

На правах рукописи



Бочкарёва Екатерина Владимировна

**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ  
РАСПРЕДЕЛЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

Специальность 05.13.17 – Теоретические основы информатики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск 2011

Работа выполнена на кафедре вычислительных систем и информационной безопасности факультета информационных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент  
Сучкова Л.И.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, доцент  
Родионов А. С.,  
кандидат технических наук, доцент  
Шатохин А.С.

Ведущая организация – Институт проблем управления  
им. В. А. Трапезникова РАН

Защита состоится «27» октября 2011 года в 14.00 час. на заседании диссертационного совета Д 219.005.02 при Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики». по адресу 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, ауд. 625.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики по адресу 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.

Отзывы на автореферат просьба высылать по адресу: 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, заместителю декана ИВТ Резвану И.И.  
Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



И.И. Резван

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы.** Перспективным направлением в области разработки систем распределенного технологического мониторинга (СРТМ) является предварительное моделирование их функционирования с целью проведения экспериментов с СРТМ без ее физической реализации, что особенно важно при создании сложных быстродействующих информационных систем в областях, где тестирование затруднено или невозможно из соображений высокой стоимости или безопасности.

Анализ узкоспециализированных программных продуктов для моделирования работы вычислительных сетей, используемых в СРТМ (ZetView, Tossim, NetWizard, Ornet Modeler и др.), выявил ряд недостатков: высокую стоимость (1,500\$-70,000\$); отсутствие средств прогнозирования и обработки нештатных ситуаций (НС); ориентацию на оборудование конкретного производителя; отсутствие средств оценки характеристик работоспособности системы в зависимости от характеристик алгоритмов обработки данных, выполняющихся на ее узлах. Описание же модели взаимодействия информационных процессов в СРТМ с использованием существующих программных продуктов для моделирования работы динамических систем (MATHLAB, LabView) требует значительных временных затрат и не позволяет получить данные для сравнительного анализа показателей работоспособности системы при различной конфигурации связей и разных характеристиках оборудования.

В связи с этим актуальным является разработка имитационной модели взаимодействия информационных процессов в СРТМ, и реализация ее в виде программной системы, позволяющей задавать структуру системы; описывать логику взаимодействия функционирующих в ней информационных процессов; исследовать применимость для обработки данных алгоритмов, обладающих различной вычислительной сложностью; прогнозировать поведение системы при НС; оценивать характеристики производительности и надежности СРТМ при использовании различного оборудования и архитектуры.

**Целью диссертационной работы** является разработка и программная реализация имитационной модели взаимодействия информационных процессов в СРТМ, позволяющей учитывать вычислительную сложность используемых алгоритмов обработки данных и исследовать характеристики работоспособности проектируемой СРТМ.

Для достижения поставленной цели ставятся следующие **задачи**:

- Разработка имитационной модели взаимодействия информационных процессов в СРТМ с позиций теории массового обслуживания, методов имитационного моделирования и комплексного подхода к описанию поведения системы.
- Разработка архитектуры имитационной системы для построения, отображения, тестирования и анализа процессов сбора, обработки и передачи данных в СРТМ и создание реализующего ее программного обеспечения.
- Разработка методики тестирования и оценки эффективности применения вычислительных технологий обработки данных в СРТМ, основанной на использовании внутреннего языка имитационной системы.

- Комплексное исследование на основе имитационного эксперимента характеристик работы СРТМ в штатном режиме и в случае программно-аппаратных сбоев в зависимости от ее топологии, параметров конфигурации оборудования и выполняющейся на узлах сети обработки данных.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач и достижения намеченной цели проводились теоретические и экспериментальные исследования, основанные на использовании методов теории массового обслуживания, теории формальных языков, теории математического моделирования, теории параллельного программирования, вычислительной математики, а также прикладное и системное программирование и средства машинной графики для отображения результатов моделирования.

#### **Научная новизна:**

1. Предложена имитационная модель взаимодействия информационных процессов в СРТМ, основанная на представлении СРТМ в виде графа, каждой вершине которого сопоставлена система массового обслуживания (СМО), взаимодействующая со СМО других его вершин и учитывающая характеристики оборудования, выполняющиеся на узле алгоритмы обработки данных и поведение СРТМ в случае возникновения программно-аппаратных сбоев.
2. Для разработанной модели предложены алгоритмы и программное обеспечение, реализующие комплексный подход к описанию взаимодействия информационных процессов СРТМ, основанный на синтезе объектно-, процессно-, событийно- и функционально-ориентированных подходов.
3. Предложено применять для оценки временных характеристик используемых на узлах СРТМ алгоритмов обработки данных синтаксически-ориентированный метод их описания.

**Реализация результатов работы.** На основе результатов исследования разработан программный комплекс для моделирования обработки данных в гетерогенных распределенных системах «DS Simulator», некоторые элементы которого были апробированы при создании сети учета энергоресурсов АлтГТУ и в специализированных приложениях. Получено свидетельство Роспатента об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2010613965.

**Практическая значимость.** Созданная на основе построенной имитационной модели программная система позволяет при проектировании СРТМ учитывать вычислительную сложность используемых на ее узлах алгоритмов обработки данных и исследовать влияние на параметры работоспособности СРТМ ее архитектуры. Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке систем распределенного технологического мониторинга для контроля производственных процессов и функционирования техногенных объектов в областях, критичных к надежности, своевременности и скорости доставки и обработки данных.

Практическая значимость работы подтверждается отзывом организации Grid Dynamics (Fremont, CA, USA), профилем работы которой являются высоконагруженные отказоустойчивые системы.

Разработанное программное обеспечение используется в учебном процессе при преподавании курса «Моделирование» для специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

**Апробация научных результатов.** Основные результаты работы апробированы на 12 конференциях: VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Информационные технологии и математическое моделирование» (Томск, 2008); XII Региональной конференции по математике «МАК» (Барнаул, 2009); X-XI Международных научно-практических конференциях «Измерение, контроль, информатизация» - ИКИ (Барнаул, 2009-2010); IV Научно-практической конференции «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии» (Оренбург, 2009); XXVI Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве» (Нижний Новгород, 2009); XVII Дистанционной Международной научной конференции «Методы и алгоритмы принятия эффективных решений» (Таганрог, 2009); VII Всероссийской научно-технической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологий» (Тула, 2010); VII Всероссийской научно-практической конференции «Технологии Microsoft в теории и практике программирования» (Томск, 2010); Международной научно-практической конференции «Молодежь Сибири – Науке России» (Красноярск, 2010); 5-6 Всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (Барнаул, 2009-2010). По материалам диссертационных исследований получен грант по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.») для проведения дальнейшей работы по теме «Модули сбора, обработки и архивирования данных в робастных SCADA-системах с элементами CASE-технологий».

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы отражены в 19 опубликованных научных работах, в том числе 3 статьи в журналах из списка ведущих рецензируемых журналов, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 1 свидетельство Роспатента об официальной регистрации программы для ЭВМ, 4 статьи в научных журналах и сборниках работ конференций, 12 тезисов докладов на конференциях. Общий объем публикаций – 36 авторских листов.

#### **На защиту выносятся:**

1. Имитационная модель, представляющая СРТМ в виде совокупности взаимодействующих СМО и основанная на сочетании объектно-, процессно-событийно- и функционально-ориентированных подходов к описанию поведения системы.
2. Архитектура и алгоритмы программной системы, реализующей предложенную имитационную модель взаимодействия информационных процессов в СРТМ.
3. Использование синтаксически-ориентированного метода описания и оценки вычислительной сложности алгоритмов обработки данных, выполняющихся на узлах СРТМ.

4. Результаты проведенных с использованием предложенной модели имитационных экспериментов по исследованию параметров работоспособности СРТМ.

### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, 4 приложений и списка литературы из 98 наименований, включая работы автора. Диссертация изложена на 168 страницах и содержит 44 рисунка, 28 таблиц и 33 формулы.

### **Содержание работы**

В **первой главе** описываются принципы функционирования и обобщенная схема информационных потоков в СРТМ, а также рассматриваются событийно-ориентированный (Е.Г.Серова, Ю.В.Аксенов, А.М.Робачевский), процессно-ориентированный (А.К.Скуратов, А.И.Бугай, М.Л.Гольдштейн, Н.В.Закурдаев, А.Е.Малышев), объектно-ориентированный (Н.Ф.Бахарова, В.Н.Тарасов, Д.Н.Гладких, А.П. Шибанов А.С.Чернышев) и функционально-ориентированный (В.В.Соснин, В.В.Окольнишников) подходы к их имитационному моделированию.

Проведенный анализ существующих промышленных систем для моделирования функционирования СРТМ и современных разработок в этой области позволил сделать следующие выводы:

- аппарат теории массового обслуживания используется в ряде систем для оценки сетевого трафика, однако не рассмотрено его применение для описания процессов обработки данных на узлах системы.
- отсутствует возможность оценки влияния вычислительной сложности используемых алгоритмов обработки данных на работоспособность СРТМ.
- существующие программные продукты для имитационного моделирования динамических систем или обладают слишком большой универсальностью, затрудняющей их использование для исследования информационных процессов в СРТМ, или ориентированы на решение задач определенного класса, что делает их непригодными для анализа работоспособности СРТМ с произвольной топологией, оборудованием и алгоритмами обработки данных.

Таким образом, актуальной задачей является разработка и программная реализация имитационной модели взаимодействия информационных процессов в СРТМ, основанной на аппарате теории массового обслуживания и комплексном подходе к описанию логики функционирования СРТМ. Предложенная модель должна давать возможность исследования на основе имитационного эксперимента характеристик работы СРТМ в зависимости от ее топологии, параметров конфигурации оборудования и выполняющихся на узлах системы алгоритмов обработки данных при работе в штатном режиме и при возникновении НС.

**Во второй главе** дается описание имитационной модели взаимодействия информационных процессов в СРТМ, внутреннего языка для описания алгоритмов обработки данных, рассматривается архитектура и алгоритмы работы программной системы, реализующей предложенную модель.

Имитационная модель взаимодействия информационных процессов в СРТМ задана в виде вектора:

$$S = \langle G, D, F, L, Time \rangle, \quad (1)$$

где  $G = \langle N, E \rangle$  – взвешенный граф, описывающий архитектуру системы: множеству  $N$  вершин соответствуют узлы СРТМ: датчики, программируемые контроллеры (PLC – programming logical controller), технологические компьютеры (ТК), множеству  $E$  ребер – каналы связи;  $D$  – архив данных;  $F$  – множество функций для реализации алгоритмов обработки данных;  $L$  – КС-грамматика внутреннего языка описания алгоритмов обработки данных;  $Time$  – модельное время. Модельное время задается вектором:

$$Time = \langle ScaleT, TimeCorrection(t) \rangle, \quad (2)$$

где  $ScaleT$  – масштаб временной шкалы, выраженный в модельных единицах (м.е.) имитационной модели;  $TimeCorrection(t)$  – дискретная функция, определяющая способ коррекции таймера модельного времени. Модельное время системы измеряется в условных единицах, не связанных ни с реальным временем, в котором функционирует СРТМ, ни со временем работы процессора компьютера, на котором происходит моделирование. Для коррекции таймера модельного времени выбран метод с переменным шагом.

Для описания логики функционирования СРТМ введено понятие **процесса**, как численного отражения последовательного изменения во времени состояния некоторого параметра в системе. Выделены процессы трех типов: процессы, генерирующие данные; процессы, получающие данные от других процессов без изменений; процессы, вычисляющие значения своих параметров с использованием численных алгоритмов. Это позволяет говорить об использовании процессно-ориентированного подхода к описанию логики работы СРТМ.

Моделирование процессов первого типа осуществляется путем задания функции генерации  $f(t)$ , где  $t$  – модельное время,  $f(t)$  – величина контрольного параметра процесса. Для моделирования передачи данных задаются характеристики каналов связи, и вычисляется объем пакета данных. Процессы третьего типа моделируются заданием функции  $d = g(dataP, t)$ , где  $t$  – момент модельного времени,  $d$  – значение характеризующего процесс параметра. Расчет  $d$  осуществляется на основе данных  $dataP$  процессов первого и второго типов с использованием методов вычислительной математики: проверяется некоторое условие или используется численный метод обработки данных.

Каждый процесс  $p_j$  из множества процессов узла  $n_i$  характеризуется типом  $TypeP$ , законом распределения времени поступления заявок  $A(t)$  и алгоритмом обработки данных, реализованным в виде функции  $f_j \in F$ , которая может записываться в виде суперпозиции других функций множества  $F$ . Такой способ описания алгоритмов обработки данных позволяет говорить о применении функционально-ориентированного подхода при имитационном моделировании взаимодействия информационных процессов в СРТМ.

Обработка данных в модели организована таким образом, что процесс  $p_j$  может запрашивать данные процессов  $\{p_k, \dots, p_m\}$  и только после этого вычислять значение контрольного параметра. Это соответствует обработке по принципу ПОЛИЗ (польской инверсной записи).

На каждом узле  $n_i$  могут одновременно функционировать несколько процессов сбора и обработки данных, поэтому каждой вершине  $n_i$  графа  $G$  сопоставлено множество процессов  $Pn_i$ . Это реализует процессный подход к моделированию передачи и обработки данных в СРТМ. Пусть  $Num$  – количество операций, необходимых для выполнения функции;  $Mem$  – необходимое количество памяти;  $TypeF$  – порядок полинома, определяющего тип сложности алгоритма;  $IndexF$  – массив коэффициентов этого полинома;  $X$  – объем обрабатываемых данных. Тогда множество процессов, выполняющихся на узле СРТМ, запишем в виде:

$$Pn_i = \{p \mid p_j = \langle TypeP, A(t), f \in F, Num, Mem, TypeF, IndexF \rangle\}. \quad (3)$$

Так как события, происходящие в СРТМ, время обработки данных, число и продолжительность сбоев и т.п. зависят от исходных данных, которые могут носить случайный характер, то для моделирования взаимодействия информационных процессов в СРТМ применен аппарат теории массового обслуживания. Для моделирования обработки данных на узле  $n_i$  графа  $G$  предложено использовать СМО типа  $\bar{D}_{numPn_i} / \bar{D}_{numO} / 1 / 1 / FIFO$ , где  $numPn_i$  – количество процессов обработки данных, выполняющихся на узле  $n_i$ ;  $numO$  – количество типов обрабатываемых событий; а в качестве заявок выступают события  $o_i \in O$ , представляющие собой изменение состояния СРТМ или некоторого ее компонента. Множество событий запишем в виде:

$$O = \{o \mid o_i = \langle TypeO, StatusO, PlaceO, ScheduleT, ProcessedT, DataO \rangle\}, \quad (4)$$

где  $TypeO$  – тип события из множества типов событий имитационной модели:  $TypeO \in \{ \text{"Запрос данных"}, \text{"Генерация данных"}, \text{"Нештатная ситуация"}, \dots \}$ ;

$StatusO$  – статус его обработки;  $PlaceO$  – процесс-источник возникновения события;  $ScheduleT$  – момент модельного времени, на который по расписанию запланирована обработка события;  $ProcessedT$  – момент модельного времени, когда диспетчер реально (т.е. с учетом задержек, перепланирования и т.п.) закончил обработку события;  $DataO$  – данные, связанные с произошедшим событием (запрос или результат выполнения запроса).

Для каждого компонента СРТМ в имитационной модели определен список типов событий  $o_i \in O$ , которые могут им инициироваться и обрабатываться, что позволяет говорить об использовании событийного подхода к описанию предметной области. Изучение литературных источников и анализ результатов экспериментов позволили предложить закон распределения времени поступления заявок для событий каждого типа (таблица 1).

Время обработки события зависит от типа заявки  $TypeO$  и характеристик узла  $PlaceO$ , на котором она выполняется, что позволяет учитывать сложность используемых алгоритмов обработки данных и время их выполнения на устройствах, обладающих разным быстродействием.

Для описания работы СМО введены понятия **диспетчера устройства**, как единственного обслуживающего прибора каждой СМО, и **очереди**, как списка



событий, обеспечивающих работу диспетчера. Число мест в очередях диспетчеров узлов задается перед началом процесса моделирования; для некоторых узлов может использоваться неограниченная очередь.

Таблица 1 – Сопоставление событий в СРТМ и в ее модели

Событие в СРТМ	Закон распределения интервалов поступления заявок указанного типа
Программно-аппаратный сбой	Вырожденное распределение, параметры которого выбираются в зависимости от вероятности возникновения НС
Запрос данных	Вырожденное распределение с параметром $f\_request\_data\_periodicity$ (периодичность опроса)
Генерация данных	Вырожденное распределение с параметром $f\_generaty\_periodicity$ (периодичность генерации)
Обработка данных	Вырожденное распределение, параметры которого выбираются в зависимости от типа события $TypeO$ и характеристик узла $PlaceO$
Возобновление работы оборудования после НС	Распределение продолжительности сбоя по нормальному закону
Передача информации по каналам связи	Распределение продолжительности передачи данных по нормальному закону

Дисциплина обслуживания строится по принципу FIFO со следующими дополнениями: постановка события в очередь происходит в зависимости от  $TypeO$ : учитывается приоритет событий; допускается их инициализация по расписанию при наличии или отсутствии связи с другими событиями; выборка события на обслуживание происходит только из головы очереди. Это позволяет событиям типа «НС» обслуживаться первыми, что соответствует положению дел в реальной СРТМ.

Для описания структуры СРТМ используется объектно-ориентированный подход: система задается совокупностью взаимодействующих объектов, моделирующих отдельные узлы. Множество  $N$  вершин графа  $G$  запишем в виде:

$$N = \{n_i | n_i = \langle \langle h_1, h_2, \dots, h_r \rangle | h_j \in Al^+, Pn_i, \bar{D}_{num} Pn_i / \bar{D}_{num} O / 1/1/ FIFO \rangle\}, (5)$$

где  $Al = \{a, b, \dots, z, A, B, \dots, Z\} \cup \{0, 1, 2, \dots, 9\}$  – алфавит модели,  $h_j$  – описания характеристик узла СРТМ (имя устройства, признак работоспособности, объем оперативной памяти, производительность и т.п.), представляющие собой непустые цепочки над алфавитом  $Al$ . Значения производительности и объема памяти узлов системы измеряются в условных единицах и выбираются пропорционально значениям параметров устройств реальной СРТМ на основе соотношения:

$$param\_m = \left[ \frac{param\_SRTM^* (\max\_m - \min\_m) - \min\_SRTM^* \max\_m + \max\_SRTM^* \min\_m}{\max\_SRTM - \min\_SRTM} \right], (6)$$

где  $\min\_m$ ,  $\max\_m$  – минимальное и максимальное значения рассчитываемого параметра в модели для устройств одного уровня архитектуры;  $\min\_SRTM$ ,  $\max\_SRTM$  – минимальное и максимальное значения рассчитываемого параметра в реальной СРТМ для устройств одного уровня архитектуры;  $param\_SRTM$  – значение параметра устройства в реальной СРТМ;  $param\_m$  –

его значение в модели. Значения модельных характеристик выбираются на множестве целых чисел, округление в меньшую сторону позволяет оценить поведение системы при худших характеристиках устройств и больших нагрузках.

Множество  $E$  ребер графа  $G$  запишем в виде вектора:

$$E = \{e | e_i = \langle n_{beg} \in N, n_{end} \in N, \langle k_1, k_2, \dots, k_m \rangle | k_l \in A_l^+ \rangle\}, \quad (7)$$

где  $n_{beg}, n_{end}$  – соединяемые узлы СРТМ,  $k_l$  – описание характеристик линии связи.

Архив данных  $D$  представляет собой базу данных программной системы, реализующей имитационную модель, и определен в следующем виде:

$$D = \{d | d_i = \langle PlaceOTypeQStateQT_1T_2Data \rangle\}, \quad (8)$$

где  $PlaceO$  – источник события;  $TypeO$  – тип события;  $StateO$  – статус обработки события;  $T_1, T_2$  – запланированное и реальное модельное время его обработки;  $Data$  – связанный с обработкой события пакет данных.

Для реализации имитационной модели, описанной формулами (1)-(8), спроектирована программная система. События, относящиеся к логике работы отдельного узла, обрабатываются его диспетчером, обслуживающим собственную очередь. События, необходимые для организации взаимодействия информационных потоков, для моделирования аппаратного взаимодействия и обработки информации, имеющей отношение к модели в целом, обрабатываются в очереди диспетчера среды моделирования, организованной в виде СМО без отказов. Все диспетчеры работают одновременно в параллельных потоках.

Для моделирования физического уровня взаимодействия процессов данные передаются через каналы связи в виде пакетов. Если взаимодействующие процессы находятся на разных узлах, то соединяющий их канал при передаче данных переводится в занятое состояние на время, вычисляемое по формуле:

$$delay\_c = \frac{V_p}{Width_c}, \quad (9)$$

где  $V_p$  – объем передаваемого пакета данных,  $Width_c$  – пропускная способность канала связи.

Для моделирования задержек, возникающих при выполнении обработки данных, используется понятие емкостной сложности  $C(n)$  как минимального количества оперативной памяти, необходимого для выполнения реализующей алгоритм функции, обрабатывающей данные объема  $n$ . Если объем памяти  $ram$  устройства меньше требуемого объема  $Mem\_task$ , то время выполнения функции увеличивается пропорционально штрафу  $k$ :

$$k = \begin{cases} \left\lceil \frac{Mem\_task}{ram} \right\rceil, & ram < C(n) \\ 1, & ram \geq C(n) \end{cases}. \quad (10)$$

Для каждого узла задается его производительность, которая выражается в количестве операций в условную модельную единицу, что позволяет моделиро-

вать выполнение алгоритмов обработки данных на «медленных» и «быстрых» устройствах. Время, необходимое для выполнения функции, требующей  $Num$  операций на устройстве с производительностью  $productivity$ , рассчитывается по формуле:

$$time\_f = \frac{Num}{productivity} . \quad (11)$$

Для каждой функции, реализующей алгоритм обработки данных, задана вычислительная сложность  $T(n)$ , как количество операций, необходимых для выполнения функции. Предложено два метода задания  $T(n)$ . При явном способе задается порядок сложности функции, используемой для моделирования выполняемого алгоритма обработки данных, и массив ее коэффициентов. При неявном способе алгоритм обработки данных описывается на внутреннем языке программирования с КС-грамматикой  $L$ , включающей в себя синтаксические конструкции, обеспечивающие доступ к базе данных  $D$  имитационной системы, а также конструкции для описания алгоритмов обработки данных. Предложенный язык программирования позволяет оперировать целочисленными данными и их массивами. Разрешено использование операций логических, арифметических и сравнения. Операторы языка включают: оператор присваивания, условный оператор, операторы циклов; разрешено использование подпрограмм.

Для определения вычислительной сложности описанного на внутреннем языке программирования алгоритма вызывается построенный на основе метода рекурсивного спуска интерпретатор, работающий вне цикла моделирования. Оценка  $T(n)$  осуществляется с учетом положений классической теории сложности вычислений.

Описана архитектура и программная реализация системы, реализующей предложенную имитационную модель взаимодействия информационных процессов в СРТМ (рис. 1).

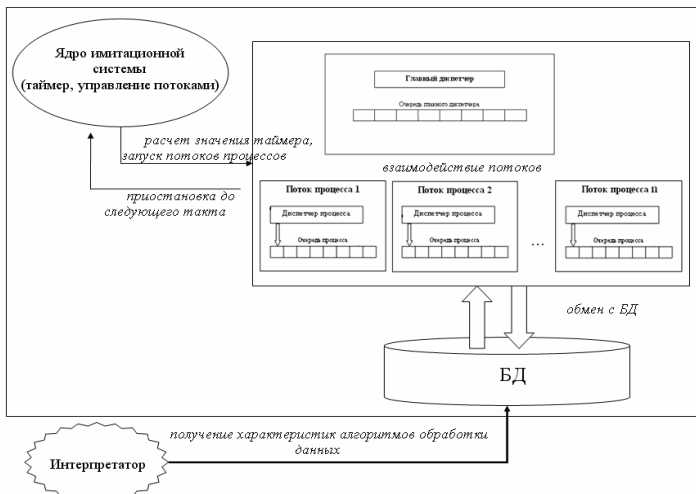


Рис. 1. Архитектура имитационной системы

Разработаны алгоритмы работы ядра системы, спроектирована структура базы данных. На уровне ядра организовано взаимодействие диспетчеров узлов и главного диспетчера системы. На каждой итерации процесса моделирования после анализа состояния всех очередей таймер получает приращение переменной величины. Диспетчеры, в очереди которых имеются события с ближайшим временем наступления, выполняют обработку события. Цикл обработки событий каждого из диспетчеров выполняется в отдельном потоке. Дальнейшее поведение имитационной системы определяется типами обрабатываемых событий.

**В третьей главе** исследуется поведение предложенной имитационной модели взаимодействия информационных процессов в СРТМ при функционировании в штатном режиме и при программно-аппаратных сбоях.

На основе имитационных экспериментов показано, что определяющее значение на коэффициент загрузки СРТМ (12) оказывает выбор параметров СМО (в частности, числа мест в очереди) для реализации подсистемы управления потоками заявок на узлах среднего уровня архитектуры СРТМ.

$$K_l = \frac{T_{work}}{T_{modeling}}, \quad (12)$$

где  $T_{work}$  – время, в течение которого узлы СРТМ были заняты;  $T_{modeling}$  – время моделирования.

При выборе для реализации диспетчеров узлов среднего уровня архитектуры СРТМ СМО с ожиданием и задании процессов, выполняющихся с высокой частотой и требующих большого количества операций, очереди диспетчеров узлов растут экспоненциально. Это сопровождается лавинообразным ростом задержек при обслуживании событий и может привести к НС. Количество событий, отклоненных от обслуживания главным диспетчером, находится на нулевом уровне при любой топологии СРТМ и алгоритмах обработки данных любой сложности.

Предложен следующий алгоритм планирования и обработки НС на узлах и каналах в модели СРТМ. В начале процесса моделирования в очереди главного диспетчера расставляются события типа «Возможная НС». Если устройство/канал активно, предпринимается попытка вывести его из строя. Независимо от того, удалась ли эта попытка, следующее событие этого типа ставится в очередь главного диспетчера на произвольный момент времени, отстоящий от текущего не более чем на  $f\_emergency\_period$ . Если на оборудовании произошла НС, то оно переходит в неактивное состояние и в очередь его диспетчера ставится событие типа «Возобновить работу» (рис.2).

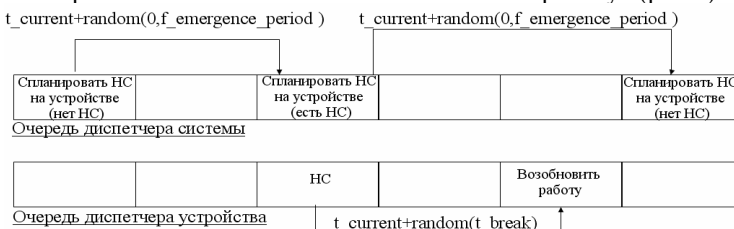


Рис. 2. Очереди событий при планировании и обработке НС

Имитационные эксперименты с моделями СРТМ различной топологии, показали, что при возникновении НС остальные компоненты системы продолжают работать корректно и работоспособность системы в целом не нарушается.

На примере различных моделей СРТМ выполнено тестирование алгоритмов и программного обеспечения построенной имитационной системы, показавшее соответствие поведения предложенной модели логике работы реальной СРТМ и возможность ее применения для исследования взаимодействия информационных процессов сбора и обработки данных в СРТМ.

**В четвертой главе** на примере информационно-измерительного комплекса (ИИК) ТЭЦ Кемеровской области показана адекватность предложенного подхода к моделированию взаимодействия информационных процессов в СРТМ поведению реальной информационно-измерительной системы.

В качестве меры адекватности модели выбрано соотношение:

$$\delta = \frac{\sum |\rho_m - \rho|}{numN}, \quad (13)$$

где  $numN$  – число узлов;  $\rho$  – коэффициент загрузки узла в реальной СРТМ;  $\rho_m$  – коэффициент загрузки узла в имитационной системе.

Расхождение в результатах моделирования и полученных в ходе мониторинга данных достигает 5%-9% и может быть объяснено упрощениями при описании информационных процессов.

Результаты имитационных экспериментов позволили выявить ряд закономерностей, которые целесообразно учитывать при практической реализации СРТМ. Так, увеличение числа датчиков, подключенных к одному PLC, ведет к увеличению задержек при передаче и обработке данных в 1,5 раза при добавлении каждого датчика. При организации топологии «звезда» на уровне ТК нагрузка узлов системы уменьшается на 15%-20% по сравнению со «звездой» на уровне PLC.

Исследована надежность и отказоустойчивость моделируемой СРТМ в случае программно-аппаратных сбоев. При задании длины очереди СМО узла системы, равной 10% от числа обработанных за время моделирования событий среднее время безотказной работы для системы с топологией «звезда» на уровне PLC, составляет 15% от времени моделирования; для систем с топологией «звезда» на уровне ТК – 30%. Среднее время безотказной работы для моделей СРТМ с дублированием устройств разных уровней составило 50%-80%.

Проведено тестирование работы СРТМ на примере применения для обработки данных алгоритмов численного дифференцирования и приближенного вычисления значения функции с использованием интерполяционного многочлена Лагранжа, описанных на внутреннем языке программирования.

Приведен пример использования разработанной имитационной модели для предварительного анализа взаимодействия информационных процессов в системе учета энергоресурсов университетского кампуса. Результаты тести-

рования элементов системы учета энергоресурсов, согласуются с данными, полученными в ходе имитационных экспериментов (рис. 3). Максимальное значение относительного отклонения коэффициентов загрузки узлов в реальной СРТМ и в ее имитационной модели составляет 3%.

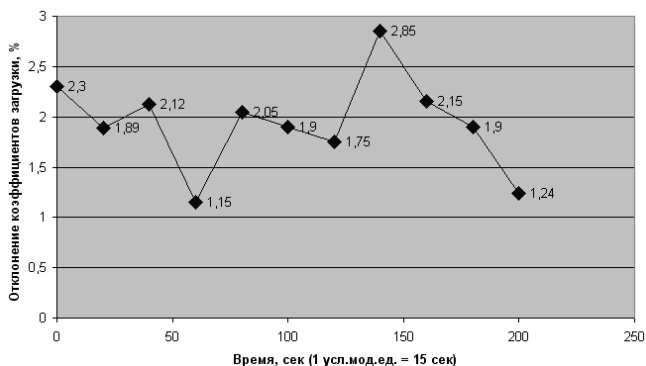


Рис. 3. Отклонение коэффициентов загрузки узлов СРТМ и ее модели

**В приложениях** приведены свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте, справки об использовании результатов диссертационных исследований в лаборатории информационно-измерительных систем, а также в учебном процессе на кафедре вычислительных систем и информационной безопасности АлтГТУ им. И. И. Ползунова, отзыв компании Grid Dynamics (Fremont, CA, USA).

### Основные результаты

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Построена и исследована имитационная модель взаимодействия информационных процессов в системах распределенного технологического мониторинга, базирующаяся на основе принципов теории массового обслуживания и объединяющая функционально-ориентированный, процессно-ориентированный, событийно-ориентированный и объектно-ориентированный подходы к описанию предметной области.
2. Предложены архитектура и алгоритмическое обеспечение программной системы, реализующей предложенную имитационную модель.
3. Предложено применять для оценки временных характеристик используемых на узлах системы распределенного технологического мониторинга алгоритмов обработки данных синтаксически-ориентированный метод их описания.

### Публикации автора по теме диссертации

Работы, опубликованные автором в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства и науки Российской Федерации:

1. Бочкарёва, Е.В. Применение имитационного моделирования для исследования процесса сбора и обработки данных микроконтроллерными устройствами / Е.В. Бочкарёва, Л.И. Сучкова, А.Г. Якунин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2009. – № 3. – С. 158 – 166 (авт. – 3 пл.).
2. Бочкарёва, Е.В. Обработка событий при имитационном моделировании работы распределенной вычислительной системы на основе принципов теории массового обслужи-

вания / Е.В. Бочкарёва, Л.И. Сучкова // Вестник Ижевского государственного технического университета. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2010. – № 1(45). – С. 99 – 102 (авт. – 1,5 п.л.).

3. Бочкарёва, Е.В. Имитационное моделирование процессов сбора и обработки данных в распределенных вычислительных системах / Е.В. Бочкарёва, Л.И. Сучкова, А.И. Харламов, А.Г. Якунин // Ползуновский вестник: измерение, информатизация, моделирование: проблемы и перспективы технологической разработки и применения. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – № 2. – С. 6 – 10 (авт. – 1 п.л.).

Другие работы, опубликованные автором по теме диссертации.

4. Бочкарёва, Е.В. Робастные SCADA-системы с элементами CASE-технологий / Е.В. Бочкарёва, Л.И. Сучкова // Ползуновский альманах. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. – № 3. – С. 31 – 33 (авт. – 1,5 п.л.).

5. Бочкарёва, Е.В. Совершенствование алгоритмов обмена данными в системе оперативного контроля теплового режима / Е.В. Бочкарёва, Л.И. Сучкова, А.Г. Якунин // Информационные технологии и математическое моделирование: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Томск, 2008. – С.203 (авт. – 0,2 п.л.).

6. Бочкарёва, Е.В. Проектирование и реализация компонентов инструментальной среды для моделирования и исследования процессов сбора и обработки данных в распределенных системах / А.Н. Бабенко, Е.В. Бочкарёва, Е.В. Дубинина, Л.И. Сучкова // Наука и молодежь НИМ2009: материалы 5 Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 7 (авт. – 0,1 п.л.).

7. Бочкарёва, Е.В. Анализ событий в системе имитационного моделирования обработки информации в распределенных вычислительных системах / Е.В. Бочкарёва // Математика – Алтайскому краю МАК2009: материалы XII региональной конференции. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 61 – 62.

8. Бочкарёва, Е.В. Архитектура инструментальной системы для моделирования процессов сбора и обработки данных вычислительными устройствами / Е.В. Бочкарёва // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: материалы XXVI Всероссийской научно-технической конференции. – Нижний Новгород: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 4.

9. Бочкарёва, Е.В. Имитационное моделирование процессов обработки и передачи данных в распределенных системах / Е.В. Бочкарёва, Л.И. Сучкова // Методы и алгоритмы принятия эффективных решений (МАПР-09): материалы 17 дистанционной международной научной конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ (ТРТУ), 2009. – С. 8-9 (авт. – 0,9 п.л.).

10. Бочкарёва, Е.В. Исследование функционирования распределенной гетерогенной системы сбора и обработки информации на основе имитационной модели / Е.В. Бочкарёва // Измерение, контроль, информатизация ИКИ-2009: материалы X Международной научно-технической конференции. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 222-225.

11. Бочкарёва, Е.В. Система имитационного моделирования информационных потоков в гетерогенных сетях / Е.В. Бочкарёва, Л.И. Сучкова // Ползуновский альманах. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – № 2. – С. 114 – 118 (авт. – 2 п.л.).

12. Бочкарёва, Е.В. Моделирование передачи и обработки информации в автоматизированных системах оперативного контроля с программируемыми устройствами сбора данных / Е.В. Бочкарёва, Л.И. Сучкова // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии: материалы 4 научно-практической конференции. – Оренбург: Изд-во ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – С. 134-137 (авт. – 1,8 п.л.).

13. Бочкарёва, Е.В. Функционально-ориентированное моделирование вычислительных систем на основе логики систем массового обслуживания / Е.В. Бочкарёва // Приоритетные направления развития науки и технологий: материалы 7 Всероссийской научно-технической конференции. – Тула: Изд-во ТГУ, 2010. – С. 102-104.

14. Бочкарёва, Е.В. Реализация многозадачности в имитационной модели функционирования распределенной гетерогенной вычислительной системы / Е.В. Бочкарёва // Техноло-

- гии Microsoft в теории и практике программирования: материалы 7 Всероссийской научно-практической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 172-174.
15. Бочкарёва, Е.В. Управление потоками заявок при имитационном моделировании гетерогенной распределенной вычислительной системы / Е.В. Бочкарёва // Молодежь Сибири – науке России: материалы Международной научно-практической конференции. – Красноярск: Изд-во Сиб.института бизнеса, управления и психологии, 2010. – С. 1-5
16. Бочкарёва, Е.В. Имитационное моделирование транспортных потоков в распределенных вычислительных системах сбора и обработки данных / Е.В. Бочкарёва, А.И.Харламов // Наука и молодежь НИМ2010: материалы 6 Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 141-144 (авт. – 2,5 п.л.).
17. Бочкарёва, Е.В. Функционально-ориентированный подход к имитационному моделированию процессов в распределенных системах сбора и обработки информации / Е.В. Бочкарёва, Л.И. Сучкова, А.И. Харламов // Измерение, контроль, информатизация ИКИ-2010: материалы XI Международной научно-технической конференции. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 196-200 (авт. – 2 п.л.).
18. Бочкарева, Е.В. Имитационное моделирование работы распределённой вычислительной системы на основе принципов теории массового обслуживания / Е.В. Бочкарева, И.М. Кулагин, Л.И. Сучкова // Измерение, контроль, информатизация ИКИ-2010: материалы XI Международной научно-технической конференции. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 41-44 (авт. – 1,5 п.л.).
19. Бочкарева Е.В., Сучкова Л.И.Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2010613965 Моделирование обработки данных в гетерогенных распределенных системах «DS Simulator». – М.: Роспатент, 2010г.

Подписано в печать 15.09.2011.  
Печать – цифровая. Усл. п.л. 1, 16.  
Тираж 100 экз. Заказ 2011 – .

Отпечатано в типографии АлтГТУ,  
656038, г.Барнаул, пр-т Ленина, 46  
Тел.: (8-3852) 36-84-61

Лицензия на полиграфическую деятельность  
ПЛД №28-35 от 15.07.97 г.