

На правах рукописи

Грибовская Наталия Сергеевна

Теоретико-категорное исследование
эквивалентностей параллельных моделей
с реальным временем

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск, 2004

Работа выполнена на кафедре вычислительных систем механико-математического факультета Новосибирского государственного университета

Научный доктор физико-математических наук
руководитель: Вирбицкайте Ирина Бонавентуровна

Официальные доктор физико-математических наук
оппоненты: Ломазова Ирина Александровна

доктор технических наук
Бандман Ольга Леонидовна

Ведущая Томский
организация: политехнический университет

Защита состоится 28 декабря 2004 года в 16 часов на заседании диссертационного совета К003.032.01 в Институте систем информатики им. А. П. Ершова Сибирского отделения РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале ИСИ СО РАН (г. Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 6).

Автореферат разослан ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
К003.032.01

Мурзин Федор Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В последние годы большой и устойчивый интерес проявляется к формальным средствам моделирования, анализа и верификации параллельных/распределенных систем, имеющих сложную структурную и функциональную организацию. Такими системами, например, являются вычислительные машины и комплексы с параллельной и распределенной структурой, коммуникационные протоколы, системы управления технологическими процессами и т.д. Процесс верификации и анализа таких систем — нетривиальная задача, требующая для своего решения фундаментальных исследований.

Среди отечественных исследований в этой области отметим работы Н.А. Анисимова, О.Л. Бандман, И.Б. Вирбицкайте, В.В. Воеводина, В.Е. Котова, И.А. Ломазовой, В.А. Соколова, В.А. Непомнящего, Л.А. Черкасовой, а среди зарубежных — работы Г. Винскеля, М. Нильсена, В. Пратта, М. Хеннеси, Р. Милнера, Дж.-П. Катоена, Д. Мерфи, Л. Чайя.

В течение трех последних десятилетий теория параллелизма породила большое разнообразие моделей, теорем, алгоритмов и инструментов, предназначенных для описания и исследования параллельных/распределенных систем. К настоящему времени центральную роль среди формальных моделей теории параллелизма занимают следующие: деревья синхронизации, системы переходов, системы переходов с независимостью, асинхронные системы переходов, структуры событий, сети Петри и т.д.

Для классификации формальных моделей различают модели с *интерливинговой семантикой* и с семантикой *истинного параллелизма*. При интерливинговом подходе параллелизм событий моделируемой системы линеаризуется, т.е. моделируется последовательной реализацией параллельных событий в произвольном недетерминированном порядке. Из вышеупомянутых моделей к этой группе относятся системы переходов и деревья синхронизации. Альтернативный подход — истинный параллелизм — предполагает, что все события системы изначально считаются независимыми. Кроме того, отношение причинной зависимости на событиях задается частичным порядком, а отношение параллелизма — отсутствием такого порядка. Типичные представители этого подхода — сети Петри, частично упорядоченные множества, структуры событий, системы переходов с независимостью и др.

Большое многообразие моделей, предложенных в теории параллелизма, требует их систематизации и унификации. Часто отношения между моделями могут быть охарактеризованы в терминах пове-

денческих эквивалентностей. В настоящее время для параллельных и распределенных систем существует большое разнообразие эквивалентностных понятий. Наиболее известными являются три подхода — трассовый, тестовый и бисимуляционный. При трассовом подходе сравниваются языки, порождаемые системами. При бисимуляционном подходе две системы считаются эквивалентными, если внешний наблюдатель не может обнаружить различий в поведении этих систем с учетом точек недетерминированного выбора. При тестовом подходе поведение системы исследуется посредством набора тестов.

Последнее десятилетие для описания и изучения параллельных систем и процессов стали активно использоваться методы теории категорий, которые позволяют классифицировать и унифицировать различные модели параллелизма. Одно из наиболее широко применяемых теоретико-категорных понятий — открытые морфизмы. С помощью таких морфизмов были предложены абстрактные определения ряда поведенческих эквивалентностей для различных безвременных моделей, что позволило доказать разрешимость эквивалентностей для систем с конечным числом состояний. В этой области были получены следующие результаты: эквивалентности, определенные на категориях интерливинговых моделей, согласуются с интерливинговой бисимуляцией Милнера, тогда как эквивалентности на категориях моделей с истинным параллелизмом требуют более сильной эквивалентности — некоторого варианта сохраняющей историю бисимуляции Трахтенброта.

Кроме того, в последнее десятилетие резко возрос интерес к разработке и исследованию распределенных систем, функционирующих в режиме реального времени. Поэтому в литературе были сделаны попытки ввести понятие времени в различные формальные модели и эквивалентностные понятия.

На основе вышесказанного можно прийти к заключению, что уже сложившийся подход к разработке корректных параллельных систем имеет ряд ограничений: недостаточно проработаны временные аспекты функционирования параллельных систем; имеет место проблема ‘взрыва состояний’ при анализе систем такого типа; временные эквивалентностные понятия введены только для ограниченного числа параллельных моделей с реальным временем, а также недостаточно изучены их взаимосвязи и разрешимость и т.д.

Поэтому в рамках диссертационной работы была предпринята попытка расширить, обобщить и развить существующий подход с целью преодоления вышеупомянутых ограничений.

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

Цель диссертации состоит в развитии и обобщении теоретико-категорных методов спецификации и верификации параллельных систем, функционирующих в режиме реального времени. Достижение цели связывается с решением следующих задач:

1. Исследование и развитие формальных методов эквивалентных преобразований параллельных программ, функционирующих в режиме реального времени.
2. Построение теоретико-категорных основ исследования временных трассовых, тестовых и бисимуляционных эквивалентностей моделей в семантиках интерливинг/истинный параллелизм.
3. Исследование проблемы распознавания указанных временных эквивалентностей с использованием методов теории категорий.

Методы исследований. В рамках данной работы использовались методы и понятия теории категорий, теории множеств, теории графов и теории алгоритмов. В качестве формальных параллельных моделей с реальным временем применялись временные системы переходов и временные структуры событий. Кроме того, использовались различные понятия поведенческих эквивалентностей параллельных процессов, а также техника временных регионов.

Научная новизна. В результате выполненных исследований автором разработан оригинальный подход к решению задач спецификации и анализа корректности параллельных систем реального времени. Следующие результаты, полученные в данной диссертации, полностью раскрывают научную новизну:

- Построен ряд категорий и подкатегорий временных параллельных моделей и изучены некоторые свойства этих категорий.
- Введены временные варианты поведенческих (трассовых, тестовых и бисимуляционных) эквивалентностей в семантиках интерливинг/истинный параллелизм.
- Дана теоретико-категорная характеристика вышеуказанных эквивалентностей в терминах открытых морфизмов на основе их 'зиг-заг' характеристики.
- Решены проблемы и даны оценки сложности распознавания указанных эквивалентностей.

Практическая ценность. Полученные результаты могут быть использованы при решении практических задач, а именно для верификации и оптимизации параллельных систем. В частности, раз-

работанные автором диссертации методы могут стать основой для построения алгоритмов распознавания различных эквивалентностей на временных параллельных моделях в семантиках интерливинг/истинный параллелизм.

Участие в проектах и грантах. Во время работы над диссертацией автор участвовал в следующих грантах:

1. *Разработка и исследование семантических методов и средств спецификации и верификации сложных распределенных систем реального времени.* РФФИ, грант 0001 00898, руководитель к.ф.-м.н. И.Б. ВИРБИЦКАЙТЕ, 2000–2001.
2. Программа РАН "Научные проекты молодых ученых", грант 114, руководитель к.ф.-м.н И.В. ТАРАСЮК, 1999–2001.
3. *Исследование параллельных процессов реального времени методами теории категорий.* Министерство образования, грант А03-2.8-353, руководитель д.ф.-м.н. И.Б. ВИРБИЦКАЙТЕ, 2003–2004.
4. *Исследование параллельных процессов реального времени методами теории категорий.* Федеральное агентство по образованию, грант А04-3.16-217, руководитель д.ф.-м.н. И.Б. ВИРБИЦКАЙТЕ, 2004.

Апробация работы. Основные идеи и конкретные результаты диссертационной работы обсуждались на следующих международных научных конференциях и семинарах:

- International Symposium on Fundamentals of Computation Theory (Riga, Latvia, 2001);
- International Seminar Concurrency: Specification and Programming (Berlin, Germany, 2002; Charna, Poland, 2003);
- A.P. Ershov International Memorial Conference on Perspectives of System Informatics (Novosibirsk, Russia, 2003);
- International conference on practical and theoretical programming UkrProg'04 (Kiev, Ukraine, 2004).

Кроме того, полученные результаты обсуждались на семинарах лаборатории теоретического программирования ИСИ СО РАН и кафедры вычислительных систем НГУ.

Публикации. По теме диссертации написано 11 научных работ, среди которых 4 работы опубликованы в зарубежных периодических изданиях и журналах, 1 — в отечественном журнале, 3 — в трудах международных конференций и семинаров.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 98 наименований. Общий объем 142 страницы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава носит обзорный характер. В ней описывается состояние теоретико-категорных исследований в области теории параллельных систем и процессов.

В *разделе 1.1* приводится сравнительный анализ параллельных моделей, полученный на основе методов теории категорий. В частности, описываются шесть центральных моделей теории параллелизма: деревья синхронизации, системы переходов, сети Петри, системы переходов с независимостью, структуры событий и асинхронные системы переходов, а также приводится сравнительная характеристика данных моделей в терминах существования функторов между категориями этих моделей.

В *разделе 1.2* определяются основные понятия теории категорий (особое внимание уделяется понятию открытого морфизма) и рассказывается о теоретико-категорных результатах, полученных при исследованиях различных эквивалентностей для безвременных параллельных моделей.

Вторая глава посвящена исследованию временных вариантов различных трассовых эквивалентностей, в контексте интерливинговой модели — временных систем переходов (ВСП), и модели с семантикой истинного параллелизма — временных структур событий (ВСС).

В *разделе 2.1* вводится и исследуется временная интерливинговая трассовая эквивалентность на ВСП. Данная эквивалентность определяется в терминах равенства временных интерливинговых языков систем. Приводится формальное определение и свойства категории ВСП, $CTTS_{\Sigma}$, построенной Хунэм и Нильсеном в 1998 году. Выделяется подкатегория \mathcal{P}_{tr} этой категории, содержащая все временные слова и тождественные морфизмы и морфизмы с пустой областью определения между ними. По данной подкатегории стандартным способом определяется понятие \mathcal{P}_{tr} -открытого морфизма и доказывается его критерий в терминах сохранения выполнений временных слов. Затем формулируется понятие абстрактной \mathcal{P}_{tr} -бисимуляции в терминах существования симметричной конструкции \mathcal{P}_{tr} -открытых морфизмов. Доказывается следующая

Теорема 2.3. Две ВСП являются \mathcal{P}_{tr} -бисимуляционно эквивалентными \Leftrightarrow они временно интерливингово трассово эквивалентны.

Далее рассматривается проблема распознавания временной интерливинговой трассовой эквивалентности в контексте класса конечных ВСП, $\mathcal{TTS}_{\mathcal{N}}$. При помощи техники регионов Алура доказывается разрешимость \mathcal{P}_{tr} -открытости морфизма. Сложность этого распознавания оценивается как $|S_1| \cdot |S_2| \cdot |X_1|! \cdot |X_2|! \cdot 2^{|X_1|+|X_2|} \cdot (2c + 2)^{|X_1|+|X_2|}$, где X_1 и X_2 — множества временных переменных ВСП, S_1 и S_2 — множества состояний ВСП, а c — наибольшее натуральное число, встречающаяся во временных конструкциях. Для ВСП из класса $\mathcal{TTS}_{\mathcal{N}}$ доказывается, что из существования симметричной конструкции \mathcal{P}_{tr} -открытых морфизмов следует существование аналогичной конструкции с вершиной из класса $\mathcal{TTS}_{\mathcal{N}}$. На основе этого факта и разрешимости \mathcal{P}_{tr} -открытости морфизмов формулируется

Следствие 2.5. Для ВСП из класса $\mathcal{TTS}_{\mathcal{N}}$ временная интерливинговая трассовая эквивалентность разрешима.

В разделе 2.2 вводится и исследуется частично-упорядоченная эквивалентность Пратта на ВСС. Эта эквивалентность определяется в терминах равенства временных частично-упорядоченных языков Пратта, которые содержат все приращения, определяемые относительно частичного порядка, для всех временных рош-множеств, выполняемых ВСС. Определяется категория ВСС \mathcal{CTES}_p и доказывается ряд полезных свойств этой категории. Далее выделяется подкатегория \mathcal{TS}'_L^p категории \mathcal{CTES}_p , содержащая все временные рош-множества и тождественные морфизмы и морфизмы с пустой областью определения между ними. По данной подкатегории стандартным способом определяется понятие \mathcal{TP}'_L^p -открытого морфизма и доказывается его критерий в терминах сохранения выполняемых рош-множеств. Затем формулируется понятие абстрактной \mathcal{TP}'_L^p -бисимуляции в терминах существования симметричной конструкции \mathcal{TP}'_L^p -открытых морфизмов. Доказывается следующая

Теорема 2.8. Две ВСС являются \mathcal{TP}'_L^p -бисимуляционно эквивалентными \Leftrightarrow они временно частично-упорядоченно эквивалентны по Пратту.

Далее рассматривается проблема распознавания частично-упорядоченной эквивалентности Пратта в контексте класса конечных ВСС, $\mathcal{TES}_{\mathcal{N}}$. При помощи техники регионов Алура доказывается разрешимость \mathcal{TP}'_L^p -открытости морфизма. Сложность этого распознавания оценивается как $N \cdot 2^{2N} \cdot (c + 1)^N$, где $N = |E_1| * |E_2|$ ($|E_1|$ и

$|E_2|$ — число событий ВСС), а c — наибольшее натуральное число, упоминаемое в определении временных функций. Для ВСС из класса \mathcal{TES}_N доказывается, что из существования симметричной конструкции \mathcal{TP}_L^p -открытых морфизмов следует существование аналогичной конструкции с вершиной из класса \mathcal{TES}_N . На основе этого факта и разрешимости \mathcal{TP}_L^p -открытости морфизмов формулируется

Следствие 2.5. Для ВСС из \mathcal{TS}_N временная частично-упорядоченная эквивалентность Пратта разрешима.

В разделе 2.3 вводится и исследуется частично-упорядоченная трассовая эквивалентность на ВСС. Такая эквивалентность определяется в терминах равенства временных частично-упорядоченных языков, содержащих все все временные рош-множества, выполняемые ВСС. Такая эквивалентность сильнее временной частично-упорядоченной эквивалентности Пратта в том смысле, что любые временно частично-упорядоченно трассово эквивалентные ВСС являются также временно частично-упорядоченно эквивалентными по Пратту. Строится категория ВСС, \mathcal{CTES}_s , и приводится ряд полезных свойств этой категории. Далее в построенной категории выделяется подкатегория \mathcal{TP}_L^s , содержащая все временные рош-множества и тождественные морфизмы и морфизмы с пустой областью определения между ними. По этой подкатегории определяется \mathcal{TP}_L^s -открытый морфизм и доказывается его критерий в терминах полного сохранения выполняемых рош-множеств. Затем формулируется понятие абстрактной \mathcal{TP}_L^s -бисимуляции в терминах существования конструкции \mathcal{TP}_L^s -открытых морфизмов и доказывается следующая

Теорема 2.14. Две ВСС являются \mathcal{TP}_L^s -бисимуляционно эквивалентными \Leftrightarrow они временно частично-упорядоченно трассово эквивалентны.

Далее рассматривается проблема распознавания частично-упорядоченной трассовой эквивалентности в контексте класса \mathcal{TES}_N . При помощи техники регионов Алура доказывается разрешимость \mathcal{TP}_L^s -открытости морфизмов. Сложность этого распознавания оценивается как $N \cdot 2^{2N} \cdot (c + 1)^N$, где $N = |E_1| * |E_2|$ ($|E_1|$ и $|E_2|$ — число событий ВСС), а c — наибольшее натуральное число, упоминаемое в определении временных функций. Для ВСС из класса \mathcal{TES}_N доказывается, что из существования симметричной конструкции \mathcal{TP}_L^s -открытых морфизмов следует существование аналогичной конструкции с вершиной из класса \mathcal{TES}_N . На основе этого факта и разрешимости \mathcal{TP}_L^s -открытости морфизмов формулируется

Следствие 2.7. Для ВСС из \mathcal{TS}_N временная частично-упорядоченная трассовая эквивалентность разрешима.

В третьей главе вводятся и исследуются временные варианты тестовых эквивалентностей для временных параллельных моделей, представленных моделями ВСП и ВСС. Два процесса считаются тестово эквивалентными, если наборы их выполняемых тестов совпадают. В интерливинговой семантике тест состоит из временного слова и набора временных действий, а в частичной упорядоченной семантике — из временного *pom*-множества и набора временных действий. Считается, что процесс прошел этот тест, если после любого выполнения данного временного слова или временного *pom*-множества может выполниться какое-нибудь временное действие из вышеупомянутого набора.

В разделе 3.1 вводится и исследуется временная интерливинговая тестовая эквивалентность на ВСП. Такая эквивалентность формулируется в терминах равенства набора выполняемых интерливинговых тестов. Определяется категория ВСП $\mathcal{C}\mathcal{T}\mathcal{T}\mathcal{S}_{test}$ и доказываются некоторые свойства этой категории. Далее в указанной категории выделяется подкатегория \mathcal{P}_{test} , содержащая наблюдения (ВСП специального вида) и морфизмы между ними. По этой подкатегории определяется \mathcal{P}_{test} -открытый морфизм и доказывается его критерий в терминах сохранения отношения перехода на достижимых множествах и вложения множеств последующих временных действий. Затем определяется абстрактная \mathcal{P}_{test} -бисимуляция в терминах существования конструкции \mathcal{P}_{test} -открытых морфизмов и доказывается следующая

Теорема 3.3. Две ВСП являются \mathcal{P}_{test} -бисимуляционно эквивалентными \Leftrightarrow они временно интерливингово тестово эквивалентны.

Далее рассматривается проблема распознавания временной интерливинговой тестовой эквивалентности на классе конечных дискретных ВСП, $\mathcal{T}\mathcal{T}\mathcal{S}_N^{disc}$. При помощи техники регионов Адура доказывается разрешимость \mathcal{P}_{test} -открытости для морфизмов выделенного класса. Сложность этого распознавания оценивается $2^{|S_1| \cdot |S_2| \cdot 2^{|X_1| \cdot |X_2|}}$, где X_1 и X_2 — множества временных переменных ВСП, а S_1 и S_2 — множества состояний ВСП. Для ВСП из класса $\mathcal{T}\mathcal{T}\mathcal{S}_N^{disc}$ доказывается, что из существования симметричной конструкции \mathcal{P}_{test} -открытых морфизмов следует существование аналогичной конструкции с вершиной из класса $\mathcal{T}\mathcal{T}\mathcal{S}_N^{disc}$. На основе этого факта и разрешимости \mathcal{P}_{test} -открытости морфизмов доказывается

Следствие 3.1. Для ВСП из класса $\mathcal{T}\mathcal{T}\mathcal{S}_N^{disc}$ временная интерливин-

говая тестовая эквивалентность разрешима.

В *разделе 3.2* вводится и исследуется временная частично-упорядоченная тестовая эквивалентность на ВСС. Такая эквивалентность определяется в терминах совпадения набора выполняемых частично-упорядоченных тестов. Определяется категория ВСС \mathcal{CTES}_t и доказываются основные свойства этой категории. Далее в этой категории выделяется подкатегория \mathcal{TT}_L , содержащая ВСС и тождественные морфизмы и морфизмы с пустой областью определения. По данной подкатегории определяется \mathcal{TT}_L -открытый морфизм и доказывается его критерий в терминах сохранения отношения следования на множествах состояний ВСС, достижимых по ролмножеству, и вложения множеств последующих временных действий. Затем формулируется понятие абстрактной \mathcal{TT}_L -бисимуляции в терминах существования конструкции \mathcal{TT}_L -открытых морфизмов и доказывается следующая

Теорема 3.7. Две ВСС являются \mathcal{TT}_L -бисимуляционно эквивалентными \Leftrightarrow они временно частично-упорядоченно тестово эквивалентны.

Далее рассматривается проблема распознавания временной частично-упорядоченной тестовой эквивалентности на классе конечных дискретных ВСС, \mathcal{TES}_N^{disc} . При помощи техники регионов Алура доказывается разрешимость \mathcal{TT}_L -открытости морфизмов для выделенного класса. Сложность такого распознавания оценивается как 2^N , где $N = |E_1| * |E_2|$ ($|E_1|$ и $|E_2|$ — число событий ВСС). Для ВСС из класса \mathcal{TT}_N^{disc} доказывается, что из существования симметричной конструкции \mathcal{TT}_L -открытых морфизмов следует существование \mathcal{TT}_L -открытого морфизма из одной ВСС в другую. На основе этого факта и полученной разрешимости доказывается

Следствие 3.2. Для ВСС из класса \mathcal{TES}_N^{disc} временная частично-упорядоченная тестовая эквивалентность разрешима.

В *четвертой главе* вводятся и исследуются временные варианты бисимуляционных эквивалентностей: временная интерливинговая слабая бисимуляция по Милнеру и Сангиорги и временная частично-упорядоченная сильная сохраняющая историю бисимуляция. Бисимуляционные эквивалентности являются наиболее сильными в том смысле, что в отличие от трассовых и тестовых они учитывают точки недетерминированного выбора.

В *разделе 4.1* вводится и исследуется временной вариант интерливинговой слабой бисимуляции по Милнеру и Сангиорги на ВСП. Такая бисимуляция отличается от сильной бисимуляции,

по крайней мере, по трем аспектам. Во-первых, такая бисимуляция предполагает, что множество действий содержит так называемое невидимое действие, обозначаемое τ . Во-вторых, в данном случае бисимуляционно подобными должны быть только невидимые переходы, то есть переходы, помеченные невидимым действием. В-третьих, данная бисимуляция требует совпадения лишь факта существования видимых действий. В разделе определяется категория ВСП, $CTTS_{w\text{bis}}$, и доказываются некоторые ее свойства. Далее в данной категории выделяется подкатегория $\mathcal{P}_{w\text{bis}}$, содержащая так называемые τ -ветви и морфизмы между ними. По этой подкатегории определяется $\mathcal{P}_{w\text{bis}}$ -открытый морфизм и доказывается его критерий в терминах сохранения отношения перехода на всех достижимых по невидимому временному действию состояний и фактов существования видимых переходов. Затем определяется абстрактная $\mathcal{P}_{w\text{bis}}$ -бисимуляция в терминах существования конструкции $\mathcal{P}_{w\text{bis}}$ -открытых морфизмов и доказывается следующая

Теорема 4.5. Две ВСС являются $\mathcal{P}_{w\text{bis}}$ -бисимуляционно эквивалентными \Leftrightarrow они временно интерливингово слабо бисимуляционно эквивалентны по Милнеру и Сангиорги.

Далее рассматривается проблема распознавания временной интерливинговой слабой бисимуляции по Милнеру и Сангиорги на классе $TTS_{\mathbf{N}}$. При помощи техники регионов Алура доказывается разрешимость $\mathcal{P}_{w\text{bis}}$ -открытости для морфизмов указанного класса. Сложность данного распознавания оценивается как $|S_1| \cdot |S_2| \cdot |X_1|! \cdot |X_2|! \cdot 2^{|X_1|+|X_2|} \cdot (2c+2)^{|X_1|+|X_2|}$, где X_1 и X_2 — множества временных переменных ВСП, S_1 и S_2 — множества состояний ВСП, а c — наибольшее натуральное число, встречающееся во временных конструкциях. Для ВСП из класса $TTS_{\mathbf{N}}$ доказывается, что из существования симметричной конструкции $\mathcal{P}_{w\text{bis}}$ -открытых морфизмов следует существование аналогичной конструкции с вершиной из класса $TTS_{\mathbf{N}}$. На основе этого факта и полученной разрешимости доказывается следующее

Следствие 4.3. Для ВСП из класса $TTS_{\mathbf{N}}$ временная интерливинговая слабая бисимуляция по Милнеру и Сангиорги разрешима.

В разделе 4.2 вводится и исследуется временная частично-упорядоченная сильная сохраняющая историю бисимуляция на ВСС. При исследовании этой эквивалентности используется ранее построенная категория $CTES_p$. В этой категории выделяется подкатегория TP_L^p , содержащая временные рош-множества и морфизмы между

ними. По этой подкатегории определяется \mathcal{TP}_L^p -открытый морфизм, доказываются его критерий в терминах совпадения поведения ВСС и доказываются следующая

Теорема 4.10. Две ВСС являются \mathcal{TP}_L^p -бисимуляционно эквивалентными \Leftrightarrow они временно частично-упорядоченно сильно бисимуляционно эквивалентны с сохранением истории.

Далее рассматривается проблема распознавания временной частично-упорядоченной сильной сохраняющей историю бисимуляции на классе \mathcal{TES}_N . При помощи техники регионов Алура доказываются разрешимость \mathcal{TP}_L^p -открытости для морфизмов указанного класса. Сложность этого распознавания оценивается как $N \cdot 2^{2N} \cdot (c + 1)^N$, где $N = |E_1| * |E_2|$ ($|E_1|$ и $|E_2|$ — число событий ВСС), а c — наибольшее натуральное число, упоминаемое в определении временных функций. Для ВСС из класса \mathcal{TES}_N доказываются, что из существования симметричной конструкции \mathcal{TP}_L^p -открытых морфизмов следует существование аналогичной конструкции с вершиной из класса \mathcal{TES}_N . На основе этого факта и полученной разрешимости доказываются

Следствие 4.5. Для ВСС из \mathcal{TS}_N временная частично-упорядоченная сильная сохраняющая историю бисимуляция разрешима.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках данной диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Построены различные категории параллельных моделей — временных систем переходов и временных структур событий — и доказаны некоторые их свойства.
2. Определен и изучен ряд временных вариантов трассовых эквивалентностей. В частности, были определены временная интерливинговая трассовая эквивалентность на временных системах переходов и временная частично-упорядоченная трассовая эквивалентность и временная частично-упорядоченная эквивалентность Пратта, на временных структурах событий.
3. Определены и исследованы два временных варианта тестовых эквивалентностей, а именно, временная интерливинговая тестовая эквивалентность на временных системах переходов и временная частично-упорядоченная тестовая эквивалентность на временных структурах событий.
4. Определены и проанализированы временные варианты бисимуляционных эквивалентностей. В том числе временная

интерливинговая слабая бисимуляция по Милнеру и Сангиорги на временных системах переходов и временная частично-упорядоченная сильная историю сохраняющая бисимуляция на временных структурах событий.

5. Выделен ряд подкатегорий, по ним определены соответствующие варианты открытых морфизмов и получена ‘зиг-заг’ характеристика для этих морфизмов.
6. Определен ряд абстрактных бисимуляций в терминах существования симметричной конструкции соответствующих открытых морфизмов.
7. Получена теоретико-категорная характеристика для всех указанных эквивалентностей в терминах совпадения с соответствующим вариантом абстрактной бисимуляции.
8. Получены результаты, касающиеся проблемы разрешимости исследуемых эквивалентностей, на различных конечных классах и оценена сложность распознавания.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ Н.С. ГРИБОВСКОЙ (МОСКАЛЕВОЙ)

1. Н.С. Грибовская. Теоретико-категорная характеристика языковых эквивалентностей временных параллельных моделей // Труды школы-конкурса "Новые подходы и решения". – ИСИ СО РАН, Новосибирск. – 2003. – С. 32–41.
2. Н.С. Грибовская. Теоретико-категорная характеристика трассовой эквивалентности для временных автоматных моделей // Проблемы программирования, 2004. – № 2-3. – С. 16–22.
3. Н.С. Грибовская. Теоретико-категорная характеристика различных эквивалентностей на временных автоматных моделях // Препринт ИСИ СО РАН, 2004. – № 119.
4. Н.С. Москалева. Теоретико-категорная характеристика трассовой эквивалентности временных параллельных моделей // Препринт ИСИ СО РАН, 2002. – № 99.
5. Н.С. Москалева. Теоретико-категорное исследование параллельных процессов реального времени // Вестник НГУ, серия: Математика, механика, информатика, 2002. – Т. II, выпуск 3. – С. 46–66.
6. N.S. Moskaleva, I.B. Virbitskaite. On the Category of Event Structures with Dense Time // Lectures Notes Computer Science, 2001. – Vol. 2138. – p. 287–298.
7. N.S. Moskaleva, I.B. Virbitskaite. Observing Time-Sensitive Partial

- Order Equivalences Categorically // In Proc. Workshop on Concurrency, Specification and Programming, Berlin, 2002. – p. 243–254.
8. N.S. Moskaleva, I.B. Virbitskaite. Open Maps and Trace Semantics for Timed Partial Order Models // In Proc. of the Andrei Ershov Fifth International Conference "Perspectives of System Informatics", 2003. – p. 160–167.
 9. Virbitskaite I. B., Gribovskaya N. S. Open Maps and Testing Equivalences for Timed Partial Order Models // In Proc. Workshop on Concurrency, Specification and Programming, Poland, 2003. – p. 195–206.
 10. I.B. Virbitskaite, N.S. Gribovskaya. Open Maps and Trace Semantics for Timed Partial Order Models // Lecture Notes in Computer Science, 2003. – Vol. 2890. – p. 248–259.
 11. I.B. Virbitskaite, N.S. Gribovskaya. Open Maps and Observational Equivalences for Timed Partial Order Models // Fundamenta Informaticae, 2004. – Vol. 61. – p. 383–399.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Все включенные в диссертацию результаты, касающиеся вопросов разрешимости эквивалентностей параллельных моделей с реальным временем, получены автором самостоятельно. Теоретико-категорные характеристики эквивалентностей, введенных на интерливинговых моделях, представленных временными системами переходов, также получены самостоятельно. При получении теоретико-категорных характеристик для эквивалентностей, введенных на истинно параллельных моделях, представленных временными структурами событий, Н.С. Грибовская внесла следующий вклад: получила теоретико-категорную характеристику временной частично-упорядоченной трассовой и временной частично-упорядоченной тестовой эквивалентностей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает свою признательность своему научному руководителю д.ф.-м.н. Вирбицкайте Ирине Бонавентуровне за помощь и понимание.

Грибовская Наталия Сергеевна

Теоретико-категорное исследование эквивалентностей
параллельных моделей с реальным временем

Подписано в печать 18.11.2004
Формат бумаги 60 × 84 1 / 16

Объем 1,0 п.л.
Тираж 100 экз.

ЗАО РИЦ “Прайс-курьер”
630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 6, тел. (383-2) 34-22-02