

На правах рукописи

Тареев

Паршуткина Светлана Александровна

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МНОГОПУТЕВОГО
РЕЗЕРВИРОВАННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОГРАММ
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных
сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

28 НОЯ 2018



Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор
Богатырев Владимир Анатольевич
- Официальные оппоненты:** **Уткин Лев Владимирович**
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, заведующий
кафедрой «Телематика (при ЦНИИ РТК)»
- Верзун Наталья Аркадьевна**
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный
экономический университет, доцент кафедры
информационных систем и технологий
- Ведущая организация:** Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

Защита состоится 25 декабря 2018 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.227.06 при Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49., ауд. 431.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49 и на сайте http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=52&page_d=1&page_d2=190753.

Автореферат разослан 21 ноября 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Холодова Светлана Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Эффективность решения функциональных задач в системах распределенной обработки данных во многом определяется организацией взаимодействия программ и программных систем. Повышение эффективности и надежности такого взаимодействия является **ключевой проблемой** в распределенных компьютерных системах. Для решения этой проблемы необходимо выполнение высоких требований к надежности не только структуры распределенной системы, но и процесса ее функционирования при влиянии неблагоприятных факторов: сбоев и отказов аппаратного и программного обеспечения, ошибок передач, нехватки ресурсов, внешних случайных или умышленных деструктивных воздействий.

Надежность функционирования системы может быть выражена через вероятность безошибочного и своевременного выполнения операций (запросов, транзакций) при не превышении максимальной задержки (таймаута). В данной работе *функциональной надежностью* обозначается способность решать предусмотренные функциональные задачи с приемлемым уровнем безошибочности и своевременности.

Надежность взаимодействия программ и программных систем обеспечивается путем:

- резервированного выполнения вычислительных процессов;
- динамического перераспределения (миграции) процессов между узлами системы с целью нивелирования последствий их отказов и перегруженности;
- надежной передачи данных через сеть.

Эффективность и надежность передачи данных в распределенных системах достигается при резервировании информационных и вычислительных ресурсов, применении методов предотвращения и устранения перегрузок в сети, управления потоками данных в соответствии с заданными уровнями качества обслуживания, обнаружения и исправления ошибок передач, использовании протоколов надежной передачи данных (reliable data transfer).

Известны решения по повышению эффективности распределенных систем на основе многопутевой передачи данных с использованием механизма многопутевой маршрутизации. В системах с многопутевой маршрутизацией может осуществляться:

- перенаправление потоков данных по альтернативным маршрутам в случае отказа основного во время решения функциональных задач, без потери времени на поиск нового пути;
- распределение пакетов одного потока (без их резервирования) по разным маршрутам;
- балансировка потоков как метода предотвращения перегрузок в сети.

При многопутевой маршрутизации не предусматривается резервирование (копирование) пакетов и одновременная отправка их копий по разным путям.

Известна концепция резервированного обслуживания запросов, согласно которой копии запросов направляются на обслуживание в разные узлы. Так, существуют исследования многоканальных систем массового обслуживания, в которых рассматривается параллельное выполнение копий запросов в ситуации их поступления в систему в момент наличия свободных приборов. Применение такой дисциплины обслуживания дает выигрыш по времени только при отсутствии очередей в узлах, в противном случае резервирование обслуживания может оказать негативное влияние на время пребывания остальных запросов, поступивших в систему позднее.

Известна концепция резервированного обслуживания запросов в группе одно- и многоуровневых кластерных систем, в которых кратность резервирования запросов (число их копий, направляемых в очередь разных узлов) задается в зависимости от критичности запросов к времени выполнения. Исследования показали, что такой подход позволяет повысить вероятность своевременного обслуживания запросов не только в условиях сбоев, ошибок и отказов в системе, но и в отсутствие этих факторов, особенно в ситуации жестких требований к времени выполнения, как в системах реального времени.

Представляется перспективным развитие данного подхода применительно к системам с многопутевой маршрутизацией (передачей данных) при несбалансированном распределении размеров запросов (пакетов) и неидентичности маршрутов (путей).

В целях повышения эффективности взаимодействия программ в системах распределенной обработки данных представляет интерес исследование интеграции концепций: многопутевой маршрутизации и резервированного обслуживания запросов. Резервированные пакеты пересылаются через сеть по многим маршрутам: по одному адресу при резервированной передаче данных или по многим адресам при резервированном распределении запросов. В первом случае требуется доставка хотя бы одного пакета по указанному адресу; во втором – заданного числа копий пакетов в подмножество указанных адресов.

Объект исследования – распределенные компьютерные системы.

Предмет исследования – модели и методы взаимодействия программ и программных систем с передачей данных и распределением запросов через сеть.

Цель работы – повышение надежности и эффективности взаимодействия программ и программных систем на основе многопутевых резервированных распределения запросов и передачи данных.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выбрать критерии эффективности взаимодействия программ в распределенных компьютерных системах с учетом ошибок передач, возможной недоступности коммуникационных и адресуемых (компьютерных, серверных) узлов при требовании не превышения максимального времени пребывания в системе (времени ожидания, таймаута).

2. Разработать аналитические и имитационные модели взаимодействия программ при многопутевых резервированных передаче данных и распределении запросов по одному адресу и по многим адресам.

3. Разработать методы и алгоритмы многопутевого резервированного взаимодействия программ, включая резервированные передачу данных и распределение запросов через сеть.

4. Разработать метод и инструментальные средства поддержки моделирования многопутевых резервированных передач, формирования и выбора оптимальных решений по их организации.

Научная новизна исследования состоит в том, что в целях развития и консолидации концепций многопутевой маршрутизации и резервированного обслуживания запросов, критичных к времени выполнения, повышения эффективности и надежности взаимодействия программ через сеть в системах распределенной обработки данных предложены:

1. Варианты организации эффективного и надежного взаимодействия программ и программных систем, отличающиеся использованием многопутевых резервированных передачи данных и распределения запросов через сеть при задании кратности резервирования запросов (пакетов) в зависимости от критичности к времени их выполнения.

2. Имитационные модели взаимодействия программ в распределенных системах с многопутевыми резервированными передачей данных и распределением запросов через сеть, отличающиеся тем, что учитывают: возможные ошибки передач и обслуживания, отказы и временную недоступность промежуточных и оконечных узлов, ограничения емкости их входных буферов, размеров пакетов, времени пребывания в системе.

3. Методы надежного взаимодействия программ через сеть с выбором кратности резервирования запросов (пакетов), учитывающие критичность к времени пребывания в системе при использовании имитационного моделирования.

4. Алгоритмы и инструментальные средства для поддержки и обоснования выбора вариантов взаимодействия программ и программных систем через сеть на основе многопутевых резервированных передачи данных и распределения запросов.

Методы исследования основываются на математическом аппарате и методологии теории массового обслуживания, теории вероятностей, теории принятия решений,

аналитического и имитационного моделирования и технологии объектно-ориентированного программирования.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что предлагается модель взаимодействия через сеть программ и программных систем, учитывающая возможность применения многопутевых передач при задании кратности резервирования запросов (пакетов) в зависимости от критичности к времени их выполнения.

Практическая значимость исследования заключается в том, что:

1. Разработан комплекс имитационных моделей компьютерных систем с различными вариантами передачи и обработки данных и распределения запросов для выбора и обоснования решений по организации надежного взаимодействия программ через сеть.

2. Предложены методы взаимодействия программ и программных систем, направленные на повышение эффективности и устойчивости функционирования распределенных компьютерных систем и использующие многопутевые резервированные передачи.

3. Предложены и реализованы инструментальные средства поддержки моделирования и выбора оптимальной кратности резервирования при многопутевых распределении запросов и передаче данных между взаимодействующими через сеть программами, позволяющие:

- автоматизировать проведение серии имитационных экспериментов и организовать сохранение их результатов в базе данных;
- выполнять обработку результатов экспериментов для заданной конфигурации системы, описывающей ее структуру (взаиморасположение ее узлов) и состояние (текущую загрузженность ресурсов, интенсивность сетевого трафика и прочее);
- реализовать возможности экспорта результатов экспериментов из базы данных в программные приложения и визуального представления получаемых зависимостей;
- осуществлять поиск оптимальной кратности резервирования передач для заданной конфигурации.

Личный вклад автора. Автором лично разработаны методы взаимодействия программ при многопутевых резервированных передаче данных и распределении запросов через сеть, метод и инструментальные средства (включая программное приложение) поддержки организации имитационных экспериментов и выбора вариантов этого взаимодействия, построены модели, исключая первоначальную базовую версию имитационной модели, реализованной Попцовой Н. А. [3]. В совместных публикациях Богатыревым В. А. осуществлена постановка задачи исследования; Богатыревым А. В., Богатыревым С. В., Кармановским Н. С. и Ворониной Д. А. оценена достоверность полученных результатов имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концептуальная модель взаимодействия программных систем на основе совмещения многопутевой маршрутизации и резервированного обслуживания запросов при задании кратности резервирования – в зависимости от критичности к времени их пребывания в системе.

2. Имитационные модели и методы взаимодействия программ в распределенных компьютерных системах с использованием многопутевых резервированных распределения запросов и передачи данных.

3. Инструментальные средства, позволяющие осуществлять обоснованный выбор вариантов взаимодействия программ и программных систем через вычислительную сеть с использованием многопутевых резервированных передач, при учете ошибок, отказов и временной недоступности узлов, возможности повторных передач, допустимого времени пребывания запросов (пакетов) в системе.

4. Оценка степени влияния на эффективность и надежность многопутевого резервированного взаимодействия программ через сеть кратности резервирования передачи данных и распределения запросов, интенсивности потока запросов и других функционально-структурных параметров распределенной компьютерной системы.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертационного исследования были представлены на конференциях: XIV и XV Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика (РИ-2014/2016)»; IX Санкт-Петербургской межрегиональной конференции «Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2015)»; 18-ой, 19-ой и XX Международной конференции DCCN-2015, DCCN-2016 и DCCN-2017 «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь»; Второй Международной Научной Конференции «Технологическая перспектива в рамках Евразийского пространства: новые рынки и точки экономического роста» (2016); XLV, XLVI и XLVII Научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО (2016–2018); Международной научно-технической конференции IEEE-2017 «Менеджмент качества, транспортная и информационная безопасность, информационные технологии» (IT&QM&IS – 2017).

Достоверность результатов исследования обусловлена корректностью выбора и применения математического аппарата, согласованностью результатов аналитического и имитационного моделирования с результатами исследований других авторов, апробацией на отечественных и международных конференциях, результатами внедрения.

Внедрение результатов исследования. Исследования выполнены в рамках НИР № 414650 «Методы и модели обеспечения интегрированной безопасности и устойчивости функционирования компьютерных систем», № 610481 «Разработка методов и средств системотехнического проектирования информационных и управляющих вычислительных систем с распределенной архитектурой», № 615869 «Методы проектирования ключевых систем информационной инфраструктуры» и № 617026 «Технологии киберфизических систем: управление, вычисления, безопасность».

Публикации по теме исследования. Основные научные результаты опубликованы в 23 печатных трудах, включая 4 в журналах из перечня ВАК, 4 в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science. Имеется 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем научно-квалификационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых литературных источников, приложения. Общий объем диссертации – 145 страниц, включая 45 рисунков.

Работа соответствует паспорту специальности 05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей: пунктам 3 «Модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем» и 9 «Модели, методы, алгоритмы и программная инфраструктура для организации глобально распределенной обработки данных».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, научная новизна и практическая значимость, формулируются цель и задачи работы, выносимые на защиту положения.

В первой главе излагаются основные принципы взаимодействия программ и программных систем, осуществляемого путем обмена сообщениями через вычислительную сеть. Обсуждаются методы обеспечения надежности взаимодействия программ при распределенной обработке данных: резервирование исполняющих программы вычислительных процессов с согласованием результатов вычислений и синхронизацией данных в разных узлах распределенной системы; динамическое перераспределение (динамическая миграция) вычислительных процессов между узлами системы для предупреждения последствий отказов и перегруженности этих узлов; управление потоками данных с использованием методов предотвращения перегрузок в сети и борьбы с ними; повышения качества обслуживания отдельных потоков, обеспечения надежности доставки отдельных пакетов. Осуществляется постановка задач исследования.

Во второй главе исследуются надежность и эффективность взаимодействия программ на основе многопутевой резервированной передачи данных (Рисунок 1а) и многопутевого резервированного распределения запросов (Рисунок 1б) разной критичности. При наличии n маршрутов (путей) между узлами с клиентским и серверным (серверными) процессами предполагается одновременная отправка из узла-источника (клиента) k копий каждого пакета данных по k путям из n возможных и получение узлом-адресатом (сервером), или узлами-адресатами (серверами), минимум m копий этого пакета, для того чтобы его передача через сеть считалась успешной. Отношение k/m назовем *кратностью резервирования передач*.

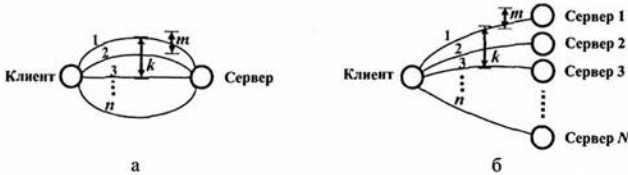


Рисунок 1 – Многопутевое резервированное взаимодействие через сеть клиента и сервера (а), клиента и группы серверов (б)

На Рисунке 1а клиент взаимодействует с сервером путем обмена сообщениями в виде одного или серии пакетов. Считаем, что задействуются одинаковые пути пересылки пакетов по сети от клиента к серверу и от сервера к клиенту и что в силу симметричности такого взаимодействия оценивается однопутевая передача данных. Успешная доставка сообщения означает получение сервером от клиента хотя бы одного пакета (все пакеты каждого сообщения хотя бы в одном экземпляре): $m = 1$ и $k/1$ (или k : такое обозначение оправдано, поскольку в данной работе значение m не варьируется). На Рисунке 1б клиент взаимодействует с группой серверов по k из n путям с целью доставки на K серверов минимум m из k отправленных копий пакетов. В случае перекрещивающихся маршрутов (без общих узлов и линий связи) $n = K$; успешное распределение через сеть запроса означает доставку $m = 1$ его копий на любой из K серверов.

Исследуем варианты многопутевых резервированных передач, считая, что при отправке копий пакетов по разным маршрутам (и их резервированном выполнении серверами) среднее время доставки узлам-адресатам (и среднее время ожидания ответа узлом-источником) может быть меньше, чем при передачах по одному из маршрутов. Это предположение оправдано, потому что, во-первых, природа обслуживания запросов в компьютерных системах и сетях является стохастической и, во-вторых, нагрузка узлов реальных систем не бывает абсолютно равномерной. Также необходимо учитывать случаи недоставки и (или) невыполнения запросов из-за ошибок, сбоев и отказов, которые считаем независимыми.

На Рисунке 2 представлена ситуация передачи данных (а) и распределения запросов (б) через сеть. Запрос может быть не доставлен («потерян», «отброшен» узлом) или доставлен на сервер за время t_1 , но не обслужен по причине превышения максимального (допустимого) времени его ожидания сервером t_0 (а); не обслужен из-за отказа «Сервера 4» или превышения максимального времени ожидания ответа клиентом $t_{0(ц)}$ (б). Пусть время передачи данных и время распределения запроса – t_4 , время ожидания ответа клиентом – $t_{4(ц)}$ (а) и $t_{3(ц)}$ (б), то есть наименьшее время из представленных на рисунках вариантов.

В данной работе рассмотрен процесс многопутевых резервированных передач в системах с высокими требованиями к своевременному выполнению запросов с точки зрения среднего времени пребывания, в условиях возможной потери пакетов при пересылке по сети и обслуживании. Учтено, что многопутевая резервированная передача, с одной стороны, способствует повышению надежности доставки и вероятности своевременного выполнения запросов, но с другой стороны, приводит к увеличению исходного числа передаваемых пакетов (запросов), к росту нагрузки в системе и к повышению среднего времени пребывания запросов в сети. Таким образом, возникает необходимость компромиссного

разрешения данного технического противоречия и определения обобщенного критерия эффективности резервированных передач на основе частных критериев, сформированных с учетом ограничений времени задержки пакетов в сети и требований к надежности и своевременности их доставки.

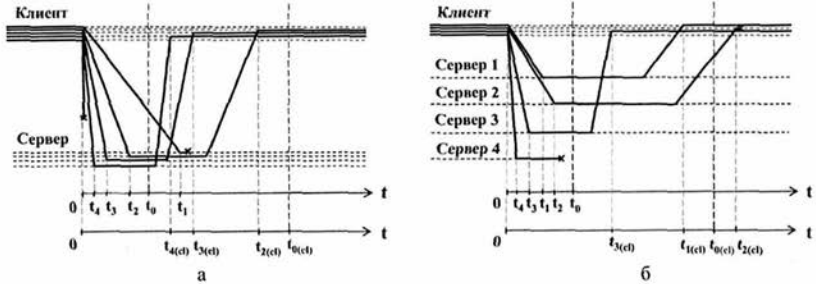


Рисунок 2 – Время ожидания (ответа) при многопутевом резервированном взаимодействии через сеть клиента и сервера (а), клиента и группы серверов (б)

Рассмотрим многопутевое резервированное распределение k копий запросов, поступающих в сеть с интенсивностью Λ , c^{-1} , по n маршрутам к группе объединенных в кластер серверов [1, 2, 5, 6]. Маршрут i содержит d_i сегментов линий связи; коммуникационные узлы представляются одноканальными системами массового обслуживания типа М/М/1 с накопителем неограниченной емкости при беспriorитетной дисциплине обслуживания. Предполагается, что пересылаемые резервные копии запроса не уничтожаются в промежуточных узлах, что приводит к верхней (пессимистической) оценке времени пребывания запросов в системе с учетом их резервированных передач.

Вероятность успешной передачи запроса (пакета) средней битовой длины N по i -му пути с учетом вероятности битовых ошибок B_{ij} в j -м сегменте i -го пути: $R_i = \prod_{j=1}^{d_i} (1 - B_{ij})^N$.

При резервированном распределении запросов по k путям вероятность успешной доставки хотя бы по одному из них на сервер, находящийся в состоянии готовности к обслуживанию запросов с вероятностью p :

$$P = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - pR_i) = 1 - \prod_{i=1}^k \left(1 - p \prod_{j=1}^{d_i} (1 - B_{ij})^N \right).$$

При идентичности маршрутов: $P = 1 - (1 - pR)^k$. Задержка на i -м пути $T_i = \sum_{j=1}^{d_i} T_{ij}$, где средняя задержка в j -м сегменте i -го пути $T_{ij} = v_{ij} / (1 - v_{ij} k \Lambda / n)$; среднее время передачи через j -й узел i -го пути $v_{ij} = N / L_{ij}$; L_{ij} – скорость передачи в j -м сегменте i -го пути. При отправке копий запросов по k из n путей в ситуации равномерного распределения нагрузки интенсивность передач по каждому пути составит $k\Lambda / n$.

Эффективность распределения запросов через сеть зависит от вероятности их безошибочной доставки P и среднего времени их доставки (пребывания в системе) T [2, 6] и может быть определена по мультипликативным (Рисунок 3а, 3б) и аддитивному (Рисунок 3в) критериям. Пусть t_0 и T_{min} – максимальное (допустимое) и минимально возможное время пребывания запроса в системе; вероятность битовых ошибок $B_1 = 10^{-7}$ (сплошные линии) и $B_2 = 10^{-5}$ (пунктирные линии); $n = 10$, $d = 5$, $p = 0,9$, $N = 2048$ бит, $L_{ij} = 100$ Мбит/с. Выигрыш от резервированного распределения обнаруживается при решении оптимизационной задачи нахождения кратности резервирования k ($k = 1$ – случай без резервирования), при которой достигается максимум эффективности передач, что критично в системах с лимитированным временем пребывания запросов. При дробных значениях оптимальной кратности передач k

может применяться смешанная стратегия резервирования. Так, при $\Lambda = 3 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ и B_2 с заданными вероятностями выбираться $k = 4$ и $k = 5$ (Рисунок 3б).

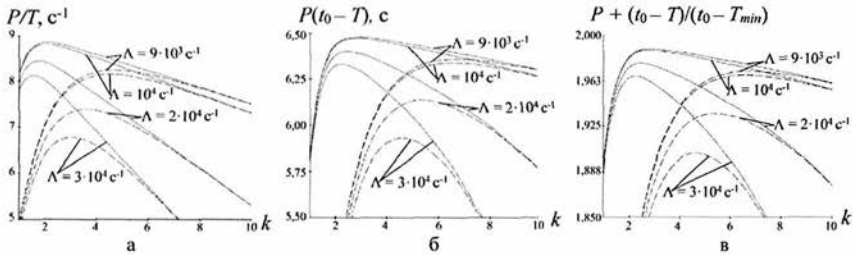


Рисунок 3 – Эффективность многопутевых резервированных передач по мультипликативным критериям (а, б) и аддитивному критерию (в)

Многопутевое резервированное распределение запросов может быть реализовано с возможностью повторных передач на основе механизма отрицательных подтверждений в случае недоступности адресуемых узлов. Если запрос получает отказ в обслуживании из-за недоступности сервера, узел-источник уведомляется об этом и повторно распределяет этот запрос через сеть, но к другому серверу. Процедуру повторяют до тех пор, пока запрос не будет принят к обслуживанию одним из серверов, последовательность опроса которых задается согласно некоторому алгоритму, например кругового обслуживания (Round Robin).

Возможно организовать последовательный и резервированный (параллельный) поиск доступного сервера – готового к обслуживанию распределяемых через сеть запросов [1, 5].

При последовательном поиске запрос направляется к серверу по одному из возможных маршрутов. В случае доступности (готовности) опрашиваемого сервера запрос ставится в его очередь, иначе – передается по следующему пути к другому серверу. Интенсивность потока запросов с учетом повторных передач Λ_0 и среднее время пребывания запросов в системе T_0 :

$$\Lambda_0 = \Lambda p \sum_{i=1}^{\infty} i(1-p)^{i-1} = \Lambda/p, T_0 = p \sum_{i=1}^{\infty} (1-p)^{i-1} i(T_d + t), T_d = v/[1 - (\Lambda_0 + \alpha\Lambda)v/n],$$

где T_d – задержка при каждой попытке распределения запроса через сеть, p – вероятность готовности сервера к обслуживанию запросов, t – время получения ответа от сервера (готов или не готов); α – соотношение интенсивности потока запросов от рассматриваемого источника и от других источников; v – время передачи запроса.

При резервированном поиске доступного сервера реализуется одновременная отправка запроса (его k копий) к k из n серверам по k путям. В случае недоступности всех k опрашиваемых серверов копии запроса посылаются к следующей группе из k серверов и так далее. Суммарная интенсивность Λ_1 и среднее время пребывания T_1 :

$$\Lambda_1 = \Lambda r \sum_{i=1}^{\infty} i(1-r)^{i-1} = \Lambda/[1 - (1-p)^k], T_1 = r \sum_{i=1}^{\infty} (1-r)^{i-1} i(T_{d1} + t),$$

где $T_{d1} = v/[1 - (k\Lambda_1 + \alpha\Lambda)v/n]$, $r = 1 - (1-p)^k$ – вероятность готовности хотя бы одного из k опрашиваемых серверов при передаче запроса по непересекающимся маршрутам.

Сравним эффективность вариантов распределения запросов по среднему времени их пребывания в системе при $\alpha = 0$, $v = 1 \text{ с}$, $t = 0,1 \text{ с}$, $n = 10$. В случае последовательного (сплошные линии) и дублированного (пунктир) поиска доступного сервера (Рисунок 4а) при $p = 0,80$ (кривые 1 и 5), 0,85 (2 и 6), 0,90 (3 и 7), 0,95 (4 и 8) в ситуации более высокой готовности сервера к обслуживанию запросов резервирование передач не целесообразно. Но по мере уменьшения готовности эффективность резервированного поиска повышается до некоторого значения интенсивности Λ . При превышении этого значения увеличение нагрузки в сети с учетом повторных пересылок нивелирует преимущества резервированного поиска, по сравнению с последовательным. В случае резервированного поиска сервера при

$p = 0,80$ и $k = 2, 3, \dots, 10$ (линии 2–10 на Рисунке 4б), чем ниже степень готовности серверов p , тем большее число маршрутов требуется для поиска доступного сервера.

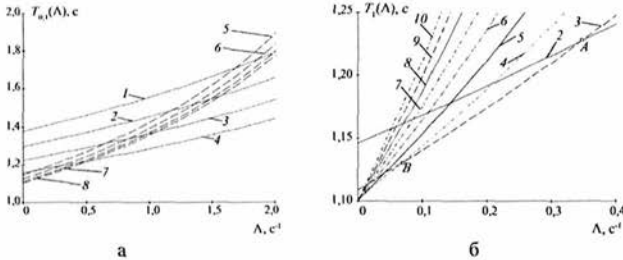


Рисунок 4 – Среднее время пребывания запросов в системе при последовательном (кривые 1–4) и дублированном (5–8) поиске сервера (а), при резервированном поиске при $k = 2, 3, \dots, 10$ (б)

Полученные аналитические зависимости свидетельствуют о существовании области целесообразности и оптимальной кратности резервированных передач k , о зависимости k от интенсивности потока запросов Λ и вероятности битовых ошибок B . Однако для более сложных случаев требуется применение методов имитационного моделирования [3, 7, 8].

На Рисунке 5 приведены алгоритм организации (проведения) имитационных экспериментов и алгоритм многопутевого распределения запроса (передачи пакета данных) через сеть [8]. Алгоритм проведения экспериментов предполагает наличие минимум одного набора значений параметров модели s , варьирующиеся значения Λ и k . Набор параметров составляет конфигурацию моделируемой системы, определяемую ее функционально-структурными характеристиками; состоянием, включая текущую загрузженность ресурсов и интенсивность сетевого трафика; требованиями прикладных программ к времени доставки пакетов к адресуемым узлам (t_0) или времени ожидания ответа узлом-источником ($t_{0(c)}$). Кроме того, к конфигурации системы относится сценарий прогона модели, или совокупность алгоритмов, совместное применение которых образует вариант функционирования системы.

При создании запроса (пакета) задаются его свойства: уникальный идентификатор; размер (длина) в битах (512–12144 для размера кадра формата Ethernet DIX (II)) – для вычисления скорости прохождения запросом пути и задержек в узлах, вероятность битовых ошибок в доставленной на сервер копии запроса; время его создания (начало пребывания в системе). При моделировании ситуации с установлением соединения запрос также содержит сведения о порядковом номере пакета в сообщении и их общем числе.

Создаваемые запросы помещаются в «очередь запросов», представляющую буфер выходного порта узла-источника. Считаем, что возникающая при этом задержка зависит только от размера исходного блока данных, определяющего время его передачи в канал, и длины очереди в выходном порту. При $k > 1$ запросы клонируются, и их копии помещаются в «очередь запросов». По достижении заданного значения M создание запросов прекращается. Одновременно с созданием новых запросов происходит их итеративное изъятие из очереди и отправка по заранее или динамически определяемым маршрутам. По окончании процессов создания запросов, их доставки и обслуживания (адресуемым узлом) результаты текущего эксперимента записываются в базу данных.

Процесс прохождения запросом пути от узла-источника к узлу-получателю характеризуется успешностью переходов между промежуточными узлами в цикле d (Рисунок 5б). При каждом переходе с заданной вероятностью (или согласно заданному условию/алгоритму) принимается решение о том, считать запрос успешно обработанным узлом или уничтоженным: в этом случае запрос досрочно покидает систему. Решения «считать запрос потерянным» и «запрос содержит битовую ошибку[-и]» реализуются с некоторой вероятностью или на основе заданного алгоритма. События переполнения очередей узлов, «запрос [одна из его копий] уже обслужен» или «запрос просрочен» (истекло

время t_0) определяются текущим состоянием системы. Задержка коммутации и задержка обслуживания, включая проверку безошибочности пересылаемого пакета и его актуальность, считаются стохастическими величинами и задаются с применением вероятностного распределения. Время пребывания запроса в системе определяется разницей между моментами времени его выхода из системы и создания; вероятность успеха при распределении – отношением числа успешно доставленных к общему числу пересылаемых через сеть запросов (пакетов). Запись в базе данных по результатам распределения M запросов содержит значения (всех или некоторых) параметров модели, число успешно обслуженных копий запросов, число уничтоженных копий на каждом этапе прохождения пути, минимальное, среднее и максимальное время пребывания запросов в системе.

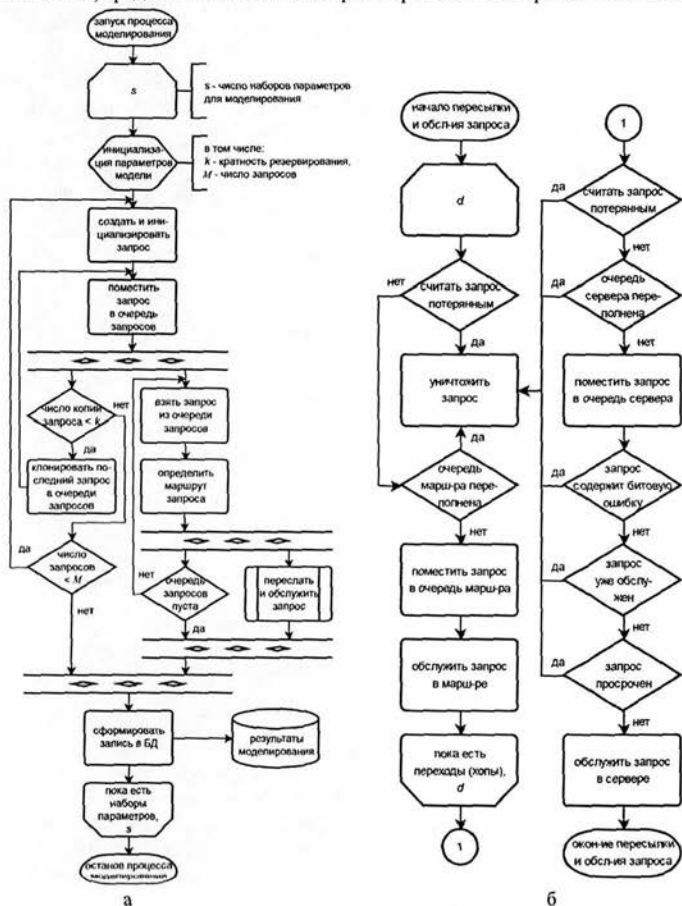


Рисунок 5 – Алгоритмы организации имитационного моделирования (а) и распределения запроса через сеть (б)

На Рисунке 6 представлены среднее время пребывания в системе T , с (а) и вероятность своевременной и безошибочной доставки P (б) при многопутевом распределении через сеть запросов. Предел допустимого времени ожидания $t_0 = 2,1 \cdot 10^{-3}$ с, $M = 5 \cdot 10^4$ шт., длина входных очередей узлов – 4096 шт. при средней битовой длине запроса $N = 4096$ бит.

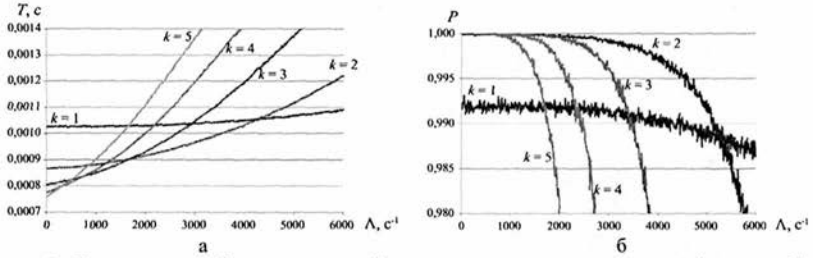


Рисунок 6 – Среднее время пребывания в системе (а) и вероятность своевременной успешной доставки (б) при многопутевом распределении запросов

Результаты имитационного моделирования подтверждают выводы аналитического об обоснованности применения многопутевых резервированных передач для снижения среднего времени пребывания в системе T и увеличения вероятности безошибочного обслуживания запросов P , причем даже в отсутствие ошибок передач и недоступности промежуточных и адресуемых узлов (Рисунок 6б). По мере возрастания интенсивности Λ увеличивается нагрузка в системе, снижается вероятность P . Приведенные зависимости позволяют найти границы целесообразности применения предлагаемого подхода к организации взаимодействия в распределенных системах.

На Рисунок 7а – вероятность своевременной доставки безошибочных пакетов P в случае без резервирования (кривые 1, 4) и с резервированием при $k=2$ (2, 5) и $k=3$ (3, 6) с учетом ошибок передач B , неготовности серверов к обслуживанию запросов p : $B_1 = 10^{-7}$ (1–3), $B_2 = 10^{-5}$ (4–6), сбоях, аппаратных и программных ошибок в промежуточных узлах $LR_1 = 10^{-4}$ (1–3), $LR_2 = 10^{-3}$ (4–6), $p_1 = 0,99$ (1–3), $p_2 = 0,95$ (4–6). Отбрасывание пакетов в промежуточных узлах приводит к уменьшению, с одной стороны, доли успешно переданных через сеть пакетов, с другой стороны, длин входных очередей в этих узлах и, как результат, времени обслуживания, что, в свою очередь, способствует повышению P . На Рисунок 7б – оптимальное число резервных копий k в зависимости от Λ при $t_0 = 2,1 \cdot 10^{-3} c$, p_2, B_2, LR_2 .

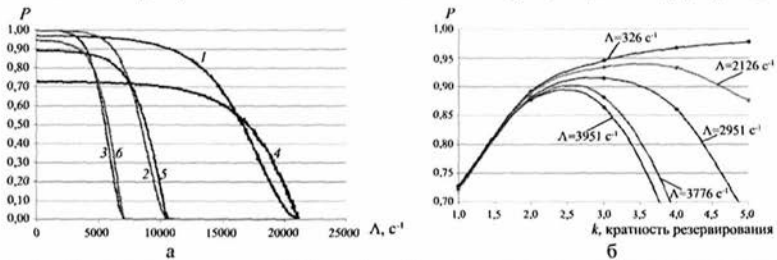


Рисунок 7 – Вероятность своевременной безошибочной доставки запросов при учете ошибок передач и неготовности серверов в зависимости от интенсивности потока запросов (а) и кратности резервирования (б)

Включение общих узлов в разные пути следования пакетов, что оправдано при низкой интенсивности отказов (10^{-4} 1/час и ниже), позволяет балансировать нагрузку с целью увеличения вероятности успешных передач. При балансировке нагрузки большая эффективность взаимодействия через сеть наблюдаются при адаптивном (на основе анализа длин очередей соседних узлов) и циклическом выборе маршрута, меньшая – при случайном.

На Рисунок 8 – среднее время пребывания запросов в системе T (а) и вероятность их своевременной безошибочной доставки к серверам P (б) в случае непересекающихся путей (кривые 1, 2, 5, 6) и пересекающихся маршрутов (3, 4, 7, 8), то есть путей с общими коммуникационными узлами и линиями связи; с повторными передачами (5–8) и без возможности повторных передач (1–4); без резервирования (1, 3, 5, 7) и при $k=2$ (кривые 2,

4, 6, 8). Применение повторных передач позволяет повысить P для определенного диапазона значений Λ . Однако при увеличении нагрузки в сети повторная пересылка запросов приводит к росту очередей в узлах и возрастанию T , в результате чего убывает P . Для некоторого диапазона значений Λ наблюдается выигрыш по T и P для случаев с резервированием без повторных передач (кривые 2, 4) относительно случаев без резервирования с повторными передачами (5, 7).

Исследована целесообразность сочетания предлагаемого подхода к резервированному обслуживанию запросов (пакетов) с приоритетным обслуживанием чувствительных к времени выполнения запросов. Установлено, что область целесообразности резервированных передач при многопутевом распределении запросов через сеть существует как при приоритетном, так и беспriorитетном обслуживании запросов наблюдаемого потока. В первом случае выигрыш по T и P оказывается существенно больше, чем во втором. Однако заметим, что подобный эффект достигается за счет снижения эффективности обслуживания менее приоритетных запросов.

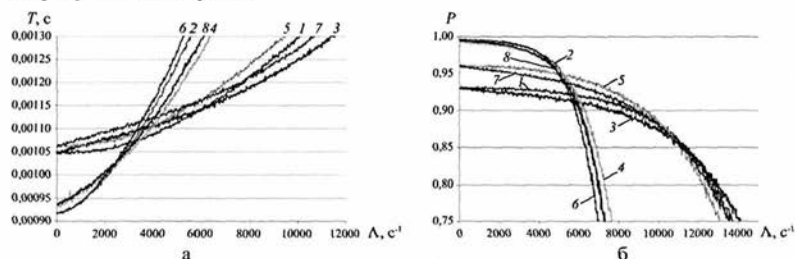


Рисунок 8 – Среднее время пребывания запросов в системе (а) и вероятность их доставки к серверам кластера (б) с учетом пересеканости маршрутов и возможности повторных передач

В третьей главе в целях поддержки организации имитационного моделирования и ускорения проведения имитационных экспериментов при выборе вариантов резервированных распределения запросов и передачи данных разработаны:

1. Алгоритм автоматизированного проведения серии (серий) имитационных экспериментов, реализованный на языке программирования Java и применяемый в среде моделирования AnyLogic 7 Professional [8, 15]. (Серия экспериментов – набор имитационных испытаний с управляемыми (Λ , k) и фиксированными значениями параметров модели при неизменном сценарии ее протекания. Выполнение более одной серии экспериментов для заданной конфигурации системы имеет целью уточнение (усреднение) получаемых результатов и оправдано при наличии в модели стохастических параметров.)

2. Структура реляционной базы данных для хранения результатов имитационных экспериментов в соответствии с заданной конфигурацией системы и управляемых параметров модели – интенсивности потока запросов, кратности резервирования передач [4].

3. Набор скриптов на языке структурированных запросов SQL для обработки результатов экспериментов, в том числе их агрегации на основе заданной конфигурации системы и подготовки к экспорту во внешние приложения, поиска оптимальной кратности резервирования передач для заданной интенсивности потока запросов [15].

4. Программное средство для визуального представления границ области целесообразности и автоматизированного поиска оптимальной кратности резервирования передач на основе обработки результатов имитационных экспериментов [4, 15].

В четвертой главе [4, 8, 15] предложены методы, направленные на выбор обоснованных решений по повышению надежности и эффективности взаимодействия программ в распределенных системах. Метод организации имитационного моделирования процесса многопутевых резервированных передач предполагает (Рисунок 9):

1. Создание *настраиваемых* имитационных моделей (ИМ) для поддержки процесса моделирования путем построения шаблонных структур распределенной системы с использованием средств дискретно-событийного моделирования выбранной среды и реализации сценариев ее функционирования в виде библиотеки подпрограмм, например, алгоритма циклического/случайного выбора маршрута. Это соответствует *шагам* (1) – (4).

2. Проведение *единичных* имитационных экспериментов (ИЭ) в интерактивном пользовательском режиме для отладки модели или серии (серий) имитационных испытаний в *программном* режиме – при алгоритмическом запуске экспериментов с варьирующимися параметрами и сохранением их результатов в базе данных (БД); *шаги* (5) – (10).

3. Анализ результатов экспериментов, нацеленный на определение области целесообразности и выбор оптимальной кратности резервирования передач для заданной конфигурации системы в случае соответствия этих результатов требованиям технического задания (ТЗ) и иным регламентирующим документам; *шаги* (11) – (14).

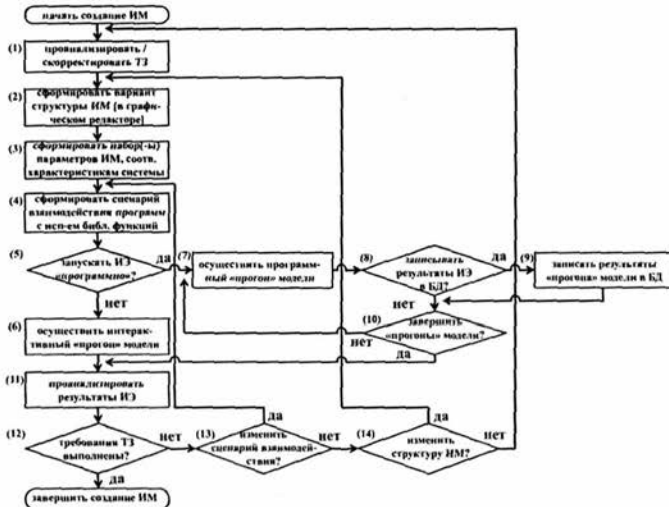
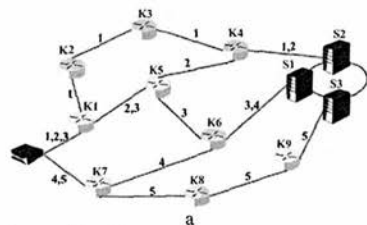


Рисунок 9 – Метод разработки моделей, проведения имитационных экспериментов и анализа их результатов

Рассмотрим применение данного метода на примере распределенной системы с $K1-K9$ коммуникационными узлами (маршрутизаторами), $S1-S3$ входящими в кластер серверами и маршрутами $1-5$ распределения запросов через сеть к этим серверам (Рисунок 10а). На Рисунке 10б – возможные комбинации этих маршрутов. На Рисунке 11 – среднее время пребывания запросов в системе T (а) и вероятность их своевременной безошибочной доставки P (б) при многопутевом распределении через сеть без резервирования передач (варианты $1-5$) и с их резервированием ($6-31$). Резервирование способствует повышению эффективности распределения запросов для вариантов $12, 14$ и 23 (Рисунок 11а), то есть распределение запросов по маршрутам 2 и 5 в среднем быстрее, чем их передача по маршруту 2 или по маршруту 5 при $\Lambda < 25 \text{ с}^{-1}$. По путям 3 и 5 – быстрее, чем по пути 3 или по пути 5 при $\Lambda < 110 \text{ с}^{-1}$. По маршрутам $2, 3$ и 5 – быстрее, чем по маршрутам $2, 3$ или 5 по отдельности при $\Lambda < 15 \text{ с}^{-1}$. Повышение P при резервированном распределении запросов достигается при $\Lambda < 210 \text{ с}^{-1}$ (Рисунок 11б); наиболее предпочтителен вариант 11 (пути 2 и 4).

При реализации предлагаемого подхода к повышению надежности и эффективности передач в распределенных системах предлагается осуществлять нахождение оптимальной кратности резервирования передач k на промежуточном уровне системы. В составе промежуточного программного обеспечения: настраиваемые имитационные модели; база

данных с результатами экспериментов; модуль обработки сообщений от выполняющих прикладные программы и взаимодействующих через сеть процессов с определением максимального времени доставки адресатам t_0 (или ожидания ответа от адресатов клиентом $t_{0(cl)}$), причем в общем случае это время индивидуально для каждого приложения; модуль обработки данных о производительности рассматриваемой части сети, в том числе интенсивности трафика (потока запросов Λ), отказах оборудования, новых подключенных узлах и прочем, от служб (систем) управления сетью (Network Management System, NMS).



Вариант №	Маршруты №	Вариант №	Маршруты №	Вариант №	Маршруты №
1	1	11	2, 4	21	1, 4, 5
2	2	12	2, 5	22	2, 3, 4
3	3	13	3, 4	23	2, 3, 5
4	4	14	3, 5	24	2, 4, 5
5	5	15	4, 5	25	3, 4, 5
6	1, 2	16	1, 2, 3	26	1, 2, 3, 4
7	1, 3	17	1, 2, 4	27	1, 2, 3, 5
8	1, 4	18	1, 2, 5	28	1, 2, 4, 5
9	1, 5	19	1, 3, 4	29	1, 3, 4, 5
10	2, 3	20	1, 3, 5	30	2, 3, 4, 5
				31	1, 2, 3, 4, 5

Рисунок 10 – Схема распределения запросов по маршрутам 1-5 (а), варианты многопутевого распределения запросов (б)

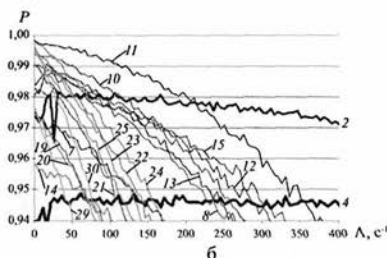
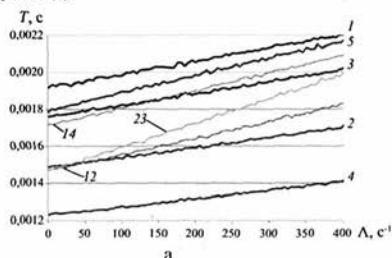


Рисунок 11 – Среднее время пребывания запросов в системе (а) и вероятность их одновременной безошибочной доставки к серверам кластера при многопутевом распределении через сеть

На Рисунке 12 представлены разработанные методы взаимодействия программ в распределенных системах, использующие построенные имитационные модели и реализованные инструменты поддержки обоснованного выбора кратности резервирования.

При многопутевой резервированной передаче данных (Рисунок 12а):

- если с момента последней передачи данных адресуемому узлу изменились структура и (или) состояние распределенной системы, например, в результате отказов узлов, обновить имитационную модель, то есть выбрать существующий ее вариант из набора сохраненных или модифицировать ее на основе текущего или иного, имеющегося в наличии шаблона;
- если для существующей имитационной модели в базе данных нет записи с текущей конфигурацией системы, включая интенсивность сетевого трафика Λ в рассматриваемой части сети и максимальное время ожидания t_0 , или если была создана новая модель на основе шаблона, провести имитационные эксперименты и сохранить их результаты в базе данных;
- если структура и состояние системы остались прежними, но изменилось время t_0 , и (или) изменилась существенным образом (на заданное значение и больше) интенсивность Λ , проверить существование в базе данных записи с текущей конфигурацией системы, и если ее нет – провести имитационные эксперименты;
- если структура и состояние системы, Λ и t_0 не изменились, выбрать последнее (кэшированное) значение кратности резервирования передач k ; в противном случае, осуществить поиск оптимального значения k для текущей конфигурации системы;
- после нахождения оптимальной кратности резервирования k произвести рассылку (многократную одноадресную) k копий пакета по k маршрутам до узла-адресата.

При многопутевом резервированном распределении запросов (Рисунок 12б):

- вначале определить адреса n серверов, обслуживающих запросы заданного типа;
- если текущий запрос не является критичным к времени выполнения, резервирования не проводить и направить этот запрос на обслуживание к одному из n серверов;
- если запрос является критичным к времени выполнения, проверить актуальность структуры и состояния системы и в случае необходимости обновить имитационную модель;
- если записи о текущей конфигурации системы нет в базе данных, провести для нее имитационные эксперименты и осуществить поиск оптимального значения k ;
- после нахождения оптимального значения k – отправить k копий запроса k серверам;
- в случае неполучения ответа от сервера (или ни от одного из k серверов) за заданное время направлять копии запроса к другим серверам до тех пор, пока не будет получен ответ или не будет превышено максимальное число попыток распределения запроса через сеть.

В заключении изложены основные выводы и результаты исследования.

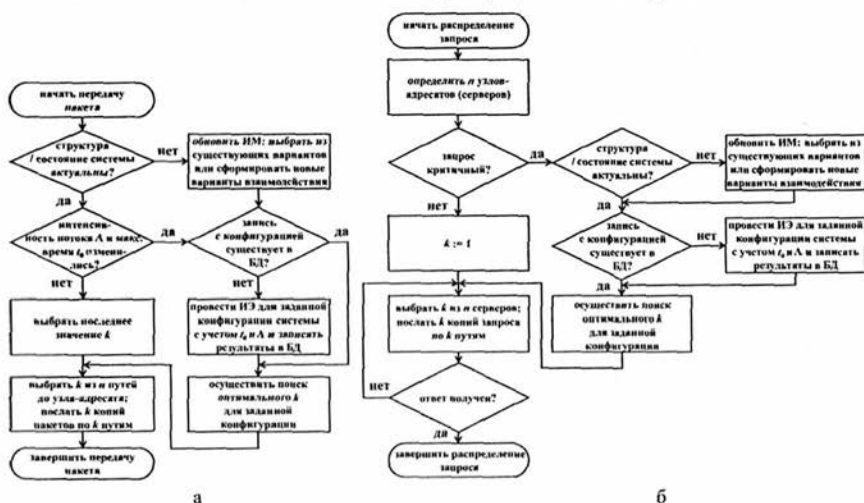


Рисунок 12 – Взаимодействие программ в распределенных системах: метод многопутевой резервированной передачи данных (пакетов) (а) и метод многопутевого резервированного распределения запросов через сеть (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целях развития и консолидации концепций многопутевой маршрутизации и резервированного обслуживания запросов, критичных к времени выполнения, повышения эффективности и надежности взаимодействия программ и программных систем через вычислительную сеть при решении задач распределенной обработки и распределенного хранения данных:

1. Выбраны критерии эффективности взаимодействия программ и программных систем, сформулированные на основе показателей эффективности – среднего времени пребывания запросов (пакетов) в системе и вероятности их безошибочной передачи через вычислительную сеть при ограниченном времени их доставки к адресуемому узлам.

2. Разработан комплекс аналитических и имитационных моделей взаимодействия программ и программных систем при многопутевом резервированных передачах:

– аналитические модели динамического распределения запросов через сеть при последовательном и при резервированном обращении к объединенным в группу серверам (кластеру) с учетом их возможной недоступности из-за перегруженности, отказов и временных отключений;

– имитационные модели передачи данных и распределения запросов в условиях возможных ошибок передач, сбоев и отказов аппаратного и программного обеспечения, отказов и недоступности промежуточных и конечных узлов, ограничений емкости их входных буферов (длины очередей), размеров пакетов и времени ожидания доставки (ответа), приоритетности потоков и различных вариантов выбора маршрутов в сети.

3. Предложены методы повышения эффективности и надежности взаимодействия программ на основе многопутевых резервированных передачи данных (по одному адресу) и распределения запросов (по многим адресам), нацеленные на выбор оптимальной кратности резервирования передач с использованием разработанных моделей и результатов имитационных экспериментов, с учетом разной чувствительности запросов (пакетов) к задержкам.

4. Предложен метод и реализованы инструментальные средства поддержки моделирования, направленного на формирование и оптимизацию выбора вариантов многопутевых резервированных передач при взаимодействии программ и программных систем через сеть, а также алгоритмы создания этих средств. Метод предполагает организацию проведения серий имитационных экспериментов с сохранением в базе данных, обработкой и анализом их результатов, в том числе с применением программного средства, разработанного для определения области эффективности резервированных передач и автоматизированного поиска оптимальной кратности резервирования.

Показаны существование области эффективности и оптимальной кратности резервирования передач, при этом установлена ее зависимость от интенсивности входного потока запросов и других функционально-структурных параметров распределенной системы, возможности повторных передач в случае недоступности адресуемых узлов и ограниченного времени доставки пакетов.

В дальнейшем предлагается адаптировать разработанные модели и методы к протоколам передачи данных и используемому на практике оборудованию распределенных компьютерных систем. Перспективы дальнейших исследований: разработка протоколов взаимодействия программ в системах с высокими требованиями к своевременности и безошибочности выполнения запросов и передачи данных при учете полученных теоретических выводов и построенных моделей.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных журналах и изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Богатырев В.А., Паршутина С.А. Модели многопутевой отказоустойчивой маршрутизации при распределении запросов через сеть // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2015. — № 12. — С. 23–28.

2. Богатырев В.А., Паршутина С.А. Многопутевое резервированное распределение через сеть критичных к задержкам запросов // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2016. — № 10 (148). — С. 41–46.

3. Богатырев В.А., Кармановский Н.С., Попцова Н.А., Паршутина С.А., Воронина Д.А., Богатырев С.В. Имитационная модель поддержки проектирования инфокоммуникационных резервированных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2016. — № 5 (16). — С. 831–838.

4. Паршутина С.А. Организация имитационных экспериментов при проектировании распределенных компьютерных систем с резервированной передачей данных // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2017. — № 5 (17). — С. 841–849.

**Публикации в зарубежных научных изданиях,
индексируемых в системах Scopus или Web of Science:**

5. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A. Redundant distribution of requests through the network by transferring them over multiple paths // *Communications in Computer and Information Science*. — 2016. — V. 601. — P. 199–207.
6. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A. Efficiency of redundant multipath transmission of requests through the network to destination servers // *Communications in Computer and Information Science*. — 2016. — V. 678. — P. 290–301.
7. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A., Poptcova N.A., Bogatyrev A.V. Efficiency of redundant service with destruction of expired and irrelevant request copies in real-time clusters // *Communications in Computer and Information Science*. — 2016. — V. 678. — P. 337–348.
8. Parshutina S.A., Bogatyrev V.A. Models to support design of highly reliable distributed computer systems with redundant processes of data transmission and handling // *Proceedings of 2017 Inter-national Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS)*. – IEEE, 2017. – Pp. 96–99.

Прочие публикации:

9. Паршутина С.А. Оптимальная организация обмена данными в отказоустойчивых распределенных вычислительных системах // В мире научных открытий: Материалы XII Международной научно-практической конференции. — М.: Изд-во «Спутник+», 2014. — С. 125–128.
10. Паршутина С.А. Методы оптимального проектирования высоконадежных распределенных вычислительных систем // XIV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2014)». Санкт-Петербург, 29-31 октября 2014 г.: Материалы конференции. \СПОИСУ. — СПб, 2014. — С. 407.
11. Паршутина С.А. Отказоустойчивость распределенных вычислительных систем при многопутевой маршрутизации // Наука XXI века: теория, практика и перспективы. Международная научно-практическая конференция. — Уфа: ООО «ОМЕГА САЙНС», 2015. — С. 39–41.
12. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A. Redundant distribution of requests across the network by transferring them over multiple paths // *Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2015) = Distributed computer and communication networks: control, computation, communications (DCCN-2015): Материалы Восемнадцатой международной научной конференции*. Под общ. ред. В. М. Вишневого. — М.: ИПУ РАН, 2015. — С. 434–439.
13. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A. Efficiency of redundant multipath transmission of requests through the network to destination servers // *Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2016): Материалы Девятнадцатой международной научной конференции: в 3 томах*. Под общ. ред. В. М. Вишневого и К. Е. Самуйлова. — М.: РУДН, 2016. — С. 73–80.
14. Parshutina S.A., Bogatyrev V.A. Simulation Modeling and Optimization of the Redundant Processes of Transmitting and Handling Requests in Distributed Computer Systems // *Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2017): Материалы Двдцатой международной научной конференции*. Под общ. ред. В. М. Вишневого. — М.: РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», 2017. — С. 206–213.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

15. Паршутина С.А. Программа для оптимизации кратности резервирования передач в распределенных компьютерных системах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662661 от 12.10.2018.

