

На правах рукописи

Быстров Александр Васильевич

СПЕЦИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ,
ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ МОДЕЛИ СЕТЕЙ ПЕТРИ

05.13.11 — математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2008

Работа выполнена в Институте систем информатики им. А.П. Ершова
Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Непомнящий В.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Ломазова И.А.
доктор технических наук,
Глинский Б.М.

Ведущая организация: Ярославский государственный университет
имени П.Г. Демидова

Защита состоится 12 декабря 2008 года в 14 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета К 003.032.01 в Институте систем информатики
имени А.П. Ершова СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, пр. Ак.
Лаврентьева, 6

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки Ин-
ститута систем информатики СО РАН

Автореферат разослан 11 ноября 2008 г.

Ученый секретарь
специализированного совета К 003.032.01
к.ф.-м.н.

Мурзин Ф.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Сети Петри — одна из наиболее популярных моделей параллельных систем, используемых как для теоретических исследований, так и практических применений в различных областях — распределенных баз данных и операционных систем, архитектур вычислительных машин, систем и сетей, систем программного обеспечения, протоколов коммуникаций, семантики параллельных языков, систем с элементами искусственного интеллекта и т.д. Модели сетей Петри играют такую же важную роль в изучении параллельных систем, что и конечные автоматы для последовательных. К достоинствам сетей Петри относятся наглядное графическое представление их структуры и эффективные методы анализа их поведения. В течение трех последних десятилетий теория сетей Петри породила большое разнообразие моделей, теорем, алгоритмов и инструментов, предназначенных для спецификации, разработки и верификации параллельных/распределенных систем. Складываются устойчивые системы базовых понятий и общепринятых методик, появляются специальные периодические издания, регулярно проводятся научные конференции, посвященные данной тематике. С помощью сетевых моделей установлен ряд фундаментальных фактов, которые позволили лучше понять природу параллельных вычислений. Так, выделены три базовых отношения между событиями параллельных систем: *причинная зависимость, параллелизм и недетерминированный выбор (конфликт)*. С одной стороны, дальнейшее продвижение в данной области связано с изучением обоснованных с теоретической точки зрения подклассов сетевых моделей (например, элементарных сетевых систем (elementary net systems), систем с условиями/событиями (condition/event systems), сетей со свободным выбором (free choice nets), позволяющих рассматривать сети Петри как математические объекты и формально исследовать их свойства, правила конструирования и преобразования. С другой стороны, появились различные расширения сетей Петри: разнообразные модели временных и стохастических сетей, сети с предикатами (predicate/transition nets), сети Петри с раскрашенными фишками (coloured Petri nets) и т. д., призванные служить математическим инструментом для моделирования и анализа реальных параллельных систем со сложной структурной организацией. Кроме того, в настоящее время также разрабатывается целый ряд инструментальных систем, основанных на моделях сетей Петри.

Среди отечественных исследований по спецификации, моделированию и анализу сложных (в том числе, параллельных/распределенных) систем отметим работы Н.А. Анисимова, О.Л. Бандман, И.Б. Вирбицкайте, В.В. Воеводина, Н.В. Евтушенко, В.А. Захарова, Ю.Г. Карпова, В.Е. Котова, И.А. Ломазовой, В.Э. Малышкина, В.А. Непомнящего, А.К. Петренко, Р.Л. Смелянского, В.А. Соколова, Л.А. Черкасовой.

Таким образом, можно констатировать, что к настоящему моменту уже сложился некоторый "классический" подход к разработке корректных распределенных систем, который, как хорошо известно, имеет ряд ограничений: существует возможность исследования только систем с простой структурной организацией и конечным числом состояний; не до конца решены проблемы описания и изучения параллельной структуры управления асинхронных программ; недостаточно проработаны временные аспекты функционирования распределенных систем; отсутствуют эффективные методы анализа поведения распределенных систем реального времени; часто в инструментальных системах либо добавление новых конструкций осуществляется исходя из требований приложений без определения их формальной семантики, либо не предоставляется широкого набора средств, позволяющих с различных точек зрения исследовать моделируемые системы (кроме того, поведенческий анализ и верификация, как правило, осуществляется посредством симуляции, а значит, рассматривается только ограниченный набор возможных вариантов поведения системы) и т.д.

Поэтому в рамках диссертационной работы предпринимается попытка развить существующий подход с целью преодоления указанных ограничений.

Все вышесказанное говорит об актуальности исследований, проводимых в рамках диссертационной работы.

Цель диссертации состоит в развитии, обосновании и обобщении формальных методов и инструментальных средств проектирования корректных распределенных систем со сложной структурной и функциональной организацией. Достижение цели связывается с решением следующих задач:

1. разработка языков и средств описания и изучения параллельной структуры управления, объединяющих в себе преимущества структурированного и модульного программирования с достоинствами сетевого моделирования;
2. увеличение выразительных мощностей формальных средств за

- счет введения дополнительных возможностей, позволяющих рассуждать о временных характеристиках функционирования распределенных систем;
3. развитие и совершенствование методов компаративной семантики с целью установления взаимосвязей, классификации и унификации различных поведенческих моделей параллелизма, а также моделей реального времени в семантиках интерливинг/"истинный параллелизм";
 4. эффективный анализ, моделирование и валидация распределенных систем со сложной структурой, представленных различными иерархическими и временными расширениями моделей СП.

Методы исследований. В рамках данной работы использовались методы и понятия теории графов, теории множеств, теории алгоритмов, аппарата математической логики, линейного программирования, теоретического программирования. В качестве формальных моделей параллелизма применялись различные классы обобщения структур событий, сетей Петри, сетей-процессов. В экспериментальных исследованиях применялись методы системного и объектного программирования, имитационного моделирования и теории структур данных.

Научная новизна. В результате выполненных исследований автором предложены оригинальные методы решения задач спецификации, моделирования и анализа распределенных систем, имеющих сложную структурную и функциональную организацию. В основе этих методов лежат разработанные автором язык управления функционированием параллельных асинхронных программ, средства описания и изучения параллельной структуры управления асинхронных программ, алгоритмы структурного и семантического анализа поведения систем реального времени, методы моделирования и валидации иерархических сетевых моделей распределенных систем.

Практическая значимость. Разработанные автором диссертации методы могут лечь в основу широкого спектра промышленных программных систем: блоков автоматического распараллеливания в трансляторах и интерпретаторах, систем построения семантических представлений и эквивалентных преобразований параллельных процессов, систем моделирования и верификации процессов реального времени, включая коммуникационные протоколы. Результаты диссертационной работы были успешно реализованы в рамках транслятора языка параллельного программирования Барс, а также экспериментальных систем

RT-MEC (Real-Time Model and Equivalence Checker), XNES (eXtensible NEtworks Simulator), SPV(SDL Protocol Verifier), которые поддерживают различные методы проектирования, анализа, верификации, валидации сложных распределенных систем и систем реального времени, представленных различными сетевыми моделями.

Достоверность и обоснованность теоретических положений диссертации обеспечиваются корректным использованием математического аппарата, строгими математическими доказательствами утверждений и теорем, проведением экспериментов на имитационных моделях.

Представление работы. Основные идеи и конкретные результаты диссертационной работы обсуждались на следующих международных научных симпозиумах, конференциях и семинарах: 2-й Международный симпозиум по информатике в России (Екатеринбург, 2007). 13th Intern. Workshop "Concurrency: Specification and Programming" (Berlin, 2004); 1-ая и 2-ая Всероссийская научная конференция "Методы и средства обработки информации" (Москва: МГУ, 2003, 2005); 4-ый Сибирский Конгресс "Прикладная и Индустриальная Математика" (Новосибирск, 2000); Международный семинар "Распределенная обработка информации" (Новосибирск, 1998); 1st Intern. Workshop "Formal Description Technique, ESTELLE'98" (Evry, France, 1998); Intern. Workshop "Discrete Event Systems" (Cagliari, Italy, 1998); Intern. Conference "Parallel Computing in Electrical Engineering"(Bialystok, Poland, 1998); 3rd and 5th Intern. Conference "Parallel Computing Technologies" (St. Petersburg, Russia, 1995, 1999); I-ая Всесоюзная конференция "Проблемы создания супер-ЭВМ, супер-систем и эффективность их применения (Минск, 1987))";

Кроме того, доклады по теме работы были сделаны на ряде семинаров Института информатики Университета г. Хильдесхайма (Германия), Института прикладной математики (г. Гренобль, Франция), Института кибернетики (г. Киев), Института программных систем РАН (г. Переславль-Залесский), Института математики СО РАН (г. Новосибирск), Института систем информатики СО РАН (г. Новосибирск), кафедр Новосибирского государственного университета и др.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, в том числе 3 — в изданиях, входящих в Перечень ВАК; 1 — монография; 9 — в трудах международных симпозиумов, конференций и семинаров; 5 — в трудах национальных симпозиумов, конференций и семинаров; 9 — в сборниках научных трудов. В конце автореферата

приведен список основных публикаций.

Участие в проектах и грантах. Результаты исследований, изложенные в диссертации, легли в основу ряда научно-исследовательских проектов, поддержанных в разные годы различными грантами Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 93-01-00986, 96-01-01655, 00-01-00898, 03-07-90331в, 07-07-00173а), Фондом Фольксваген (грант I/70 564), Фондом ИНТАС (грант 1010-СТ93-0048), Фондом ИНТАС-РФФИ (грант 95-0378) и др.

Личный вклад. Диссертация содержит результаты работ, выполненных автором в Вычислительном центре СО РАН с 1974 по 1990 гг. и в Институте систем информатики СО РАН с 1990 по 2008 гг.

Во всех работах опубликованных в соавторстве автор участвовал в постановке задач, разработке методов решения и анализе результатов. Также в работах [1,14,19,20,24,25,28] диссертантом предложены синтаксис и семантика подязыка управления языка Барс, алгоритмы управления вычислениями и программно реализованы соответствующие компоненты транслятора и симулятора. Результаты, изложенные в работах [6,7,10] получены автором самостоятельно, за исключением того, что разработка структуры и функций системы RT-MEC была выполнена совместно с И.Б. Вирбицкайте. В работах [2,3,5,8,9,11,15-18,26,27] диссертант принимал участие в создании модели ИВТ-сетей, им сформулированы требования и разработана архитектура программных комплексов XNES/SPV, он также участвовал в их программной реализации и отладке. Работы [21-23] написаны в неделимом соавторстве.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, разбитых на разделы, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 136 с., основной текст - 126 с., приложение - 10 с., библиографический список - 121 наименование. Работа содержит 39 рисунков и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность рассматриваемых вопросов; формулируются цели исследований, представленных в диссертации, обосновывается научная новизна результатов и практическая значимость работы, приводится краткое описание содержания диссертации по главам.

В **первой главе** определяются основные понятия, связанные со структурой и поведением различных моделей сетей Петри, которые используются в тексте диссертации. В частности, рассматриваются обычные СП,

СП со свободным выбором, регулярные и иерархические СП, дискретно-временные и непрерывно-временные СП, раскрашенные СП, временные и иерархические раскрашенные СП, а также СП с приоритетами. В конце главы представляется краткий аналитический обзор инструментальных систем, базирующихся на сетевых моделях. При этом обосновываются достоинства ряда программных комплексов, среди которых отмечается система PEP (Programming Environment based on Petri nets).

Вторая глава посвящена сетевым средствам спецификации управления в языке параллельного программирования Барс, базирующегося на асинхронной модели вычислений.

В разделе **2.1 структуры управления** задаются формулами управления на основе иерархических сетей. Формулы управления описывают статическое управление, накладываемое на асинхронную программу. Спусковые функции, указывающие условия, при которых могут начаться действия, заданные в модуле, являются механизмом динамического управления.

В разделе **2.2** обсуждаются принципы использования "жестких" и программируемых *типов управления*, а также приводятся примеры их описания и применения для конструирования структурированных параллельных программ. Типы управления задают классы структур управления, обладающих некоторым общим свойством, например, семейство последовательных структур, конвейерных структур и т.п.

В разделе **2.3** описывается язык параллельного программирования Барс, базирующийся на асинхронной модели вычислений. Этот язык разрабатывался в 1980-1985 гг. под руководством В.Е. Котова в рамках выполняемого в Вычислительном центре СО АН СССР научно-исследовательского проекта Марс (модульные асинхронные развиваемые системы). Основными чертами языка являются: наличие развитых средств описания разнообразных структур управления; непроцедурная форма записи применения операций к сложным структурам данных; модульность и развиваемость. Язык Барс представляет собой систему из ортогональных взаимодействующих подязыков: С-язык содержит средства описания управления (см. ниже), Е-язык содержит средства описания выражений, М-язык содержит средства описания работы с памятью, кроме того, выделен специальный подязык для конструирования и преобразования (абстрактных) структур данных (К-язык) и вспомогательные подязыки для описания типов данных.

В разделе **2.4** рассматривается синтаксис и семантика подязы-

ка управления (С-языка), позволяющего описывать сложные управляющие взаимодействия и в то же время основывающегося на относительно простом формальном семантическом базисе.

Основной конструкцией С-языка является формула управления, составленная из операторов (модулей) языка как аргументов и из операций управления. Оператору соответствует атомарная сеть, состоящая из единственного перехода (простого в случае простого оператора и составного в случае составного оператора или модуля). Операции управления — это алгебраические операции над сетями: операции *присоединения*, операции *исключения*, операции *наложения*, операции *итерация*, операция *разметки*. Таким образом, семантика структуры управления, заданной формулой управления, представима регулярной или иерархической сетью. Выделены два типа связей по управлению между модулями и операторами Барс-программ. К первому относятся связи, зависящие от значений, хранящихся в памяти, ко второму типу — безусловные связи, зависящие от (программных) событий.

Компонент транслятора языка Барс, осуществляющий перевод структур управления во внутреннюю форму (расширенное сетевое представление) реализован на языке Си.

В **разделе 2.5** описывается симулятор иерархических сетей с ожиданием, являющийся основой интерпретатора управления для Барс-программ. Процесс управления функционированием обычной (неиерархической) сети достаточно прост, однако ситуация меняется при симуляции функционирования сетей сложной структуры. Для каждого уровня иерархии необходим свой экземпляр управления. Таким образом, симулятор можно представить как универсальную процедуру генерации независимых экземпляров процедуры управления функционированием составного перехода. Такой экземпляр генерируется для каждого составного перехода, когда он становится активным. Соответствующий экземпляр процедуры организует локальное управление работой перехода в течение всего времени его активности и исчезает после его завершения. В иерархической сети два и более составных перехода могут одновременно находиться в активном состоянии, и, следовательно, несколько экземпляров процедуры управления работают параллельно. В случае, когда некоторые составные переходы сети имеют общее стороннее место, при ее функционировании может возникнуть конфликтная ситуация, когда локальные управления переходов обращаются к этому месту. Для разрешения таких конфликтов предложена специальная процедура

арбитража.

Третья глава посвящена анализу временных сетевых моделей посредством системы RT-МЕС. В качестве моделей распределенных систем реального времени рассматриваются модель дискретно-временной сети Петри (ДВСП) $\mathcal{DTN} = (P, T, F, M_0, D)$ (с функцией D , сопоставляющей каждому переходу целочисленную временную длительность его срабатывания) и модель непрерывно-временной сети Петри (НВСП) $\mathcal{CTN} = (P, T, F, M_0, D)$ (с функцией D , сопоставляющей каждому переходу временной интервал с целочисленными границами его срабатывания).

В разделе **3.1** разрабатываются методы структурного анализа НВСП. Считается, что НВСП имеет *корректное таймирование*, если $D(t_1) \cap D(t_2) \neq \emptyset$ для всех $\bullet t_1 \cap \bullet t_2 \neq \emptyset$.

Теорема 3.1. Пусть $N = (P, T, F, M_0)$ — ограниченная (безопасная) СП. Тогда $\mathcal{CTN} = (N, D)$ — ограниченная (безопасная) НВСП при любом корректном таймировании D .

Теорема 3.2. Пусть $N = (P, T, F, M_0)$ — живая СП, удовлетворяющая следующим условиям: $\forall p \in P \diamond |p^\bullet| \geq 1$ и $\forall p, q \in P \diamond p^\bullet \cap q^\bullet \neq \emptyset \Rightarrow p^\bullet \subseteq q^\bullet \vee q^\bullet \subseteq p^\bullet$. Тогда $\mathcal{CTN} = (P, T, F, M_0, D)$ — живая НВСП при любом корректном таймировании.

Теорема 3.3. Пусть $\mathcal{CTN} = (P, T, F, M_0, D)$ — живая (дивергентная, ограниченная, безопасная) НВСП с корректным таймированием. Тогда $N = (P, T, F, M_0)$ — живая (дивергентная, ограниченная, безопасная) СП.

Далее приводятся алгоритмы структурного анализа некоторых поведенческих свойств непрерывно-временной СП со свободным выбором (НВССВ).

Алгоритм А1 осуществляет анализ живости ограниченных НВССВ.

Алгоритм А2.а предназначен для построения начального состояния, при котором исходная непрерывно-временная структурированная сеть будет живой и безопасной (сеть является структурированной, если существует начальное состояние, при котором НВССВ является живой и ограниченной).

Алгоритм А2.б производит углубленный анализ ограниченности непрерывно-временных структурированных сетей — определяет максимальное количество фишек для каждого места.

Алгоритм А3 предназначен для анализа свойства дивергентности НВССВ при заданном множестве внутренних переходов.

Для всех разработанных алгоритмов даны полиномиальные оценки их временной сложности и показана их корректность.

В разделе 3.2 строится семантика "истинного" параллелизма ДВСП и НВСП в терминах временных первичных структур событий и временных локальных структур событий соответственно.

Для ДВСП устанавливается изоморфизм между множеством $RSS(TESS_{DTN})$ достижимых временных конфигураций временной первичной структуры $TESS_{DTN}$, упорядоченным отношением смены конфигураций (\rightarrow), и множеством $STP(DTN)$ временных бесконфликтных сетей-процессов, упорядоченным отношением вложения (\subseteq).

Теорема 3.6. Для ДВСП DTN верно, что частично-упорядоченные множества $(RSS(TESS_{DTN}), \rightarrow)$ и $(STP(DTN), \subseteq)$ изоморфны.

Далее вводится понятие временных локальных структур событий и разрабатывается семантика "истинного параллелизма" для безопасных НВСП. Приводится построение, позволяющее по безопасной НВСП CTN получить временную локальную структуру событий $tptes(CTN)$ такую, что множество $seq(SFS(CTN))$ последовательностей шагов НВСП, упорядоченное отношением вложения (\subseteq), и множество $ExecSet(tptes(CTN))$ выполнений временной локальной структуры событий, упорядоченное отношением вложения (\subseteq), изоморфны.

Теорема 3.7. Для НВСП CTN верно, что частично-упорядоченные множества $(seq(SFS(CTN)), \subseteq)$ и $(ExecSet(tptes(CTN)), \subseteq)$ изоморфны.

В разделе 3.3 предлагается программный комплекс RT-MEC (Real-Time Model and Equivalence Checker), поддерживающий спецификацию, валидацию и верификацию параллельных систем реального времени, представленных различными моделями временных сетей Петри, и функционирующий на базе системы PER. При рассмотрении структуры и функций комплекса особое внимание уделяется модулям, поддерживающим анализ, симуляцию и верификацию временных расширений сетей Петри. В комплексе RT-MEC анализ осуществляется посредством исследования структуры моделируемой системы, валидация — путем имитационного моделирования (симуляции), а верификация — с помощью как "проверки модели", так и проверки на поведенческую эквивалентность. Отличительная черта комплекса RT-MEC состоит в том, что делается попытка объединить в единое целое различные методы анализа и верификации распределенных систем реального времени с возможностью последующего их сравнения. Также приводятся резуль-

таты экспериментов, проведенных средствами RT-MEC.

Четвертая глава посвящена разработке и реализации программного комплекса XNES (eXtended Net Editor and Simulator), являющегося одним из основных компонент системы SPV (SDL Protocol Verifier), предназначенной для проектирования, анализа и верификации протоколов коммуникаций, представленных моделями ИВТ-сетей (модификациями иерархических временных раскрашенных сетей Петри Йенсена). XNES позволяет работать с сетевыми моделями, как полученными в результате трансляции с языков спецификаций (SDL, Estelle), так и построенными непосредственно в XNES, а также импортировать и экспортировать модели для использования совместно с другими системами. Комплекс XNES реализован с использованием языка программирования Python, открытой библиотеки Petri Net Kernel и открытого формата хранения PNML (Petri Net Markup Language).

В **разделе 4.1** описываются иерархические временные типизированные сети Петри с приоритетами (ИВТ-сети). Дополнительно к базовым множествам цветов, используемым в раскрашенных сетях Петри и соответствующим стандартным типам целых, вещественный, строковый, булевский, в ИВТ-сетях вводятся типы массив и запись. В ИВТ-сети также могут присутствовать *места-очереди*. Новая фишка в таком месте помещается в очередь и остается недоступной, пока из места не будут извлечены все фишки, поступившие до нее. В отличие от дискретно-временных раскрашенных сетей Петри в ИВТ-сетях для моделирования задержек используется непрерывно-временной механизм Мерлина. В ИВТ-сети переходу также может быть приписан целочисленный приоритет, определяющий выбор перехода для срабатывания из нескольких потенциально возможных. С помощью специального типа *слоя* в ИВТ-сетях поддержан механизм так называемой многослойности, который допускает одновременную работу (фрагмента) сети на нескольких экземплярах данных. Это, в частности, позволяет естественно моделировать динамические конструкции языка спецификаций SDL. Предполагается, что ИВТ-сети являются *квазибезопасными* в том смысле, что при любом функционировании сети каждое (многослойное) место содержит не более одной фишки в каждом слое (не более одной очереди для мест-очерей).

В **разделе 4.2** рассматриваются структура и функции программного комплекса XNES. Основные модули XNES: графический редактор для построения сетевых моделей; симулятор для имитационного моде-

лирования и отладки ИВТ-сетей; трассировщик для протоколирования сеанса симуляции; визуализатор для построения высоко-уровневой визуализационной модели протокола; подключаемые модули (плагины) для расширения возможностей системы XNES.

В многооконном графическом *редакторе* ИВТ-сеть представляется иерархией страниц, на каждой из которых изображена сеть в виде помеченного ориентированного графа. Средствами редактора осуществляется модификация сетевой модели с непрерывным контролем синтаксической корректности. Поддержано сопоставление элементов сетевой модели и конструкций спецификации на языке SDL/Estelle, из которых они получены в результате трансляции.

Симулятор интегрирован с редактором и визуализирует функционирование ИВТ-сетей. Симулятор может работать как в пошаговом, так и в автоматическом режимах. В пошаговом режиме пользователю предоставлен полный контроль над процессом симуляции. В автоматическом режиме выбор возможного события на очередном шаге симуляции осуществляется случайным образом. Есть средства отладки модели, например, задание условий, при достижении которых процесс симуляции приостанавливается.

Трассировщик протоколирует сеанс симуляции, предоставляя следующие возможности: создание в процессе симуляции контрольных точек и навигацию по ним; прямое и обратное воспроизведение сохраненного протокола симуляции.

Визуализатор осуществляет построение специальной модели, которая оперирует терминами, естественными для исходной системы (протокола). Построенная визуализационная модель носит подчиненный характер, все ее поведение полностью определяется поведением базовой сетевой модели в ходе реального сеанса имитационного моделирования, но поведение протокола отображается в визуализационной модели в более наглядной форме.

Плагины позволяют без модификации ядра системы легко подключать независимые модули, расширяющие или изменяющие ее функциональность. В системе XNES такой механизм реализован на основе динамической типизации и интерпретируемости языка Python.

Далее рассматриваются результаты экспериментов, проводимых с использованием системы XNES с сетевыми моделями известных протоколов таких, как ATM-R-протокол, InRes-протокол, i-протокол и кольцевой протокол RE.

В **заключении** перечисляются основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы.

В **приложении** приводятся основные теоретические результаты и алгоритмы анализа свойств, известные из литературы для класса сетей Петри со свободным выбором.

Основные результаты, полученные в диссертации

1. Разработаны типы управления в языке асинхронного параллельного программирования Барс. Предложены синтаксис и семантика S-языка — языка управления функционированием Барс-программ. Разработаны и программно реализованы компонент транслятора языка Барс, осуществляющий перевод структур управления S-языка в расширенное сетевое представление, и симулятор иерархических сетей с ожиданием, являющийся основой интерпретатора управления для Барс-программ.
2. Предложены методы структурного анализа поведенческих свойств непрерывно-временных сетей Петри со свободным выбором. Даны оценки сложности разработанных алгоритмов и доказана их корректность. Для различных временных расширений сетей Петри введена семантика "истинного параллелизма" в терминах временных структур событий, установлены взаимосвязи между данным семантическим представлением и временными сетями-процессами. Также предложена и программно реализована экспериментальная система RT-МЕС, поддерживающая методы спецификации, анализа, верификации параллельных систем реального времени, представленных различными моделями временных сетей Петри. Средствами RT-МЕС проведены эксперименты, демонстрирующие целесообразность и эффективность предложенных формальных методов.
3. Разработан и реализован программный комплекс XNES (eXtended Net Editor and Simulator), являющийся одним из основных компонент системы SPV (SDL Protocol Verifier), предназначенной для проектирования, анализа и верификации протоколов коммуникаций, представленных моделями ИВТ-сетей (модификациями иерархических временных раскрашенных сетей Петри). С помощью комплекса проведены эксперименты с рядом протоколов коммуникаций с целью анализа их корректности, включая сетевые модели таких известных протоколов, как InRes-протокол, ATMR-протокол, i-протокол и кольцевой протокол RE.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК:

1. Бульонков М.А., Быстров А.В., Дудоров Н.Н., Котов В.Е. Базовый язык параллельного программирования Барс // Программирование. – 1986. – № 6. – С. 32–40.
2. Непомнящий В.А., Алексеев Г.И., Быстров А.В., Куртов С.А., Мыльников С.П., Окунишникова Е.В., П.А. Чубарев П.А., Чурина Т.Г. Использование сетей Петри для верификации распределенных систем, представленных на языке Estelle // Известия академии наук. Теория и системы управления. – 1999. – N. 5. – С. 105–116.
3. Непомнящий В.А., Алексеев Г.И., Быстров А.В., Мыльников С.П., Окунишникова Е.В., П.А. Чубарев П.А., Чурина Т.Г. Верификация коммуникационных протоколов, представленных на языке Estelle с помощью сетей Петри высокого уровня // Программирование. – 2001. – № 2. – С. 18–30.

Публикации в трудах международных конференций:

4. Быстров А.В. Синхросети – средство описания взаимодействия асинхронных процессов // Proc. 4th International Conference of Young Computer Scientists. – Bratislava, 1984. – P. 52–56.
5. Nepomniaschy V.A., Alekseev G.I., Bystrov A.V., Churina T. G., Mylnikov S. P., Okunishnikova E. V. Petri net modelling of Estelle-specified communication protocols // Proc. 3rd Intern. Conference PaCT-95, St.-Petersburg, Russia, 1995. Lecture Notes in Computer Science . – 1995. – Vol. 964. – P. 94–108.
6. Быстров А.В., Вирбицкайте И.Б. Автоматический анализ и верификация распределенных систем реального времени // Тр. 6-ого межд. семинара "Распределенная обработка информации" (РОИ'98 & DDP'98). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. – С. 236–240.
7. Bystrov A.V., Virbitskaite, I.B. RT-Mec: a Tool for Validation and Verification of Petri Nets with Time Parameters // Proc. Intern. Workshop on Discrete Event Systems. – Italy, Cagliari, 1998. The IEE Publisher, London, 1998. – P. 510–514.
8. Nepomniaschy V.A., Alekseev G.I., Bystrov A.V., Churina T.G., Mylnikov S.P., Okunishnikova E.V. Towards Verification of Estelle-specified Communication Protocols: Coloured Petri Net Approach // Proc. Intern. Conf. on Parallel Computing in Electrical Engineering, – Poland, Bialystok, 1998. – P. 141–147.
9. Nepomniaschy V.A., Alekseev G.I., Bystrov A.V., Churina T.G., Myl-

- nikov S.P., Okunishnikova E.V. EPV — Petri Net Based Estelle Protocol Verifier // Proc. 1st Intern. Workshop on the Formal Description Technique Estelle. – France, Evry, 1998. – P. 101–108.
10. Bystrov A.V., Virbitskaite I.B. Implementing Model Checking and Equivalence Checking for Time Petri Nets by the RT-MEC Tool // Proc. 5th Intern. Conf. PaCT-99, St-Petersburg, Russia, 1999. – Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 1999. – Vol. 1662. – P. 194–200.
11. Nepomniaschy V.A., Argirov V.S., Beloglazov D.M., Bystrov A.V., Churina T.G., Mashukov M.Yu., Novikov R.M. Modeling and verification of SDL specified distributed systems using high-level Petri nets // Proc. 13th Intern. Workshop "Concurrency, Specification and Programming", Berlin, 2004. – Humboldt University, Berlin. – Informatik-Bericht 170. – P. 100-111.
12. Nepomniaschy V.A., Alekseev G.I., Argirov V.S., Beloglazov D.M., Bystrov A.V., Chetvertakov E.A., Churina T.G., Mylnikov S.P., Novikov R.M. Application of Modified Coloured Petri Nets to Modeling and Verification of SDL Specified Communication Protocols // Proc. 2-nd Intern. Symp. on Computer Science in Russia, Ekaterinburg, 2007. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 2007. – Vol. 4649. – P. 303–314.

Публикации в трудах отечественных конференций:

13. Быстров А.В. 8 Сетевые средства синхронизации процессов // Тр. Всесоюзного научно-технического семинара "Программное обеспечение многопроцессорных систем". – Калинин, 1985. – С. 44–46.
14. Бульонков М.А., Быстров А.В., Дудоров Н.Н., Касперович Д.А., Чурина Т.Г. Опыт реализации языка параллельного программирования БАРС // Тр. I-ой Всесоюзной конференции "Проблемы создания супер-ЭВМ, супер-систем и эффективность их применения". – Минск, 1987. – Ч. I. – С. 113–114.
15. Непомнящий В.А., Алексеев Г.И., Быстров А.В., Мыльников С.П., Окунишникова Е.В., П.А. Чубарев П.А., Чурина Т.Г. Верификация коммуникационных протоколов, представленных на языках Estelle и SDL // Тр. 4-ого сибирского конгресса "Прикладная и индустриальная математика". – Новосибирск: Институт математики СО РАН, 2000. – С. 123.
16. Непомнящий В.А., Алексеев Г.И., Аргиров В.С., Быстров А.В., Мыльников С.П., Новиков Р.М., Чурина Т.Г. Моделирование и верификация коммуникационных протоколов, представленных на языке SDL, с помо-

щью сетей Петри высокого уровня // Тр. 1-ой Всероссийской научной конференции "Методы и средства обработки информации". – Москва: МГУ, 2003. – С. 454-460.

17. Непомнящий В.А., Алексеев Г.И., Аргиров В.С., Белоглазов Д.М., Быстров А.В., Машуков М.Ю., Москвин С.О., Мыльников С.П., Новиков Р.М., Семенов И.А., Четвертаков Е.А., Чурина Т.Г. Программный комплекс SPV для симуляции, анализа и верификации SDL спецификаций коммуникационных протоколов // Тр. 2-ой Всероссийской научной конференции "Методы и средства обработки информации". – Москва: МГУ, 2005. – С. 407–413.

Публикации в сборниках научных трудов и монографии:

18. Непомнящий В.А., Алексеев Г.И., Быстров А.В., Куртов С.А., Мыльников С.П., Окунишникова Е.В., Чубарев П.А., Чурина Т.Г. Верификация Estelle спецификаций распределенных систем посредством раскрашенных сетей Петри. - Новосибирск: ИСИ СО РАН, 1998. – 140 с.

19. Быстров А.В., Дудоров Н.Н., Котов В.Е. О базовом языке системы MAPC // Сб.: Языки и системы программирования. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1979. – С. 85–106.

20. Быстров А.В., Городня Л.В., Дудоров Н.Н. Основные черты базового языка // Высокопроизводительные вычислительные системы. – Т. 11. – Москва: ИПУ АН СССР, 1981. – С. 32–38.

21. Быстров А.В., Городня Л.В., Котов В.Е. Сетевой подход к преобразованию программ и процессов // Сб.: Оптимизация и преобразование программ. – Ч. 1. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1983. – С. 114-222.

22. Быстров А.В., Городня Л.В. Обработка исключительных ситуаций в асинхронных программах // Сб.: Теоретические и прикладные вопросы параллельной обработки информации. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984. – С. 91-99.

23. Бульонков М.А., Быстров А.В., Дудоров Н.Н. Сети с синхронизацией – функционирование и корректность // Сб.: Теория программирования и средства описания параллельных дискретных систем. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1985. – С. 115–127.

24. Бульонков М.А., Быстров А.В., Дудоров Н.Н., Касперович Д.А., Чурина Т.Г. Опыт реализации языка параллельного программирования BARC на ЭВМ последовательной архитектуры // Сб.: Вычислительные системы и программное обеспечение. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1986. – С. 78–88.

25. Бульонков М.А., Быстров А.В., Дудоров Н.Н., Касперович Д.А., Чу-

рина Т.Г. Система программирования на базе языка параллельного программирования Барс // Сб.: Архитектура и программное обеспечение многопроц. выч.комплексов. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1988. – С. 98–104.

26. Алексеев Г.И., Быстров А.В., Мыльников С.П., Реализация системы проектирования сетевых моделей в MS-WINDOWS // Сб.: Проблемы теоретического и экспериментального программирования. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1993. – С. 73–80.

27. Alekseev G.I., Bystrov A.V., Churina T.G., Mylnikov S.P. Petri-net based environment for the specification, analysis and simulation of concurrent systems // Specification, Verification and Net Models of Concurrent Systems. – Novosibirsk: IIS SB RAS, 1994. – P. 116–127.

Прочие:

28. Бульонков М.А., Быстров А.В., Дудоров Н.Н., Котов В.Е. Базовый язык параллельного программирования для многопроцессорных систем БАРС. (Описание языка) // Алгоритмы и программы. – № 4(61). – Москва: ВМТМ Центр, 1984. – С. 23–25.

29. Бульонков М.А., Быстров А.В., Дудоров Н.Н., Котов В.Е. Предварительное описание языка Барс // Препринт ВЦ СО АН ССР. – № 556. – Новосибирск: ВЦ СО АН ССР, 1985. – 44 с.

30. Быстров А.В. Структурный анализ поведения непрерывно-временных сетей Петри // Препринт ИСИ СО РАН ССР. – № 137. – Новосибирск: ИСИ СО РАН. – 2006. – 30 с.

Подписано в печать
Формат бумаги 60×84 1/16
Тираж 100 экз.

___. ___. 2008.
Усл. печ. л. 1
Заказ _____

Центр оперативной печати “Оригинал 2”
г.Бердск, ул. Островского, 55, оф. 02, тел. (383) 214 45 35