

На правах рукописи

Бурдаков Алексей Викторович

**Модели и методы анализа
вычислительных систем с архитектурой
брокера объектных запросов**

**Специальность 05.13.15 – Вычислительные машины и системы
(технические науки)**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва - 2002

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Григорьев Ю.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Ткаченко В.М.

кандидат технических наук
Олифер В.Г.

Ведущая организация: НИИ «ВОСХОД» (г. Москва)

1576451.
Бурдаков А.В.
Модели и методы анализа
вычислительных
2002 — 0.00

ся « » апреля 2002 года на
Д 212.141.10 в Московском
ерситете имени Н.Э. Баумана по
ул., д.5.

закомится в библиотеке

заверенные печатью, просим

2002 г.



С.Р. Иванов

2 г. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

1576451

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1576451

Актуальность темы. В настоящее время распределенные вычислительные системы (например, системы комплексной автоматизации предприятий) разрабатывают в соответствии с архитектурой, определяемой стандартом CORBA (Common Object Request Broker Architecture – Общая архитектура брокера объектных запросов). Данный стандарт вводит в архитектуру системы дополнительный слой абстракции, называемый *брокером объектных запросов*, который играет роль посредника и организатора взаимодействия между программными объектами (компонентами системы) независимо от их физического расположения в узлах вычислительной сети, программно-аппаратной платформы и программной реализации. CORBA также определяет стандартную инфраструктуру распределенных систем, позволяющую использовать при разработке готовые базовые сервисы системы (например, сервисы транзакций, безопасности, лицензирования и т.п.). Использование стандарта CORBA позволяет строить системы, как с классической двухзвенной архитектурой «клиент-сервер», так и со сложной распределенной многоуровневой архитектурой. CORBA опирается на объектно-ориентированный подход к проектированию распределенных вычислительных систем, поэтому для вычислительных систем с данной архитектурой характерно использование объектно-ориентированных систем управления базами данных для организации постоянного хранения объектов. Применение стандарта CORBA и соответствующих ему общесистемных пакетов позволяет существенно уменьшить стоимость разработки распределенных вычислительных систем, объединения различных компонентов и интеграции с другими информационными системами.

По оценкам научных источников, вопросы анализа производительности возникают на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) распределенной системы. Так, в частности, при проектировании и разработке системы очень важно принять правильные решения при выборе архитектуры и отдельных компонентов системы. Ошибки, допущенные на ранних стадиях и обнаруженные на поздних стадиях ЖЦ системы, требуют на их исправление дополнительных средств, соизмеримых со стоимостью разработки системы. Анализ производительности также важен и при выборе готового программно-аппаратного обеспечения, масштабировании (увеличении числа клиентов) существующих систем и их адаптации. Однако в связи с высокой сложностью современных вычислительных систем проектировщику очень трудно проанализировать показатели качества разрабатываемой системы (особенно временные характеристики), а интуитивный выбор варианта интеграции разнородных ресурсов и параметров проектируемой системы на основе CORBA может привести к существенной потере производительности на этапе эксплуатации корпоративной сети предприятия и большим затратам на доработку вычислительной системы. Поэтому разработка математических методов и инструментальных средств анализа, позволяющих прогнозировать поведение распределенных систем на основе брокера объектных запросов и объектно-ориентированных СУБД, является

11

актуальной задачей. Использование математических методов анализа производительности позволит минимизировать затраты на модификацию и обновление программно-аппаратного обеспечения комплекса, а также снизить возможные риски, связанные с критическим снижением производительности.

Цель работы. Целью данной работы является разработка математических методов, инструментальных средств и методики оценки характеристик производительности вычислительных систем, построенных на базе брокера объектных запросов и поддерживающих доступ к объектно-ориентированным СУБД.

В работе решаются следующие **задачи**:

- 1) разработка математического метода оценки характеристик производительности с архитектурой брокера объектных запросов (CORBA);
- 2) разработка математического метода оценки времени выполнения запросов к объектно-ориентированным СУБД;
- 3) разработка инструментального средства моделирования;
- 4) формализация вычислительных систем с Общей архитектурой брокера объектных запросов (CORBA) в нотации разработанного инструментального средства;
- 5) проведение исследований реальной вычислительной системы на этапе ее проектирования или перепроектирования.

Объект исследования. Объектом исследования является класс систем с архитектурой CORBA, включающих в себя объектно-ориентированные системы управления базами данных.

Предмет исследования. Предметом исследования настоящей работы является анализ процессов на основе брокера объектных запросов и объектно-ориентированных СУБД.

Научная новизна. В работе получены следующие новые научные результаты:

- 1) на основе Алгебры процессов для оценки производительности (Performance Evaluation Process Algebra – PEPA) разработана модель вычислительной системы с архитектурой брокера объектных запросов, учитывающая особенности функционирования брокера объектных запросов;
- 2) доказана теорема о взаимном подобии представлений вычислительных систем в нотации стохастической алгебры процессов PEPA и стохастической сети Петри;
- 3) на основе теоремы об отображении описания распределенных систем в цепи Маркова разработан математический метод оценки характеристик производительности систем на базе архитектуры CORBA;
- 4) получены производящая функция числа объектов и преобразование Лапласа-Стилтьеса времени чтения объектов, удовлетворяющих условиям поиска, для различных алгоритмов доступа к объектно-ориентированным базам данных;
- 5) на основе формулы Яо получена производящая функция числа читаемых из базы данных страниц, учитывающая случайный характер количества объектов в исходных экстендах.

Методы исследования. Исследования проводились на основе комплексного использования теории массового обслуживания, теории вероятности, теории множеств, теории графов, теории нечетких чисел.

Практическая ценность полученных результатов. В работе для практического использования полученных результатов разработано инструментальное средство, предназначенное для поддержки принятия решений в процессе проектирования систем с архитектурой CORBA. Данное инструментальное средство относится к классу экспертных систем (ЭС). Оно включает в себя описание процедурных знаний, основу которых составляют разработанные в работе математические методы оценки производительности систем рассматриваемого класса и времени выполнения запросов к объектно-ориентированным СУБД. ЭС также включает в себя декларативные знания о конфигурации узлов и критических характеристиках систем. В БД ЭС хранятся исходные данные проектируемой системы: параметры архитектуры, информационного и прикладного программного обеспечения. ЭС позволяет прогнозировать время выполнения методов и запросов к базе данных, загрузки серверов и сетей, а также выявлять «узкие места» распределенной вычислительной системы с целью их устранения.

Внедрение результатов исследований. Разработанная методика и инструментальное средство были использованы в процессе исследования подсистемы «Аналитика» комплексной системы автоматизации холдинга предприятий оптовой торговли (КСА) с целью прогнозирования характеристик системы при увеличении нагрузки. Основной проблемой, решенной проведенным исследованием, являлось выявление «узких мест», которые могут быть определены на основе сравнения загрузок устройств с их критическими значениями. Но т.к. эти загрузки зависят от архитектуры схемы БД, ее наполнения, транзакций и запросов к БД, то для прогнозирования загрузок было использовано разработанное инструментальное средство. Анализ исследуемой системы выявил, что в системе при увеличении нагрузки появятся «узкие места». Были предложены способы оптимизации системы, позволившие исключить «узкие места» системы: 1) увеличение пропускной способности канала связи с 64 до 256 Кбит/с и 2) использование материализованных представлений (materialized view) СУБД.

Публикации по теме. По материалам работы опубликовано 6 печатных работ. Алгоритмы разработанной инструментальной системы включены в Государственный фонд алгоритмов и программ.

Апробация работы. Материалы работы были изложены автором на следующих конференциях и семинарах:

1. Научно-практической конференции «Современные информационные технологии в управлении и образовании – новые возможности и перспективы использования», М., 2001.
2. НТС кафедры ИУ-5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2001.

Объем работы. Диссертационная работа содержит 196 страниц, 77 рисунков и 33 таблицы, 1 страницу копий актов о внедрении, список литературы из 176 наименований. Основной текст изложен на 166 страницах.

Во **введении** обосновывается актуальность проблемы. Формулируются цели и задачи исследований, приводится перечень основных результатов, выносимых на защиту, и излагается краткое содержание глав диссертации.

В **первой главе** «Критический анализ существующих методов оценки вычислительных систем на базе брокера объектных запросов и объектно-ориентированных СУБД» приведено описание систем на базе архитектуры CORBA и выделены их особенности, проведен анализ существующих математических методов анализа характеристик производительности систем рассматриваемого класса, предложена концепция разработки новых методов анализа, инструментального средства и методики оценки характеристик производительности.

Для систем на базе архитектуры CORBA выделены следующие особенности: объектная архитектура, распределенность вычислений, гетерогенный поток заявок в системе, выполнение асинхронных и синхронных подпроцессов, использование объектно-ориентированных СУБД.

Проведен анализ математических методов оценки характеристик производительности систем на базе CORBA. Анализ показал, что существующие методы имеют ряд недостатков, не позволяющих использовать их на ранних стадиях разработки систем:

- 1) имитационное моделирование имеет ограниченное применение для расчета достаточно больших моделей;
- 2) методы Stochastic Rendezvous и Layered Queuing Network не позволяют моделировать гетерогенный поток заявок от клиентов системы;
- 3) стохастические алгебры процессов не обладают графической нотацией, кроме того, для них, как и для стохастических сетей Петри, свойственно лавинообразное увеличение сложности решения с увеличением размерности модели;
- 4) сети Петри не обладают, в отличие от алгебр процессов, композиционностью, т.е. с их помощью достаточно сложно построить модель большой размерности;
- 5) для рассмотренных методов сложно получить параметры моделей.

Проведен анализ математических методов оценки времени выполнения запросов к объектно-ориентированным СУБД. Анализ показал, что существующие методы обладают рядом существенных недостатков:

- 1) аналитическая модель Тиюва (Teeuw) не позволяет определять время выполнения соединений объектов, а предположки, примененные к модели кэш-памяти, трудно признать реальными;
- 2) калибруемая аналитическая модель Гардарина (Gardarin) требует выполнения калибрующего эксперимента, что слишком трудоемко или невозможно на ранних стадиях проектирования системы;
- 3) имитационная модель Делиса (Delis) не позволяет оценивать большие модели, т.к. требует для этого слишком больших вычислительных ресурсов, кроме того, для нее сложно получить исходные параметры;

- 4) методы оценки алгоритмов Грэфа (Graefe) и Хэрриса (Harris) не позволяют рассчитывать время выполнения соединений в объектно-ориентированных СУБД и не учитывают использование индексов при выполнении соединений.

В связи с недостатками существующих математических методов и средств оценки характеристик производительности систем рассматриваемого класса возникла необходимость в разработке:

- 1) математического метода, представляющего модель более высокого уровня, чем модели ТМО, позволяющего оценивать время выполнения транзакций в системе с архитектурой CORBA и запросов к объектно-ориентированным СУБД, а также выявлять «узкие места» системы;
- 2) инструментального средства, позволяющего описывать исследуемую систему в терминах, знакомых проектировщику, и реализующего разработанные математические методы;
- 3) методики оценки характеристик производительности и шаблонных моделей, облегчающих формализацию исследуемых систем.

Во **второй главе** «Математические методы оценки характеристик производительности систем с архитектурой CORBA, обеспечивающих доступ к объектно-ориентированным СУБД» предложено описание систем на базе CORBA в нотации стохастической алгебры процессов PEPA, доказана теорема о взаимном подобии представлений распределенной системы в нотации алгебры процессов PEPA и стохастических сетях Петри. Разработана модель и предложен эффективный способ ее расчета, доказана теорема, позволяющая оценить время выполнения запросов к ООСУБД для различных алгоритмов доступа.

Стохастическая алгебра процессов для оценки производительности (Performance Evaluation Process Algebra – PEPA) позволяет описывать вычислительные системы в виде взаимодействующих компонентов (m, μ) , выполняющих определенные действия типа m с интенсивностью μ . В PEPA определен компактный набор операций, позволяющий строить композитные компоненты: префикс ($\cdot$), селекция ($+$), кооперация ($\triangleright, \parallel$), абстракция ($/$) и константа ($=^{def}$). Операция кооперации позволяет описывать синхронизацию и параллельное (независимое) выполнение компонентов. Формализм, предлагаемой данной алгеброй процессов представляется достаточно удобным и гибким для описания систем рассматриваемого класса, однако для него должно быть предложено эффективное решение и графическая нотация.

В работе показано, что выполнение транзакций в системе на базе архитектуры CORBA, может быть описано в виде процесса с применением следующих операций:

- 1) префикса, представляющего последовательное выполнение методов;
- 2) селекции, представляющей вероятностное ветвление между методами;
- 3) константы, используемой для композиционного описания и для задания рекурсии (циклических процессов).

Синхронные или асинхронные подпроцессы могут быть представлены с помощью циклических процессов, синхронизируемых с основным процессом в начальной и конечной или только в начальной точке соответ-

ственно. В работе предложен следующий способ представления в РЕРА процесса Z с асинхронными подпроцессами:

$$\begin{aligned} Z_{\text{основной}} &\stackrel{\text{def}}{=} \dots (m_k, \mu_k) \cdot (async_j, \mu_{\text{async}_j}) \cdot \dots Z_{\text{основной}} \\ Z_{\text{асинхронный}_j} &\stackrel{\text{def}}{=} (async_j, T) \cdot (m_{j_1}, \mu_{j_1}) \cdot \dots (m_{j_n}, \mu_{j_n}) \cdot Z_{\text{асинхронный}_j} \\ Z &\stackrel{\text{def}}{=} \left(Z_{\text{основной}} \cdot \triangleright \triangleleft_{\{async_1\}} Z_{\text{асинхронный}_1} \dots \triangleright \triangleleft_{\{async_n\}} Z_{\text{асинхронный}_n} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

где m - тип метода, μ - интенсивность выполнения метода.

В диссертации показано, что система на базе CORBA может быть описана в РЕРА в виде параллельно выполняемых транзакций Z , кооперирующихся с ресурсами системы R_k :

$$\begin{aligned} S' &\stackrel{\text{def}}{=} S \cdot \triangleright \triangleleft_{\{get_1, m_1\}_{k=1}} R \equiv \\ &\left(\prod_{i=1}^K \left(\prod_{j=1}^{N_i} \left(Z'_{\text{основной}_i} \cdot \triangleright \triangleleft_{\{L_i\}} Z'_{\text{подпроцесс}_i} \cdot \triangleright \triangleleft_{\{L_2\}} \dots \triangleright \triangleleft_{\{L_n\}} Z'_{\text{подпроцесс}_n} \right) \right) \right) \cdot \triangleright \triangleleft_{\{get_1, m_1\}_{k=1}} \prod_{k=1}^K R_k, \parallel \end{aligned} \quad (2)$$

где K - количество типов транзакций, N_i - число клиентов, инициирующих выполнение транзакций, $\{L\}$ - кооперационные наборы.

С целью введения графической нотации для описаний процессов вида (1) и (2) в алгебре процессов РЕРА в работе разработано преобразование в нотацию стохастических сетей Петри. Так, для базового элемента (m, μ) , представляющего выполнение метода объекта CORBA, соответствующая сеть Петри будет иметь вид:

$$N = (P, T, F, \Theta, M_0, l)$$

где $P = \{p_1, p_2\}$ - множество мест, $T = \{t\}$ - множество переходов, $F = \{(p_1, t), (t, p_2)\}$ - дуги сети, $\Theta = \{(t, \mu)\}$ - интенсивности переходов, $M_0 = \{p_1\}$ - начальные места сети, $l(t) = m$ - разметка переходов.

Для преобразования операции префикса $(m, \mu).P$, представляющей последовательное выполнение методов, необходимо соединить начальные места сети Петри $N[P]$ с конечными местами $N[(m, \mu)]$. Для преобразования операции селекции $P+Q$ с одиночными начальными термами, представляющих вероятностное ветвление между методами, необходимо соединить начальные места сетей $N[P]$ и $N[Q]$. Преобразование операции кооперации с пустым кооперационным набором (параллельное выполнение) $P \parallel Q$ производится с помощью объединения двух сетей Петри: $N[P \parallel Q] = N[P] \cup N[Q]$. Преобразование синхронизирующей операции кооперации $P \triangleright \triangleleft Q$ выполняется с помощью объединения переходов сетей $N[P]$ и $N[Q]$, соответствующих синхронизирующим операциям. Операция абстракции $N[P/L]$ соответствует сети Петри с типами соответствующих переходов $l(t) \in L$, замещенных неопределенными типами $l'(t) = \tau$. Рекурсия представляется с помощью сети Петри исключением конечных мест и соединением входивших в них дуг с начальными местами.

Получение характеристик производительности для моделей, представленных с помощью стохастической алгебры процессов РЕРА и стохастических сетей Петри, выполняется с помощью перехода к цепям Маркова через графы вывода и достижимых состояний, описывающих систему как множество состояний (узлов) и переходов между ними (ребер). Такие графы описывают непрерывный по времени марковский процесс, для которого при условии его конечности, позитивной рекуррентности и несократимости, существует решение в виде вероятностей стационарного состояния. В работе доказано, что модели в алгебре процессов РЕРА и в преобразованном представлении с помощью сетей Петри, будут строго взаимно подобными (strongly bisimilar):

Теорема 1: Пусть операция кооперация $\triangleright \triangleleft$ ограничена синхронизирующей и параллельной операциями $\triangleright \triangleleft^*$, тогда стохастическая сеть Петри $N[P]$, полученная в результате преобразования компонента P стохастической алгебры процессов РЕРА, является строго взаимно подобной (strongly bisimilar):

$$DG(P) \sim RG(N[P])$$

Из научных публикаций известно, что строгое взаимное подобие приводит к подобным графам вывода и достижимых состояний, а, следовательно, и к подобным марковским процессам и к одинаковым характеристикам производительности.

В работе предложено аппроксимирующее решение для оценки характеристик производительности на основе описания (2), т.к. точное решение с помощью перехода к соответствующему макровскому процессу приводит к лавинообразному увеличению размерности решаемой задачи. Данное решение основано на исследованиях, показывающих, что время реакции системы можно принять равным времени реакции для однопользовательского режима при условии допустимой загрузки ее элементов:

$$\rho_i < \rho_{\text{крит},i} = \begin{cases} 0.35 \dots 0.4, & \text{Ethernet} \\ 0.75, & \text{Token Ring} \\ 0.6, & \text{узлы, серверы БД} \end{cases} \quad (3)$$

Такое допущение позволяет перейти к рассмотрению каждой цепи для каждого клиента в отдельности. Полученные загрузки узлов аппроксимируются для N клиентов с помощью следующего выражения:

$$\rho_k(N) = N \sum_{i: C_i \sim [m] \subseteq H_k} P(C_i) \quad (4)$$

где $P(C_i)$ - стационарная вероятность состояния для соответствующего марковского процесса, при этом состояния соответствуют методам объектов k -го узла исследуемой системы.

Среднее время реакции системы, связанное с выполнением запускаемой клиентом транзакции, можно получить из (4) с помощью формулы Литтла:

$$R = \frac{1}{\mu_0 \Pi(C_{i: C_i \sim m_0})} - \frac{1}{\mu_0} \quad (5)$$

где μ_0 - интенсивность обдумывания ответа клиентским узлом.

Отметим, что полученное среднее время реакции (5) системы не зависит от числа клиентов, что соответствует исходным предпосылкам. Отметим также, что выражения (4) и (5) действительны при выполнении условий (3).

Одной из основных особенностей систем рассматриваемого класса является использование объектно-ориентированных СУБД (ООСУБД), к которым обращаются методы объектов для доступа к данным. Поэтому оценка времени выполнения запросов к ООСУБД позволяет получить необходимые параметры для модели системы в алгебре процессов РЕРА и использовать аппроксимирующие выражения (4) и (5).

Основным отличием ООСУБД от реляционных СУБД является наличие ассоциативных связей между объектами экстенгов классов (Рис. 1).

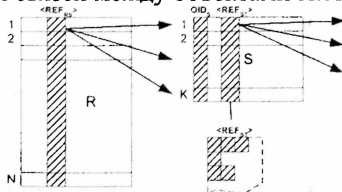


Рис. 1 Ассоциативная связь между объектами экстенгов

Наличие таких связей определяет алгоритмы соединения объектов, хранимых в различных экстенгах. В ООСУБД применяется два основных вида алгоритмов: прямое соединение (Forward Join) и обратное соединение (Reverse Join). Для указанных алгоритмов в работе предложены методы оценки времени их выполнения.

Выполнение алгоритма Forward Join заключается в отборе объектов экстенга R (см. Рис. 1) по условию запроса F_R и в выборе объектов из экстенга S , по объектному идентификатору OID с проверкой условия F_S . В работе доказана следующая теорема, позволяющая оценить характеристики времени выполнения соединения с помощью алгоритма Forward Join.

Теорема 2: Пусть даны два экстенга R и S , связанные между собой ассоциативной связью вида $R.REF \rightarrow S.OID$ (Рис. 1). Пусть выбор j -го объекта по условию F_S независим от выбора объекта по ссылке REF и значения ссылок независимы в совокупности. Пусть также соединение выполняется по физическим и логическим указателям по алгоритму Forward Join, а время доступа к объекту из экстенга S по физическому указателю является н.с.в. θ с преобразованием Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) $\Theta(s)$, а время поиска физического указателя во вспомогательной структуре (индексе) является н.с.в. ω с ПЛС $\Omega(s)$, тогда:

1) ПЛС времени выполнения соединения имеет следующий вид:

$$\Xi(s) = \Psi(\Theta(s)\Omega(s)) \quad (6)$$

2) математическое ожидание времени выполнения соединения определяется следующим выражением:

$$M = M(\xi)(M(\theta) + M(\omega)) \quad (7)$$

где: $\Psi(z) = \prod_{j=1}^{|\Omega_{ref}|} V_R(1 - \eta_j(1 - z))$ - производящая функция случайной величины (ПФСВ) числа ссылок от R к S , $M(\xi)$ - математическое ожидание числа ссылок от R к S , $M(\theta)$ - математическое ожидание времени доступа к объекту из S по физическому указателю, $M(\omega)$ - математическое ожидание времени поиска физического указателя во вспомогательной структуре, $V_R(z)$ - ПФСВ числа выбранных объектов в экстенсте R по условию F_R , $V_S(z)$ - ПФСВ числа выбранных объектов из S по условию F_S , η_j - вероятность ссылки на j -й объект экстенста S .

В работе доказано, что ПФСВ и математическое ожидание числа отобранных объектов из S при выполнении алгоритма Forward Join определяются следующими выражениями:

$$\Omega(z) = [z^0] V_S(z) + \sum_{k=1}^K [z^k] V_S(z) \binom{K}{k}^{-1} \sum_{(j_1, \dots, j_k) \in Q_k} \prod_{j=j_1, \dots, j_k} (1 - (1 - [z^0] V_R(1 - \eta_j(1 - z)))(1 - z)) \quad (8)$$

$$M(\omega) = \sum_{k=1}^K \left([z^k] V_S(z) \binom{K}{k}^{-1} \sum_{(j_1, \dots, j_k) \in Q_k} \sum_{j=j_1, \dots, j_k} (1 - [z^0] V_R(1 - \eta_j(1 - z))) \right) \quad (9)$$

Здесь выражения типа $[z^i] V(z)$ определяет коэффициент при z^i производящей функции $V(z)$.

Для случая равенства вероятностей ссылок η_j из R к S в работе выведено следствие, показывающее, что математическое ожидание числа отобранных объектов из S определяется следующим выражением:

$$M(\omega) = K_S \left(1 - \left(1 - \frac{1}{K} \right)^{N_R} \right)$$

где N_R и K_S - число отобранных объектов из экстенстов R и S по условиям F_R и F_S соответственно, K - число объектов в экстенсте S .

Другой алгоритм соединения экстенстов Reverse Join предполагает выбор объектов из экстенста S , удовлетворяющих F_S , и выполнение поиска объектов из экстенста R , содержащих ссылки на отобранные объекты из S . В работе доказана следующая теорема, позволяющая оценить характеристики времени выполнения соединений по алгоритму Reverse Join:

Теорема 3: Пусть выполнены предпосылки теоремы 1, но соединение выполняется по алгоритму Reverse Join по физическим указателям и индексу, а время доступа к объекту из экстенста R по физическому указателю является н.с.в. θ_{RJ} с ПЛС $\Theta_{RJ}(s)$, время поиска указателя во вспомогательной структуре (индексе $R_{REF_S} \rightarrow$ физический_адрес в R), является н.с.в. ω с ПЛС $\Omega(s)$. Тогда:

1) ПЛС времени выполнения соединения методом Reverse Join определяется следующим выражением:

$$\Xi(s) = V_S(\Theta_{RJ}(s)\Omega(s)) \quad (10)$$

2) Математическое ожидание времени выполнения соединения имеет вид:

$$M = M(\xi)(M(\theta) + M(\omega)) \quad (11)$$

где: $M(\xi)$ - математическое ожидание числа поисков в отношении R , $M(\theta)$ - математическое ожидание времени доступа по указателю, $M(\omega)$ - математическое ожидание времени поиска физического указателя во вспомогательной структуре, V_s - ПФСВ числа объектов, отобранных по условию F_s из S .

В работе доказано, что ПФСВ и математическое ожидание числа отобранных объектов из R при выполнении алгоритма Reverse Join определяются выражениями:

$$\Psi(z) = V_R \left(1 - \left(1 - \left[\sum_{k=1}^K \left([z^k] V_s(z) \binom{K}{k}^{-1} \sum_{\{j_1, \dots, j_k\} \in Q_k} \prod_{j=j_1, \dots, j_k} (1 - \eta_j) \right) \right] \right) (1 - z) \right) \quad (12)$$

$$M(\psi) = M(\chi_R) \left(1 - \left[\sum_{k=1}^K \left([z^k] V_s(z) \binom{K}{k}^{-1} \sum_{\{j_1, \dots, j_k\} \in Q_k} \prod_{j=j_1, \dots, j_k} (1 - \eta_j) \right) \right] \right) \quad (13)$$

Для случая равенства вероятностей ссылок η_j из R к S в работе выведено следствие, показывающее, что математическое ожидание числа отобранных объектов из R определяется следующим выражением:

$$M(\psi) = N_R \left(1 - \left(1 - \frac{1}{K} \right)^{K_S} \right)$$

Часто для оценки числа страниц, выбранных из БД при выполнении запроса, используется формула Яо. Этой формулой можно пользоваться при фиксированном числе объектов экстенда, удовлетворяющих условию поиска и количестве страниц, занимаемых экстендом. Но на ранних этапах проектирования можно говорить о случайном характере характеристик этих величин. В диссертации на основе классической комбинаторной задачи об урнах с ограниченным объемом выведена ПФСВ числа страниц, выбираемых из БД при выполнении запроса:

$$L(x) = \sum_m \left([z^m] V_1(z) \sum_n \left([z^n] V_2(z) [y^n] \left(1 + x \left((1+y)^b - 1 \right) \right)^m \binom{bm}{n}^{-1} \right) \right) \quad (14)$$

где b - максимальное число объектов на странице, $V_1(z)$ - ПФСВ числа страниц, занимаемых экстендом, $V_2(z)$ - ПФСВ числа объектов, удовлетворяющих условию поиска.

Математическое ожидание числа считанных страниц определяется из (14) путем дифференцирования в точке $x=1$:

$$M(l) = \sum_m \left([z^m] V_1(z) m \sum_n \left([z^n] V_2(z) \left(1 - \binom{b(m-1)}{n} \binom{bm}{n}^{-1} \right) \right) \right) \quad (15)$$

ПФСВ (14) была использована для получения ПЛС времени чтения страниц:

Теорема 4: Пусть все страницы заполнены полностью и все объекты экстенда равномерно распределены по страницам, а каждая страни-

ца вмещает до b объектов. Пусть также время чтения одной страницы БД с дисковой подсистемы является н.с.в. θ с ПЛС $\Theta(s)$. Тогда:

1) ПЛС времени чтения объектов имеет следующий вид:

$$L(\Theta(s)) \quad (16)$$

2) Математическое ожидание времени чтения имеет следующий вид:

$$M = M(l)M(\theta) \quad (17)$$

где: $M(l)$ - математическое ожидание числа считанных страниц, определяемое выражением (15), $M(\theta)$ - математическое ожидание времени чтения одной страницы, $b = PG = \left\lfloor V_{\text{страницы БД}} / V_{\text{объектов}} \right\rfloor$ - число объектов на страницу, $L(z)$ - ПФСВ числа считанных страниц (14).

В **третьей главе** «Разработка инструментального средства поддержки принятия решений на этапе проектирования систем с архитектурой CORBA и объектно-ориентированными СУБД» разработан концептуальный проект, архитектура и логический проект инструментального средства оценки характеристик производительности систем на основе CORBA и ООСУБД, предложена формализация систем с архитектурой CORBA и разработана методика оценки характеристик систем данного класса.

В работе обоснована необходимость создания инструментального средства, относящегося к классу экспертных систем (ЭС). Выделены основные составляющие разрабатываемой ЭС: база знаний (БЗ), механизм вывода (МВ), база данных (БД), модули объяснений и приобретения знаний, интерфейсы пользователя и инженера по знаниям.

Проектирование ЭС выполнено с применением методологии ComtopKADS разработки систем, основанных на знаниях. В рамках данной методологии построены модели организации, задач и агентов; разработаны модели экспертизы (знаний) и коммуникации (взаимодействия), а также модель проекта. На основе разработанных моделей выполнено логическое проектирование экспертной системы.

Из существующих моделей представления знаний выбрана фреймовая модель, т.к. она позволяет описывать не только декларативные, но и процедурные знания, что необходимо для реализации разработанных математических методов. Также рассмотрены способы описания недоверенных и неопределенных данных в ЭС и выбрано представление в виде трапезиевидных нечетких чисел, позволяющее описывать в ЭС размытость экспертных оценок, свойственную ранним стадиям выполнения проектов.

Разработана метамодель базы знаний (БЗ) и машина вывода для фреймовой модели в соответствии со стандартом GFP (Generic Frame Protocol) / ОКВС (Open Knowledge Base Connectivity) 2.0. Определены структуры, представляющие объекты «база знаний», «фрейм», «слот» и «грань», а также стандартные элементы выделенных объектов (например, комментарий или дата создания фрейма). Разработаны функции управления фреймовой структурой (например, функции создания, удаления и поиска фреймов). Предложенная метамодель БЗ позволяет строить на ее основе любые фреймовые структуры.

Для предложенной метамодели разработана БЗ, включающая в себя фреймы «система», «процесс», «модель», «канал», «топология», «СУБД», «узел» и «запрос». Фреймы БЗ связаны между собой связями ассоциации и наследования. Вывод в БЗ осуществляется путем передачи сообщений между слотами с помощью слотов-процедур фреймов. Вывод начинается с фрейма «система», который выделяет транзакции, инициируемые клиентскими узлами, и последовательно для каждой транзакции вызывает фрейм «процесс». Фрейм «процесс» обращается к БД ЭС и определяет цепь запросов к ООСУБД, представляемых фреймом «запрос», и передает ему управление. Фрейм «запрос» обращается к фрейму «узел» для оценки загрузки узла и к фреймам «канал» и «топология» для оценки загрузки каналов связи. Фрейм «СУБД», вызываемый фреймом «узел», оценивает объем ввода-вывода данных анализируемого запроса к ООСУБД, а «узел» - время выполнения запроса. Фрейм «модель» реализует методы оценки характеристик производительности системы в целом на основе полученных интенсивностей обслуживания запросов узлами и каналами связи.

Разработана концептуальная схема БД (ER-диаграмма в стандарте IDEF1X), включающая в себя подсхемы описания конфигурации узлов и СУБД, топологии и сетей, описания проектируемых баз данных оцениваемых систем, запросов и транзакций. Концептуальная схема база данных ЭС определяет связи между сущностями, что позволило использовать механизм ссылочной целостности использовавшегося СУБД Oracle.

Предложено описание трапециевидных нечетких чисел в базе данных в виде пятерки $\langle s, A, B, C, D \rangle$, где s - признак нечеткого числа, A и D - левая и правая граница основания трапеции, а B и C - границы верхней части трапеции. Для указанного представления разработаны функции арифметических операций.

Разработан граф диалога и интерфейс с пользователем в виде форм для описания конфигураций узлов и СУБД, реестра тестов TPC-C, реестра сетей, каналов и топологии, проектируемых баз данных, запросов, транзакций и обращений к транзакциям. Интерфейс с пользователем позволяет выполнять описание системы, ее параметров и просматривать полученные результаты оценки характеристик производительности.

Предложена формализация основных компонентов систем на базе CORBA, которая может использоваться в качестве «шаблонных моделей» при выполнении формализации исследуемых систем:

- 1) репозитария интерфейсов;
- 2) репозитария реализаций и процесса доступа к CORBA-объектам;
- 3) сервиса именования и процесса поиска объектов;
- 4) трейдер-сервиса (Trader Service) и сервиса свойств;
- 5) сервиса транзакций;
- 6) функций аутентификации, аудита и авторизации сервиса безопасности.

Предложена формализация для исследуемых реляционных баз данных: таблиц, представлений, хранимых процедур, триггеров и индексов. Также предложена формализация для основных аспектов объектно-ориентированных БД: объектных идентификаторов, ассоциативных связей, связей иерархии наследования, объектов-коллекций и функций. Для фор-

мализации связей иерархии наследования рассмотрены следующие способы хранения: вертикальное и горизонтальное разбиение, кластерное хранение. Предложена формализация запросов к реляционным СУБД (SQL-запросы) и к объектно-ориентированным (OQL-запросы). Также предложена формализация приложений в системе в виде взаимодействующих транзакций и составляющих их запросов. Представлено описание моделей в нотации разработанной ЭС.

Разработана методика оценки характеристик производительности систем на основе CORBA с помощью разработанной ЭС. Для методики определены ее область применения и процедура использования:

- 1) генерация варианта системы;
- 2) формализация системы на базе CORBA: основных компонентов, сервисов, прикладной части;
- 3) представление модели в нотации разработанной ЭС;
- 4) проведение вычислительного эксперимента;
- 5) оценка полученных результатов: загрузки узлов и сетей, времени выполнения транзакций с разложением на отдельные запросы, числа блоков, обрабатываемых при выполнении запроса.

Разработанная ЭС, основанная на методах оценки характеристик производительности систем на базе CORBA, представленных во второй главе, является системой поддержки принятия решений. Полученные с помощью ЭС оценки проектировщик «вплетает» в гештальт (целостное представление) проектируемой системы, на основе чего принимает решение о выборе, модификации или генерации нового варианта системы. Разработанная ЭС с помощью предложенной методики позволяет оценивать характеристики как разрабатываемых, так и эксплуатируемых систем.

В четвертой главе «Использование разработанного средства и методики оценки характеристик производительности для анализа подсистемы «Аналитика» приведены результаты исследований подсистемы «Аналитика» комплексной системы автоматизации холдинга предприятий оптовой торговли (КСА) с помощью разработанной экспертной системы и методики оценки характеристик производительности.

Подсистема «Аналитика» установлена и эксплуатируется в холдинге предприятий оптовой торговли и предназначена для поддержки принятия решений высшим звеном руководства. Данная подсистема является распределенной вычислительной системой с архитектурой CORBA. В центральном подразделении холдинга развернута локальная вычислительная сеть (ЛВС), объединяющая клиентов, сервер СУБД Oracle 8i, сервер приложений Jaguar CTS 3.6, сервер генерации HTML страниц Sybase PowerDynamo и Web-сервер Microsoft IIS 5.0. Бизнес-логика системы реализована в виде CORBA-объектов, выполняющихся на сервере приложений, и обращающихся к корпоративной БД. Клиенты центрального отделения обращаются непосредственно к серверу приложений через брокер объектных запросов, в то время как мобильные клиенты работают через Интернет, обращаясь к Web-серверу, который взаимодействует через сервер страниц с сервером приложений. К центральному отделению также подключен филиал с помощью защищенной виртуальной сети (VPN) через Интернет.

Так как планируется увеличение числа подключенных к системе филиалов, то необходимо было спрогнозировать характеристики производительности системы и отдельных ее элементов, найти «узкие места» в системе и предложить варианты оптимизации системы. В рамках проведенного исследования, было выполнено описание и формализация комплекса технических средств подсистемы, формализация инфраструктуры CORBA (сервиса имен и безопасности). Была проведена формализация БД системы, получены характеристики наполнения БД. Выполнена формализация прикладных объектов системы в виде совокупности транзакций, обращений к транзакциям со стороны узлов, запросов от транзакций к СУБД.

Разработанное инструментальное средство, реализующее предложенные методы, позволило оценить временные показатели выполнения транзакций $t_1, \dots, t_6$ системы, а также загрузки узлов $K_{1,2,3}, C_{2,3,4}$ и каналов системы $Сеть_{\dots}$, и выявить потенциально узкие места системы. Оценка характеристик производительности для варианта с планируемым увеличением нагрузки на систему показала, что система не может эксплуатироваться в таком режиме, т.к. в ней прогнозируется появление двух «узких мест»: канала связи центрального отделения с провайдером Интернет с пропускной способностью 64 Кбит/с ($k_{\dots} = 2,80$) и сервер СУБД СЗ ($k_{СЗ} = 1,52$). Причиной высокой загрузки сервера СУБД явились транзакции $t1$ и $t4$, выполняющие сложные запросы на большом объеме данных.

Для развязки «узких мест» были предложены следующие решения:

- 1) увеличение пропускной способности канала от центрального отделения к провайдеру Интернет с 64 Кбит/с до 256 Кбит/с;
- 2) создание на основе таблиц, на которых выполняются транзакции $t1$ и $t4$ материализованного представления (materialized view), содержащего агрегированные данные, необходимые для быстрого вычисления результатов запросов; применение материализованных представлений позволяет перенести основную нагрузку на сервер СУБД на ночное время, в течении которого производится обновление исходных таблиц БД.

Предлагаемые изменения в системе были формализованы и введены в ЭС, с помощью которой был проведен вычислительный эксперимент и получены оценки характеристик производительности оптимизированного варианта. Оценка показала, что система с учетом предложенных изменений удовлетворяет требованиям и не содержит перегруженных узлов, в то же время полученная загрузка канала связи между отделением «Центральный офис» и провайдером Интернет (0,65) позволяет сделать вывод о его эффективном использовании.

Более расширенные сведения об оценке адекватности разработанной ЭС представлены в документации на данное изделие. Оценка адекватности проводилась на случайно выбранных модельных экспериментах ТРС-С и показала результаты, приемлемые на ранних стадиях разработки вычислительных систем.

1. На основе алгебры процессов РЕРА разработан математический метод оценки характеристик производительности систем на основе архитектуры CORBA, учитывающий основные особенности систем рассматриваемого класса: гетерогенный поток заявок, параллельное выполнение, синхронные и асинхронные подпроцессы.
2. Предложен математический метод оценки времени выполнения запросов к объектно-ориентированным системам управления базами данных, который учитывает особенности выполнения алгоритмов Forward Join и Reverse Join, используемых для соединения объектов.
3. Разработан концептуальный проект, архитектура и логический проект инструментального средства для поддержки принятия решений проектировщиком при выборе варианта систем с архитектурой CORBA. Это средство относится к классу экспертных систем (ЭС) и включает средства для описания проектируемой схемы базы данных и ее наполнения, топологии и узлов сети, транзакций и запросов к объектно-ориентированной СУБД.
4. Предложено формальное описание для компонентов брокера объектных запросов, сервисов CORBA, объектно-ориентированных и реляционных баз данных, приложений систем рассматриваемого класса, в нотации разработанного инструментального средства.
5. Разработана методика оценки характеристик производительности с использованием разработанного средства анализа, включающая в себя этапы генерации варианта системы, формализации и описания проекта в экспертной системе, проведения вычислительного эксперимента и оценки полученных характеристик системы.
6. Разработанная методика и инструментальное средство было использовано в процессе исследования подсистемы «Аналитика» комплексной системы автоматизации холдинга предприятий оптовой торговли (КСА) с целью прогнозирования характеристик системы при увеличении нагрузки. Проведенный анализ показал, что система не может эксплуатироваться при планируемом увеличении нагрузки. Были выявлены «узкие места» системы и предложены способы оптимизации системы: 1) увеличение пропускной способности канала с 64 Кбит/с до 256 Кбит/с и 2) оптимизация транзакций системы с помощью материализованного представления сервера СУБД. Оценка оптимизированной системы показала, что ее характеристики производительности удовлетворяют требованиям.
7. В дальнейшем планируется провести анализ и предложить формализацию для других распределенных объектных архитектур, таких как DCOM.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Бурдаков А.В. Анализ характеристик производительности распределенных систем обработки данных с архитектурой CORBA // Современные информационные технологии в управлении и образовании – новые возможности и перспективы использования: Сборник научных трудов ФГУП НИИ «Восход», МИРЭА. – М., 2001. – С.71.
2. Григорьев Ю.А., Бурдаков А.В. Метод оценки характеристик производительности распределенных систем обработки данных с архитектурой CORBA // Вестник Амурского Государственного Университета. Естественные и экономические науки. – Благовещенск, 2001. – Вып. №13. – С.22-25.
3. Григорьев Ю.А., Бурдаков А.В., Плутенко А.Д. Анализ характеристик производительности распределенных систем обработки данных // Проблемы построения и эксплуатации систем обработки информации и управления: Сборник статей МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2000. – Вып. №1. – С.11-17.
4. Григорьев Ю.А., Бурдаков А.В. Анализ характеристик производительности распределенных систем обработки данных на базе технологии CORBA // Проблемы построения и эксплуатации систем обработки информации и управления. – М., 2000. – Вып. №1. – С.19-24.
5. Бурдаков А.В., Григорьев Ю.А., Плутенко А.Д., Оценка времени выполнения запросов к объектно-ориентированным базам данных // Информатика и системы управления. – Благовещенск, 2001. – №2. – С. 12-23.
6. А.С. 2001611054 РФ. Комплекс инструментальных средств анализа моделей доступа к базам данных распределенных систем обработки данных (КСАМ) / Ю.А. Григорьев, А.Д.Плутенко, А.А.Остапенко, А.В.Бурдаков. - №2001610600; Заявл. 17.05.2001 // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. – М., 2001. – Бюл. №4. – С.26.