УДК 621-039-542

EDN ACOXMY

Имитационное моделирование распределенных вычислительных систем

С.С. Чивчян

Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: chivchyanst@gmail.com

Аннотация. Стремительных рост сложных систем, используемых в облачных вычислениях, системах искусственного интеллекта и больших данных подталкивает на применение имитационного моделирования для исследования поведения системы в различных сценариях, а также для того, чтобы минимизировать риски при внедрении новых технологий и оптимизации ресурсов. Целью статьи является исследование современных подходов к подобным платформам, их роли в анализе и оптимизации сложных вычислительных архитектур. Работа направлена на обзор существующих исследований и инструментов, применяемых для моделирования процессов в РВС. Данная статься может способствовать разработке новых систем имитационного моделирования облачных вычислений, а также может быть полезной для ознакомления с основами распределенных вычислительных систем и их моделирования.

Ключевые слова: имитационное моделирование, распределенные вычислительные сети, облачные вычисления, оптимизация распределения задач.

Simulation modeling of distributed computing systems

S.S. Chivchyan

Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia

E-mail: chivchyanst@gmail.com

Abstract. The rapid growth of complex systems used in cloud computing, artificial intelligence, and big data drives the use of simulation modeling to study system behavior in various scenarios, as well as to minimize risks when implementing new technologies and optimizing resources. This article aims to explore modern approaches to such platforms and their role in the analysis and optimization of complex computing architectures. It also aims to review existing research and tools used to model processes in distributed computing systems. This article can contribute to the development of new cloud computing simulation systems and may also be useful for familiarizing oneself with the fundamentals of distributed computing systems and their modeling.

Keywords: simulation modeling, distributed computing networks, cloud computing, task distribution optimization.

1. Введение

Распределенные вычислительные системы (РВС) представляют собой основу современной цифровой инфраструктуры. Они обеспечивают работу облачных сервисов, систем анализа данных, платформ искусственного интеллекта. Сложность таких систем обусловлена их масштабируемостью, высокой степенью параллелизма и необходимостью эффективного управления ресурсами. Также современные технологии требуют больших вычислительных мощностей, из-за чего растет количество дата-центров, которые влекут затраты электроэнергии и ресурсов.

Для того, чтобы не использовать лишние ресурсы и уменьшить риск возникновения потенциальных узких мест в системе используется имитационное моделирование. Данный метод позволяет создавать экспериментальные сценарии без непосредственного вмешательства в реальную инфраструктуру. Разнообразие существующих решений и методов порождает необходимость их анализа, чтобы выбрать подходящие средства и предложить концепцию, учитывающую современные потребности.

2. Постановка задачи (Цель исследования)

Целью исследования является ознакомление с распределенными вычислительными системами и анализ современных программных средств для имитационного моделирования распределенных вычислительных систем.

Задачи исследования:

- провести анализ библиографических источников и предметной области;
- выполнить обзор наиболее актуальных средств имитационного моделирования облачных систем и исследований по оптимизации распределения задач.

3. Методы и материалы исследования

3.1. Анализ библиографических источников и предметной области

Имитационное моделирование распределенных вычислительных систем является одной из ключевых технологий для исследования, проектирования и оптимизации современных вычислительных инфраструктур.

Распределенные вычислительные системы представляют из себя совокупность вычислительных ресурсов, работающих в едином окружении для выполнения общих задач. Их отличительными чертами является:

- возможность адаптации системы под растущие нагрузки;
- выполнение операций на разных узлах, что требует эффективного планирования и взаимодействия (отсюда порождаются множество исследований по разработке моделей, методов и алгоритмов для оптимизации распределения задач);
- обеспечение надежности в условиях выхода из строя отдельных компонентов;
- использование различных типов оборудования и архитектур.

РВС находят применение в широком спектре областей: от обработки больших данных до управления облачными и граничными вычислениями.

Облачные вычисления можно определить как «тип параллельной и распределенной системы, состоящей из набора взаимосвязанных и виртуализированных компьютеров, которые динамически предоставляются и представляются как один или несколько унифицированных вычислительных ресурсов на основе соглашений об уровне обслуживания, заключенных путем переговоров между поставщиком услуг и потребителями» [1].

Лесли Лэмпорт (американский ученый в области информатики, первый лауреат премии Дейкстры и разработчик LaTeX [2]) в одном из своих интервью дал следующее определение: «распределенным системам – это система, в которой ваш компьютер может стать бесполезным из-за отказа компьютера, о существовании которого вы даже не знали» [3]. Из-за этого, чтобы предоставить максимально надежный опыт использования для конечного потребителя, необходимо тщательно тестировать новые технологии в подобных системах.

3.2. Имитационное моделирование

Имитационное моделирование используется для исследования поведения РВС без необходимости развертывания реальной инфраструктуры. Это важно для:

- предсказания производительности системы при изменении параметров;
- тестирования и оптимизации алгоритмов распределения задач;
- анализа отказоустойчивости и масштабируемости.

В статьях [4-6] приведена подробная классификация с описанием области применения средств имитационного моделирования. Выделяют два класса имитационного моделирования:

- системы общего назначения;

- узкоспециализированные системы.

Системы общего назначения обладают высокой гибкостью и позволяют моделировать практически любую предметную область, но требуют значительной квалификации от разработчика из-за их сложности. В отличие от них, узкоспециализированные системы адаптированы для конкретных классов задач, что делает их более доступными для изучения и применения. Такие системы обычно снабжены интуитивно понятным интерфейсом, ориентированным на специалистов в соответствующей области, что способствует ускорению разработки моделей.

С точки зрения сфер применения выделяются системы [4], используемые для бизнес-аналитики, моделирования компьютерных сетей, производственных процессов и непосредственно распределенных вычислительных систем. Каждая из этих категорий обладает уникальными особенностями, отражающими специфику предметной области.

Кроме того, имитационное моделирование классифицируется на три основных подхода [7]:

- Дискретно-событийное моделирование: фокусируется на изменении состояний системы в конкретные моменты времени, что делает его идеальным для анализа производственных, логистических и медицинских процессов.
- Системная динамика: ориентирована на изучение поведения динамических систем с обратными связями, включая их взаимодействие с окружающей средой. Этот метод полезен для анализа систем с нелинейной и переменной структурой.
- Агентное моделирование: исследует поведение децентрализованных систем, состоящих из агентов – объектов, обладающих автономным поведением и способностью взаимодействовать друг с другом. Данный подход позволяет изучать влияние индивидуальных действий на поведение системы в целом.

В статье [8] описана распределенная сервис-ориентированная среда для моделирования систем массового обслуживания на базе виртуализированных ресурсов Иркутского суперкомпьютерного центра. Подчеркнута важность высокоуровневого интерфейса для удобства пользователей и дальнейших исследований в области автоматизации анализа результатов моделирования с применением GPSS World. Также упоминается разработка моделей для лечебных учреждений.

Работа [9] посвящена оптимизации обработки данных с использованием возможностей графических ускорителей и библиотеки Numba на Python. Автор предлагает реализовывать

параллельные операции как отдельные модули с унифицированным интерфейсом. Статья ориентирована на прикладные аспекты повышения эффективности вычислений.

Исследование [10] демонстрирует ценность имитационного моделирования для анализа временных характеристик распределенных систем. Приведены модели, оценивающие среднее время ожидания заявок в зависимости от алгоритмов приоритезации. Для повышения точности результатов применен регенеративный метод анализа, позволяющий получать более надежные данные и улучшать качество последующего анализа.

Статья [11] посвящена созданию программного комплекса для автоматизации проектирования автомобильных дорог. Разработанная система обеспечивает выполнение расчетов дорожных конструкций в соответствии с нормативными требованиями, включая прочность, морозоустойчивость, сдвигоустойчивость и устойчивость к усталостному разрушению.

Статья [12] рассматривает задачи динамического распределения ресурсов в облачных центрах обработки данных, где важным является минимизация энергопотребления и обеспечение равномерной загрузки серверов. В качестве метода прогнозирования используется метод группового учета аргументов, который позволяет точно предсказывать загрузку и температуру серверов, снижая частоту ненужных миграций виртуальных машин.

Все рассмотренные выше научные работы демонстрируют актуальность и значимость применения имитационного моделирования в различных областях. Эти исследования подтверждают, что имитационное моделирование является мощным инструментом для анализа, прогнозирования и повышения эффективности систем, что делает его неотъемлемой частью современных научных и прикладных разработок.

В статьях [12] и [13] также подчеркивается значимость разработки имитационных платформ, а также приводятся ключевые этапы распределения ресурсов.

3.3. Методы и алгоритмы распределения задач

Одной из ключевых прикладных задач является распределение и планирование задач в вычислительных сетях. В условиях растущей сложности инфраструктуры, таких как облачные центры обработки данных, распределенные вычислительные системы и высоконагруженные сети, задачи управления ресурсами становятся все более многообразными и требуют инновационных подходов [14, 15]. Все новые модели и алгоритмы тестируются при помощи имитационных средств.

Статья [16] посвящена улучшению процесса распределения задач в облачных вычислениях. Предложен алгоритм на основе метода кластеризации К-средних, который группирует задачи в кластеры, а затем распределяет их между виртуальными машинами в зависимости от их возможностей. По итогу эксперимента, предложенный подход уменьшает время выполнения задач и общую продолжительность их обработки, за счет этого повышается эффективность распределения задач.

Статья [17] представляет обзор алгоритмов планирования нескольких рабочих процессов в облачных вычислительных средах. Представлена классификация таких алгоритмов, их особенности и сравнительный анализ. В статье рассматриваются следующие задачи: оптимальное распределение задач между процессорами, сокращение времени выполнения процессов и управление затратами. Исследование подчеркивает необходимость дальнейших исследований в области улучшения алгоритмов планирования и их адаптации для сложных облачных сценариев.

Исследование [18] рассматривает проблему распределения вычислительной нагрузки в условиях туманных вычислений, которые стали актуальными из-за недостаточности традиционных облачных архитектур для работы с большими объемами данных в среде IoT. Подчеркивается значимость разработанной онтологии и ее потенциал для сокращения времени перебора узлов-кандидатов при размещении нагрузки.

3.4. Существующие методы решения

В статье [19] предлагается конфигурируемый цифровой симулятор в реальном времени для распределенных систем, который используется для имитации поведения реального устройства, управляемого на основе XML файла. Эта статья показывает, что система моделирования должна быть легко конфигурируема в одном файле, а не с помощью программного кода.

В ходе анализа рассмотренных научных работ было выявлено, что пакет CloudSim используется в значительном числе исследований для моделирования и изучения различных аспектов распределения ресурсов и оптимизации задач в облачных вычислениях. Его широкая популярность обусловлена высокой степенью гибкости, поддержкой множества сценариев симуляции, а также возможностью кастомизации под специфические требования исследователей.

Использование CloudSim в ряде рассмотренных работ [12-13], [16], [18] подтверждает его актуальность как средства для имитационного моделирования в области облачных вычислений. В исследовании [17] в одном из рассмотренных примеров также использовалось данное решение для имитационного моделирования.

Для симуляции граничных и IoT-систем этой же компанией разработан фреймворк iFogSim (и iFogSim2) [20]. Он построен на основе CloudSim и предназначения для моделирования раскладки вычислительных задач между облаком и узлами тумана (fog computing).

В статье [21] описывается применение CloudSim в учебном процессе. В работе подробно описаны возможности CloudSim. Автор демонстрирует методику интеграции CloudSim в образовательные программы для закрепления навыков программирования, моделирования и анализа производительности облачных систем.

Одним из существенных минусов CloudSim является отсутствие визуального представления результатов моделирования и взаимодействия с системой. Это делает его использование сложным для начинающих пользователей, которые могли бы быстрее освоить инструмент при наличии графического интерфейса.

Кроме того, отсутствие визуализации затрудняет анализ сложных сценариев моделирования, таких как распределение ресурсов, миграция виртуальных машин или топологии сети. Пользователям приходится дополнительно разрабатывать инструменты визуализации или экспортировать данные в сторонние программы.

В работе [22] рассматриваются облачные вычисления, включая платформу CloudSim. В статье представлены наиболее часто используемые классы платформы с описанием их функционального назначения.

4. Полученные результаты

На основе архитектуры CloudSim была разработана структурная схема для ПО имитационного моделирования распределенных систем, которая представлена на рисунке 1.

Архитектура представляет из себя модульную, многоуровневневую платформу.

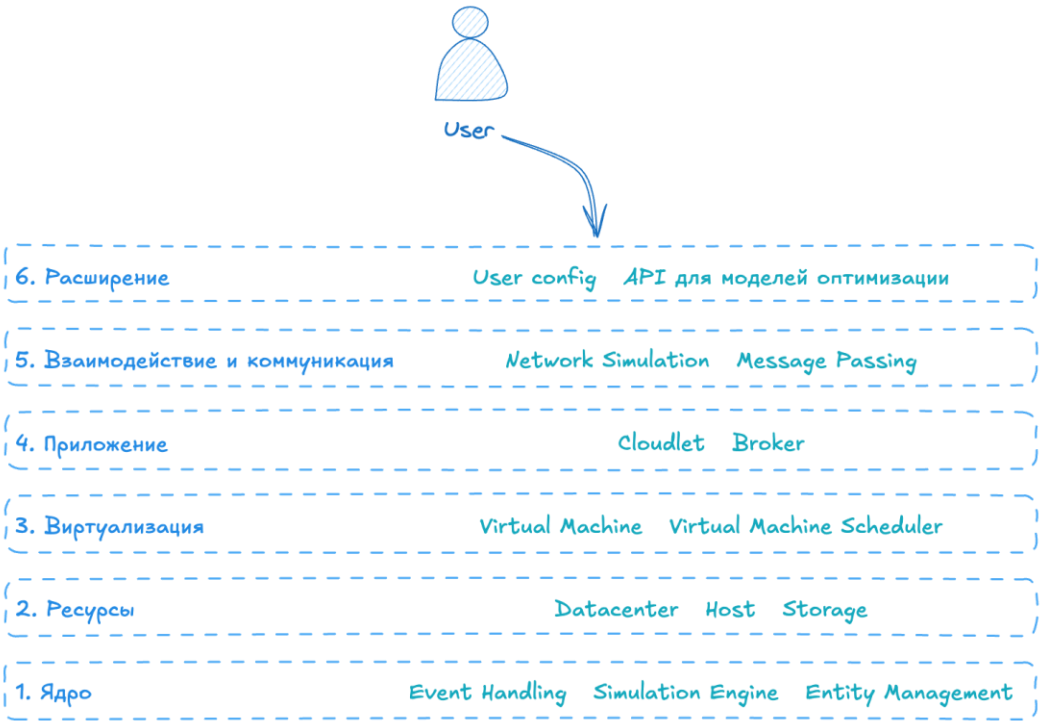

Рисунок 1. Структурная схема.

Планировщик получает задачи от пользователя, определяет подходящие виртуальные машины, запускает задачи и отслеживает их выполнение. Центры обработки данных предоставляют ресурсы планировщику, управляют хостом. Виртуальные машины выполняют задачи, переданные планировщиком. Сеть обеспечивает взаимодействие между компонентами, учитывая задержки и ограничения пропускной способности.

5. Выводы

В статье проведен анализ существующих подходов и технологий, включая платформу CloudSim, на основе которой были выделены ключевые требования к средам имитационного моделирования распределенных вычислительных систем.

Стоит выделить, что при разработке подобной системы рекомендуется уделить внимание к конфигурации инфраструктуры при помощи конфига и интеграции пользовательского интерфейса с элементами визуализации, чтобы упростить процесс анализа результатов моделирования.

Также в статье рассмотрены работы, посвященные данной сфере. Результаты исследования имеют как теоретическую, так и практическую значимость. Они могут быть использованы для разработки среды имитационного моделирования распределенных

вычислительных систем. Также исследование может быть полезным для ознакомления с основами имитационного моделирования РВС.

Список литературы

1. Буйя, Р., Modeling and simulation of scalable cloud computing environment and the cloudsim toolkit: challenges and opportunities / Р. Ранджан, Р. Кальейрос // IEEE Spectrum. – 2009 (дата обращения: 06.06.2025).
2. Лэмпорт, Лесли – Wikipedia : сайт. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Лэмпорт,_Лесли (дата обращения: 06.06.2025).
3. How to Write Software With Mathematical Perfection – Quantamagazine : сайт. – URL: https://www.quantamagazine.org/computing-expert-says-programmers-need-more-math-20220517/ (дата обращения: 06.06.2025).
4. Феоктистов, А. Г. Инструментальные средства имитационного моделирования предметно-ориентированных распределенных вычислительных систем / А. Г. Феоктистов, А. С. Корсуков, Ю. А. Дядькин // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 4. – С. 30-60. – EDN XEHESN (дата обращения: 06.06.2025).
5. Малецкая, О. А. Обзор систем имитационного моделирования / О. А. Малецкая // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии : Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции, Оренбург, 14–15 ноября 2013 года / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Оренбургский государственный университет". – Оренбург: ООО ИПК "Университет", 2013. – С. 321-325. – EDN RVVQSV (дата обращения: 06.06.2025).
6. Бойко, А. А. Имитационное моделирование: виды и области применения / А. А. Бойко, С. А. Евдокимова, Т. П. Новикова // Новые аспекты моделирования систем и процессов : Материалы Международной научно-практической конференции, Воронеж, 26 мая 2023 года / Отв. редакторы В.К. Зольников, А.И. Заревич. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. – С. 18-26. – DOI 10.58168/NAMSP_18-26. – EDN FBOEVO (дата обращения: 06.06.2025).
7. Евдокимова, С. А. Simulation modeling of the process of consideration of citizens' appeals / Д.Н. Драгина // Modeling of systems and processes. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 15-24 (дата обращения: 06.06.2025).

8. Феоктистов, А. Г. Распределенная вычислительная среда для имитационного моделирования систем массового обслуживания / А. Г. Феоктистов // Интеллектуальные технологии и средства реабилитации и абилитации людей с ограниченными возможностями (ИТСР-2018) : Труды III международной конференции, Москва, 29–30 ноября 2018 года. – Москва: Московский государственный гуманитарно-экономический университет, 2018. – С. 57-61. – EDN OPZRJM (дата обращения: 06.06.2025).
9. Исследование ускорения обработки данных в многоядерных вычислительных системах на основе имитационного моделирования / В. А. Лохвицкий, А. И. Захаров, Г. А. Брякалов, К. А. Неретина // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2022. – № 1. – С. 87-94. – DOI 10.18137/RNU.V9187.22.01.P.087. – EDN QYNESC (дата обращения: 06.06.2025).
10. Звонарева, Г. А. Использование имитационного моделирования для оценки временных характеристик распределенной вычислительной системы / Г. А. Звонарева, Д. С. Бузунов // Открытое образование. – 2022. – Т. 26, № 5. – С. 32-39. – DOI 10.21686/1818-4243-2022-5-32-39. – EDN NPLKMY (дата обращения: 06.06.2025).
11. Тайлакова, А. А. Разработка информационно-вычислительной системы для имитационного моделирования процесса проектирования автомобильных дорог / А. А. Тайлакова // Перспективы развития информационных технологий : Труды Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Кемерово, 29–30 мая 2014 года / Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Международный научно-образовательный центр КузГТУ-Arena Multimedia. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2014. – С. 291. – EDN TCDKSH (дата обращения: 06.06.2025).
12. Тутов, А. В. Моделирование процессов распределения ресурсов в облачных центрах обработки данных / А. В. Тутов, Н. В. Тутова, А. С. Ворожцов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 4. – С. 76-80. – EDN YNTFFX (дата обращения: 06.06.2025).
13. Ташпулатов, Ж. Ж. Модели распределения виртуальных ресурсов облачных центров обработки данных / Ж. Ж. Ташпулатов, С. С. Назиров // Аллея науки. – 2018. – Т. 2, № 4(20). – С. 535-542. – EDN XOHQDZ (дата обращения: 06.06.2025).
14. Дулесов А. С., Андреев Р. А., Коновалов А. А. Модель архитектуры ИТ-решений: создание, генерация решений // Современные инновации, системы и технологии – Modern

Innovations, Systems and Technologies. 2024. Т. 4, № 2. С. 0212–0220. DOI: 10.47813/2782-2818-2024-4-2-0212-0220.

15. Nath, N. C., & Faruq, O. (2025). The application of cybersecurity in smart city innovations: an AI aspect. Modern Innovations, Systems and Technologies, 5(2), 3025–3039. https://doi.org/10.47813/2782-2818-2025-5-2-3025-3039
16. Дандхвани, В. 12. Evolutionary Algorithm Using K-mean For Task Scheduling in Cloud Computing / Д. Векария // International Journal Of Engineering And Computer Science. – 2017. Т. 6, № 5. – С. 21390-21392 (дата обращения: 06.06.2025).
17. Ханоош, З. A Survey on Multiple Workflow Scheduling Algorithms in Cloud Environment // Al-Furat Journal of Innovations in Electronics and Computer Engineering (FJIECE). – 2024. – DOI 10.46649/fjiece.v3.1.4a.13.4.2024 (дата обращения: 06.06.2025).
18. Клименко, А. Б. Решение задачи распределения вычислительной нагрузки в средах туманных вычислений на базе онтологий / А. Б. Клименко, И. Б. Сафроненкова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 8(202). – С. 83-94. – DOI 10.23683/2311-3103-2018-8-83-94. – EDN ZSIJRJ (дата обращения: 06.06.2025).
19. Чэнь, Ц. Real-time digital simulator for distributed systems / Ц. Чэнь, Ч. Ду, П. Хан, С. Ду // Simulation. – 2021. – Т. 97, № 5. – С. 299-309. – DOI 10.1177/0037549720986865. – EDN XZWAID (дата обращения: 06.06.2025).
20. Фахимуллах, М. Simulation Tools for Fog Computing: A Comparative Analysis / М. Фахимуллах, Г. Филипп, Ш. Ахвар, М. Трокан // Sensors. – 2023. – Т. 23, № 7. – С. 3492. – DOI 10.3390/s23073492. – EDN OOEJKM (дата обращения: 06.06.2025).
21. Ворожцов, А. С. Методика использования пакета программ Cloudsim в учебном процессе / А. С. Ворожцов, Н. В. Тутова // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. – 2017. – Т. 6, № 1. – С. 13-15. – EDN YTYBOH (дата обращения: 06.06.2025).
22. Гоял, Т. Cloudsim: simulator for cloud computing infrastructure and modeling / А. Сингх, А. Агарвал // Procedia Engineering. – 2012. – Т. 38. – С. 3566–3572. – DOI: 10.1016/j.proeng.2012.06.412 (дата обращения: 06.06.2025).