно зависит от функций, осуществляемых ИА. Так, в условиях эквивалентных функциональных возможностей всех ИА системы, обеспечивающих обмен всей доступной информацией, реализуется стратегия кооперативного обучения, минимизирующая дублирование потоков данных. В условиях частичной неопределенности ИА может формировать распределение вероятностей поведения остальных ИА, реализуя стратегию фиктивной игры.

Указанные ситуации в большинстве случаев применимы к системам распределенных вычислений на основе расписания, реализуемых в составе информационно-управляющих систем реального времени или реагирующих систем (reactive systems). При функционировании распределенных вычислительных систем общего назначения, ориентированных на широкий класс вычислительных задач, четкий критерий вознаграждения за действия ИА (функция полезности) чаще всего отсутствует, что требует от ИА

реализации случайных действий и обучения выбору тех из них, которые максимизируют функцию полезности. Указанный процесс относится к марковским процессам и в теории агентных систем управления классифицируется как агентное обучение с подкреплением (АОП, англ. agent reinforcement learning – ARL). Вычислитель, представленный $ИА_i$, при этом взаимодействует со средой (environment), получая в некоторый момент времени значение наблюдения o_i , на основе которого реализуется действие a_i из множества действий, доступных $ИА_i$. Результатом выполнения действия a_i является выигрыш r_i . Его значение является показателем, влияющим на вероятность реализации действия a_i на последующих этапах функционирования $ИА_i$. В случае рассмотрения одного ИА схема, представленная на рисунке 1, определяет одноагентное обучение с подкреплением (ООП). При рассмотрении множества ИА указанная схема трансформируется в многоагентное обучение с подкреплением (МОП, англ. multiagent reinforcement learning). Из рисунка 1 видно, что схема МОП может быть трансформирована в два класса:

- схема с индивидуальным (r_i) выигрышем $ИА_i$;
- схема с коллективным (r) выигрышем $\{ИА_i\}$.

В силу того, что в общем случае схема ООП является вырожденной схемой МОП, дальнейшая формализация представлена для нее.

Математической моделью ООП является дискретная рекуррентная модель, описываемая следующим кортежем:

$$\langle S, A, v, O, o, R, r \rangle, \quad (7)$$

где $S = \{s\}$ – множество возможных состояний среды; $A = \{a\}$ – множество возможных действий ИА; $O = \{o\}$ – множество наблюдений среды; $R = \{r\}$ – множество возможных значений выигрыша.

Очевидно, что значения показателей указанных множеств в момент времени t носят вероятностный характер и определяются следующими функциями, возвращающими соответствующие вероятности значений:

- функция наблюдения (8);
- функция перехода (9);
- функция выигрыша (10).

$$v(s_t, a_t, s_{t+1}): S \times A \times S \rightarrow [0,1]; \quad (8)$$

$$\xi(s_t, o_t): S \times O \rightarrow [0,1];$$

(9)

$$r(s_t, a_t, s_{t+1}): S \times A \times S \rightarrow R. \quad (10)$$

Рассмотренная выше схема МДВС на основе ООП не в полной мере отражает динамику ее функционирования. С целью уточнения этой схемы

предлагается перейти к схеме МОП, в рамках которой реализуется кооперативная стохастическая игра $\{IA_i\}$.

Формализация схемы МОП связана с переходом от скалярных величин o_t, a_t, r_t к векторам $\vec{o}_t, \vec{a}_t, \vec{r}_t$. Следствием этого является экспоненциальный рост мощности множества $S = \{s\}$ при увеличении масштаба системы (увеличении мощности множества $\{IA_i\}$), поскольку множество состояний среды трансформируется в семейство множеств $\mathbf{S}$, связанное не только с отсутствием в составе МДВС ИА (элемент множества x), но и с состояниями конкретных элементов множества $\{IA_i\}$:

$$\mathbf{S} = \left\{ \left\langle x, s_1, \dots, s_k \mid s_i \in S_i, i = \overline{1, k} \right\rangle \right\}, \quad (11)$$

где S_i – множество возможных состояний i -го ИА.

Соответственно, множество A_i для конкретного IA_i трансформируется в семейство множеств $\mathbf{A}$:

$$\mathbf{A} = \left\{ \left\langle a_i \mid a_i \in A_i, i = \overline{1, k} \right\rangle \right\}. \quad (12)$$

Кроме того, мощность множества $A_i = \{a_i\}$ увеличивается за счет дополнительных возможностей по взаимодействию ИА между собой.

В силу того, что ИА в схеме МОП в общем случае имеют возможность наблюдать состояния других ИА ($s_i, i = \overline{1, k}$), множества O и R также подвергаются трансформации в семейства множеств.

Благодаря переходу к представленным выше семействам множеств, в схеме МОП появляется возможность рассмотрения кооперации ИА. Так, функция v дополняется подмножеством семейства множеств $\mathbf{a}_t = (a_1^t, \dots, a_k^t), a_i^t \in A_i$, определяющим кооперативное воздействие IA_i ($i = \overline{1, k}$) при переходе из состояния s_t к состоянию s_{t+1} .

$$v(s_t, \mathbf{a}_t, s_{t+1}): S \times \mathbf{A} \times S \rightarrow [0, 1]. \quad (13)$$

Исходя из рассмотренных выше представлений МДВС как схемы МОП (8-13), можно сделать вывод, что при масштабировании системы, когда обучение с подкреплением проводится на всем множестве (или некотором подмножестве) ИА, функции наблюдения, перехода и выигрыша отдельных элементов $\{IA_i\}$ в силу их векторного представления становятся зависимыми от действий других элементов данного множества. В связи с этим решение проблемы динамической устойчивости сформированной МДВС, традиционно решаемой в схемах ООП с использованием Q-алгоритмов (*q-learning*), которые базируются на получении оценок функции полезности, не приводит к ожидаемым результатам, поскольку максимизация суммы значений полезности всех элементов $\{IA_i\}$ не гарантирует достижения МДВС своей целевой функции –

минимизации максимальной задержки вычислений множества задач, поступивших на входы $\{IA_i\}$.

Очевидно, что решение этой задачи лежит в области получения пригодных решений, например приведения схемы МОП, которой представлена МДВС, к некоторому равновесному состоянию. В качестве точки равновесия при этом предлагается использовать равновесие по Нэшу.

Для схем МОП точка, определяющая равновесие по Нэшу, может быть представлена набором Π политик IA_i (правил выбора действия a_i) – таким, что для любого состояния $s \in S$ для функции выигрыша выполняется условие

$$\forall_{\pi_i^* \in \Pi} r_i(s, \pi_i^*, \dots, \pi_k^*) \geq r_i(s, \pi_i^*, \pi_{i-1}^*, \pi_i^*, \pi_{i+1}^*, \pi_k^*) \quad (14)$$

где $r_i(s, \pi_i^*, \dots, \pi_n^*)$ – значение функции выигрыша IA_i , которое он получает, начав функционировать из состояния s , исходя из предположения, что остальные ИА реализуют набор политик $\pi_i^*, \dots, \pi_n^*$. При этом известно, что для любой структуры многоагентной системы, с точки зрения ее динамической устойчивости, имеется хотя бы одна точка, определяющая равновесие по Нэшу.

Разработанная теоретико-игровая модель взаимодействия вычислительных узлов в МДВС в условиях ее динамической реконфигурации на основе кооперативной стохастической игры с использованием методов мультиагентного обучения с подкреплением позволяет удерживать вычислительную структуру МДВС в равновесном состоянии.

Третья глава посвящена разработке алгоритма децентрализованного управления потоками данных и распределением ресурсов, а также имитационной модели многоузловой децентрализованной вычислительной системы.

В качестве метода взаимодействия вычислительных узлов для распределения ресурсов предлагается использование двойного комбинаторного аукциона, выбранного из представленного множества аукционных алгоритмов.

В соответствии с целями имитационного исследования разработан моделирующий алгоритм для исследования времени выполнения задач в системе в зависимости от количества вычислительных узлов (рисунок 2).

Для исследования динамической устойчивости многоузловой децентрализованной вычислительной системы в условиях ее масштабируемости и процесса оттока узлов была разработана дискретно-событийная имитационная модель в среде моделирования AnyLogic.

Дискретная рекуррентная модель, описываемая кортежем (7), может быть определена следующим количеством элементов:

1. Для множества S :
 - s_0 – формирование вычислительной инфраструктуры МДВС;
 - s_1 – ввод узла-ведомого в вычислительную инфраструктуру МДВС;

- s_2 – вывод узла-ведомого из вычислительной инфраструктуры МДВС;
- s_3 – расформирование вычислительной инфраструктуры МДВС.

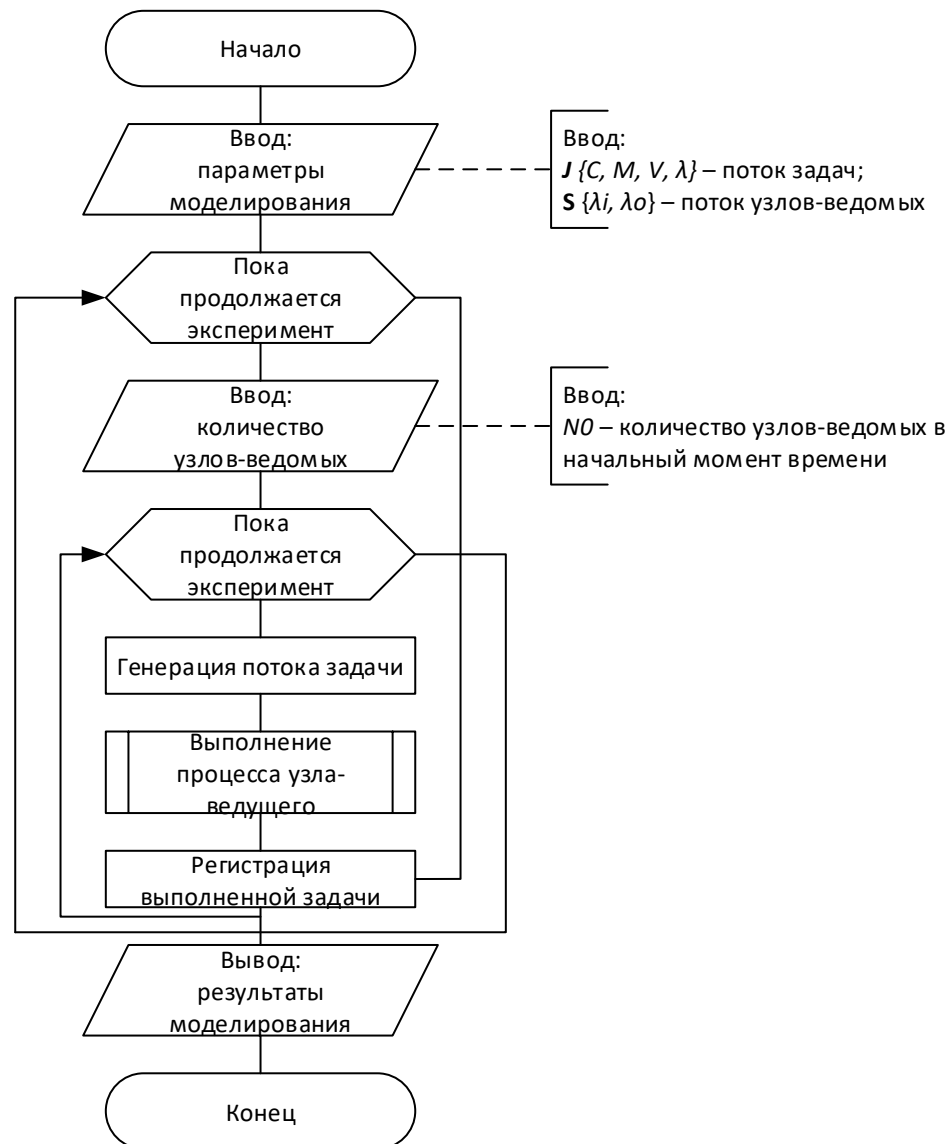


Рисунок 2 – Структурная схема моделирующего алгоритма

2. Для множества A :

- a_0 – введенный в вычислительную инфраструктуру МДВС узел-ведомый имеет свободные локальные вычислительные ресурсы;
- a_1 – узел-ведомый в составе вычислительной инфраструктуры МДВС определяет достаточность свободных локальных вычислительных ресурсов для решения поступившей на его вход задачи;
- a_2 – узел-ведомый обслуживает поступившую на его вход задачу путем занятия всех свободных локальных вычислительных ресурсов;
- a_3 – узел-ведомый обслуживает поступившую на его вход задачу путем занятия части свободных локальных вычислительных ресурсов.

3. Для множества O :

- o_0 – другие узлы-ведомые и узел-ведущий имеют свободные локальные вычислительные ресурсы;
- o_1 – свободные локальные вычислительные ресурсы других узлов отсутствуют.

4. Для множества R :

- r_0 – приоритет узла-ведомого при кооперативной обработке задачи, поступившей на его вход, увеличивается;
- r_1 – приоритет узла-ведомого при кооперативной обработке задачи, поступившей на его вход, не изменяется.

На основе разработанной имитационной модели был спланирован и проведен имитационный эксперимент, в результате которого была получена зависимость времени выполнения задач, поступающих на входы МДВС, от текущего количества вычислительных узлов (свойство масштабируемости), а также проверен процесс динамической реконфигурации вычислительной инфраструктуры для схемы «ведущий-ведомый» в условиях оттока (динамического исключения) из нее как узлов-ведомых, так и узла-ведущего.

Оценка эффективности проводилась на основании континуальной модели функционирования вычислительных систем, как для стационарного, так и для переходного режимов работы.

Предложенный алгоритм распределения вычислительных ресурсов и управления потоками данных в МДВС реализует схемы «ведущий-ведомый», а представленная имитационная модель МДВС позволяет продемонстрировать распределение ресурсов и управление потоками данных мобильных устройств для решения вычислительных задач без передачи данных в облачную инфраструктуру.

В четвертой главе предложена архитектура многоузловой децентрализованной вычислительной системы.

На основе анализа существующих программно-аппаратных решений вычислительных узлов МДВС была обоснованно выбрана платформа Raspberry Pi 3 Model B+ с интегрированным модулем Wi-Fi 802.11ac DualBand 2.4GHz & 5GHz. В качестве базового системного ПО предложено использование операционной системы Raspbian Stretch Lite Kernel version 4.1.4 со средой контейнеризации приложений Docker. Для указанной программно-аппаратной среды была разработана многоуровневая архитектура программного обеспечения (ПО) вычислительного узла МДВС, базирующаяся на сервис-ресурсной модели (рисунок 3).

Разработанная архитектура представлена двумя уровнями:

- 1) физической инфраструктуры МДВС, представляющей совокупность мониторов и исполнительных механизмов вычислительного узла – ИА, где среда контейнеризации приложений Docker используется в качестве хранилища сервисов, вызываемых для решения поступающих на входы МДВС задач;

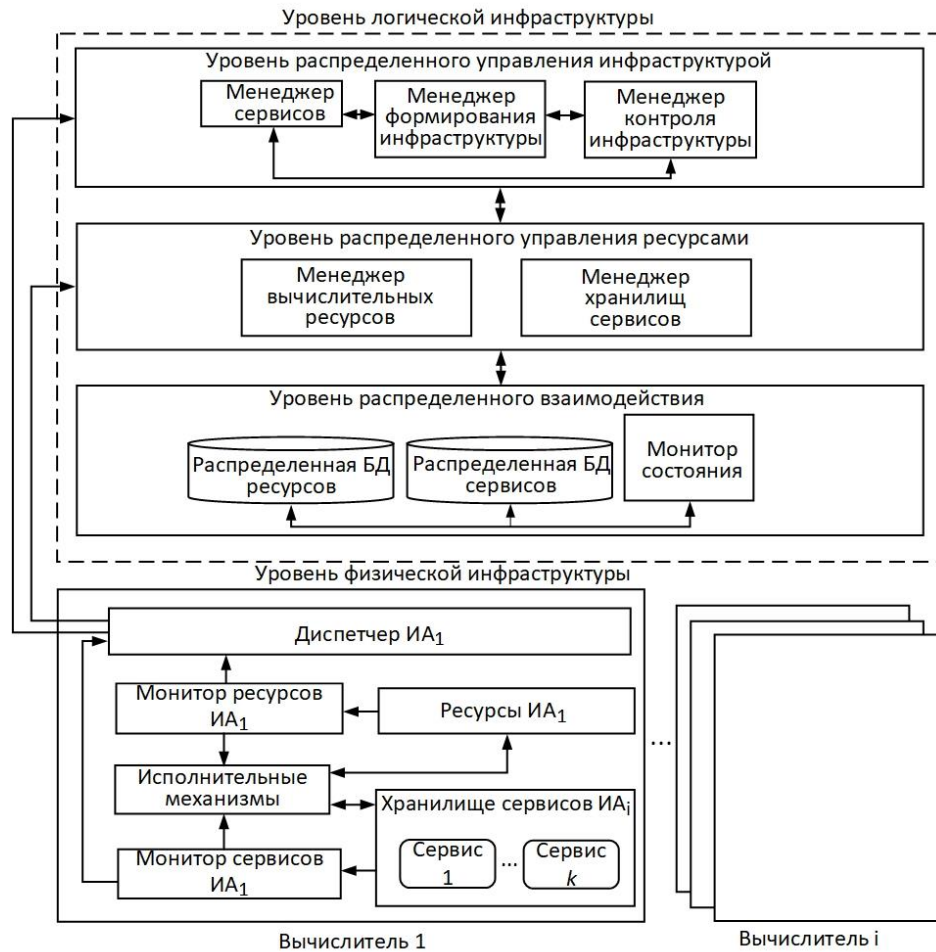


Рисунок 3 – Многоуровневая архитектура ПО вычислительного узла МДВС

2) логической инфраструктуры МДВС, представляющей совокупность:

- распределенных реестров ресурсов и сервисов, поддерживающих сеансы распределенных вычислений;
- менеджеров логического управления формируемыми вычислительными инфраструктурами и поддержания целостности распределенных баз данных (БД).

В качестве основы распределенных БД обоснованно выбрано etcd – распределенное хранилище параметров конфигурации вида «key-value», а в качестве алгоритма взаимного информационного согласования узлов для уровня их распределенного взаимодействия – реализация алгоритма Raft, поддерживающая функциональную схему «leader-follower» («ведущий-ведомый») (рисунок 4).

В рамках предложенной архитектуры МДВС и обоснованно выбранных программно-аппаратных решений узлов и алгоритмов их взаимного информационного согласования разработаны частные решения для процедуры включения нового узла-ведомого в существующую вычислительную инфраструктуру; поддержания целостности распределенных реестров в течение сеанса распределенных вычислений; выбора узла-ведущего из числа узлов-ведомых в случаях его сбоя или отказа (рисунок 5).

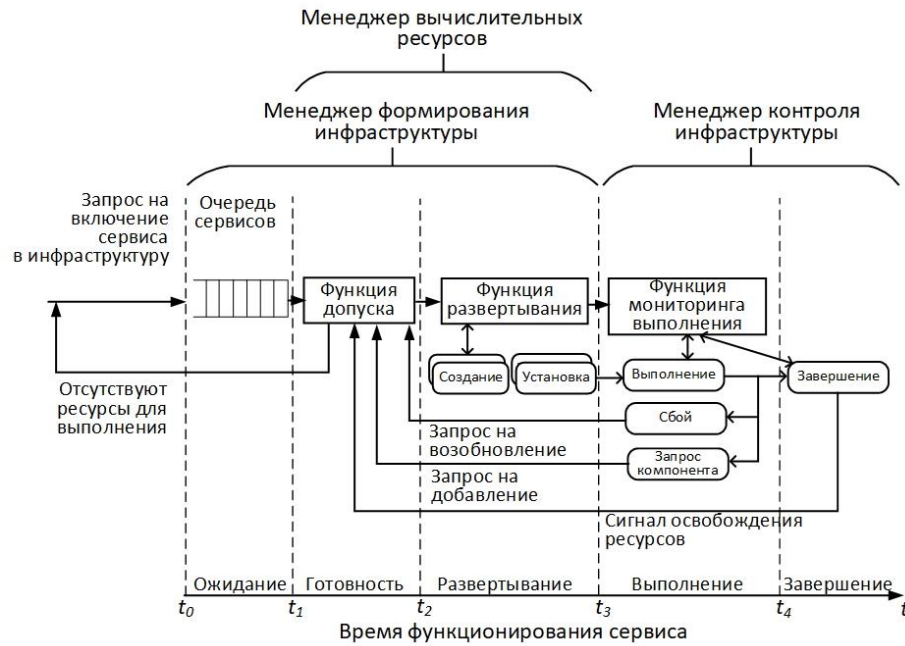


Рисунок 4 – Функциональная схема «ведущий-ведомый»

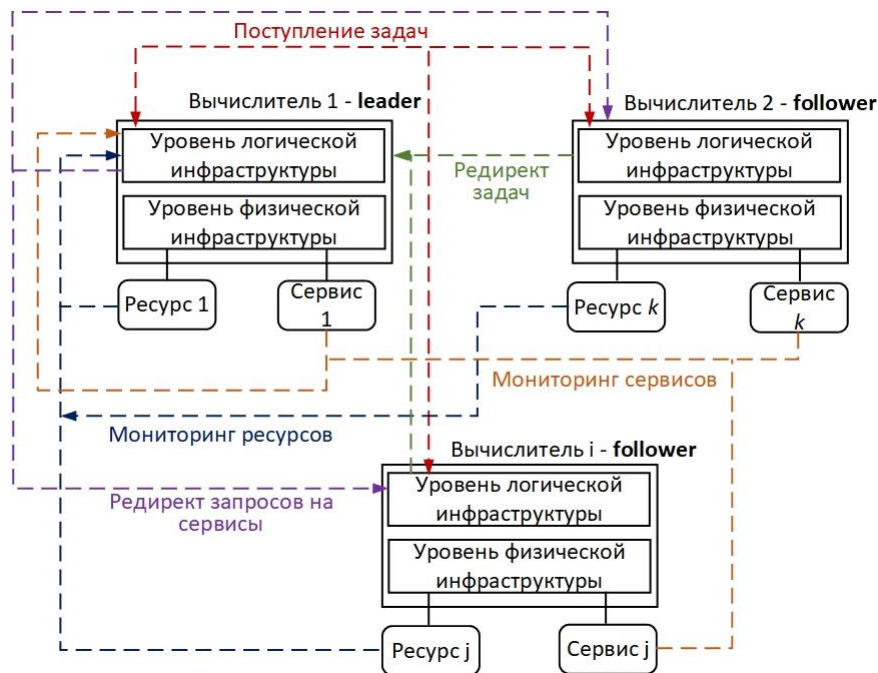


Рисунок 5 – Структура взаимного информационного согласования функционирования вычислительных узлов

Анализ предметной области проектов ПО распределенной обработки данных и распределенных вычислений позволил выделить следующие варианты реализации структуры ПО, поддерживаемого вычислительной платформой Raspberry Pi 3 Model B+:

- *WiFiMeshRaspberryPi* – набор API-функций, функционирующих поверх стека протоколов TCP/IP GNU/Linux, и обеспечивающих локацию и маршрутизацию peer-to-peer узлов mesh-сети через интерфейс WLAN;

- *Docker for Raspbian* – реализация фреймворка автоматизации управления системой контейнеризации;
- *etcd* – реализация распределенной БД, основанной на кворумных методах взаимного информационного согласования в системах отказоустойчивой обработки данных.

На основе указанных реализаций ПО была разработана многоуровневая структурная схема ПО вычислительных узлов МДВС (рисунок 6).

В качестве базовых служб, запускаемых при старте ОС, используются:

- *etcd* – служба поддержки распределенной БД типа «ключ-значение» (key-value DB);
- *Docker Runtime* – среда управления системой контейнеризации Docker;
- *WiFiMeshRaspberryPi* – сервис peer-to-peer локации и маршрутизации в одноранговой mesh-сети, базирующийся на стеке протоколов TCP/IP и использующий в качестве структуры данных таблицы маршрутизации распределенную хэш-таблицу DHT.

Информационное взаимодействие распределенных компонентов *etcd* и *WiFiMeshRaspberryPi* реализуется с использованием REST API, функционирующего поверх протокола HTTP. Служба *etcd* реализует вариант кворумной модели для схемы «ведущий-ведомый». Благодаря тому, что служба *etcd* является OpenSource проектом, в ходе проведения исследования была выполнена модификация алгоритма межузлового голосования для этапа репликации актуальных данных *Инфраструктуры CI* и выбора узла с функцией «Ведущий».

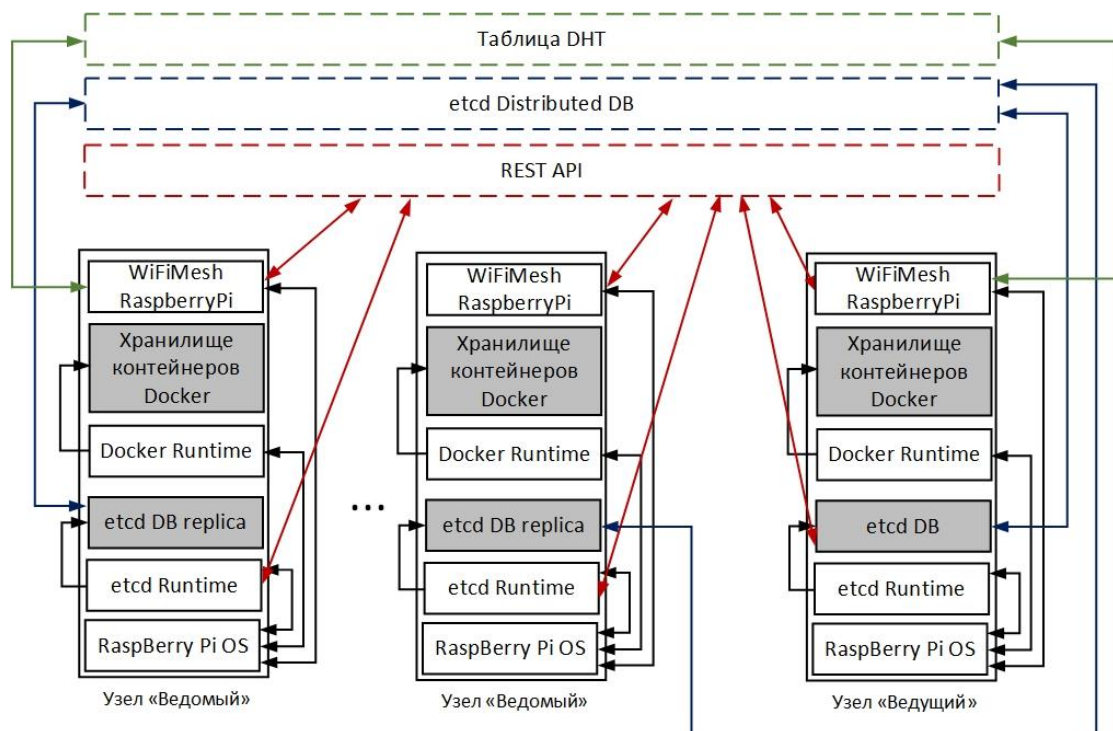


Рисунок 6 – Структурная схема взаимодействия модулей программного обеспечения узлов МДВС на базе вычислительной платформы Raspberry Pi 3 Model B+

Для экспериментальной проверки предложенных решений был спланирован и проведен сравнительный эксперимент по оцениванию масштабируемости (scalability) и динамической устойчивости (dynamic stability) вычислительной инфраструктуры, формируемой МДВС (рисунок 7). Разработанная структура программных модулей МДВС была реализована на кластере из восьми «Raspberry Pi 3 Model B+». Сравнение производилось с вариантом системы распределенных вычислений на базе облачной инфраструктуры Microsoft Azure, основанной на алгоритме взаимного информационного согласования Paxos, реализованном в фреймворке Apache Cassandra. Проведенные эксперименты показали зависимость времени достижения взаимной согласованности сформированной вычислительной инфраструктуры от числа отказавших узлов, включая процесс выбора отказавшего узла-ведущего, что позволяет провести экстраполяцию значения динамической устойчивости на МДВС заданного масштаба. Оценивание предложенной процедуры взаимного информационного согласования на базе распределенного хранилища etcd и фреймворка Apache Cassandra показало снижение времени формирования вычислительной инфраструктуры при последовательном добавлении в нее узлов-ведомых с 50 минут для 40 узлов (Apache Cassandra) до 1,5 минут для 100 узлов (etcd).

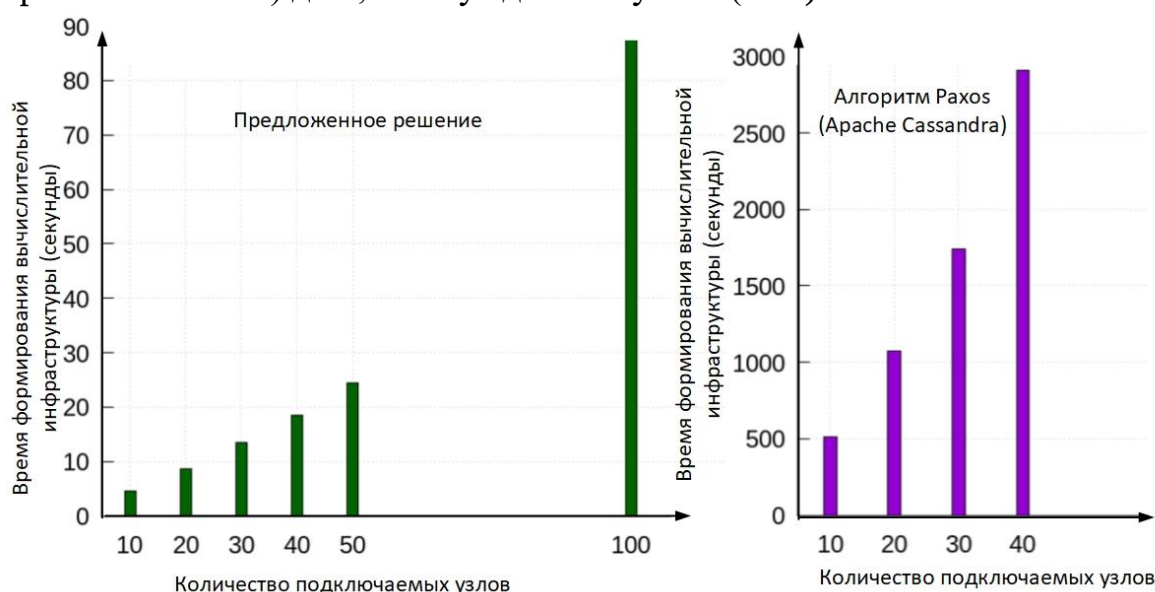


Рисунок 7 – Сравнительный эксперимент по оцениванию масштабируемости и динамической устойчивости вычислительной инфраструктуры, формируемой МДВС

Таким образом, разработана структурная модель взаимодействия программных модулей вычислительного узла МДВС. На реализованные элементы разработанного ПО процесса функционирования многоузловой децентрализованной вычислительной системы получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в реестре ФИПС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ состояния проблемы обеспечения динамической устойчивости процесса управления вычислительными ресурсами и потоками данных в многоузловых децентрализованных вычислительных системах.
2. Разработана теоретико-игровая модель взаимодействия вычислительных узлов многоузловой децентрализованной вычислительной системы в условиях динамической реконфигурации структуры системы.
3. Разработан алгоритм распределения вычислительных ресурсов и управления потоками данных протокола взаимного информационного согласования в многоузловой децентрализованной вычислительной системе в условиях ее динамической реконфигурации.
4. Разработана архитектура многоузловой децентрализованной вычислительной системы, поддерживающая динамическую устойчивость процесса распределенных вычислений.
5. Разработано программное обеспечение процесса функционирования вычислительных узлов многоузловой децентрализованной вычислительной системы.
6. Проведены численные эксперименты по оцениванию масштабируемости и динамической устойчивости распределенного вычислительного процесса.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях списка ВАК:

1. Рожкова, Т. С. Подходы к постановке задачи оптимизации распределения ресурсов в вычислительной сети / Т. С. Рожкова, В. В. Афанасьев, И. И. Ветров // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – № 8 (4). Режим доступа : <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=859>.
2. Рожкова, Т. С. Разработка модели распределения ресурсов в многоузловой децентрализованной системе управления потоками данных мобильных устройств / Т. С. Рожкова, А. А. Невров, И. И. Ветров // Системы управления и информационные технологии. – 2021. – № 4 (86). – С. 14-18.
3. Рожкова, Т. С. Использование теоретико-игрового подхода для моделирования процесса функционирования многоузловой децентрализованной вычислительной системы // Системы управления и информационные технологии. – 2022. – № 1 (87). – С. 13-16.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus:

4. Rozhkova, T. Construction of a parametric model of competitive access in relational databases by using a random forest method / D. Gromey, E. Lebedenko, D. Nikolaev, T. Rozhkova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information technology. Industry control system. – 2019. – Vol. 3. – № 2 (99). – pp. 15-24.

Свидетельства о государственной регистрации программ и патенты:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613217. Многоузловая децентрализованная вычислительная система «MDCS-Trial version» / Т. С. Рожкова, М. А. Васюков, В. А. Смирнов, Д. М. Бакулин, Д. А. Фефилов; заявители и правообладатели: Т. С. Рожкова, М. А. Васюков, В. А. Смирнов, Д. М. Бакулин, Д. А. Фефилов; опубл. 01.03.2022.

6. Патент на изобретение RU 2647697 С1, Российская Федерация. Способ распределения ресурсов между агентами в гетерогенной эпизодической вычислительной сети / Т. С. Рожкова, Е. В. Лебедеенко; заяв. – 2017102087 от 23.01.2017; опубл. 16.03.2018; бюл. № 8.

Статьи и материалы конференций:

7. Рожкова, Т. С. Алгоритмы распределения ресурсов в гетерогенной эпизодической вычислительной сети / Т. С. Рожкова, Е. В. Лебедеенко // XI Всероссийская межведомственная научная конференция «Актуальные направления развития систем охраны, специальной связи и информации для нужд ОГВ РФ». – Академия ФСО России. – 2018. – № 3. – С. 74-79.

8. Rojkova, T.S., Bykova, A.S. To the question of resources distribution in heterogeneous ad hoc networks // Modern informatization problems in simulation and social technologies MIP-2019'SCT. Proceedings of the XXIV-th International Open Science Conference, Yelm, WA, USA, January 2019, pp. 216-221.

9. Рожкова, Т. С. К вопросу о распределении ресурсов между агентами в гетерогенной эпизодической вычислительной сети / Т. С. Рожкова, Е. В. Лебедеенко // Информационные технологии моделирования и управления. – 2019. – № 2 (116). – С. 125-134.

10. Рожкова, Т. С. Децентрализованный подход к управлению ресурсами в распределенных вычислительных сетях / Т. С. Рожкова, Е. В. Лебедеенко, М. В. Чемодуров // Научная конференция «Научно-техническое и информационное обеспечение деятельности...» ИКСИ Академии ФСБ России. – Москва. – 2020. – № 1. – С. 117-120.

11. Рожкова, Т. С. Обзор существующих решений по реализации систем распределенных вычислений // IV Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых – будущее России» ЮЗГУ. – Курск. – 2019. – № 2. – С. 84-90.

12. Rojkova, T.S., Borodkina, V.E., Magamedov, R.R. Open frameworks of neural networks distributed training for texts classification by category // Modern informatization problems in simulation and social technologies MIP-2020'SCT. Proceedings of the XXV-th International Open Science Conference, Yelm, WA, USA. – January 2020. pp. 108-112.

13. Rojkova, T.S., Karpenko, O.A., Rykshin, M.S. Research of distributed storage systems and methods of distributed processing for big data // Modern informatization problems in simulation and social technologies MIP-2020'AS.

Proceedings of the XXV-th International Open Science Conference, Yelm, WA, USA. – January 2020. – pp. 235-239.

14. Рожкова, Т. С. Обзор существующих моделей управления ресурсами в распределенной вычислительной системе // IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», АПИНО. – СПб. – 2020. – С. 556-561.

15. Рожкова, Т. С. Обзор показателей эффективности управления ресурсами в распределенной вычислительной системе // XXV Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2020». – Томск. – 2020. – С. 64-67.

16. Rojkova, T.S., Lebedenko, E.V. Research of distributed storage systems and methods of distributed processing for big data // Modern informatization problems in simulation and social technologies MIP-2020'AS. Proceedings of the XXVII-th International Open Science Conference, Yelm, WA, USA. – January 2021. – pp. 235-241.