

Нугаев Ринат Камильевич

аспирант кафедры информационных систем и технологий, Московский финансово-юридический университет МФЮА, Москва. ORCID: 0009-0004-4049-9296

Электронный адрес: rinat@nugaev.net

Rinat K. Nugaev

Postgraduate at the Department of information systems and technologies, Moscow University of Finance and Law MFUA, Moscow. ORCID: 0009-0004-4049-9296

E-mail address: rinat@nugaev.net

УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ: ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ВЫЗОВЫ СОВРЕМЕННОСТИ

Аннотация. В современном информационном обществе возрастают требования к быстрой обработке, удобному хранению и передаче информации. Необходимы динамичные способы доступа к данным, поиск информации в определенные временные интервалы и выполнение сложных операций с данными. Переход от централизованной обработки данных к распределенным системам обусловлен быстрым развитием технологий, увеличением объемов данных, требованием высокой доступности и скорости обработки информации. Цель статьи заключается в обсуждении основных проблем и вызовов, с которыми сталкиваются современные распределенные системы обработки данных. Методы исследования. Анализ проведен на основе отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных проблематике распределённых систем обработки данных. Теоретическая база строилась с использованием методологических принципов, включающих общенаучные приёмы анализа и синтеза, методы дедуктивного и индуктивного рассуждения, а также сравнительно-обобщающие подходы. Такой инструментарий позволил выявить ключевые закономерности функционирования исследуемых систем и определить направления их совершенствования. Результаты. Применение выбранного метода позволило выделить совокупность аспектов, требующих приоритетного внимания при проектировании и эксплуатации распределённых систем. Нарастающий объём данных в сочетании с динамичным развитием цифровых технологий существенно усложняет процессы управления такими структурами. Для достижения стабильного функционирования необходима постоянная модернизация инструментов администрирования, совершенствование методов защиты информации и повышение эффективности работы вычислительных узлов. Ключевыми условиями успешного развития распределённых систем выступают гибкость архитектуры, адаптивность к изменяющейся информационной среде и рациональное использование ресурсов. В условиях ускоряющейся цифровизации именно комплексные стратегии управления позволяют обеспечить оптимальное сочетание производительности, надёжности и безопасности, что создаёт предпосылки для их устойчивого функционирования в долгосрочной перспективе. Выводы. Изучение проблемы современных распределенных систем обработки данных позволяет сделать следующие выводы: необходимо обеспечить безопасность данных и сетевой инфраструктуры через эффективные меры защиты; проблема масштабируемости становится актуальной с ростом объемов данных и нагрузки на систему; следует разрабатывать стратегии и технологии для эффективного масштабирования систем, оптимизации ресурсов, балансировки нагрузки и управления энергопотреблением; необходимо постоянно совершенствовать алгоритмы, архитектуру систем и использовать передовые технологии для повышения производительности; важным вызовом является обеспечение непрерывной работы и отказоустойчивости систем для автоматического восстановления после сбоев и отказов, а также доступности данных.

Ключевые слова: системы обработки данных, распределенные технологии, информационные системы, данные.

Для цитирования: Нугаев Р.К. Управление распределенными системами обработки данных: основные проблемы и вызовы современности // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2025. № 3. С. 63 – 71. DOI: 10.18137/RNU.V9187.25.03.P.63

MANAGEMENT OF DISTRIBUTED DATA PROCESSING SYSTEMS: MAIN PROBLEMS AND MODERN CHALLENGES

Abstract. In the modern information society, the requirements for fast processing, convenient storage and transmission of information are increasing. Dynamic ways of accessing data, searching for information at certain time intervals, and performing complex operations with data are needed. The transition from centralized data processing to distributed systems is due to the rapid development of technology, an increase in data volumes, and the requirement for high availability and speed of information processing. The purpose of the article is to discuss the main problems and challenges faced by modern distributed data processing systems. Research methods. The analysis is based on domestic and foreign scientific publications devoted to the problems of distributed data processing systems. The theoretical framework was built using methodological principles, including general scientific methods of analysis and synthesis, methods of deductive and inductive reasoning, as well as comparative and generalizing approaches. Such tools made it possible to identify the key patterns of functioning of the studied systems and determine the directions of their improvement. Results. The application of the chosen method made it possible to identify a set of aspects that require priority attention in the design and operation of distributed systems. The growing volume of data combined with the dynamic development of digital technologies significantly complicates the management processes of such structures. To achieve stable operation, it is necessary to constantly modernize administrative tools, improve information security methods and increase the efficiency of computing nodes. The key conditions for the successful development of distributed systems are flexibility of architecture, adaptability to a changing information environment and rational use of resources. In the context of accelerating digitalization, it is precisely integrated management strategies that make it possible to ensure the optimal combination of productivity, reliability and security, which creates the prerequisites for their sustainable functioning in the long term. Conclusions. Studying the problems of modern distributed data processing systems allows us to draw the following conclusions: it is necessary to ensure the security of data and network infrastructure through effective protection measures; the problem of scalability becomes relevant with increasing amounts of data and system load; strategies and technologies should be developed for effective system scaling, resource optimization, load balancing, and energy management; 4) algorithms, system architecture, and advanced technologies should be continuously improved to improve performance; 5) and an important challenge is to ensure system continuous operation and resiliency for automatic recovery from failures and failures, as well as data availability.

Keywords: data processing systems, distributed technologies, information systems, data.

For citation: Nugaev R.K. (2025) Management of distributed data processing systems: main problems and modern challenges. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, analysis, management.* No. 3. Pp. 63 – 71. DOI: 10.18137/RNU.V9187.25.03.P.63 (In Russian).

Введение

В современном информационном обществе требуются высокие скорости обработки информации, удобные формы ее хранения и передачи. Также требуются динамичные способы доступа к данным, возможности поиска информации в определенные временные промежутки и выполнение сложных математических и логических операций с данными.

Переход от централизованной модели обработки данных к распределённой инфраструктуре обусловлен рядом существенных факторов, связанных с изменением приоритетов в экономике, управлении и научных исследованиях. Возрастающие объёмы обрабатываемой информации, а также потребность в обеспечении постоянного доступа и высокой производительности вычислительных процессов делают традиционные централизованные подходы малоприменимыми в условиях современного технологического ландшафта.

Цель статьи заключается в обсуждении основных проблем и вызовов, с которыми сталкиваются современные распределенные системы обработки данных.

Методы. Проведен теоретический анализ по теме исследования российской и зарубежной литературы. В исследовании использованы методологические подходы, основанные на принципах общенаучного анализа и синтеза, применялись методы сравнительного анализа, дедуктивного и индуктивного рассуждения и обобщения.

Обзор источников

Изучением распределительных систем занимались как отечественные, так и зарубежные авторы. В фокусе внимания находятся архитектурные принципы построения таких систем, способы управления вычислительными и информационными потоками, а также методы обеспечения надёжности и защиты информации в распределённых средах. К числу актуальных отечественных работ, направленных на выявление сильных и слабых сторон распределённой инфраструктуры хранения данных, относятся исследования Ы. Аширова, А. Бабаевой и И. Батырова [1]. Тематика проектирования и внедрения распределённых информационных систем в контексте корпоративных структур подробно рассматривается в работе С.В. Фурмана [2]. Системный подход к анализу распределённых вычислительных сред предложен А.В. Козловым, который рассматривает принципы взаимосвязи архитектурных компонентов и особенности функционирования мультипроцессорных конфигураций [3]. В работе В.Я. Цветкова и А.Н. Алпатова [4] акцентируется внимание на структурных противоречиях распределённых систем и предложена классификация по числу элементов, охватывающая кластеры, корпоративные и глобальные архитектуры. Комплексные вопросы безопасности и устойчивости распределённых информационных систем нашли отражение в исследовании М.В. Горбуновой, А.Я. Ометова и соавторов [5]. Отдельное направление исследований связано с распределёнными системами управления, где акцент сделан на проблемах сетевой задержки и отказоустойчивости, что подробно представлено в работе Т.Н. Ахундова и коллег [6]. Дополнительный вклад в развитие архитектурной теории внесли М.В. Хардикив и Д.Е. Эминджонов [7]. Расширенный взгляд на современные технологические парадигмы, включая кластерные среды, Grid- и облачные вычисления, представлен в работе С.А. Раздобудова и А.И. Мартышкина [8]. Отдельное внимание аппаратной реализации распределённых систем управления в промышленности уделяет С.А. Рылов, рассматривающий ИТ-архитектуры для агропромышленных комплексов и непрерывных производств [9].

На международном уровне вопросами повышения производительности распределённых систем за счёт гибкой балансировки нагрузки в облачных средах занимается N.S. Albalawi [10]. Структурно-функциональный анализ распределённого вычислительного стека представлен в публикациях С. Ramon-Cortes и соавторов [11].

Проблемы обеспечения устойчивости функционирования распределённых систем в контексте оптимизации алгоритмов машинного обучения рассмотрены в систематическом обзоре S. Liu и коллег [12]. Нетрадиционные подходы к организации балансировки вычислительных ресурсов, основанные на модели разрежённого взаимодействия между узлами, предложены G. Mendelson и К. Ху [13].

Результаты

С использованием предложенного метода были выявлены важные аспекты, требующие внимания и решения. С увеличением объемов данных и развитием технологий управление распределёнными системами становится сложнее. Для успешного функционирования таких систем необходимо постоянное совершенствование методов управления, обеспечения безопасности и оптимизации производительности. Гибкость, адаптивность и эффективное управление ресурсами являются ключевыми факторами в быстроменяющейся информационной среде, где важно разрабатывать стратегии управления для повышения производительности, надёжности и безопасности данных.

Обсуждение

Распределённая обработка данных представляет собой подход к обработке информации, при котором задачи обработки данных выполняются на нескольких компьютерах, взаимодействие между ними осуществляется через сеть. Каждый компьютер в такой системе может выполнять свою часть работы независимо от других, что обеспечивает параллельную обработку данных и повышает производительность системы в целом. Одной из ключевых характеристик распределённых систем выступает отказоустойчивость, которая означает, что выход из строя отдельного компонента не влияет на функционирование всей архитектуры [12, с. 2]. Преимуществами такой архитектуры являются масштабируемость, гибкость и устойчивость к отказам, однако при этом сохраняются риски, связанные с надёжностью компонентов и устойчивостью хранилищ при повышенных нагрузках [1, с. 820].

Современные исследования позволяют классифицировать распределённые системы по различным основаниям. Рассмотрим классификацию распределительных вычислительных систем по типу предоставляемых ресурсов, представленную В.Я. Цветковым и А.Н. Алпатовым [4, с. 32]. Авторы выделяют три типа распределительных систем:

- *Computational Grid* (распределённые вычислительные системы) – представляют собой инструмент для обработки данных, содержащий большое количество ресурсов (процессоры, память и хранилища данных); примером данной вычислительной системы являются кластеры;
- *Data Grid* (распределённые информационные системы) – используются для хранения, обработки, передачи и анализа данных в различных областях (наука, бизнес, здравоохранение и др.), управляют большим объемом информации, применяются для задач, не требующих больших вычислений;
- *Semantic Grid* (семантический Грид) позволяет более эффективно описывать, находить и использовать ресурсы в распределённой среде для каждой конкретной предметной области, используя при этом стандарты и методы, основанные на семантике.

Другими авторами применяется масштабная классификация: кластеры включают несколько узлов, корпоративные распределённые среды охватывают организационные сети, а глобальные системы – распределения, включающие сотни и тысячи элементов [11, с. 5].

Перечисленные классификации соотносятся с основными векторами развития распределённых вычислений, представленными в обзоре современных систем [8, с. 87].

Исследование отечественной и зарубежной литературы позволяет сделать вывод о том, что ключевыми функциональными характеристиками распределённых систем выступают прозрачность, открытость и масштабируемость.

Рассмотрим каждую характеристику.

Прозрачность доступа к данным в распределённых системах означает, что пользователи могут получать доступ к данным и работать с ними, не зная конкретных деталей о том, где и как именно хранятся и обрабатываются эти данные в системе, обеспечивая единообразный и удобный доступ. Такая архитектура достигается путём унификации доступа и репликации ресурсов, но сопровождается ростом накладных расходов и снижением отклика системы. В условиях высокой нагрузки прозрачность может негативно сказываться на времени отклика, что подчёркивается в контексте динамического перераспределения задач между узлами [10, с. 3].

Для регулирования доступа пользователей к общим ресурсам и обеспечения целостности данных используются специальные механизмы блокировок и транзакций [4, с. 34].

Однако достижение абсолютной прозрачности сопряжено с ограничениями: сетевые задержки, неоднородность пропускной способности каналов и вариативность нагрузки могут снижать производительность и отзывчивость системы, особенно заметно это в реальном времени или системах с сильной реактивностью [13, с. 10].

Существует связь между прозрачностью и производительностью распределённой системы. Увеличение прозрачности может повысить удобство использования системы, уменьшить сложность для пользователя, однако это может привести к увеличению накладных расходов на обеспечение прозрачности и снижению производительности из-за дополнительных задержек и нагрузки на систему [6, с. 144].

Для обеспечения *открытости* в распределённых системах часто используются формализованные протоколы и определяются службы через интерфейсы [9, с. 120]. Все открытые системы обладают гибкостью. Гибкость в контексте открытых систем означает их способность адаптироваться и изменяться без значительных затрат или нарушения работы системы [11, с. 5].

Распределённые вычислительные системы являются масштабируемыми. Под *масштабируемостью* понимается способность эффективно повышать производительность системы и обрабатывать большие объёмы данных по мере увеличения рабочей нагрузки. Данное свойство необходимо для обеспечения эффективной работы системы в условиях динамически меняющихся требований и объёмов данных [10, с. 14].

Еще одним следствием масштабируемости является то, что аппаратные решения для распределённых систем могут быть разнообразными и неоднородными, другими словами, гетерогенными. Гетерогенные системы предоставляют большую гибкость и гибкость, так как различные компоненты могут быть выбраны и настроены в зависимости от конкретных требований и задач системы.

С развитием технологий и снижением стоимости вычислительных ресурсов распределённые системы обработки данных становятся всё более доступными и популярными не

только в научных областях, но и в различных сферах бизнеса. Однако ключевым вопросом для пользователей становится выбор подходящего программного обеспечения для построения распределенной инфраструктуры обработки данных. На сегодняшний день существует множество популярных инструментов для обработки распределенных данных: Apache Hadoop, Apache Spark, Apache Kafka, Amazon EMR, Google Cloud Dataflow и др. Каждый из них имеет свои особенности и преимущества, и выбор конкретного инструмента зависит от конкретных потребностей и целей разрабатываемого проекта.

В современном мире существует множество проектов и инициатив по разработке распределенных информационных систем обработки данных, например, в России существует национальный проект по разработке распределенных информационных систем «АР-БИКОН» (Ассоциация региональных библиотечных консорциумов) [8, с. 86–87]. Проект является примером успешной реализации распределенных систем обработки данных в контексте библиотечного дела, способствующей улучшению доступа к знаниям и информационным ресурсам для пользователей.

В процессе развития распределенных технологий и систем возникают разнообразные проблемы. Для решения типичных проблем в настоящее время разработаны стратегические подходы, среди которых можно выделить следующие.

Управление и координация. Сложные распределенные системы обработки данных могут состоять из большого количества компонентов и устройств, их управление и координация могут вызывать затруднения. Для устранения данной проблемы рекомендуется использовать системы управления и мониторинга наблюдения и контроля всех элементов системы [7, с. 34]. При этом А. В. Козлов подчёркивает, что эффективное управление распределёнными архитектурами невозможно без системного подхода к организации взаимодействия между подсистемами и оптимального распределения функций между компонентами [3, с. 74].

Обеспечение безопасности. Распределенные системы обработки данных подвержены различным угрозам (утечка данных, атаки, взломы и др.). Минимизация рисков может достигаться внедрением современных методов шифрования, аутентификации и авторизации и регулярным обновлением системы безопасности [5, с. 12–13].

Использование технологий и архитектур для решения вопросов надежности и проблем сетевой задержки. При передаче данных через сеть возникают задержки и возможные сбои соединения, что может негативно сказаться на работе распределенной системы. Решение данной проблемы возможно при использовании технологий и архитектур, способных обнаруживать сбои и восстанавливаться самостоятельно. Необходимо работать над улучшением инфраструктуры сети, чтобы обеспечить более высокую надежность и устойчивость передачи данных [6, с. 144].

Решение проблемы масштабируемости. Рост объёмов данных и числа пользователей неизбежно создаёт нагрузку на вычислительные комплексы, что делает проблему масштабируемости одной из ключевых для современных распределённых систем. Поддержание высокой производительности при расширении функционала достигается преимущественно за счёт горизонтального масштабирования, предусматривающего добавление новых узлов в инфраструктуру. Подобный подход способствует перераспределению нагрузки и снижает риск перегрузки отдельных компонентов. Существенную роль в данном процессе играют облачные технологии, позволяющие динамически наращивать ресурсы и повышать эластичность системной архитектуры [10, с. 5–6].

Управление распределенными системами обработки данных:
основные проблемы и вызовы современности

Препятствия на пути к эффективному масштабированию нередко связаны с так называемыми узкими местами. К числу наиболее распространённых относятся ограниченные возможности серверов при обслуживании значительного числа клиентов, что ведёт к перегрузкам и снижению производительности. Дополнительные трудности возникают при множественном доступе к единому файлу данных, где вероятны задержки и конфликты при обработке информации.

Для обеспечения гибкой адаптации распределённых систем к изменяющимся условиям функционирования необходимо комплексное решение указанных проблем. Оптимизация коммуникационных процессов, устранение структурных ограничений, использование распределённых алгоритмов и эффективное балансирование нагрузки формируют основу для устойчивого масштабирования как в количественном измерении, так и с точки зрения географического распределения вычислительных ресурсов.

Решение проблемы интеграции и совместимости компонентов. Использование стандартных протоколов данных для обмена информацией между компонентами системы обеспечит более простую интеграцию и взаимодействие между различными частями системы, уменьшит вероятность возникновения конфликтов и ошибок при обмене данными [11, с. 12]. Особенности взаимодействия в корпоративных распределённых ИС подробно рассмотрены в работе С. В. Фурмана, где подчёркивается необходимость согласования технических и бизнес-требований при проектировании таких систем [2, с. 88].

Решение проблемы сложности разработки и тестирования. Создание и тестирование распределённых систем может быть затратным процессом и вызывать сложности из-за необходимости управления множеством компонентов, сетевых взаимодействий и предотвращения возможных ошибок, что особенно важно при проектировании и отладке сложных распределённых вычислительных сред [12, р. 7–8]. Чтобы упростить процесс разработки и отладки распределённых систем обработки данных, рекомендуется использовать специальные инструменты разработки, которые позволяют более эффективно управлять компонентами системы, отслеживать их взаимодействие и проводить диагностику проблем.

Заключение

В ходе исследования основных проблем и вызовов современных распределённых систем обработки данных были выявлены ключевые аспекты, требующие внимания и решения. Важно понимать, что с развитием технологий и увеличением объемов данных сложность управления распределёнными системами будет только увеличиваться. Для успешного функционирования таких систем необходимо постоянное развитие и совершенствование методов управления, обеспечения безопасности и оптимизации производительности.

Следует также отметить, что в условиях быстроменяющейся информационной среды важно соблюдать гибкость и адаптивность. Ключевым фактором становится комбинация передовых технологий, оптимизированных алгоритмов и компетентного управления ресурсами, разработка эффективных стратегий управления, способствующих повышению производительности, надежности и безопасности данных.

Полученные результаты могут быть полезны при разработке распределённых информационных систем в сфере управления производственными процессами, цифровыми архивами и облачными средами. Представленный анализ систематизирует знания по выбо-

ру эффективных архитектурных решений и подходов к построению высоконагруженных инфраструктур. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка универсальных моделей оценки эффективности архитектурных решений, включая интеграцию методов ИИ и автоматизированного управления ресурсами.

Литература

1. Аширов И., Бабаева А., Батыров И. Распределенные системы хранения данных: преимущества и вызовы // Вестник науки. 2024. Т. 3. № 10 (79). С. 819–822. EDN CGSFPA.
2. Фурман С.В. Особенности территориально-распределенных информационных систем предприятий // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 10-5 (97). С. 86–89. DOI: 10.24412/2500-1000-2024-10-5-86-89. EDN OHQCNX.
3. Козлов А.В. Системный анализ распределенных систем // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2019. № 1 (11). С. 71–76. EDN XOHZII.
4. Цветков В.Я., Алпатов А.Н. Проблемы распределенных систем // Перспективы науки и образования. 2014. № 6 (12). С. 31–36. EDN TDXHPH.
5. Горбунова М.В., Ометов А.Я., Комаров М.М., Беззатеев С.В. Обзор проблем внедрения технологии распределенного реестра // Информационно-управляющие системы. 2020. № 2 (105). С. 10–19. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-2-10-19. EDN LTNFOQ.
6. Ахундов Т.Н., Кротких М.Т., Е Селезнев.Г., Стожков Д.С. Распределенные системы управления (PCY) // Уральская горная школа – регионам : Материалы международной научно-практической конференции. Уральская горнопромышленная декада, Екатеринбург, 11 апреля 2022 г. Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2022. С. 144–145. EDN XIOQGB.
7. Хардилов М.В., Эминджонов Д.Е. Архитектура распределенных систем: проблемы и решения // Научный лидер. 2025. № 6 (207). С. 33–35. EDN VOSOEW.
8. Раздобудов С.А., Мартышкин А.И. Обзор современных распределенных систем // European Journal of Natural History. 2020. № 2. С. 85–89. EDN BDDSDf.
9. Рылов С.А. IIoT аппаратная архитектура распределенных систем управления непрерывными промышленными производствами и агрокомплексами // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70. № 1 (50). С. 105–113. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-105-113. EDN UVTIKD.
10. Albalawi N.S. Dynamic scheduling strategies for cloud-based load balancing in parallel and distributed systems // Journal of Cloud Computing. 2025. Vol. 14. Article no. 33. DOI:
11. Ramon-Cortes C., Alvarez P., Lordan F., Alvarez J., Ejarque J., Badia R.M. A survey on the Distributed Computing stack // Computer Science Review. 2021. Vol. 42. Article no. 100422. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100422>
12. Shuo Liu. A Survey on Fault-tolerance in Distributed Optimization and Machine Learning // arXiv. 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.08545>
13. Mendelson G., Xu K. Load Balancing Using Sparse Communication // arXiv. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.02410>

References

1. Ashirov Y., Babaeva A., Batyrov I. (2024) Distributed data storage systems: Advantages and challenges. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science]. Vol. 3. No. 10 (79). Pp. 819–822. (In Russian).

Управление распределенными системами обработки данных:
основные проблемы и вызовы современности

2. Furman S.V. (2024) Features of geographically distributed enterprise information systems. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. No. 10-5 (97). P. 86–89. DOI: 10.24412/2500-1000-2024-10-5-86-89. (In Russian).
3. Kozlov A.V. (2019) Systems analysis of distributed systems. *ITNOU: Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii* [ITNOU: Information technologies in science, education and management]. No. 1 (11). Pp. 71–76. (In Russian).
4. Tsvetkov V.Ya., Alpatov A.N. (2014) Problems of distributed systems. *Perspectives of Science and Education*. No. 6 (12). Pp. 31–36. (In Russian).
5. Gorbunova M.V., Ometov A.Ya., Komarov M.M., Bezzateev S.V. (2020) Survey of distributed ledger technology integration challenges. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems]. No. 2 (105). Pp. 10–19. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-2-10-19. (In Russian).
6. Akhundov T.N., Krotkikh M.T., Seleznev E.G., Stozhkov D.S. (2022) Distributed control systems (DCS). In: *Ural'skaya gornaya shkola – regionam* [Ural Mining School for regions] : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Ural Mining Decade, Ekaterinburg, April 11, 2022. Ekaterinburg : Ural State Mining University Publ. Pp. 144–145. (In Russian).
7. Khardikov M.V., Emindzhonov D.E. (2025) Architecture of distributed systems: Problems and solutions. *Scientific Leader*. No. 6 (207). Pp. 33–35. (In Russian).
8. Razdobudov S.A., Martyshkin S.A. (2020) Review of modern distributed systems. *European Journal of Natural History*. No. 2. Pp. 85–89. (In Russian).
9. Rylov S.A. (2023) IIoT hardware architecture of distributed control systems for continuous industrial production and agricultural complexes. *Electrical and Electrical Equipment in Agriculture*. Vol. 70. No. 1 (50). Pp. 105–113. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-105-113. (In Russian).
10. Albalawi N.S. (2025) Dynamic scheduling strategies for cloud-based load balancing in parallel and distributed systems. *Journal of Cloud Computing*. 2025. Vol. 14. Article no. 33. DOI:
11. Ramon-Cortes C., Alvarez P., Lordan F., Alvarez J., Ejarque J., Badia R.M. (2021) A survey on the Distributed Computing stack. *Computer Science Review*. Vol. 42. Article no. 100422. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100422>
12. Shuo Liu (2021) A Survey on Fault-tolerance in Distributed Optimization and Machine Learning. *arXiv*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.08545>
13. Mendelson G., Xu K. (2024) Load Balancing Using Sparse Communication. *arXiv*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.02410>

Поступила в редакцию: 26.07.2025

Received: 26.07.2025

Поступила после рецензирования: 20.08.2025

Revised: 20.08.2025

Принята к публикации: 03.09.2025

Accepted: 03.09.2025