



На правах рукописи

Кокорин Сергей Владимирович

Комбинированные методы моделирования,  
расчёта и оптимизации характеристик  
информационно-вычислительных сетей

Специальность 05.13.01 — Системный анализ, управление и  
обработка информации

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

5 АПР 2012

Санкт-Петербург — 2012

**Работа выполнена** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН)

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Рыжиков Юрий Иванович
- Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Никифоров Виктор Викентьевич  
кандидат технических наук  
доцент Гончаренко Владимир Анатольевич
- Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП)

Защита состоится 17 апреля 2012 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д.002.199.01 при федеральном государственном бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН по адресу: 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия, дом 39.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербурга института информатики и автоматизации Российской академии наук.

Автореферат разослан 17 марта 2012 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.002.199.01  
кандидат технических наук



Нестерук Ф. Г.

# 1 Общая характеристика работы

**Актуальность темы диссертации.** Исследование зависимости эффективности функционирования информационно-вычислительной сети (ИВСет) представляет собой весьма актуальную научно-техническую задачу, так как её решение позволит оптимально использовать доступные ресурсы. Проблема оптимального использования информационных ресурсов в настоящее время является достаточно острой, это связано с тем, что лишние ресурсы и избыточные ИТ становятся замороженными инвестициями (более того, потерянными ресурсами, учитывая быстрое моральное старение аппаратно-программного комплекса (АПК)), а недостаточные ресурсы — упущенной выгодой.

В указанных условиях особую ценность приобретают вопросы количественного и качественного оценивания эффективности функционирования существующих и создаваемых ИВСет, которые составляют основу любой современной информационной и автоматизированной системы. Традиционно перечисленные вопросы исследовались с использованием теории массового обслуживания (ТМО). Однако в современных условиях для учёта распределённости, неоднородности, нестационарности требуется разработка соответствующего модельно-алгоритмического обеспечения.

К настоящему моменту получено огромное количество интересных фундаментальных и практических результатов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7], к основным недостаткам которых можно отнести вычислительную сложность и наличие ряда жёстких ограничений на поведение моделируемого объекта, что может приводить к запоздавшим или ошибочным прогнозам и, как следствие, к потере прибыли. Это определяет актуальность поставленных в диссертационной работе задач создания модельно-алгоритмического обеспечения, расчёта и оптимизации вероятностно-временных характеристик (ВВХ) ИВСет.

**Объектом исследования** является процесс функционирования современных информационно-вычислительных сетей, широко используемых в различных предметных областях в настоящее время. **Предметом исследования** являются: модели, методы, алгоритмы и методики моделирования, расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет.

**Целью диссертационной работы** является повышение оперативности и качества функционирования существующих и перспективных ИВСет на основе разработки и реализации новых моделей и алгоритмов расчёта и оптимизации их ВВХ.

Для достижения сформулированной цели были поставлены и решены следующие основные **задачи исследования**:

- выполнена содержательная и формальная постановка задачи расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет как сетей массового обслуживания (СеМО);
- разработаны аналитические и имитационные модели СеМО для расчёта ВВХ ИВСет численными методами;
- разработаны и исследованы методы оптимизации характеристик СеМО;
- разработаны прототипы программной реализации и созданы интерфейсы для предложенных алгоритмов и моделей;
- решены прикладные задачи расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет.

**Методы исследования**, применяемые в диссертационной работе: дискретно-событийное моделирование, теория массового обслуживания, численная оптимизация, математическая статистика.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методы аналитико-имитационного моделирования, расчёта различных ВВХ ИВСет.
2. Комбинированный метод оптимизации ВВХ ИВСет.
3. Результаты решения прикладных задач расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет.

**Научная новизна.** В рамках диссертационной работы были разработаны оригинальные алгоритмы и методы решения актуальных научно-технических задач моделирования, расчёта и оптимизации характеристик ИВСет, приведённые в следующих абзацах.

Предложен алгоритм *расчёта высших моментов и аппроксимации функции распределения времени пребывания заявок при однократном посещении узлов* для однородных замкнутых СеМО, позволяющий проводить итеративную коррекцию аппроксимации распределения времени пребывания в узлах сети. Этот алгоритм даёт возможность расширить область использования и повысить точность метода оценивания показателей эффективности для ВВХ СеМО.

Получены *аналитические формулы для моментов распределения времени пребывания заявок* в сети через моменты распределения длительности однократного пребывания в узлах, которые избавляют от работы с неустойчивой технологией численного дифференцирования и повышают точность оценивания показателей эффективности для СеМО.

Предложен *комбинированный метод оптимизации ВВХ ИВСет*, выраженной в терминах СеМО, интегрирующий достоинства алгоритмов локальной и глобальной оптимизации, положенных в его основу. Этот метод применим к широкому классу аналитико-имитационных моделей и не требует информации о производных.

В диссертации также предложены модели, методы и алгоритмы, позволившие решить некоторые частные задачи моделирования, расчёта и оптимизации характеристик ИВСет.

Реализован *ситуационный алгоритм выбора численного метода* для задачи расчёта ВВХ СМО и СеМО, основанный на их классификации по коэффициенту вариации распределений длительности интервалов между последовательными поступлениями заявок и времени обслуживания в каналах и последующем комбинировании моделей СМО и узлов СеМО. Алгоритм позволяет автоматизировать процесс выбора схем моделирования СеМО, что даёт возможность пользователям обоснованно находить компромисс между точностью и скоростью расчёта характеристик СМО и узлов СеМО.

Предложена *модификация метода «меченых заявок»* для расчёта характеристик ИВСет, исключая значимую смещённость при оценке характеристик, что достигается рациональным подбором частоты меченых заявок. Полученные оценки обладают существенно меньшей дисперсией при сопоставимой длительности моделирования.

Разработан *способ ограничения пространства поиска оптимальных параметров* на основе модифицированного метода штрафных функций, который позволяет регулировать скорость сходимости метода оптимизации. Модификация заключается в подборе штрафных функций, являющихся функциональными аналогами производной целевой функции (ЦФ), в то время как сама производная может либо отсутствовать, либо быть очень сложной для вычисления.

Разработан *алгоритм оперативного пересчёта оптимальных ВВХ ИВСет* для различных сценариев деградации её структуры, в котором последовательно решается новая задача оптимизации сети с вышедшими из строя узлами. В результате выполненных исследований удалось сформулировать правила реконфигурации сети при возникновении подобных ситуаций на этапе проектирования, минимизировать потери без использования дополнительных ресурсов и оценить чувствительность ИВСет к выходу из строя её отдельных узлов.

**Практическая ценность работы.** В диссертационной работе были разработаны и реализованы два прототипа приложений расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет А-МОСТ и QNOpt, система ИМ, а также модельно-алгоритмическое обеспечение расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет. При разработке данных прототипов использовалась библиотека прикладных программ МОСТ («Массовое обслуживание. Стационарный режим»), созданная профессором Рыжиковым Ю. И.

Прототипы приложений А-МОСТ и QNOpt для расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет численными методами позволили объединить все разработанные модели, алгоритмы и методы, визуализировать результаты, исследовать их свойства и ускорить процесс моделирования.

Разработанная система ИМ использовалась для проверки качества исследуемых численных методов и для описания случаев, допускающих изменение конфигурации ИВСет во время моделирования. С её помощью удалось успешно реализовать частные ИМ для различных прикладных областей, которые в последующем применялись для исследования эффективности предложенных методов моделирования.

В частности, одной из версий модельно-алгоритмического обеспечения расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет была реализована при анализе проекта «Ракурс Д» в организации ОАО СКБ «Орион». В результате удалось на научной основе обосновать требования к составу и структуре оборудования АПК проекта.

В целом, проведённые исследования показали, что полученные результаты могут быть использованы как на этапе проектирования ИВСет для анализа возможностей проектируемой системы, выдачи рекомендаций по характеристикам аппаратной базы и организации процесса функционирования, так и на этапе эксплуатации для поддержки принятия решений, а также для проверки качества функционирования моделируемой системы и управления функционированием ИВСет и при проведении её модернизации.

**В практическую реализацию** разработанного модельно-алгоритмического обеспечения были переданы:

- способ формализации требований экспертов относительно значений показателей эффективности моделируемой системы, позволяющие повысить обоснованность выбора оборудования АПК ИВСет;
- иерархия моделей описания функционирования ИВСет обработки телеметрической информации, с помощью которых удалось с различной степенью детализации и точности оценить и оптимизировать ВВХ указанных сетей;
- методы оперативного расчёта требуемых ВВХ ИВСет, позволившие сократить время расчёта по сравнению с существующими подходами;
- методы верификации модельно-аналитического и программного обеспечения расчёта, базирующегося на результатах сравнения указанных показателей с реальными ретроспективными данными;
- методика предсказания моментов времени смены сценариев поведения ИВСет;

- методика решения задачи выбора необходимого состава и структуры АПК ИВСет;
- методика оценивания чувствительности узлов сети к деградации её структуры.

**Реализация результатов работы** Полученные в диссертации результаты были реализованы в ОАО «СКБ Орпю»; Омский государственный технический университет; Рижский технический университет; СПИИРАН; разработанное модельно-алгоритмическое обеспечение расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет использовалось при выполнении НИР фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «У.М.Н.И.К.» и программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН проект 2.3; грантов РФФИ 10-08-00906-а, 10-08-90027-Бел\_а, 11-08-01016-а, 11-08-00767-а.

**Апробация и публикации:** Результаты научных исследований автора представлены в 8 публикациях: из них 1 работа входит в перечень ВАК РФ, 6 в рецензируемых изданиях. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на EUROSIM Congress on Modelling and Simulation (2010), 25th European Conference on Modelling and Simulation ECMS (2011), Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика». (ИММОД) (2009, 2011), XII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2010)».

**Структура и объем работы** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Основное содержание работы изложено на 138 страницах, содержит 37 рисунков, 9 таблиц. Список использованных источников включает 53 наименования.

## 2 Содержание работы

Во **введении** дан сравнительный анализ существующих подходов к формальному описанию и решению задач моделирования, расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет. Обоснована актуальность решаемой научно-технической задачи; определены объект, предмет, направления соответствующих исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту и структура диссертации.

В **первой главе** на содержательном уровне описываются прикладные задачи расчёта ВВХ ИВСет, решение которых в настоящее время весьма актуально и востребовано. Проведён критический анализ традиционно ис-

пользуемого на практике алгоритма расчёта ВВХ СеМО, позволивший определить перспективные направления улучшения его характеристик и сформулировать первый класс решаемых в диссертации научно-технических задач, суть которых сводится к следующему:

*Постановка задачи расчёта ВВХ ИВСет.* Пусть задана  $q$  однородная открытая/замкнутая СеМО с дисциплиной обслуживания FIFO:

$$q = (a, n, B, R), \quad (2.1)$$

где  $a = (a_1, \dots, a_m)^T$  — первые  $m$  моментов распределения между прибывающими «вышними» заявками для открытых сетей массового обслуживания;  $K$  — размер популяции для замкнутых сетей (вместо  $a$ );  $n = (n_1, \dots, n_M)^T$  — количество каналов в каждом из  $M$  узлов сети;  $B = \{b_{ij}\}, i \in \overline{1, M}, j \in \overline{1, m}$  — первые  $m$  начальных моментов распределения времени обслуживания заявок;  $R = \{r_{ij}\}, i, j \in \overline{1, M+1}$  — матрица стационарных вероятностей переходов.

При построении модели, в отличие от общепринятых численных процедур расчёта, допускается учёт высших моментов для задания распределения времени обслуживания в узлах и интервалов между поступлением заявок.

Требуется рассчитать начальные моменты распределения времени пребывания заявки в сети  $\nu = (\nu_1, \dots, \nu_m)^T$  и коэффициенты загрузки для каждого узла сети  $\rho = (\rho_1, \dots, \rho_M)^T$ . Данные характеристики были названы базовыми ВВХ СеМО.

Рассматриваемые показатели качества:

- $\nu_1(q)$  — среднее время пребывания заявок в СеМО;
- $\rho(q) = 1/M \sum_{i=1}^M \rho_i^2(q) - 1/M^2 (\sum_{i=1}^M \rho_i(q))^2$  — показатель равномерности распределения нагрузки;
- $\overline{P}_\nu(q|t_0)$  — доля недообработанных заявок за время  $t_0$  от момента поступления;
- $e(q) = \frac{K}{\nu_1(q)} - \sum_{i=1}^M c_i n_i \mu_i^{d_i}$  — показатель пропускной способности СеМО при заданных затратах (для замкнутых сетей), где  $c_i, d_i$  — коэффициенты, определяющие зависимость стоимости оборудования от его мощности.

*Подход к решению поставленной задачи.* Традиционно для оценивания распределения числа заявок в СеМО  $q$  используется базовый алгоритм [8], поскольку он позволяет с высокой оперативностью рассчитывать ВВХ ИВСет, применим к задачам высокой размерности (сотни узлов) и при его реализации удаётся учесть преобразования потоков заявок.

Этот алгоритм позволяет рассчитать все базовые ВВХ СеМО, но при этом обладает некоторыми особенностями реализации, которые потребовали

его доработки. Так, например имеется ограничение, что для всех узлов необходимо задать общий алгоритм численного расчёта, который используется на всех итерациях расчёта узлов, а значит при различных значениях параметров, и может оказаться так, что на промежуточной итерации возникнет ситуация, когда расчёт не может быть выполнен и потребуются прекращение процедуры. Поэтому предлагается подход к автоматизации выбора алгоритма из заранее заданного множества, где в зависимости от исходных данных, будет выбираться оптимальный по скорости расчёта. Недостатком библиотек, реализующих существующие численные алгоритмы, является отсутствие расчётных формул для случая замкнутых сетей. В связи с этим, в диссертации предложены один из возможных подходов к расчёту высших моментов для случая замкнутых СеМО, в ходе которого проверялась точность получаемых оценок ВВХ.

Базовый алгоритм основывается на предположении о гамма-распределении времени однократного пребывания заявки, в узле и поэтому обычно при его реализации используется неустойчивый метод численного дифференцирования для перехода от аппроксимации функции преобразования Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) к начальным моментам, что сужает сферу применимости данного алгоритма и вносит дополнительные ошибки. Предлагаются разработанные автором аналитические формулы перехода от начальных моментов времени однократного пребывания заявок в узлах к начальным моментам распределения времени пребывания заявок в сети в целом.

Разработан алгоритм выбора наиболее предпочтительной расчётной схемы ВВХ ИВСет. Алгоритм использует информацию о коэффициентах вариации распределения интервалов между поступающими заявками и времени обслуживания в каналах. На рисунке 2.1 представлена предложенная в диссертации обобщённая схема выбора аппроксимирующего распределения. Для каждой расчётной схемы имеются особые случаи комбинации параметров, например, распределение Эрланга с 2 фазами является особым случаем для расчётной схемы, основанной на гиперэкспоненциальном распределении. В задачах оптимизации ИВСет на промежуточных этапах пользователь может «случайно» попасть в подобную ситуацию, поэтому автоматический выбор используемых методов расчёта ВВХ позволяет расширить применимость численных методов расчёта характеристик ИВСет, а также ускорить процесс анализа полученных результатов пользователем за счёт увеличения устойчивости алгоритмов расчёта ВВХ и уменьшения числа итераций расчёта модели.

В диссертации разработаны и представлены аналитические формулы расчёта начальных моментов времени пребывания заявок в сети  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  без

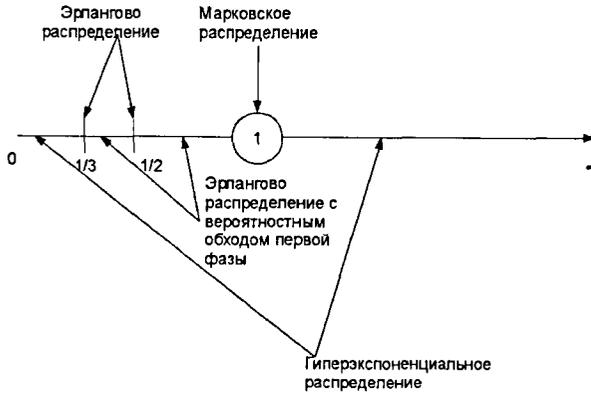


Рис. 2.1: Схема автоматического выбора типа распределения в зависимости от коэффициента вариации.

использования традиционной неустойчивой технологии численного дифференцирования и приведены *аналитические* формулы, применяемые при их расчёте. Результаты метода хорошо согласуются с результатами ИМ и оценками, полученными благодаря использованию численного дифференцирования (результаты численных экспериментов представлены на рисунке 2.2, где на графике по оси  $x$  откладывается максимальный коэффициент загрузки узлов сети, по оси  $y$  — относительная погрешность предлагаемого аналитического метода в сравнении с оценками ИМ). Дополнительно необходимо отметить, что предложенный подход не связан с дисциплинами обслуживания заявок в каждом узле сети, а потому может быть применён к неоднородным СМО.

Во **второй главе** формально описаны общие и частные задачи оптимизации ВВХ ИВСет, а также предложены методы и алгоритмы их решения.

*Постановка задачи.* Дано множество допустимых вариантов ИВСет вида:  $Q = \{q = (a, n, B, R), \forall a, \forall n, \forall B, \forall R\}$ . В этом случае обобщённая задача *оптимизации структуры ИВСет* формально описывается следующим образом:  $f(\tilde{q}(R)) \rightarrow \min_{R \in \Xi}$ , где  $\Xi$  множество допустимых матриц  $R$ , а  $\tilde{q} : \Xi \rightarrow Q'$ ,  $\tilde{q}(R) = (a_0(K_0), n_0, B_0, R) \in Q'$ , а обобщённая задача *оптимального использования ресурсов ИВСет* имеет вид:  $f(\hat{q}(B)) \rightarrow \min_{B \in \Theta}$ , где  $\Theta$  — множество допустимых распределений, определяющих  $B$ , а  $\hat{q} : \Theta \rightarrow Q'$ ,  $\hat{q}(B) = (a_0(K_0), n_0, B, R_0) \in Q'$ .

На основе приведённых обобщённых задач выбора наилучших параметров ИВСет могут быть сформулированы следующие частные **задачи** оптимизации ВВХ и показателей качества функционирования ИВСет:

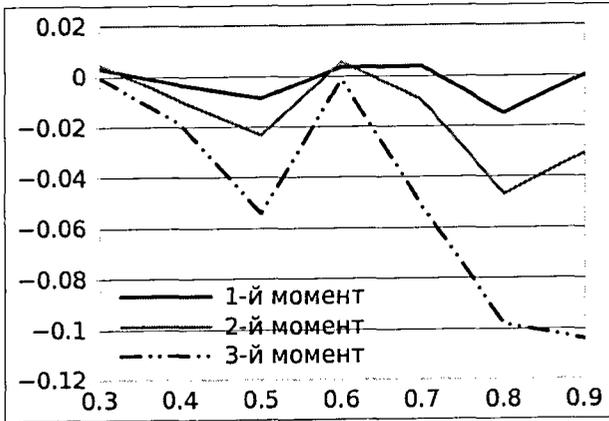


Рис. 2.2: Сравнительная оценка относительной погрешности  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  в зависимости от коэффициента загрузки узлов сети.

- минимизации среднего времени пребывания заявок в сети:

$$J_1 = \nu_1(\hat{q}(R)) \rightarrow \min_{R \in \Xi};$$

- обеспечения равномерности распределения нагрузки в сети:

$$J_2 = \rho(\hat{q}(R)) = 1/M \sum_{i=1}^M \rho_i^2(R) - 1/M^2 (\sum_{i=1}^M \rho_i(R))^2 \rightarrow \min_{R \in \Xi};$$

- минимизации доли недообработанных заявок за время  $t_0$  от момента их поступления в сеть:  $J_3 = \overline{P}_v(\hat{q}(R)|t_0) \rightarrow \min_{R \in \Xi};$

- задача максимизации пропускной способности сети при минимальных затратах, где  $c_i, d_i$  — некоторые произвольные константы:

$$J_4 = e(\hat{q}(R)) = \frac{K}{\nu_1(\hat{q}(R))} - \sum_{i=1}^M c_i n_i \mu_i^{d_i} \rightarrow \max_{R \in \Xi};$$

- для перечисленных задач, но уже применительно к оптимизации ресурсов, были предложены следующие ЦФ:

$$J_5 = \nu_1(\hat{q}(B)), J_6 = \rho(\hat{q}(B)), J_7 = \overline{P}_v(\hat{q}(B)|t_0), J_8 = e(\hat{q}(B)).$$

Аналогичные задачи были сформулированы ранее, в работах других авторов [6, 9, 10], однако для их решения предлагалось использование исключительно методов ИМ, позволяющих оптимизировать ВВХ и показатели эффективности для широкого класса моделей. В диссертации, в отличие от существующих подходов, разработано модельно-алгоритмическое обеспечение, позволившее решить перечисленные задачи оптимизации ВВХ ИВСет более оперативно и со значительно меньшими затратами ресурсов.

*Подходы к решению поставленной задачи.* Для повышения оперативности в рамках обобщённой процедуры оптимизации ВВХ ИВСет была использована комбинация модифицированных методов Брента Р.П. и пси-

преобразования Чичинадзе В.К. Для первого метода для расчёта ВВХ ИВСет разработаны подходы к построению начальных оценок и предложены эмпирические начальные оценки для  $J_1$ ,  $J_4$ , для второго — подобраны параметры, позволившие повысить эффективность его использования при решении задач поиска начального приближения в рамках обобщённой процедуры оптимизации ВВХ ИВСет. Анализ численных экспериментов показал, что использование предложенной комбинации методов позволяет проводить оптимизацию широкого класса показателей эффективности для ИВСет большой размерности (сотни узлов) и получать решения (значения ВВХ), устойчивые к изменению начальных приближений и модификации входных параметров.

На рисунке 2.3 продемонстрирована зависимость найденного оптимального значения ЦФ вида  $J_1$  от количества итераций для задачи оптимизации «структуры» сети, состоящей из 30 узлов со случайным (от 1 до 7) числом каналов и случайными двумя первыми начальными моментами времени обслуживания в каждом узле. На графике ось  $y$  представлена в логарифмической шкале и показывает наилучшее значение целевой функции (среднего времени пребывания заявок в сети), по оси  $x$  отложено количество итераций. Для проведения оптимизации потребовалось не более 3 секунд.

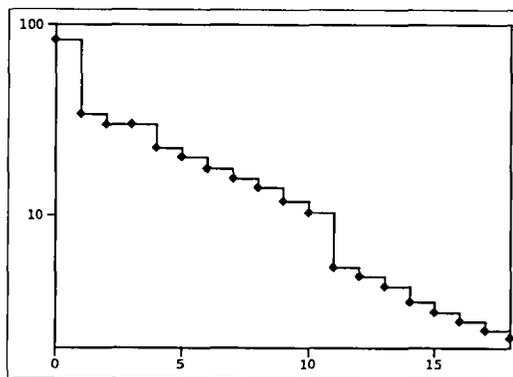


Рис. 2.3: Оценка требуемого числа итераций для сходимости комбинированного метода задачи оптимизации «структуры» сети по среднему времени пребывания.

Достоинством предлагаемого подхода к оптимизации ВВХ ИВСет является то, что при его реализации не требуется информации о производной оптимизируемой целевой функции. В качестве её функциональной альтернативы предлагается использовать штрафные функции вида  $f_\rho(x) = f(x) - \alpha\rho(x, \Xi')$ , где  $\rho(x, \Xi')$  — расстояние от  $x$  до множества  $\Xi'$ , а  $\alpha$  — коэффициент значимости штрафа. Эта модификация позволяет подобрать вид штрафной функции так, чтобы ускорить сходимость и иметь возможность

задавать дополнительные ограничения на множестве моделей ИВСет. Необходимость введения штрафных функций была вызвана также особенностями решаемых прикладных задач, наличием технических ограничений ИВСет, которые невозможно учесть в разработанных моделях иным способом.

Метод оптимизации структуры сети может быть применён в сценарии выхода из строя различных элементов подсетей, что подтверждено на нескольких сценариях выхода из строя узлов сети. Также для сети с вышедшими из строя элементами был разработан алгоритм поиска оптимальных параметров функционирования оставшейся работоспособной подсети. Результаты этих исследований позволили оценить критичность работы каждого отдельного узла и определить узкие места исходной ИВСет, а также сформировать рекомендации по целесообразной модернизации рассматриваемой сети. На радиальном графике, приведённом на рисунке 2.5 представлен пример оценивания влияния полного отказа некоторых из узлов сети, изображённой на рисунке 2.4, на минимальное среднее время прохождения заявками сети. Значение координат, определяющие структуру внутреннего многоугольника, изображённого на рисунке 2.5, выражаются в виде величины среднего времени прохождения заявки, а также соответствуют ситуации, когда рассматриваемая сеть нормально функционирует. В свою очередь, значения координат, определяющие структуру внешнего многоугольника, соответствуют ситуации, когда сеть начинает деградировать. В частности, на рисунке 2.5 представлена ситуация, при которой можно оценить среднее время прохождения заявки по сети в случае выхода из строя любого узла.

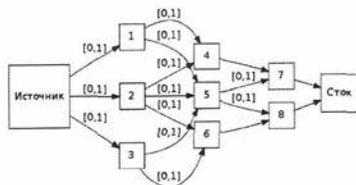


Рис. 2.4: Пример моделируемой сети.

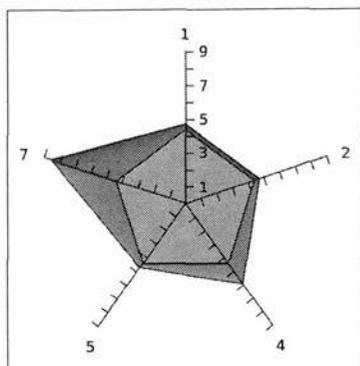


Рис. 2.5: Влияние отказа узлов на минимальное среднее время прохождения заявками сети.

В **третьей главе** рассматриваются варианты применения предложенного во второй главе подхода к оптимизации ИВСет в случае, когда её функционирование описывается с помощью ИМ. Анализируются особенности ИМ и предлагаются способы преодоления стохастической природы оценок.

Численные эксперименты показывают, что использование исключительно численных методов при расчёте и оптимизации ВВХ ИВСет может привести к получению результатов моделирования, не соответствующим ВВХ реально существующих систем. Представленные в главе результаты исследований в области ИМ позволили проводить расчёт и оптимизацию ВВХ ИВСет в случае, когда численные методы расчёта характеристик моделей ТМО неудовлетворительно описывают реальные ИВСет. Разработанная система ИМ дала возможность описать и исследовать сети массового обслуживания, аналогичные ранее предложенным в 1 и 2 главах аналитическим моделям сетей, определённых как  $Q$ , и дополнительно расширила класс объектов моделирования. В данной главе также были добавлены показатели эффективности функционирования ИВСет, расчёт которых с использованием аналитического моделирования затруднён: распределение числа прерываний обслуживания и доля пакетов заявок, успевших пройти сеть за заданный промежуток времени.

Для улучшения качества оценок характеристик ИВСет в диссертационной работе предложен метод ИМ, основанный на методе «меченых заявок», который позволил сократить дисперсию оценок значений показателей эффективности, не увеличивая вычислительные затраты, и ускорить поиск оптимальных значений параметров, оцениваемых другими методами. Исследованы условия, при которых данный метод предпочтительнее классического метода дискретно-событийного ИМ, и найдена зависимость точности оценок от загрузки сети, степени связности её узлов и общего числа узлов в сети. Благодаря разработанному методу стало возможным поставить и решить задачу оптимизации ВВХ ИВСет, заданную с помощью ИМ.

На рисунке 2.6 представлена зависимость корреляции накапливаемых значений времени прохождения заявками через сеть от степени связности СеМО. Как можно видеть, метод «меченых заявок» позволяет накапливать практически независимые значения по сравнению с классическим методом, а значит рассчитывать более корректные оценки данных величин.

В **четвёртой главе** приведены примеры решений прикладных задач расчёта ВВХ ИВСет СМ в реальном масштабе времени (РМВ) посредством использования комбинированного метода моделирования расчёта и оптимизации характеристик ИВСет.

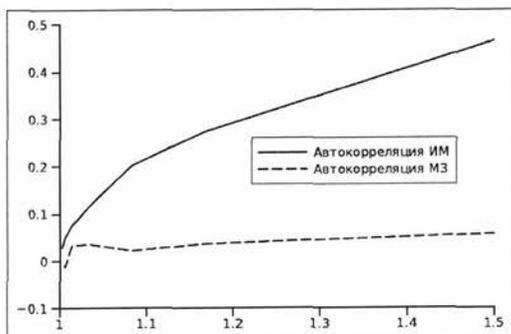


Рис. 2.6: Автокорреляция накапливаемых значений для ИМ.

Необходимой частью решения прикладных задач является предварительная обработка и правила верификации применимости модели к имеющимся исходным данным. Рассмотренные в работе варианты проверки гипотез о виде распределений предоставляют возможность автоматизировать процессы подготовки данных и выявить границы применимости предлагаемых методов, что позволяет увеличить обоснованность использования предлагаемых моделей, алгоритмов и методов моделирования, расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет.

Важную роль на практике играют задачи оценивания ВВХ ИВСет в условиях существенной нестационарности входного потока заявок, для чего был разработан подход к описанию нестационарного поведения моделируемой ИВСет на основании модели скрытых цепей Маркова и проведению расчёта и оптимизации параметров ИВСет отдельно на каждом участке стационарности в РМВ путём использования быстрых приближённых численных методов, предложенных в первых двух главах диссертационной работы.

Предложенные методы моделирования, расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет были использованы для решения задачи анализа функционирования АПК подсистемы обработки телеметрической информации (проект «Ракурс Д»), входящей в автоматизированную систему контроля состояния инфраструктуры атомного реактора. Пример графа, описывающего структуру алгоритма обработки телеметрической информации, и интерпретация структуры АПК в виде СеМО представлена на рисунке 2.7. Основными требованиями к рассматриваемой подсистеме является необходимость оперативного расчёта интегральных характеристик состояния работы всей инфраструктуры атомного реактора и проведение обработки данных проходит в реальном времени. Также к особенностям подсистемы относится то, что АПК может

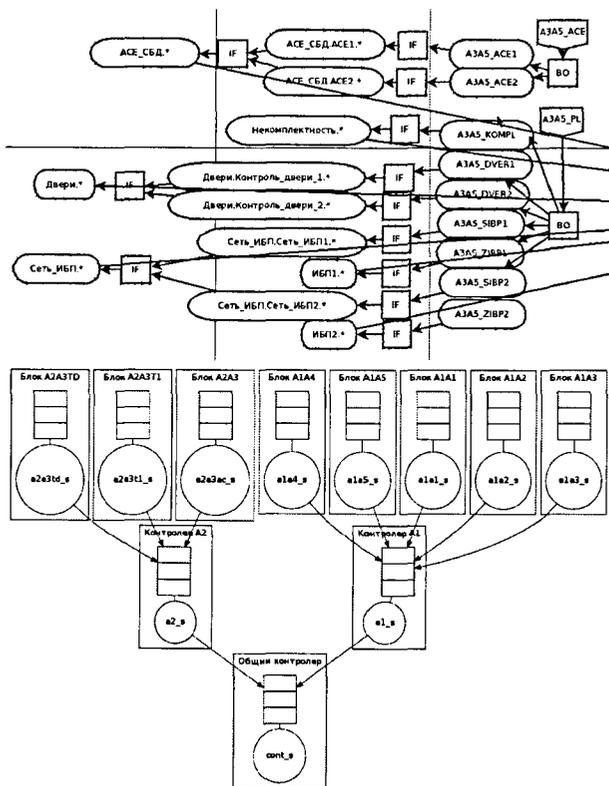


Рис. 2.7: Пример модели алгоритма анализа состояния стойки КИС336\_5.

состоять из сети многопроцессорных, различных по характеристикам серверов. При этом функционирование инфраструктуры атомного реактора нестабильно.

Кроме того, в четвёртой главе представлены результаты решения следующих прикладных задач:

- оценивание среднего времени обработки данных, вероятности того, что время обработки данных превысит директивные сроки;
- обоснование требований, предъявляемых к характеристикам и структуре эксплуатируемых и модернизируемых АПК.

В качестве наглядного примера результатов анализа проекта «Ракурс Д» приведём расчёт доли всех выполненных операторов подсистемы мониторинга и долю операторов, входящих в подсеть КИС420\_9, так как

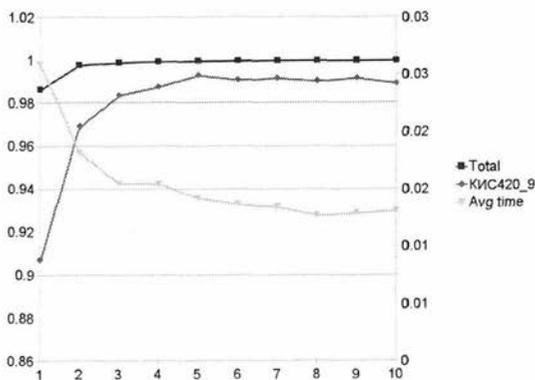


Рис. 2.8: Зависимость доли обслуженных пакетов и среднего времени обслуживания одного пакета от числа процессоров обслуживания в критическом режиме.

эта подсеть имеет наибольшее число операторов. Рассмотрим для этой подсети две характеристики: среднее время обслуживания данного проекта и долю пришедших пакетов, которые прошли обработку в подсети за время до появления следующего пакета. На рисунке 2.8 представлен график, где по оси  $x$  откладывается число процессоров, обслуживающих обработку телеметрической информации, по левой оси  $y$  — доля заявок, отработавших до прихода следующего пакета, а по правой — среднее время обработки подсети КИС420\_9.

Анализ полученных графиков зависимостей переменных позволил выявить ошибки в логике функционирования систем обработки телеметрической информации. С использованием созданной модели удалось оценить долю заявок, успевающих пройти обработку до появления следующего пакета при заданных характеристиках сети. Для проекта «Ракурс-Д» можно говорить, что при штатной работе инфраструктуры реактора в среднем проекты выполняются на пределе возможностей настольного компьютера: лишь 94% всех заявок успевают отработать за отведённые 0.1 секунды, но сама система остаётся не перегруженной. Также можно видеть, что увеличение числа процессоров или уменьшение времени обработки отдельного оператора заметно влияют на долю вóвремя обработанных пакетов. Моделирование нагрузок в критической ситуации показало, что требуется 3–4 сервера, типа HP ProLiant, для обработки возросшего потока информации, хотя в существующей АПК использовался один сервер.

В **заключении** диссертационной работы описываются достигнутые цели и задачи исследования, обозначены преимущества разработанных методов и алгоритмов расчёта и оптимизации характеристик ИВСет по сравнению с уже существующими, а так же приведены полученные результаты в области теоретических и прикладных исследований.

В приложении А приведено описание прототипа разработанной программы А-МОСТ, предназначенной для решения задач расчёта ВВХ моделей однородных систем и сетей массового обслуживания, в приложение Б — описание прототипа программы QNOpt, предназначенной для решения задач оптимизации ВВХ ИВСет.

### 3 Заключение

В результате проведённых исследований в диссертационной работе представлен подход к решению важной научно-технической задачи моделирования, расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет, и получены следующие основные результаты:

- проведён критический анализ существующих подходов к постановке и решению задачи моделирования, расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет, выбраны и обоснованы пути её решения;
- разработаны аналитические модели СеМО, которые позволяют с требуемой степенью адекватности описать ИВСет, кроме того определена область применения этих моделей;
- разработана система ИМ для расчёта характеристик ИВСет;
- предложены алгоритмы и методы решения задач моделирования, расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет;
- разработаны и реализованы прототипы программ для расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет;
- проиллюстрирована конструктивность разработанного модельно-алгоритмического обеспечения на примере задачи анализа существующей ИВСет обработки телеметрической информации.

Подводя итог, можно сказать, что разработанный подход моделирования, расчёта и оптимизации ВВХ ИВСет по сравнению с аналогами менее трудоёмок и позволил, как показали результаты внедрений, строить иерархию моделей в зависимости от точности, качества, объёма входных данных и требований к точности оценок показателей эффективности, что повысило обоснованность и эффективность принятия решений при управлении и модернизации ИВСет.

## 4 Список публикаций по теме диссертации

Публикации в научных журналах, включённых в перечень ВАК:

- Кокорин С.В., Рыжиков Ю.И. *Оптимизация параметров сетей массового обслуживания на основе комбинированного использования аналитических и имитационных моделей*. Приборостроение, 2010, 53, 61–66.

Международные конференции:

- Kokorin S.V., Sokolov B.V. *Numerical Methods of Structure Optimization of Homogeneous Queuing Networks*. Proceeding of the 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, 2010, 2, 29.
- Kokorin S.V., Sokolov B.V., Ryzhikov Yu.I. *Model And Algorithm For Combinational Optimization Of Information System Bandwidth*. Proceedings 25th European Conference on Modelling and Simulation ECMS-2011, Digitaldruck Pirrot GmbH, 2011, 166–171.

Другие публикации:

- Кокорин С. В., Рыжиков Ю.И. *Автоматический синтез программ расчёта систем и сетей обслуживания*. Труды IV Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика». (ИММОД), 2009, 272 – 274.
- Кокорин С.В., Соколов Б.В. *Комбинированный метод оптимизации структуры замкнутых однородных сетей массового обслуживания*. Труды IV Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика». (ИММОД), 2009, 149 – 151.
- Кокорин С.В. *Имитационная модель приоритетной многоканальной системы массового обслуживания*. Труды IV Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика». (ИММОД). 2009.
- Кокорин С.В., Рыжиков Ю.И. *Автоматическая сборка программ решения комплексных задач теории очередей*. Региональная информатика (РИ-2010). XII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2010)». Труды конференции. СПОИСУ, 2010, 48.

- Долгушин Д.Ю., Задорожный В.Н., Кокорин С.В. *Двухуровневое моделирование автотранспортных потоков на основе клеточных автоматов и систем с очередями*. Пятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. «Имитационное моделирование. Теория и практика», ИММОД-2011. Труды конференции. ОАО «ЦТСС», 2011, том 1, 139–145.

## Список литературы

- [1] *Bose, Sanjay K. An Introduction to Queuing Systems / Sanjay K. Bose.* — Springer, 2002. — P. 312 p.
- [2] *Breuer, L. An Introduction to queuing theory and matrix-analytic methods. / L. Breuer, D. Baum.* — Springer, 2005. — P. 278.
- [3] *Kelly, F.P. Network Routing / F.P. Kelly // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 337.* — 1991. — Vol. 337. — Pp. 343–367.
- [4] *Neuts, Marcel F. Matrix-analytic methods in queuing theory / Marcel F. Neuts // European Journal of Operational Research.* — 1983. — no. 15. — Pp. 2–12.
- [5] *Medhi, Jyotiprasad. Stochastic models in queuing theory / Jyotiprasad Medhi.* — 2 edition. — Elsevier Science & Technology, 2010. — P. 450 p.
- [6] *Уолрэнд, Дж. Введение в теорию сетей массового обслуживания / Дж. Уолрэнд; Ed. by В. Ф. Матвеев.* — М.: Мир, 1993. — P. 336 с.
- [7] *Вишневский, В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В.М. Вишневский.* — Техносфера, 2003. — С. 512.
- [8] *Рыжиков, Ю.И. Машинные методы расчёта систем массового обслуживания / Ю.И. Рыжиков.* — СПб: ВИКИ им А. Ф. Можайского, 1979. — С. 177.
- [9] *Задорожный, В.Н. Распределение каналов в однородных немарковских сетях с очередями / В.Н. Задорожный // Омский научный вестник.* — 1997. — С. 5–10.
- [10] *Иглхарт, Д. Регенеративное моделирование сетей массового обслуживания / Д. Иглхарт, Д. Шедлер.* — М.: Радио и связь, 1984. — С. 136.

Подписано в печать 16.03.2012г.  
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз.  
Заказ № 2544.

Отпечатано в ООО «Издательство «ЛЕМА»»  
199004, Россия, Санкт-Петербург, В.О., Средний пр., д. 24  
тел.: 323-30-50, тел./факс: 323-67-74  
e-mail: [izd\\_lemma@mail.ru](mailto:izd_lemma@mail.ru)  
<http://www.lemmaprint.ru>