

На правах рукописи

Воробьев Андрей Игоревич

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ
ИНФОРМАЦИОННЫХ УСЛУГ В ЦЕНТРАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Специальность: 05.13.01 -
Системный анализ, управление и обработка информации
(технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена на кафедре автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина)

Научный руководитель: Академик Российской академии образования
доктор технических наук, профессор
Советов Борис Яковлевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Водяхо Александр Иванович
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ" им.
В.И.Ульянова (Ленина), профессор кафедры
вычислительной техники

кандидат технических наук
Васильев Николай Владимирович
ОАО «Информационные телекоммуникационные
технологии», начальник сектора

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения"

Защита диссертации состоится «__»_____20__г. в___ч. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.07 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им.В.И.Ульянова (Ленина)" по адресу: 197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им.В.И.Ульянова (Ленина)".

Автореферат разослан «__»_____20__г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.

Цехановский В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Основой построения ИТ-инфраструктуры является Центр обработки данных (ЦОД). Предназначение ЦОД – обеспечение безотказной работы бизнес-процессов, надежное хранение данных и гарантированный доступ к ним, предоставление информационных услуг.

Центры обработки данных востребованы государственными службами (электронное правительство, госуслуги), крупными организациями, такими как, банки, страховые и торговые корпорации, предприятия добывающей отрасли, телекоммуникационные компании (биллинговые системы, хостинг, всевозможные Web-сервисы и социальные службы). Все они используют сложные бизнес-приложения, и их деятельность зависит от надежности функционирования ИТ-инфраструктуры.

Важнейшими преимуществами создания ЦОД являются консолидация систем обработки и хранения информации. В тоже время растущие потребности бизнеса необходимо удовлетворить в условиях ограниченных ресурсов: надо хранить больше данных в выделенном пространстве, быстрее производить вычисления, не потребляя и не выделяя слишком много энергии, передавать больше информации по имеющимся каналам связи, обеспечивать максимальную степень готовности эксплуатируемых ИТ-систем. И всё это с ограниченным финансированием. В таких условиях грамотное проектирование ЦОД является ключевым звеном для достижения эффективной работы предприятия, а указанные ограничения определяют выбор используемых технологий и оборудования.

Известно, что в области ИТ-систем высокой доступности происходит быстрая смена технологий. Отсутствие единого подхода к организации ЦОД, стандартов проектирования и эксплуатации различных серверных помещений и центров обработки ставят проблему выработки системного подхода к реализации инфраструктуры, а также разработки моделей и методов повышения эффективности предоставления информационных услуг в ЦОД. Появление опыта в виде открытых стандартов, моделей и методов позволит унифицировать реализацию ЦОД и упростить внесение изменений в его инфраструктуру, способствовать тиражируемости и масштабируемости решений. Инфраструктура ЦОД должна быть перспективной, т.е. обеспечивать долгосрочную защиту инвестиций, затраченных на построение и эксплуатацию ЦОД.

Особенное значение данная проблема приобретает в условиях экономического кризиса, который усилил дефицит ресурсов. Предприятия сокращают бюджеты на ИТ, меньше вкладывают в долговременные проекты вообще и в ЦОД в частности. Первостепенной становится задача создания легких, недорогих и в то же время эффективных решений, отвечающих требованиям бизнес-заказчиков. Основная проблема состоит в том, как в условиях постоянного увеличения стоимости ресурсов получать максимальную отдачу от их эксплуатации. Отсюда возникают ключевые вопросы, которые необходимо решать при реализации ЦОД, – каким образом добиться увеличения основных показателей (производительности, надежности и т.д.) при минимизации затрат (энергопотребление, администрирование), учесть возможный рост нагрузки, предусмотреть восстановление после сбоев и высокую доступность критически важных приложений и сервисов. Эти вопросы **актуализируют** задачу моделирования процессов функционирования ЦОД при предоставлении информационных услуг.

Теория моделирования сложных систем и их элементов развита такими отечественными учеными, как Г.П.Башарин, В.А. Ершов, Г.П. Захаров, Ю.Ф. Кожанов, М.О. Колбанев, А.П. Кулешов, О.И. Кутузов, В.Г. Лазарев, И.А. Мизин, Н.Н. Мошак, Ю.И. Рыжиков, Б.Я. Советов, Т.М. Татарникова, О.С. Чугреев, С.А. Яковлев. Оценка вероятностно-временных характеристик систем, оптимизация и распределение ресурсов рассматривались в работах зарубежных ученых: Л. Клейнрок, Д. Мартин, У. Столлингс, Э. Таненбаум, М. Шварц и другие. Труды этих и ряда других ученых составляют теоретическую базу для исследования и моделирования сложных систем обработки, хранения и передачи информации, в том числе отдельных узлов, кластеров, центров обработки данных, систем хранения и их

функциональных элементов. В тоже время некоторые вопросы, связанные с эффективностью предоставления информационных услуг в ЦОД остаются открытыми. Перечисленные обстоятельства говорят о важности научной задачи разработки моделей и методов повышения эффективности функционирования ЦОД при предоставлении информационных услуг, имеющей большое значение для экономики страны.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является повышение эффективности предоставления информационных услуг в центрах обработки данных.

Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработать структурно-функциональную модель центра обработки данных.
2. Разработать комплекс моделей оценки качества предоставления информационных услуг в центрах обработки данных.
3. Разработать методы повышения эффективности предоставления информационных услуг в центрах обработки данных.

Объектом исследования являются центры обработки данных, выполненные в виде консолидации кластеров обработки и систем хранения данных.

Предметом исследования являются процессы предоставления информационных услуг в центрах обработки данных.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач применялись математические методы системного анализа, теории вероятности, эволюционных алгоритмов и теории массового обслуживания.

Научная новизна работы состоит в разработке моделей и методов повышения эффективности предоставления информационных услуг в ЦОД, позволяющих обеспечить соглашение о качестве обслуживания клиентов. Новые научные результаты:

1. Структурно-функциональная модель центра обработки данных отличается определением множества структурных элементов и их функционального назначения, присущих большинству современных центров обработки данных, что позволяет более полно описывать процессы предоставления информационных услуг.
2. Комплекс моделей оценки качества предоставления информационных услуг в центрах обработки данных отличается учетом многоэтапности обработки клиентского запроса, что позволяет определить необходимые требования к производительности ЦОД.
3. Методы повышения эффективности предоставления информационных услуг в центрах обработки данных учитывают зависимость показателей эффективности от характеристик ЦОД, что позволяет обеспечивать необходимое качество обслуживания клиентов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Структурно-функциональная модель центра обработки данных.
2. Комплекс моделей оценки качества предоставления информационных услуг в центрах обработки данных.
3. Методы повышения эффективности предоставления информационных услуг в центрах обработки данных.

Достоверность научных результатов и выводов подтверждается: корректным применением математического аппарата, обоснованностью применяемых ограничений, сопоставлением теоретических положений и результатов численного моделирования.

Научная и практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что модели и методы повышения эффективности предоставления услуг в ЦОД можно рассматривать как единую методологию обеспечения необходимого качества обслуживания клиентов. Полученные результаты моделирования представляют практическую ценность при проектировании центров обработки данных.

Результаты работы внедрены в учебный процесс СПбГЭТУ (ЛЭТИ) и используются при проведении лабораторных работ, а также в курсовом и дипломном проектировании по темам, связанным с функционированием ИТ-систем, на кафедре автоматизированных систем обработки информации и управления.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись на XII международной конференции «Информатика: проблема, методология, технологии» (Воронеж, 9-12 февраля 2012 г.); XIII международной конференции «Региональная информатика (РИ-2012)» (Санкт-Петербург, 24-26 октября 2012 г.); международной конференции «Региональная информатика», (Санкт-Петербург, 1-3 марта 2005 г.); второй всероссийской конференции «Абонентский доступ в сетях следующего поколения» (Санкт-Петербург, 2005 г.) и на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава научных сотрудников и аспирантов СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича в 2006 – 2012 гг.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, из них – 3 статьи из перечня изданий, рекомендованных ВАК, и 9 – работ в научных трудах международных и всероссийских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 77 наименований. Основная часть работы изложена на 141 страницах машинописного текста. Работа содержит 40 рисунков, 12 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель исследования и решаемые задачи, определена научная новизна и практическая ценность основных результатов работы.

В первой главе рассмотрена организация ИТ-инфраструктуры центра обработки данных. Предложена структурно-функциональная модель ЦОД, которая представлена в виде описания структуры, отдельных модулей, функций и взаимодействия ЦОД с клиентами (1):

$$\text{ЦОД} = f(M, \Phi, \vec{G}, \vec{G}^{\text{доп}}), \quad (1)$$

где M – множество подсистем (модулей) ЦОД,

Φ – множество функций ЦОД,

\vec{G} – вектор показателей качества ЦОД,

$\vec{G}^{\text{доп}}$ – вектор допустимых показателей (требований) со стороны клиентов ЦОД на качество их обслуживания.

Современный ЦОД состоит из следующих функциональных модулей:

– Серверного комплекса ($СК_{i=1, \overline{A}; j=1, \overline{B}}$, i – число серверов в кластере j -й группы),

включающего различные группы кластеров. Кластер рассматривается как совокупность однотипных серверов, объединенных коммутационной системой. Каждый сервер имеет один процессор и память ограниченного объема.

– Системы хранения данных ($СХД_{i=1, \overline{N}; j=1, \overline{M}}$, i – число СХД j -го типа), предназначенной для организации надежного хранения информационных ресурсов и предоставления к ним доступа со стороны серверов.

– Сетевого оборудования ($СО_{i=1, \overline{I}; j=1, \overline{J}}$, i – наименований сетевого оборудования j -го типа), включающего оборудование маршрутизации, коммутации, организации оптических каналов связи, подключения пользователей, средств обеспечения информационной безопасности.

– Инженерных систем (ИС), отвечающих за предоставление необходимых условий для надежной эксплуатации вычислительного оборудования.

– Системы управления (СУ), обеспечивающей контроль и администрирование всех функциональных модулей ЦОД.

Таким образом, структурно-функциональная модель ИТ-инфраструктуры ЦОД представлена кортежем:

$$\text{ЦОД} = \left\langle \prod_{i,j=1}^{i,j=A,B} \text{СК}_{ij}, \prod_{i,j=1}^{i,j=N,M} \text{СХД}_{ij}, \prod_{i,j=1}^{i,j=I,J} \text{СО}_{ij}, \text{ИС}, \text{СУ} \right\rangle.$$

Практическая реализация структурно-функциональной модели ЦОД зависит от реальной нагрузки, спектра предоставляемых услуг, исполняемых бизнес-приложений, требуемых объемов памяти.

С точки зрения качества предоставляемых ЦОД информационных услуг интерес вызывают подсистемы обработки и хранения данных.

Основными показателями качества ЦОД являются следующие его характеристики: пропускная способность, время ответа на клиентский запрос, надежность функционирования, управляемость и эффективность.

Пропускная способность – метрическая характеристика, показывающая соотношение объема данных, обработанных ЦОД в единицу времени, и характеризует качество выполнения основной функции ЦОД – обработки запросов пользователей.

Время ответа – время, затраченное на прохождение запроса пользователя к ЦОД и обратно. Является метрической характеристикой и оценивается, как среднее арифметическое всех измерений за определенный период времени, например, сутки.

Надежность – свойство системы выполнять возложенные на нее функции в заданных условиях эксплуатации с заданными показателями качества. Предлагается, что у сложных систем, типа ЦОД, основной характеристикой надежности является отказоустойчивость – способность ЦОД работать в условиях отказа некоторых его элементов.

Управляемость ЦОД подразумевает возможность централизованно контролировать состояние функциональных модулей, входящих в состав ЦОД, выявлять и разрешать проблемы, возникающие при их работе, выполнять анализ производительности и планировать развитие ЦОД. Задача анализа производительности ЦОД сводится к частным задачам: оценке интегральных и дифференциальных характеристик ЦОД и исследованию характера зависимости этих характеристик от входной нагрузки, внешних условий и внутренних параметров ЦОД. Решению вопросов развития инфраструктуры ЦОД и выявления элементов, нуждающихся в модернизации, способствует оценка использования ресурсов ЦОД, основанная на оценке коэффициента эффективности использования ресурсов и коэффициента дисбаланса с последующей интерпретацией результатов в виде гистограмм и графов. По результатам анализа представляется возможным сделать выводы относительно степени влияния негативных факторов на эффективность функционирования ЦОД; доли неэффективно используемых средств, вложенных в различные модули ЦОД; «узких» и потенциально «узких» мест ЦОД; необходимости дозагрузки или перераспределение ресурсов между серверами, кластерами и системами хранения ЦОД. Данный подход может применяться не только для оценки эффективности использования различных модулей ЦОД, но и характер этой задачи является ресурсосберегающим и создающим источник дополнительных инвестиций.

Эффективность – основной показатель качества работы ЦОД, характеризующий степень его способности выполнять свои функции по назначению. Данный показатель используется как для сравнения процессов функционирования самого ЦОД, с целью выбора его оптимальных параметров, так и для сравнительной оценки с другими вариантами построения ЦОД.

Процесс предоставления услуг центром обработки данных характеризуется появлением соглашений о качестве обслуживания (Service Level Agreement - SLA). SLA-соглашение – это часть договора между провайдером и клиентом, в котором описывается упорядоченная

система показателей для контроля качества предоставляемых услуг, а также штрафы за нарушение соглашения и вознаграждения в случае успешного его выполнения. Наиболее распространенными показателями качества, задаваемыми в SLA-соглашениях, являются среднее время ответа на запрос и максимальное время ответа для заданной доли запросов.

Запрос пользователя на предоставление информационной услуги ЦОД – это задание, состоящее из последовательности задач и интервалов времени на обдумывание между этими задачами, т.е. моментом времени, прошедшим между завершением выполнения задачи на каком-либо узле, например сервере кластера, и моментом поступления следующей задачи на другой узел ЦОД, например системы хранения данных, в пределах одного задания. Таким образом, процесс предоставления пользователю i -й информационной услуги может быть представлен кортежем $U_i = \{t_i, H_i, Tr_i\}$, где t_i – момент инициирования i -го задания, H_i – характеристики i -го задания, такие как режим и приоритет обработки задания, адрес и имя пользователя, запросившего информационную услугу и др., и Tr_i – трасса i -го задания. Трасса задания – это последовательность задач, при выполнении которых пользователю будет предоставлена информационная услуга. Формально Tr_i представляется в виде упорядоченного множества событий $\{S_1, S_2, \dots, S_R\}$, имевших место в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_R соответственно. К событиям относятся моменты начала выполнения задания, начала и завершения обработки отдельных задач, начала и окончания выполнения процессов в системах хранения данных ЦОД, и др.

Задача диссертационного исследования сформулирована как многопараметрическая и многокритериальная экстремальная задача с ограничениями: при заданных значениях элементов множества параметров φ , задающих технические характеристики функциональных модулей ЦОД, найти необходимое множество M , описывающее структуру ЦОД (число серверов в кластере, число кластеров, систем хранения и т.п.), такое, чтобы выполнялись условия:

$$0 < g_i(\varphi, M) \leq g_i^{\text{доп}}, \quad g_i \in \vec{G}, \quad g_i^{\text{доп}} \in \vec{G}^{\text{доп}}, \quad (2)$$

$$\varphi \rightarrow \min f(\varphi, M), \quad (3)$$

где φ – аддитивная функция стоимости ЦОД, включающая стоимость технических средств и программного обеспечения;

g_i – значение i -го показателя качества ЦОД;

$g_i^{\text{доп}}$ – допустимое значение i -го показателя качества, определенное в SLA-соглашении.

Сформулированная задача решается в два этапа: на первом – выполняется оценка показателей качества \vec{G} предоставления информационных услуг в центрах обработки данных, на втором – решается задача (2)–(3).

Определены функциональные модули ЦОД и процессы предоставления информационных услуг, оказывающие значительное влияние на показатели качества. К ним относятся:

1) Серверный комплекс. Для учета влияния серверного комплекса на показатели качества необходимо разработать:

Модель оценки характеристик производительности ЦОД и запасов по пропускным способностям:

$$\bar{t}_{\text{отв}} = f(\lambda, T_{\text{обс}}), \quad \Lambda(\bar{t}_{\text{отв}}), \quad D = f(\lambda),$$

где λ – нагрузка, поступающая в ЦОД, [запросов/с];

$T_{\text{обс}}$ – время обслуживания клиентского запроса в ЦОД, [с];

$\bar{t}_{\text{отв}}$ – время ответа на запрос пользователя;
 D – запас по пропускным способностям ЦОД.

Модель распределения нагрузки (балансировки) в кластере ЦОД.

$$p(m_1, m_2, m_C) = f(\lambda, C, \bar{\mu}),$$

где $p(m_1, m_2, \dots, m_C)$ – вероятность распределения запросов пользователей по C серверам кластера;

λ – интенсивность поступления в кластер запросов на выполнение задач;

C – количество серверов в кластере;

$\bar{\mu}$ – вектор интенсивностей обслуживания запросов в серверах кластера, [с].

Модель оценки надежности ЦОД.

$$P_{\text{ЦОД}} = f[P_1, \dots, P_n, \theta(t)],$$

где $P_{\text{ЦОД}}$ – вероятность безотказного функционирования ЦОД;

P_i – вероятности безотказного функционирования i -го модуля ЦОД в процессе решения заданий клиентов ЦОД.

θ – множество всех возможных состояний ЦОД в момент времени t .

2) Системы хранения данных. Для оценки влияния систем хранения данных на показатели качества ЦОД необходимо разработать:

Модель размещения информационных ресурсов в системах хранения данных

$$t_{\text{отв}} = f(C, \lambda, \mu, m),$$

где $t_{\text{отв}}$ – время ответа на запрос пользователя;

λ – интенсивность заданий, поступающих к ресурсу, [заданий/с];

C – пропускная способность ресурса, [операций/с];

μ – среднее число операций, необходимых для выполнения задания;

m – количество ресурсов.

Во второй главе предложен комплекс моделей оценки качества предоставления информационных услуг в центрах обработки данных.

Математическим аппаратом для оценки качества предоставления информационных услуг в ЦОД выбран аппарат беспriorитетных разомкнутых экспоненциальных сетей массового обслуживания (СеМО).

ЦОД задается следующим кортежем параметров:

$$\{N, \bar{K}, P = \|p_{ij}\|, \bar{I}, \bar{T}_{\text{обс}}\},$$

где N – число кластеров ЦОД;

$\bar{K} = \{K_1, \dots, K_C\}$ – вектор, i -м компонентом которого является число серверов в i -м кластере;

$P = \|p_{ij}\|$, $i, j = \overline{1, N}$ – трасса задания, состоящая из последовательности задач, определенных запросом пользователя;

$\bar{I} = \{I_1, \dots, I_N\}$ – вектор, i -м компонентом которого является интенсивность входного потока запросов i -го класса на предоставление информационной услуги;

$\bar{T}_{\text{обс}} = \{T_{\text{обс}1}, \dots, T_{\text{обс}N}\}$ – вектор, i -м компонентом которого является среднее время обслуживания задач в i -м кластере ЦОД.

С точки зрения выполняемых функций наиболее важными характеристиками ЦОД являются¹: среднее время ответа $\bar{t}_{\text{отв}}$ на предоставление информационной услуги; среднее время ответа для k -й категории (класса) запроса $T_{\text{вх}k}$, к которому могут предъявляться индивидуальные требования по качеству обслуживания; условная пропускная способность ЦОД B и запас D по пропускной способности.

Названные характеристики могут дать ценную информацию о свойствах ЦОД. Например, $\bar{t}_{\text{отв}}$ характеризует среднее время обработки запроса на предоставление информационной услуги, а запас D показывает готовность ЦОД продолжать устойчиво функционировать при увеличении нагрузки по тому или иному входу (классу запросов).

Поскольку в SLA-соглашениях задаются ограничения на качество обслуживания запросов различных классов, в работе предлагается модель ЦОД, которая учитывает современную структуру входного потока заявок.

Поведение пользователей при получении информационной услуги характеризуется их сессиями. Сессия пользователя состоит из последовательности заданий, а также интервалов времени на обдумывание, т.е. времени, прошедшим с момента отправки ответа сервером какого-либо кластера и до поступления нового задания в систему в рамках одной сессии. Типичная сессия может длиться несколько минут. Поэтому в модели необходимо учитывать длительность времени жизни сессий. Для моделирования процесса обдумывания в ЦОД введен виртуальный сервер ($c=0$) с бесконечным числом параллельных независимых каналов обслуживания, позволяющий отразить в модели независимость времени на обдумывание пользователей от времени обработки задания в ЦОД.

Предлагается оценивать время ответа $T_{\text{вх}k}$, на запрос класса k по формуле (4), как суммарное время прохождения запроса через N кластеров ЦОД

$$M[T_{\text{вх}k}] = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i^k}{\lambda^k} \cdot \frac{\bar{t}_i^k}{C_i - q_i}, \quad (4)$$

где N – число кластеров ЦОД;

C_i – число серверов в i -м кластере;

q_i – номинальная загрузка i -го кластера;

\bar{t}_i^k – среднее время ответа на запрос класса k сервером кластера i ;

$\frac{\lambda_i^k}{\lambda^k}$ – среднее число посещений кластера i запросом класса k за время его нахождения в ЦОД.

Для эффективного использования кластеров нужно по возможности равномерно распределить задачи по серверам. В противном случае недогруженные серверы будут простаивать, в то время как задачи, работающие на перегруженном сервере, будут выполняться недопустимо медленно. Чтобы этого не происходило, требуется перераспределять задачи с загруженного узла на недогруженные. Данный процесс является одной из функций системы управления ЦОД и называется балансировкой нагрузки. Распределение нагрузки может решаться, как для каждого кластера, так и для ЦОД в целом.

¹ Советов Б.Я., Яковлев С.А. Построение сетей интегрального обслуживания. Ленинград: Машиностроение, 1990 – 332 с.

В работе предложена модель распределения (балансировки) нагрузки в ЦОД. В основе модели лежат базовые понятия математического аппарата сети массового обслуживания с центральным обслуживающим прибором². Каждая заявка, поступающая в кластер, генерирует задачу, для выполнения которой центральный сервер принимает решение о предписании заявки на один из $(C-1)$ сервер в соответствии с правилом: $\min(m_1, m_2, \dots, m_C)$, где m_i – количество заявок, стоящих в очереди для выполнения на i -м сервере кластера.

На $\bar{t}_{\text{отв}}$ предоставления информационной услуги существенно влияет способ консолидации серверов и систем хранения данных ЦОД. Исследованы следующие варианты:

– непосредственное подключение сервера к системе хранения, что соответствует варианту «один сервер – одна СХД». Моделируется набором из C СМО $G|G|1$, где C – количество пар «сервер-СХД»

– файл-серверная архитектура, что соответствует варианту «один сервер – много СХД». Моделируется СМО $G|G|V$ с очередью запросов к V СХД;

– сеть хранения данных, что соответствует варианту «много серверов – много СХД». Моделируется СМО $G|G|1$.

В третьей главе предложены методы повышения эффективности предоставления информационных услуг в центрах обработки данных: метод управления нагрузкой, поступающей на ЦОД, метод отказоустойчивого размещения задач в кластере серверного комплекса ЦОД, метод распределения памяти в ЦОД.

Эффективность ЦОД $Ef_{\text{ЦОД}}$ представлена функцией (5).

$$Ef_{\text{ЦОД}} = F(\Lambda, P_{\text{отк}}, t_{\text{отв}}, P_{\text{пот}}), \quad (5)$$

где Λ – пропускная способность ЦОД;

$P_{\text{отк}}$ – вероятность безотказного функционирования (отказоустойчивость ЦОД);

$t_{\text{отв}}$ – время ответа на запрос пользователя;

$P_{\text{пот}}$ – вероятность потерь запросов к ЦОД.

Предложен метод управления нагрузкой, поступающей на ЦОД, который позволяет увеличить Λ и уменьшить $P_{\text{пот}}$ (6)

$$\Lambda_{\text{упр}} = f(\lambda), \quad P_{\text{пот}}^{\text{упр}} = f(\lambda), \quad (6)$$

где $\Lambda_{\text{упр}}$ – пропускная способность ЦОД при использовании механизма управления, $\Lambda_{\text{упр}} > \Lambda$;

λ – интенсивность поступления запросов на вход ЦОД;

$P_{\text{пот}}^{\text{упр}}$ – вероятность потерь ЦОД при использовании управления, $P_{\text{пот}}^{\text{упр}} < P_{\text{пот}}$.

Нагрузка на ЦОД с течением времени меняется и если выделять необходимые для решения заданий пользователей ресурсы только на основании значения пиковой интенсивности, то часть ресурса не будет востребована в процессе выполнения запроса. Следовательно, используя статистические свойства нагрузки, администрация ЦОД может без потери качества осуществить статистическое мультиплексирование нагрузки, что позволяет предоставить суммарный общий кредит всем клиентам, превышающий общую пропускную способность ЦОД. Для обеспечения выполнения SLA-соглашения предлагается выдавать клиентам ЦОД так называемый «кредит», т.е. разрешение на передачу данных со скоростью, не превышающей заданную таким «кредитом». Для уменьшения числа потерянных заявок

²Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 600 с.

введен буфер ограниченного объема, куда будут помещаться заявки в случае превышения порогового значения счетчика. Эти ячейки будут повторно поставлены на передачу, когда нагрузка на вход ЦОД уменьшится. Тогда потеря заявок будет происходить только в случае переполнения буфера. Для осуществления такого управления потоками заявок был применен игровой метод, когда управляющее устройство состоит из коллектива вероятностных автоматов, закрепленных за виртуальными каналами, по которым передаются заявки от соответствующего пользователя. Работа автомата задается действиями $\gamma_1, \dots, \gamma_n$. Действие означает выбор i -го приращения к заданному кредиту с вероятностью m_i из n возможных при поступлении соответствующей заявки. Выбор действия заявки задается вектором-строкой (7)

$$M = (m_1, \dots, m_n), \quad \text{где } m_i \geq 0, \\ \sum_{i=1}^n m_i = 1. \quad (7)$$

Изменение структуры автомата M происходит следующим образом. При поступлении клиентских запросов автомат сравнивает значение трафика с пропускной способностью ЦОД. Если трафик не превышает пропускную способность или превышает так, что заявки записываются в буфер без потерь, то действие γ_i автомата считается успешным, автомат поощряется, элемент m_i увеличивается умножением на коэффициент $\beta \geq 1$ и вся строка нормируется. Если буфер переполнен и поступающие заявки теряются, то автомат штрафуются, при этом элемент m_i уменьшается умножением на $0 \leq \alpha \leq 1$ и вся строка нормируется. Если совершено действие γ_i , то новое значение элементов автомата будет вычислено как (8)

$$m'_i = \frac{m_i}{1 + (z - 1)}, \quad (8)$$

где $z = \alpha$ при штрафе и $z = \beta$ при поощрении.

Поощрение или штраф соответствуют передаче источнику заявок сигнала об увеличении или снижении скорости обработки.

Предложен метод отказоустойчивого размещения задач в кластере ЦОД, который позволяет повысить $P_{\text{отк}}$. Результатом является получение отказоустойчивого плана размещения задач по серверам кластера ЦОД (9)

$$P_{\text{отк}} = f(P_i, Q_j), \quad i=1, \dots, k; \quad j=1, \dots, h; \quad D = f(U, p-N, o-N), \quad (9)$$

где $P_{\text{отк}}$ – вероятность безотказного функционирования ЦОД;

P_i – вероятность исправного состояния i -го сервера в кластере ЦОД;

Q_j – вероятность неисправного состояния j -го сервера в кластере ЦОД;

D – план размещения задач по серверам кластера ЦОД;

U – число задач, решаемых в кластере ЦОД одновременно;

$p-N$ – количество работоспособных серверов кластера ЦОД;

$o-N$ – количество отказавших серверов кластера ЦОД.

Кластер выполняет фиксированное задание Γ , которое представляет собой известное множество задач $\Gamma = \{U_1, U_j, \dots, U_L\}$ с заданными требованиями к порядку их выполнения и взаимосвязям. Каждая задача U_j характеризуется следующими показателями: b_j – вес задачи (величина, определяющая важность задачи U_j для системы); v_j – объем оперативной памяти, требуемый для хранения и выполнения задачи; τ_j – время выполнения задачи.

В процессе работы кластера возможны отказы серверов. Состояние кластера определяется как $s_v = \sigma_1, \dots, \sigma_n$, где $\sigma_i = 0$, если M_i – работоспособный сервер (р-Сервер) и $\sigma_i = 1$,

если M_i – отказавший сервер (о-Сервер); $s^0=00\dots0$ – начальное состояние кластера; все состояния $s_v \neq s^0$ называются искаженными.

Постановка задачи отказоустойчивого размещения следующая (10): для каждого искаженного работоспособного состояния $s_\omega \in S^\omega$ найти такой план $D_\omega = \left| d_{ji}^\omega \right|$ распределения задач, при котором достигается максимальное значение функциональной мощности серверного комплекса ЦОД в состоянии s_ω

$$E_\omega^f = \sum_{U} \sum_{j \in \Omega_\omega^f} \sum_{M_i \in H_\omega} d_{ji}^\omega b_j \rightarrow \max, \quad (10)$$

где Ω_ω^f – множество собственных задача отказавших серверов;

H_ω – множество р-Серверов для состояния s_ω , при ограничениях:

– на суммарное время выполнения сервером M_i всех задач, назначенных ему в состоянии s_ω (ограничение 1) и

– на объем памяти каждого р-Сервера M_i , доступный для размещения копий задач, дополнительно назначаемых этому серверу для выполнения в искаженном состоянии s_ω (ограничение 2).

Задача (10) относится к классу задач дискретной оптимизации с булевыми переменными, для решения которых могут применяться точные методы математического программирования. Поскольку для многих задач практической сложности применение таких методов затруднено ввиду их чрезвычайно большой трудоемкости, то предложено использовать эвристических методы, дающие не точное, а некоторое «хорошее» решение. К ним относятся различные модели эволюционных вычислений, в частности генетические алгоритмы.

Предложен генетический алгоритм, формирующий план D_ω . Последовательность выполнения генетического алгоритма, состоит из следующих шагов.

1. Создание начальной популяции P^0 состоит в выполнении операции инициализации для каждой особи из ее N_0 хромосом, т.е. случайного распределения задач по работоспособным серверам р- N некоторого данного состояния с одновременной проверкой заданных ограничений на объем памяти сервера и на максимальное суммарное время выполнения задач на каждом сервере. N_0 задается пользователем. Алгоритм инициализации одной хромосомы:

– формирование случайного списка задач;
– выбор очередной задачи из списка, если он не пуст, в противном случае окончание работы алгоритма;

– попытка размещения выбранной задачи в i -й р-Сервер данного состояния ($i=1, \dots, g$, g – число р-Серверов), начиная с $i=1$ при проверке ограничений 1 и 2. Данная задача назначается для решения в i -й сервер, если ограничения 1 и 2 для него не нарушены, иначе – попытка поместить задачу в $(i+1)$ -й сервер; процедура продолжается до наибольшего номера р-Сервера;

– если данную задачу не удастся разместить ни на один сервер – отбрасывание этой задачи и переход к шагу 2.

2. Селекция (отбор) хромосом для скрещивания. В данной реализации алгоритма выбираем метод пропорциональной селекции хромосом непосредственно из предшествующей популяции (на первой итерации селекция осуществляется из начальной популяции). Из них случайным образом формируются пары различных хромосом, и над каждой из этих пар с заданной вероятностью выполняется операция кроссинговера.

3. Выполнение операторов генетического алгоритма. Над данной парой хромосом с заданной вероятностью $P_{кр}$ выполняется операция кроссинговера. Реализуется операция следующим образом. Если случайно сгенерированное число $r < P_{кр}$, то над данной парой выполняется кроссинговер. Потомки проверяются на ограничения и сравниваются с родительскими хромосомами. Если потомок не удовлетворяет ограничениям или если полезность потомка меньше полезности родительской хромосомы, то потомок отбрасывается и ищется новая родительская пара для кроссинговера. Если $r > P_{кр}$, то над данной парой кроссинговер не выполняется, а «несостоявшиеся родители» переходят в следующий родительский пул R для выполнения следующего генетического оператора – мутации. Если потомок удовлетворяет ограничениям и полезность потомка больше полезности родителя, то потомок переходит в промежуточный родительский пул R , а родители отбрасываются. В данной реализации генетического алгоритма используется одноточечный кроссинговер. Операция одноточечной мутации выполняется для каждого элемента (бита) каждой хромосомы из популяции R с заданной вероятностью $P_{мут}$.

Пусть P_t^c – дочерняя популяция, полученная из популяции P_t в результате кроссинговера её особей и последующей мутации. В следующую (новую) популяцию P_{t+1} могут попасть как особи только дочерней популяции P_t^c , так и лучшие особи из дочерней P_t^c и родительской P_t популяций.

4. Создание новой популяции P_{t+1} : хромосомы, полученной в результате операций отбора, кроссинговера и мутации над хромосомами текущей популяции P_t , переходят в P_{t+1} .

5. Вычисление качества популяции. Данный этап необходим для ведения статистики и для определения значения критерия останова: после каждого шага генетического алгоритма вычисляется полезность $F(A_k)$ каждой хромосомы и полезность всей популяции, как сумма всех $F(A_k)$ при $k=1 \dots N$.

6. Замена предыдущей популяции на новую и проверка критерия останова. В реализации генетического алгоритма для данной задачи использованы следующие критерии останова:

- а) заданное максимальное количество популяций;
- б) заданное максимальное значение $F(A_k)$ полезности хромосомы – заданный процент от суммы весов всех задач начального множества.

Самая полезная хромосома в популяции, полученная перед остановом, является решением задачи.

Предложен метод распределения памяти в ЦОД, который позволяет сократить число запросов к часто используемым ресурсам и тем самым уменьшить $t_{отв}$. Результатом является план распределения памяти с ресурсами по серверам кластера ЦОД (11)

$$t_{отв} = f(Q); Q = f(U, p, \lambda_{ij}), \quad (11)$$

где Q – план распределения памяти по серверам кластера ЦОД;

U – количество задач, решаемых ЦОД;

λ_{ij} – интенсивность запроса i -го ресурса для выполнения j -й задачи.

Задача распределения памяти в кластере ЦОД сведена к задаче математического программирования (12).

$$\sum_{j=1}^m a_{ju} \lambda_{ij} \leq c_i, \quad i=1, \dots, n, \quad (12)$$

где a_j – объем (в битах) j -го блока информации, $j = 1, \dots, m$;

u_{ij} – двоичная переменная, выражающая наличие ($u_{ij}=1$) или отсутствие ($u_{ij}=0$) в памяти i -го сервера данных j -го блока информации;

c_i – объем собственной памяти i -го сервера $i = 1, \dots, n$.

Определена вероятность попадания задачи l -го потока на i -й сервер обработки (13) при следующей дисциплине обслуживания: «направлять задачу туда, где больше необходимой информации».

$$p'_{li}(U) = \frac{\sum_{j=1}^m u_{ij} p_{ij}}{\sum_{i,j} u_{ij} p_{ij}}. \quad (13)$$

Определена вероятность того, что задача l -го потока, направленная на i -й сервер обработки (14), найдет там необходимую для решения информацию, т.е. ей не придется обращаться к хранилищу данных.

$$p''_{li} = p_{li}(U). \quad (14)$$

Располагая интенсивностями потоков решаемых задач $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ и производительностями каждого сервера μ_1, \dots, μ_n , сформулирована задача определения оптимального расположения блоков информации по серверам кластера ЦОД, минимизирующая обращаемость к хранилищу данных в процессе функционирования ЦОД (15):

$$Q(U) = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k \lambda_l [1 - p''_{li}(U)] p'_{li}(U) \rightarrow \min_{U \in S} \rightarrow U^*, \quad (15)$$

$$\text{где } S: \begin{cases} \sum_{l=1}^k \lambda_l p_{li}(U) < \mu_i \\ \sum_{i=1}^m a_i u_{ij} \leq c_i \end{cases},$$

U – двоичный вектор, определяющий распределение блоков памяти по кластерам ЦОД, $U = (u_{11}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nm})$.

Четвертая глава посвящена апробации предложенных в диссертационной работе моделей и методов повышения эффективности предоставления информационных услуг в ЦОД.

Выполнен вычислительный эксперимент по оценке производительности ЦОД и запасов по пропускным способностям. Результаты эксперимента показали, что разные классы запросов требуют разного времени обслуживания в ЦОД. Модель оценки производительности ЦОД учитывает структуру входного потока заявок и соответствует реальным SLA-соглашениям, в которых задаются ограничения на качество обслуживания для каждой информационной услуги.

Приведена оценка влияния распределения нагрузки на производительность ЦОД. Результаты вычислительного эксперимента показывают, что для устранения возможности появления узкого места необходим сервис балансировки нагрузки:

– с ростом нагрузки наличие узкого места не позволяет кластеру в целом справиться с поступающими запросами пользователя, в то время как кластер с сервисом распределения нагрузки продолжает функционировать;

Эксперимент по сравнению вариантов размещения ресурсов в системах хранения данных ЦОД показал, что:

– вариант «один сервер – одна СХД» или системы типа DAS эффективна только для офисных ЦОД;

– вариант «один сервер – много СХД» или системы типа NAS эффективнее систем типа DAS, но не позволяют использовать мощности свободных ресурсов для ускорения работы остальных занятых ресурсов;

– вариант «много серверов – много СХД» или система хранения типа SAN позволяет эффективно разделять имеющиеся ресурсы путем использования кластера с виртуализацией информационных ресурсов.

Представлена оценка влияния механизма управления обработкой запросов пользователей на пропускную способность ЦОД и на вероятность потерь заявок пользователей ЦОД. Исследования показали, что применение управления позволяет увеличить пропускную способность ЦОД на 15-20%. При большем числе входящих виртуальных каналов, можно получить большее увеличение пропускной способности

Приводится описание программного обеспечения, разработанное на языке C++, которое реализует генетический алгоритм, предложенный для решения задачи отказоустойчивости кластера ЦОД. Машинный эксперимент по оценке отказоустойчивости ЦОД выполнен для двух вариантов: без учета приоритета задач пользователя и обработка с приоритетом. Результатом эксперимента является:

а) количество серверов в кластере, необходимое для выполнения заданий пользователя с обеспечением оптимального времени обслуживания заданий;

б) план отказоустойчивого размещения задач пользователя.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о высокой степени доверия к предложенным моделям и методам повышения эффективности предоставления информационных услуг в ЦОД.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации проведено исследование и получено решение важной научно-технической задачи разработки моделей и методов повышения эффективности предоставления информационных услуг в центрах обработки данных.

Основные научные результаты работы заключаются в следующем.

1) Предложена структурно-функциональная модель центра обработки данных, включающая описания:

инфраструктуры ЦОД на уровне структурных модулей, выполняющих функции обработки и хранения данных;

характеристик качества предоставления информационных услуг в ЦОД;

вариантов применения ЦОД;

2) Разработан комплекс моделей оценки качества предоставления информационных услуг в центрах обработки данных, включающий:

модель оценки характеристик производительности ЦОД и запасов по пропускным способностям, в том числе с разделением запросов на классы;

модель распределения нагрузки в кластере ЦОД;

модель размещения информационных ресурсов в системах хранения данных ЦОД.

3) Предложены методы повышения эффективности предоставления информационных услуг в центрах обработки данных:

метод управления нагрузкой, поступающей на ЦОД;

метод обеспечения отказоустойчивости серверного комплекса ЦОД;

метод распределения памяти в кластере ЦОД.

4) Полученные экспериментальные соотношения вероятностно-временных характеристик показывают, влияние различных внешних и внутренних факторов на эффективность предоставления информационных услуг в ЦОД. Эти соотношения подтверждают теоретические положения, выносимые на защиту.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Воробьев А.И. Анализ характеристик инфокоммуникационной системы с неординарным потоком заявок на обслуживание [Текст]/Колбанёв М.О., Нестеренко В.Д., Воробьев А.И. //Труды учебных заведений связи, 2006. № 175. С.81-92.

2. Воробьев А.И. Модель балансировки нагрузки в вычислительном кластере центра обработки данных [Текст]/Колбанёв М.О., Татарникова Т.М., Воробьев А.И. // Информационно-управляющие системы, №3, 2012. С. 37-41.

3. Воробьев А.И. Применение методов оптимизации в задачах структуризации корпоративного центра обработки данных [Текст]/ Советов Б.Я, Воробьев А.И. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» №8, 2012. С. 41-46.

Публикации в других изданиях и материалах конференций:

4. Воробьев А.И. Обзор технологий абонентского доступа инфокоммуникационных сетей [Текст]/Колбанёв М.О., Воробьев А.И., Матяшов П.А.//Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика», 1-3 марта 2005. Тезисы доклада. – СПб, 2005. С. 74-75.

5. Воробьев А.И. Оценка вероятностей блокировки заявок в мультисервисных сетях [Текст]//59-я НТК студентов, аспирантов и молодых специалистов СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 23 - 27 мая 2005 г. Тезисы доклада. – СПб., 2005.

6. Воробьев А.И. Модель в мультисервисной сети абонентского доступа [Текст]/Колбанёв М.О., Воробьев А.И., Матяшов П.А.//Вторая всероссийская конференция «Абонентский доступ в сетях следующего поколения», 2005. Тезисы доклада. – СПб., 2005. С. 12-16.

7. Воробьев А.И. Анализ характеристик инфокоммуникационной системы с неординарным потоком заявок на обслуживание [Текст]/Колбанёв М.О., Воробьев А.И., Матяшов П.А.//58-я НТК профессорско-преподавательского состава научных сотрудников и аспирантов СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 23 - 27 января 2006 г. Тезисы доклада. – СПб., 2006.

8. Воробьев А.И. Метод расчёта запаса по пропускным способностям центра обработки данных [Текст]//XII международная конференция «Информатика: проблема, методология, технологии», Воронеж, 9-12 февраля 2012 г.

9. Воробьев А.И. Модель сервиса балансировки нагрузки в центре обработки данных [Текст]/Татарникова Т.М., Воробьев А.И. //XII международная конференция «Информатика: проблема, методология, технологии», Воронеж, 9-12 февраля 2012 г.

10. Воробьев А.И. Применение генетического алгоритма для решения задачи обеспечения отказоустойчивости вычислительного кластера [Текст]/ Татарникова Т.М., Воробьев А.И., Яготинцева Н.В.//Межвузовский сборник научных трудов: Управление, экономика, транспорт, право. №1(9), 2011. С. 3-9.

11. Воробьев А.И. Предложения по развитию ИТ-инфраструктуры образовательной среды СПбГУСЭ [Текст]/Колбанёв М.О., Коршунов И.Л., Омелян А.В., Воробьев А.И. //XIII международная конференция «Региональная информатика (РИ-2012)». Санкт-Петербург, 24-26 октября. СПб.: СПОИСУ, 2012. С. 303.

12. Воробьев А.И. Современный подход к организации учебного подхода в вузе [Текст]/Колбанёв М.О., Омелян А.В., Воробьев А.И. //XIII международная конференция «Региональная информатика (РИ-2012)». Санкт-Петербург, 24-26 октября. СПб.: СПОИСУ, 2012. С. 303-304.