

На правах рукописи



**РУБЦОВ Алексей Алексеевич**

**СПЕЦИАЛЬНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ  
ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ СОСТАВНЫХ ЗАПРОСОВ  
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ДОСТАВКИ ДАННЫХ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2024

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

Научный руководитель: **Добрышин Михаил Михайлович**  
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Саенко Игорь Борисович**,  
доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности СПИИРАН, ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»  
**Душкин Александр Викторович**,  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационная безопасность», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный технологический университет»

Защита состоится «14» февраля 2025 г. в 12:00 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» <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «20» декабря 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Гусев Константин Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Прогресс в предметной области распределенных вычислений связан с развитием и совершенствованием методов, математического, программного и аппаратного обеспечения на разных уровнях иерархии вычислительных систем от многоядерных и многопроцессорных схем до систем распределенных вычислений различной функциональности.

Одной из важнейших составных частей подобных систем является система, поддерживающая временное локальное и/или распределенное хранение актуальных данных, требуемых их потребителям (процессам, пользователям). Ее целью является оперативное и своевременное предоставление данных, требуемых для реализации вычислительных процессов на различных уровнях их иерархии. Основным принципом ее организации является буферизация (кэширование) данных и поддержка протоколов их доставки. При этом уровни кэширующих хранилищ подобной системы соответствуют уровням организации систем распределенных вычислений. К подобным системам относятся: система кэш-памяти многоядерных микро- и многопроцессорных вычислителей (Cache Coherence Systems, CCS), системы актуализации таблиц маршрутизации в системах связи с коммутацией пакетов, подсистема обслуживания распределенных транзакций в системах управления реляционными базами данных и в системах на основе микросервисной архитектуры, системы очередей сообщений распределенных систем обработки информации реального времени (Message Queuing Systems, MQS), системы искусственного интеллекта с федеративным обучением (Federate Machine Learning Systems, FMLS), системы доставки контента, развертываемые провайдерами интернет-сервисов (Content Delivery Networks, CDN). Близкие принципы структурной и функциональной организации таких систем позволяют отнести их к обобщенному классу, именуемому системы доставки данных (СДД).

Основными исследовательскими проблемами в предметной области СДД являются проблемы обеспечения согласованности и доступности (consistency, availability) доставляемых данных, что отражается в разработке теоретической базы, например, теорем CAP (Consistency, Availability, Partition tolerance) и BASE (Basically Available, Soft-state, Eventually consistent) для систем с устойчивым и неустойчивым состояниями соответственно. При этом подобные исследования СДД не в полной мере рассматривают свойство оперативности доставки данных, обобщенно выражаемое показателем «время отклика узла СДД на запрос доставки данных» (один из вариантов в практике систем мониторинга – TTFB (Time to First Byte)), преимущественно ориентируются на централизованное управление процессом доставки и не в полной мере учитывают автономность их составных частей (узлов), связанную со структурной и функциональной эволюцией систем распределенных вычислений, к которым они относятся. Так в случае когерентности кэша в микропроцессорах проблема минимизации времени

отклика локального кэша заданного ядра решается аппаратной реализацией протоколов доставки, в то время как в распределенных вычислительных системах, таких как MSQ, FMLS, CDN, где отдельные узлы или их федерации обладают высоким уровнем автономности, практически отсутствует обобщенное решение подобной оптимизационной задачи, особенно в условиях обслуживания составных (содержащих параллельные подзапросы) потоков запросов высокой интенсивности.

Существенный вклад в развитие предметной области методов и алгоритмов для систем управления СДД внесли: Сонин К.И., Buyya R., Pathan A., Broberg J., Bubendorfer K., Kim K., Lynch N., Foster I., Ozer A., Zhang L., Huang J., Narahari Y., Wellman M.

При этом предлагаемые методы и алгоритмы ориентированы на распределенные вычислительные инфраструктуры с детерминированной или имеющей слабую степень динамики структурой, а другие формализуют оптимизационную задачу согласованности/оперативности доставки данных в условиях ограничений, что в ряде случаев является неприемлемым для современных реализаций систем распределенных вычислений с автономными узлами (микросервисы, сети доставки контента и др.).

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования продиктована необходимостью разработки специальных средств математического и программного обеспечения распределенных систем доставки данных, обслуживающих составные потоки запросов, с целью решения проблемы повышения оперативности обслуживания этих потоков в условиях их высокой интенсивности.

Тематика диссертационной работы соответствует научному направлению ФГКВОУ ВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации» «Повышение эффективности функционирования распределенных вычислительных систем».

**Целью работы** является повышение оперативности обслуживания потоков составных запросов узлами распределенных систем доставки данных в условиях нестационарного характера их интенсивности за счет разработки математического и программного обеспечения децентрализованного формирования логических групп узлов доставки данных.

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

1. Провести системный анализ состояния исследований в области решения проблемы повышения оперативности и своевременности доставки данных в современных системах доставки данных различных уровней иерархии системы распределенных вычислений.

2. Разработать модель узла распределенной системы доставки данных, учитывающую нестационарность потока составных запросов и основанную на принципах перераспределения их между множеством взаимодействующих узлов доставки данных.

3. На основе обобщения существующих методов организации децентрализованного управления в распределенных системах обосновать

способ логического объединения узлов доставки данных на основе их пирингового (P2P) взаимодействия и разработать соответствующий алгоритм объединения.

4. Осуществить выбор метода децентрализованного взаимного информационного согласования узлов при их логическом объединении, а также реализующий его алгоритм, обеспечивающий достижение цели исследования по критерию пригодности.

5. Разработать архитектуру распределенной системы доставки данных с децентрализованным управлением процессом обслуживания потока составных запросов потребителей данных.

6. Разработать программный комплекс взаимного информационного согласования узлов распределенной системы доставки данных.

**Объект исследования:** система доставки данных в составе системы распределенных вычислений.

**Предмет исследования:** модели и методы реализации процесса обслуживания системой доставки данных запросов потребителей данных.

**Методы исследования.** При решении поставленных в диссертации задач использовались: метод системного анализа, теория многоагентных систем, теория массового обслуживания, теория игр, метод 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:

- модель распределенной системы доставки данных, отличающаяся от известных возможностью определения времени отклика узла доставки данных и других вероятностно-временных характеристик обслуживания высокоинтенсивных составных запросов, базирующаяся на подмножестве одноканальных систем массового обслуживания с приоритетной схемой обработки подзапросов;

- алгоритм объединения узлов распределенной системы доставки данных, обеспечивающий повышение оперативности обслуживания составных запросов высокой интенсивности и отличающийся от известных динамическим объединением узлов на основе их пирингового взаимодействия в логических группы параллельного обслуживания подзапросов составных запросов.

- алгоритм взаимного информационного согласования узлов распределенной системы доставки данных, обеспечивающий решение задачи включения/исключения отдельных узлов логической группы, обслуживающих высокоинтенсивные потоки составных запросов,

отличающийся от известных использованием обратного варианта аукционной модели Викри;

- структура программного комплекса многоузловой распределенной системы доставки данных, отличающаяся от известных реализацией механизмов встраивания оверлейной вычислительной инфраструктуры, обеспечивающей поддержку динамического однорангового междузлого взаимодействия в процессе взаимного информационного согласования и обслуживания составных запросов подмножеством входящих в нее узлов.

**Теоретическая значимость** исследования состоит в разработке нового подхода к взаимному информационному согласованию автономных узлов распределенной системы доставки данных, с целью их логического объединения, позволяющего достичь приемлемого значения времени отклика на составные запросы потребителей данных в условиях нестационарного характера их интенсивности. Положения и выводы, содержащиеся в данной работе, могут быть использованы в развитии программных средств перспективных систем доставки данных разного уровня иерархии систем распределенных вычислений.

**Практическая значимость.** Разработка программного комплекса взаимного информационного согласования узлов распределенной системы доставки данных в виде специализированного программного средства, позволяет интегрировать его в программные реализации систем управления существующих систем доставки данных. Разработанный программный комплекс может быть использован научными и проектными организациями, занимающимися вопросами распределенных информационных систем. На специализированное программное средство получено свидетельство о государственной регистрации.

**Положения, выносимые на защиту:**

- модель распределенной системы доставки данных позволяет определить ее вероятностно-временные характеристики для условий нестационарной интенсивности составных запросов потребителей данных;

- алгоритм объединения узлов распределенной системы доставки данных обеспечивает повышение оперативности обслуживания подзапросов высокоинтенсивных составных запросов;

- алгоритм взаимного информационного согласования узлов распределенной системы доставки данных обеспечивает динамическое формирование логических групп узлов, обслуживающих высокоинтенсивные потоки составных запросов потребителей данных;

- архитектура распределенной системы доставки данных обеспечивает поддержку динамического однорангового междузлого взаимодействия в процессе взаимного информационного согласования и обслуживания составных запросов подмножеством входящих в нее узлов.

**Результаты внедрения.** Основные результаты внедрены в виде специального программного модуля в составе программного обеспечения защищенной системы хранения, обработки и доставки информации

ООО «Плюспэй», а также внедрены в образовательный процесс Академии ФСО России (дисциплина – «Компьютерные сети»).

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XXIX-th International Open Science Conference «Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2024'AS)» (Воронеж, 2024 г.), XXIX Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2024» (ТУСУР, Томск, 2024 г.), а также на научных семинарах кафедры информатики и вычислительной техники Академии ФСО России (2022–2024 гг.).

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректным использованием математических средств моделирования и анализа, а также результатами сравнительного анализа данных вычислительных и натуральных экспериментов.

**Публикации.** По результатам диссертационного исследования опубликовано 9 научных работ, в том числе 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (из них 1 – в изданиях WoS и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ). В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [1,5,7] – аналитическая модель обслуживания запросов в распределенных системах доставки данных, объединенных на основе пирингового соглашения, [2,4] – алгоритм взаимного информационного согласования элементов систем доставки данных на основе аукционной модели, [3,6,8,9] – архитектура многоузловой распределенной системы доставки данных, за счет оверлейной вычислительной инфраструктуры, поддерживает логическое межузловое взаимодействие в процессе взаимного информационного согласования и обслуживания составных запросов подмножеством входящих в нее узлов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа изложена на 164 страницах машинописного текста, включая 50 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 128 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** рассмотрены особенности организации, а также тенденции развития и совершенствования распределенных систем доставки данных (СДД), функционирующих в составе систем распределенных вычислений (СРВ). На основании анализа исследований, посвященных организации и функционированию аппаратно-программных платформ реальных СДД на различных уровнях иерархии СРВ (рисунок 1) были выявлены их обобщенные характеристики, к основной из которых относится то, что потоки запросов на доставку данных являются составными (представленными множеством подзапросов) и, преимущественно,

высокоинтенсивными со случайным характером распределения периодов интенсивности (рисунок 2).



Рисунок 1 – Обобщенная структура СДД на различных уровнях иерархии СРВ

различных уровней иерархии СРВ сформулирована необходимость совершенствования их математического и программного обеспечения, связанного с решением задачи повышения оперативности обслуживания потоков запросов на доставку данных в условиях нестационарного характера их интенсивности. В этой связи было сформулировано противоречие между необходимостью повышения оперативности обслуживания запросов на доставку данных и использованием в существующих СДД методов и алгоритмов, направленных

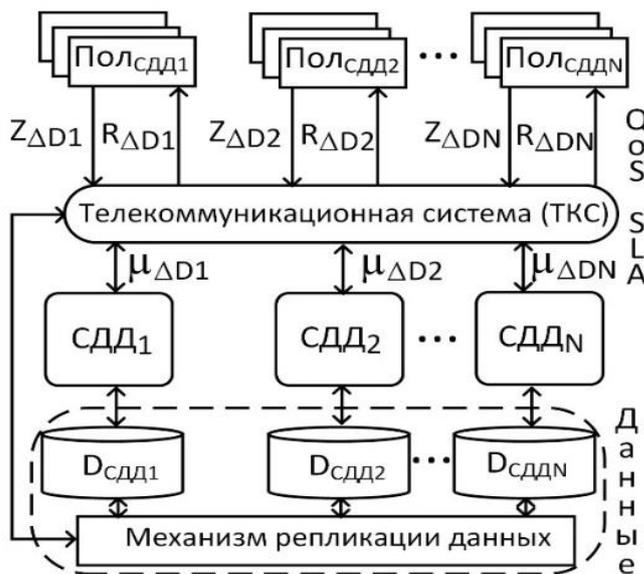


Рисунок 2 – Обобщенная структура организации распределенной системы доставки данных

Рассмотрены особенности решения задач доставки данных для конкретных вариантов СДД каждого уровня иерархии СРВ, выявлены их особенности. Проведен анализ основных методов и алгоритмов, лежащих в основе СДД каждого уровня и обеспечивающих повышение оперативности, а также когерентность и консистентность доставляемых данных.

На основе рассмотренного выше анализа предметной области СДД раз-

преимущественно на достижение когерентности и консистентности данных, а также отсутствием в них учета высокой автономности структурно-функциональных схем современных СРВ.

На основании этого противоречия сделана постановка научной задачи по разработке математического и программного обеспечения обслуживания потоков запросов потребителей данных узлами СДД в условиях нестационарного характера интенсивности этих запросов за счет децентрализованного формирования логических групп узлов.

**Вторая глава** посвящена разработке математического обеспечения процесса обслуживания потока запросов на доставку данных в условиях нестационарного характера их интенсивности. В рамках решения этой задачи было выполнено: формальное представление распределенной СДД, как совокупности автономных подсистем (узлов), обслуживающих собственные потоки запросов на доставку данных  $Z_{\Delta DN}$ , а также моделирование процесса обслуживания таких запросов отдельным узлом СДД. В качестве методологической основы моделирования была выбрана теория массового обслуживания. В качестве базового класса СМО-моделей обоснованно выбран класс M/G/1.

Также в ходе моделирования было выявлено, что, в общем случае, понятие «запрос на доставку данных» требует модификации, поскольку на практике, в большинстве случаев, является составным (например, запрос веб-страницы с несколькими изображениями, ссылками на другие страницы и сценарии на PHP в CDN-системах). Сделано обоснование того, что запрос  $Z_{\Delta DN}$  на узел обобщенной СДД можно представить случайной величиной  $X$ , имеющей распределение с тяжелым хвостом:

$$P\{X > x\} \approx x^{-\alpha}, \quad (1)$$

где  $x \rightarrow \infty$  и  $0 < \alpha < 2$  – коэффициент вариации случайной величины и  $k \leq x \leq p$ , где  $k$  – минимальный размер запроса (получение одного частного объекта), а  $p$  – максимальный размер запроса (получение произвольного множества частных объектов). То есть, величину запроса  $Z_{\Delta DN}$ , влияющую на время его обслуживания прибором  $\Pi$ , можно представить трехпараметрическим Парето распределением (BPD – bounded Pareto distribution) с границами  $k$  и  $p$  –  $X \approx \text{BPD}(k, p, \alpha)$  с соответствующей функцией плотности распределения вероятности:

$$f(x; k, p, \alpha) = \frac{\alpha k^\alpha}{1 - \left(\frac{k}{p}\right)^\alpha} x^{-\alpha-1} \quad (2)$$

Подобное представление при использовании коэффициента  $\alpha \approx 2$  позволило моделировать среднюю степень вариативности  $x$  (величины запроса), а при  $\alpha \rightarrow 0$  – повышение степени его вариативности. Тогда  $j$ -й момент обслуживания прибором  $\Pi$  некоторого произвольного запроса  $x$  был выражен, как:

$$E[X^j] = \begin{cases} \frac{\alpha p^j \left(\left(\frac{k}{p}\right)^\alpha - \left(\frac{k}{p}\right)^j\right)}{(j-\alpha) \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^\alpha\right)}, & j \neq \alpha \\ \frac{\alpha k^\alpha \ln\left(\frac{p}{k}\right)}{\left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^\alpha\right)}, & j = \alpha \end{cases}, \quad (3)$$

Исходя из этого, были определены вероятностно-временные характеристики предложенной СМО (рисунок 3, а), такие как:  $W'$  – среднее время ожидания;  $l$  – длина очереди ожидающих запросов;  $E[X]$  – нагрузка прибора П. Поскольку длина очереди  $l$  согласно закона Литтла может быть выражена через среднее время ожидания  $W'$  ( $l = \lambda W'$ ), то для средней вариативности величины запроса (второй момент величины  $X$ ) по формуле Поллачека-Хинчина было получено выражение для среднего времени ожидания обработки запроса  $Z_{\Delta DN}$ , являющееся численным показателем времени отклика узла СДД на запрос:

$$W' = \frac{\lambda E[X^2]}{2(1-\rho)}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – среднее число запросов, обслуживаемых прибором П и выражаемое как  $\rho = \lambda b < 1$ , где  $b$ , в свою очередь, параметр экспоненциального закона распределения длительности обслуживания запросов  $\tau_b$ . При этом было выявлено, что для распределения Парето с границами конечных моментов существуют трудности, связанные с преобразованием Лапласа для таких показателей, как длина очереди и время занятости прибора П обслуживанием запроса. Поэтому было предложено аппроксимировать распределение Парето гиперэкспоненциальным распределением с плотностью распределения вероятностей некоторой его  $R$ -й части:

$$H_R(t) = \sum_{i=1}^R P_i \lambda_i e^{-\lambda_i t}, \quad (5)$$

где  $\sum_{i=1}^R P_i = 1$ . Выполнив над  $H_R(t)$  преобразование Лапласа:

$$F_{H_R}(s) = L\{H_R(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-st} H_R(t) dt = \sum_{i=1}^R \frac{P_i \lambda_i}{\lambda_i + s}, \quad (6)$$

где  $s = \sigma + i\omega$  – комплексная переменная, было получено выражение для  $n$ -го момента распределения интервалов обслуживания запросов прибором П:

$$E[X^n] = (-1)^n \frac{d^n L\{H_R(t)\}}{ds} \Big|_{s=0}, \quad (7)$$

где  $X$  – непрерывная случайная величина с плотностью вероятности  $H_R(t)$ . В соответствии с этим для первого момента распределения выражение примет вид:

$$E[X] = \sum_{i=1}^R \frac{P_i}{\lambda_i}, \quad (8)$$

а для второго момента соответственно:

$$E[X^2] = \sum_{i=1}^R \frac{2P_i}{\lambda_i^2} \quad (9)$$

Аналогично получим преобразование Лапласа для времени ожидания запросов в очереди прибора П:

$$L_W(s) = \frac{s(1-\rho)}{s-\lambda+\lambda L\{H_R(t)\}} = \frac{s(1-\rho)}{s-\lambda+\lambda \sum_{i=1}^R \frac{P_i \lambda_i}{\lambda_i + s}} \quad (10)$$

Так же, как и для интервала обслуживания запросов, на основе этого выражения было получено значение плотности распределения ожидания запросов в очереди прибора П –  $w(t)$ , и, соответственно, с его помощью определена обобщенная (кумулятивная) функция распределения времени ожидания  $W(t)$ . Для рассмотренной СМО было определено, что она не предусматривает составного характера запросов  $Z_{\Delta DN}$ , где их величина распределена в диапазоне значений  $k$  и  $p$  с некоторым коэффициентом вариации  $\alpha$ . Было предложено представить запрос  $N$ , поступающий на вход СМО-системы с некоторой интенсивностью  $\lambda_N$  совокупностью  $k$  частных запросов с интенсивностями  $\lambda_{1,N}, \lambda_{2,N}, \dots, \lambda_{k,N}$ . В связи с этим при моделировании эта схема была модифицирована путем добавления узла Д (Диспетчера), который имеет возможность расщепить поступающий запрос  $Z_{\Delta DN}$  на составляющие его подзапросы. Подобное решение обеспечивает возможность обслуживания этих частных запросов как обслуживаемым прибором  $\Pi_N$ , так и их перенаправления на другие обслуживаемые приборы (узлы распределенной СДД). С целью моделирования составных запросов  $Z_{\Delta DN}$  было предложено рассматривать модель СДД как совокупность одноканальных СМО класса  $M/G/1$ , что позволяет реализовать в узле Д функцию перенаправления частных запросов между узлами в условиях, когда интенсивность составных запросов превышает некоторый допустимый порог (например, не соблюдаются условия соглашения QoS SLA). Модификация модели СМО представлена на рисунке 3 на примере трехузловой СДД.

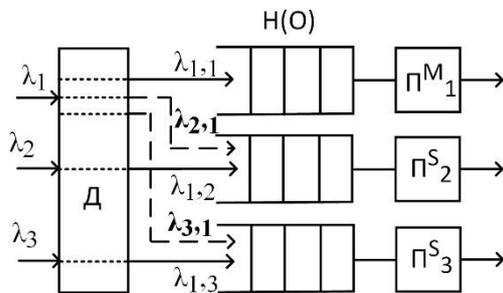


Рисунок 3 – СМО-модель обслуживания подзапросов (пример)

В соответствии с предложенной функцией узла Д, в подобном случае подмножество частных запросов (на рисунке 3 их интенсивности  $\lambda_{2,1}, \lambda_{3,1}$ ) будет перенаправлено на приборы  $\Pi^S_2$  и  $\Pi^S_3$  соответственно. Индексы М и S в названиях приборов обозначают соответственно Master (прибор, чья нагрузка перераспределяется) и Slave (прибор, обрабатывающий часть нагрузки прибора Master), связанных P2P (пиринговым)

соглашением. Очевидно, что в зависимости от ситуации с входящей нагрузкой, указанные функции прибора могут меняться. Поскольку нагрузка, обслуживаемая прибором  $\Pi_N^S$  от прибора  $\Pi^M$ , является дополнительной, была введена приоритетная система обслуживания запросов без вытеснения с  $p$  очередями приоритетов. Исходя из известных подходов к моделированию СМО с приоритетным обслуживанием, было получено выражение для времени ожидания запросов с приоритетом для произвольной  $p$ -й очереди:

$$W_p = \frac{W_0}{(1-\sigma_p)(1-\sigma_{p+1})}, \quad (11)$$

где  $\sigma_p = \sum_{i=p}^P \rho_i$ , а  $W_0 = \sum_{i=p}^P \frac{\rho_i E[X_i^2]}{2}$  – среднее время ожидания запроса с приоритетом, зависящее от времени обслуживания других запросов с приоритетом, где  $E[X_i^2]$  – второй момент времени обслуживания запроса с  $i$ -м приоритетом.

Из выражения 11 видно, что время ожидания  $W_k$  запроса с  $k$ -м приоритетом не зависит от времени ожидания запросов с более низким приоритетом ( $i=(1,2,\dots,p-1)$ ), что согласуется с практикой функционирования реальных систем с приоритетным обслуживанием. Для подобного варианта было получено выражение для времени ожидания запросов с произвольным  $p$ -м приоритетом, поступающих на мастер-прибор  $\Pi^M$ . Обозначим преобразование Лапласа для времени ожидания таких запросов, как  $W_p^*(s)$ , тогда:

$$W_p^*(s) = \frac{(1-\rho)s + \lambda_L \left[ 1 - \sum_{j=1}^{p-1} \frac{\lambda_{j,j}}{\lambda_L} B_j^*(s) \right]}{s - \lambda_{p,p} + \lambda_{p,p} B_j^*(s)}, \quad (12)$$

где  $\lambda_L = \sum_{j=1}^{p-1} \lambda_{j,j}$ . На основании этого было получено выражение для времени ожидания запросов с произвольным  $p$ -м приоритетом, поступающих на любой прибор  $\Pi^S$ , обслуживающий запросы с приоритетом в диапазоне  $1,2,\dots,p-1$ :

$$W_j^*(s) = \frac{(1-\rho) \left[ s + \lambda_{p,p} - \lambda_{p,p} G_p^*(s) \right]}{s - \sum_{j=1}^{p-1} \lambda_{j,j} + \sum_{j=1}^{p-1} \lambda_{j,j} B_j^*(s + \lambda_{p,p} - \lambda_{p,p} G_p^*(s))}, \quad (13)$$

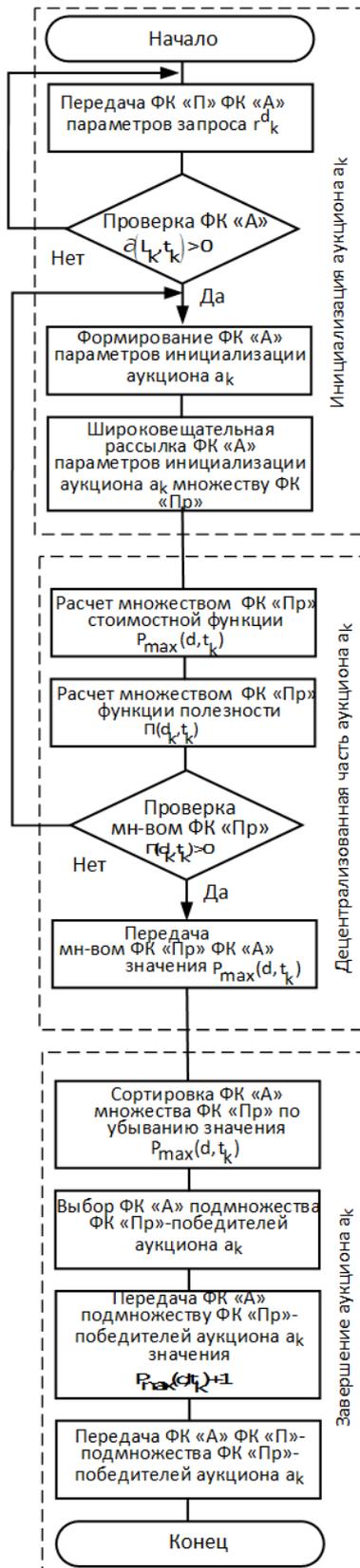


Рисунок 4 – Обобщенная структурная схема разработанных алгоритмов объединения узлов распределенной СДД в логическую группу и их взаимного информационного согласования

где  $G_p^*(s) = B_j^*(s + \lambda_{p,p} - \lambda_{p,p} G_p^*(s))$  – преобразование для распределения времени обслуживания произвольным прибором  $P^S$  запроса с  $p$ -м приоритетом.

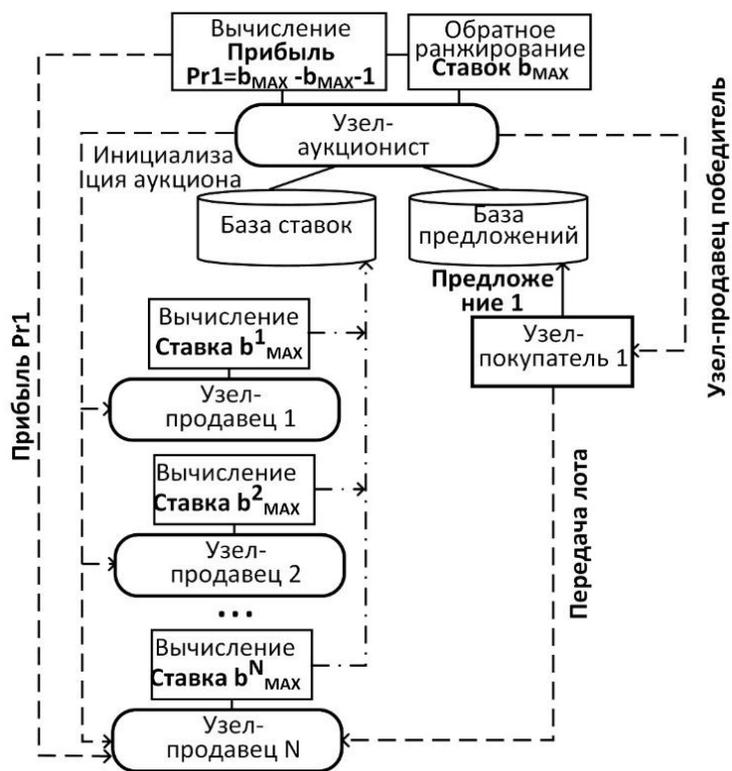
Таким образом, разработана модель распределенной системы доставки данных, обеспечивающая определение вероятностно-временных характеристик обслуживания высокоинтенсивных составных запросов, позволяющих оценить производительность системы доставки данных произвольной структуры по показателю оперативности обслуживания запросов. Разработанная модель отличается от известных использованием подмножества одноканальных систем массового обслуживания с приоритетной схемой обработки подзапросов, использующей для получения моментов распределения интервалов их обслуживания аппроксимацию гиперэкспоненциальным распределением.

В третьей главе представлены разработанные алгоритмы объединения узлов распределенной системы доставки данных и их взаимного информационного согласования, обеспечивающие динамическое формирование логических групп узлов, обслуживающих высокоинтенсивные потоки составных запросов потребителей данных.

Обобщенная структурная схема разработанных алгоритмов представлена на рисунке 4. Из рисунка 4 видно, что их основой являются: способ динамического формирования логических групп узлов (Лсдд) на основе их пирингового (P2P) взаимодействия и аукционная схема включения узлов в группу Лсдд, реализованная по комбинированной схеме с централизованными инициализацией и завершением аукциона и децентрализованным принятием решения об участии узла в группе Лсдд. При разработке алгоритмов были рассмотрены: обобщенная схема

взаимного информационного согласования узлов СДД ( $L_{СДД}^{ВИС}$ ), а также обобщенно выбрана теория аукционных игр, в рамках

которой определен вид используемого аукциона – аукцион Викри.



В силу особенностей функциональной схемы перенаправления части составных запросов (рисунок 5) была предложена модификация схемы аукциона Викри – обратный аукцион Викри со множеством продавцов и одним покупателем (рисунок 6), а также определены функциональные компоненты такой схемы, базирующиеся на мультиагентном (МАС) подходе.

Структура указанных функциональных компонентов была сформирована на основе теоретико-множественного подхода, в рамках которого были определены условия, при котором составной запрос

Рисунок 5 – Структура модифицированного алгоритма обратного аукциона Викри – обратный аукцион Викри

$r_k \in R$  не может быть обслужен  $i$ -м элементом множества узлов  $N$ : задержка обслуживания запроса  $r_k \in R$  превышает порог  $N$ ; отсутствует объем хранилища  $S_d$ , необходимый для хранения данных  $d_k$ . Это условие было выражено функцией  $\partial(L_i, t_k)$ :

$$\partial(L_i, t_k) = \left( \sum_k L_i^k(t_k) (1 - \sigma(r_k, i)) \right) + \ell \left( \left( \sum_k L_i^k(t_k) (\sigma(r_k, i)) \right) - S_d \right), \quad (14)$$

где первое слагаемое – задержка обслуживания запроса  $r_k \in R$ , а второе слагаемое – условие ограничения объема хранилища  $i$ -го элемента множества узлов  $N$ . Величина  $\ell$  в выражении 14 определяет следующее бинарное условие:

$$\ell = \begin{cases} 1 & \text{при } \left( \sum_k L_i^k(t_k) (\sigma(r_k, i)) \right) - S_d > 0 \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (15)$$

Соответственно, если значение функции  $\partial(L_i, t_k) > 0$ , это означает, что  $i$ -й элемент множества узлов  $N$  «штрафуется» из-за невозможности обслуживания запроса  $r_k \in R$ , поступившего в момент времени  $t_k$ . Такой штраф является триггером для принятия им решения о репликации данных  $d$  на другие

элементы множества узлов  $N$ . В этом случае компонент  $A$   $i$ -го элемента множества узлов  $N$  инициирует алгоритм аукциона на основе следующих исходных условий:  $S_d \geq 0$  – требуемый объем хранилища данных  $d_k$ ;  $U_d$  – скорость передачи копии данных  $d_k$  от  $i$ -го элемента множества  $N$  на другие элементы этого множества, участвующие в аукционе;  $V_d$  – скорость передачи копии данных  $d_k$  от элементов множества  $N$ , участвующих в аукционе, до пользователя, сформировавшего запрос  $r_k^c$ ;  $T$  – время хранения копии данных  $d_k$  элементами множества узлов  $N$ , участвующими в аукционе.

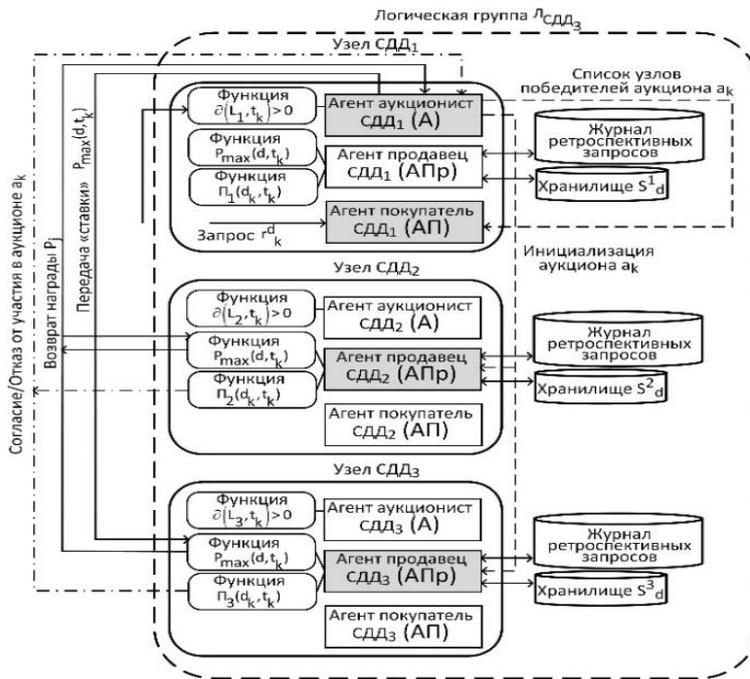


Рисунок 6 – Структура мультиагентного (МАС) варианта схемы обратного аукциона Викри для формирования логической группы узлов СДД

На основе обобщенной схемы обратного аукциона Викри был предложен МАС-вариант схемы аукциона формирования логической группы узлов (рисунок 6), в рамках которой произведен обоснованный выбор стоимостной функции  $P_{max}(d, t_k)$  и функции полезности  $P_i(d_k, t_k)$ , используемых узлами – участниками аукциона. Основной стоимостной функцией  $P_{max}(d, t_k)$  является значение «штрафа» за невозможность обслужить в момент времени  $t_k$  запроса  $r_k^d$ , т.е. выполнения условия  $\partial(L_i, t_k) > 0$ . Определив значение

величины такого «штрафа» как  $\alpha \cdot \partial(L_i, t_k)$ , где  $\alpha$  является значением некоторой константы, являющейся коэффициентом «штрафа», значение  $P_{max}(d, t_k)$  было определено, как выражение:

$$P_{max}(d, t_k) = \beta \left[ \frac{\sum_{j=1}^{k-1} \{p_j + \gamma\} \delta(r_k^d, r_j^d) \phi(r_k^1, r_j^1) e^{-\lambda(t_k - t_j)}}{k-1} \right] - \alpha \cdot \partial(L_i, t_k) \quad (16)$$

Для получения значения прогноза используется среднее арифметическое взвешенное максимального значения  $p_j$ , предложенное за обслуживание множества запросов  $r_{j,k-1}^d$  до момента времени  $t_k$  с учетом функций сходства

ресурсного и структурного компонентов запросов. Функция полезности  $\Pi_i(d_k, t_k)$  функционального компонента АП  $i$ -го элемента множества  $N$  была определена как:

$$\Pi_i(d_k, t_k) = S_{d_k}^i + X(d_k, t_k) \pm \psi(\Pi_i), \quad (17)$$

где  $S_{d_k}^i$  – требуемый объем хранилища  $S_{d_k}^i$ , который можно определить выражением:

$$S_{d_k}^i = \mathfrak{R}(d_k) \cdot \varphi(d_k), \quad (18)$$

где, в свою очередь,  $\mathfrak{R}(d_k)$  требования к объему хранилища для хранения данных  $d_k \in D$ , определяемые пользователем системы СДД, а  $\varphi(d_k)$  – стоимость их хранения, определяемая функциональным компонентом АП  $i$ -го элемента множества  $N$ ;  $X(d_k, t_k)$  – функция «дохода» (прибыли) от размещения данных  $d_k \in D$  в хранилище  $S_{d_k}^i$ , которую можно определить выражением:

$$X(d_k, t_k) = \chi_{d_k} - \chi_{d_j}, \quad (19)$$

где, в свою очередь,  $\chi_{d_k}$  и  $\chi_{d_j}$  – значение величины «дохода» от хранения данных  $d_k \in D$  и  $d_j \in D$  (предполагаемых к удалению из хранилища  $S_{d_k}^i$ ). Физический смысл этих величин зависит от рассматриваемого варианта системы СДД. Так в системах CDN (доставки контента) он выражается в реальных стоимостных единицах, связанных с арендой объема системы СХД СДД, а, например, в системах CCS (когерентности данных кэш-памяти микропроцессоров) он выражается стоимостным коэффициентом, являющимся отношением объема кэш-памяти, занимаемого данными, ко времени хранения этих данных.

Из выражения 19 видно, что  $X(d_k, t_k) > 0$  в случае принятия решения о замещении данных  $d_j \in D$  данными  $d_k \in D$ . Принятие такого решения осуществляется на основе анализа системы журналирования  $i$ -го элемента множества  $N$ .  $\psi(\Pi_i)$  – функция «заинтересованности» функционального компонента АП  $i$ -го элемента множества  $N$  для участия в аукционе  $a_k$ , применяемая в виде дополнительного условия для усиления/ослабления функции полезности в конкретных системах СДД (например, в системах, где управлением ведется не на алгоритмическом уровне, а с использованием ЛПР).

**Таким образом, разработаны алгоритмы объединения узлов распределенной СДД в логические группы с использованием механизма пирингового взаимодействия и их взаимного информационного согласования в**

процессе объединения, основанного на комбинированной обратной схеме аукциона Викри (централизованные: инициализация и завершение аукциона, децентрализованное принятие решение об участии в аукционе), которые обеспечивают формирование логических групп узлов для динамического обслуживания высокоинтенсивные потоков составных запросов.

В четвертой главе предложена архитектура программно-реализованной

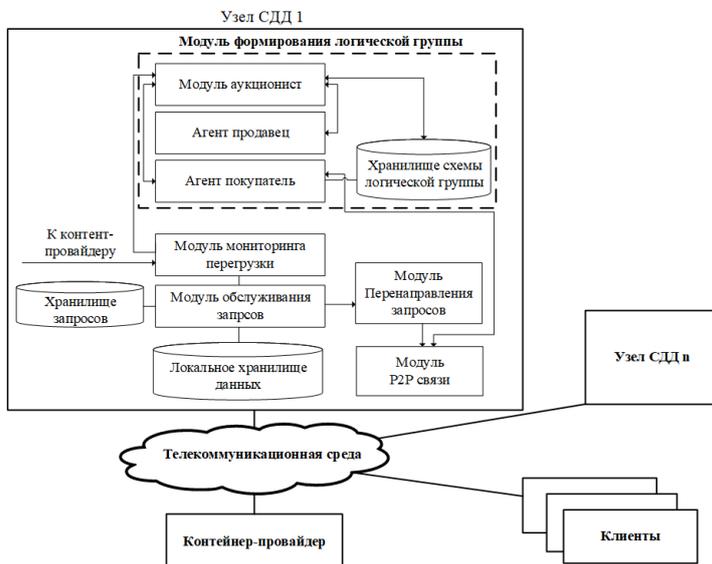


Рисунок 7 – Структура программного комплекса узла распределенной СДД с оверлейным блоком формирования логической группы узлов

она может быть реализована на базе прикладных фреймворков типа PyMAS (Python Multiagent System), для аппаратного уровня СРВ – в виде проблемно-ориентированных ASIC-модулей. Обобщенная структура программного комплекса узла СДД с предложенным оверлейным модулем формирования логической группы (отмечен штрих-пунктиром) представлена на рисунке 7.

Из рисунка 7 видно, что модуль формирования логической группы инициализируется на основе мониторинга перегрузки узла СДД (порог интенсивности запросов) или по запросу контент-провайдера СДД. Он представлен модулем инициализации и завершения аукциона, поддерживающим актуальное состояние хранилища схемы логической группы и двух типов агентов: продавца (функция предоставления услуги обработки перенаправленных запросов) и покупателя (функция формирования требования к агентам продавцам). Взаимодействие узлов динамически сформированной логической группы производится с использованием блока P2P-связи (реализация протокола DHT).

Для оценивания степени достижения цели исследования было принято решение о проведении имитационного эксперимента на разработанной имитационной модели распределенной СДД. Он представлен комбинированной средой имитационного моделирования, включающей: симулятор среды сетевого взаимодействия MiniNet, симулятор блока формирования логической группы в среде AnyLogic и симулятор базовых функций узла СДД в среде GPSS Studio.

ной многоузловой распределенной СДД, содержащая оверлейную вычислительную инфраструктуру, обеспечивающую инициализацию и завершение аукциона по формированию логической группы и поддержку однорангового межсетевое взаимодействия подмножества узлов СДД (логической группы) в процессе их взаимного информационного согласования.

Оверлейный характер предлагаемой архитектуры позволяет сделать ее программно-инвариантной конкретным реализациям СДД. Для СДД сервисного уровня данных СРВ (ри-

Обобщенная схема разработанной имитационной модели представлена на рисунке 8.

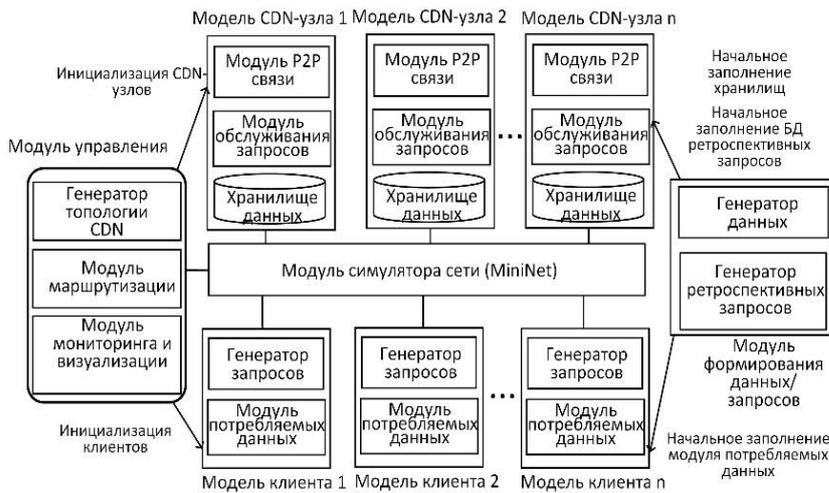


Рисунок 8 – Структура имитационной модели распределенной СДД

В рамках разработанной имитационной модели был спланирован сравнительный имитационный эксперимент для оценивания результата обслуживания составных запросов, интенсивность поступления которых превышает функциональный порог узла СДД для распределенной СДД на основе автономных узлов и для СДД с формированием

логических групп узлов. Входные параметры для каждого прогона имитационного эксперимента случайным образом формировались соответствующими генераторами нагрузки имитационной модели: количество узлов СДД (варьировалось от 2 до 10), количество клиентов, формирующих запросы, количество подзапросов в составном запросе, интенсивность составных запросов, начальное заполнение локальных хранилищ данных узлов СДД, начальное заполнение хранилищ ретроспективных запросов узлов СДД.

Разработанный алгоритм формирования логической группы на основе аукциона подключается к остальным компонентам модели через AnyLogic Python API (библиотека AnyLogic Cloud).

Пример сравнительного оценивания предложенного решения и обслуживания высокоинтенсивного составного запроса – оценивание времени отклика CDN-узла на составной запрос одного клиента с варьируемым количеством подзапросов в составном запросе  $Q = \{10, 20, 40, 80, 100\}$  с фиксированным временем обслуживания подзапроса в составном запросе  $t_q = 0,5$ :

- в автономном режиме обслуживания составного запроса – представлен на рисунке 9;

- в режиме использования модуля формирования логических групп CDN-узлов (прогоны 1-4 – 5 CDN-узлов, прогон 5 – 7 CDN-узлов, прогоны 6-8 – 8 CDN-узлов) – представлен на рисунке 10.

Из рисунков 9 и 10 видно, что вне зависимости от количества узлов в распределенной СДД схема СДД с динамическим формированием логических групп реализует меньшее время отклика обслуживания запросов. При этом близость значений времен отклика для обеих схем связана с латентностью формирования логической группы, что требует оптимизации как алгоритмических, так и программных решений предложенного блока формирования логической группы.

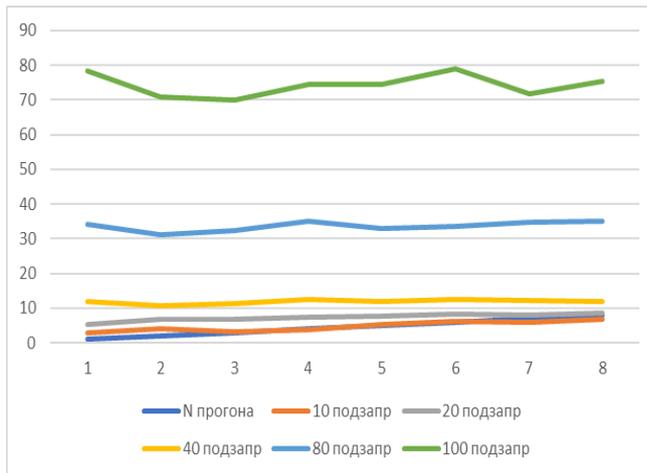


Рисунок 9 – Время обслуживания составного запроса автономным CDN-узлом

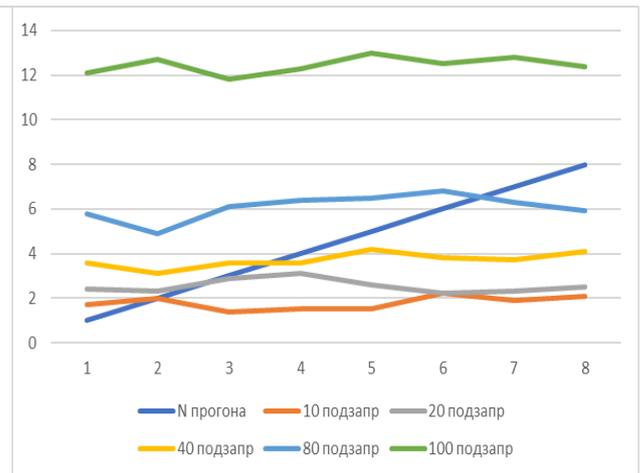


Рисунок 10 – Время обслуживания составного запроса логической группой CDN-узлов

Таким образом, представлена архитектура программно-реализованной многоузловой распределенной системы доставки данных, основанной на оверлейно развертываемом аукционном блоке формирования логической группы узлов и обеспечивающая поддержку однорангового межсетевое взаимодействие в процессе взаимного информационного согласования подмножества входящих в нее узлов. Результаты имитационного эксперимента подтверждают достижение цели исследования. На реализованные элементы разработанного ПО системы доставки данных, основанной на оверлейно развертываемом аукционном блоке формирования логической группы узлов, получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в реестре ФИПС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Проведен системный анализ состояния исследований в области решения проблемы повышения оперативности и своевременности доставки данных в современных системах доставки данных различных уровней иерархии системы распределенных вычислений.
2. Разработана СМО-модель многоузловой распределенной системы доставки данных, учитывающая нестационарность потока составных запросов и основанная на принципах перераспределения их между множеством взаимодействующих узлов доставки данных.
3. Разработаны алгоритмы объединения узлов распределенной системы доставки данных и их взаимного информационного согласования в процессе объединения, обеспечивающие обслуживание составных запросов высокой интенсивности.

4. Разработана архитектура многоузловой распределенной системы доставки данных, основанной на оверлейно развертываемом аукционном блоке формирования логической группы узлов.

5. Разработан программный комплекс взаимного информационного согласования узлов распределенной системы доставки данных. На программный комплекс получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в реестре ФИПС № 2024682677.

6. Проведены сравнительные эксперименты по оцениванию времени отклика на составные запросы высокой интенсивности для предлагаемой архитектуры распределенной системы доставки данных и существующей архитектуры, основанной на автономном функционировании узлов. Результаты экспериментов показывают повышение на 3,5 – 4,2% (в зависимости от числа узлов в логической группе) оперативности обслуживания тестового потока составных запросов (снижение среднего времени отклика узла) разработанной архитектуры многоузловой распределенной системы доставки данных (на примере симуляции сети CDN-узлов) в сравнении с обслуживанием указанного потока совокупностью автономных узлов.

#### **Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы**

Дальнейшие разработки и исследования стоит вести в направлении оптимизации предложенных алгоритмов и развитии программных средств перспективных систем доставки данных разного уровня иерархии систем распределенных вычислений.

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Белов, А.С. Подход к моделированию обслуживания запросов в распределенных системах доставки данных, объединенных на основе пирингового соглашения / А.С. Белов, **А.А. Рубцов** // Системы управления и информационные технологии. – 2024. – № 3 (97). – С. 4-12.

2. **Рубцов, А.А.** Подход к процессу взаимного информационного согласования элементов систем доставки данных на основе аукционной модели / А.А. Рубцов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – № 12 (3). Режим доступа: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1621>.

#### **Публикации в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus**

3. Bumazhkina, N.Yu. An algorithm for obtaining an ensemble machine learning model for node federation in decentralized machine learning systems / N.Yu. Bumazhkina, **A. A. Rubtsov**, P. V. Mikhalev // AIP Conference Proceedings. Manuscript № AIPCP21-AR-MIP 2024-00155.

#### **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682677. М: ФИПС / П.Н. Горбачев, **А.А. Рубцов**; заявители и правообладатели: П.Н. Горбачев, А.А. Рубцов; опубли. 26.09.2024.

**Статьи и материалы конференций**

5. **Rubtsov, A.A.**, Oleinik A.V. Approaches to modeling the process of functioning of a distributed data delivery system with a peer-to-peer scheme // Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2024'AS). Proceedings of the XXIX-th International Open Science Conference, Voronezh. – January 2024. – p. 200-204.

6. **Рубцов, А.А.** К вопросу о моделировании процесса обслуживания запросов в распределенных системах доставки данных / А.А. Рубцов // Научная сессия ТУСУР – 2024: материалы XXIX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2024. – С. 93-96.

7. **Рубцов, А.А.** Сравнение централизованного и децентрализованного подходов к моделированию процесса функционирования распределенной системы доставки данных с одноранговой схемой / А.А. Рубцов // Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных сетей связи специального назначения: сборник трудов III Межвузовской научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 119-123.

8. Добрышин, М.М. Вариант структуры программного комплекса узла распределенной системы доставки данных с оверлейным блоком формирования логической группы узлов / М.М. Добрышин, А.А. Рубцов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. – 2024. – 11(128). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18591> (дата обращения: 07.11.2024).

9. Добрышин, М.М. Алгоритм управления маршрутизацией информационных потоков между элементами распределенных систем обработки и доставки данных / М.М. Добрышин, А.А. Рубцов // Вестник науки. – 2024. – Т. 2. – № 11(80) – С. 1192-1200.