

Отчет по научному проекту молодых ученых РАН за период 2000-2002 гг. (6-ой конкурс-экспертиза 1999 г.).

1. Наименование и номер проекта, учреждение РАН.

Эквивалентности алгебраических и сетевых спецификаций и верификация параллельных систем реального времени.

Номер 114.

Институт систем информатики им. А.П. Ершова, Сибирское Отделение Российской Академии Наук (ИСИ СО РАН).

2. Сведения о руководителе и участниках проекта.

Руководитель.

Тарасж Игорь Валерьевич, к.ф.-м.н., 1971 г. рождения, научный сотрудник, лаборатория Теоретического программирования, ИСИ СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 6, 630090, г. Новосибирск.

Исполнители.

Боженкова Елена Николаевна, к.ф.-м.н., 1972 г. рождения, научный сотрудник, лаборатория Теоретического программирования, ИСИ СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 6, 630090, г. Новосибирск.

Андреева Мария Владимировна, 1978 г. рождения, аспирантка 2 года обучения, лаборатория Теоретического программирования, ИСИ СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 6, 630090, г. Новосибирск.

Москалева Наталия Сергеевна, 1980 г. рождения, студентка 6 курса, кафедра Вычислительных систем, Механико-математический факультет, Новосибирский государственный университет (НГУ), ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск.

3. Научные результаты.

На сетях Петри с невидимыми переходами определен и исследован ряд новых поведенческих эквивалентностей. Изучено сохранение этих отношений при операции детализации, соответствующей переходу на более низкий уровень структурной абстракции. Исследована взаимосвязь отношений на подклассах: на сетях без невидимых переходов и последовательных сетях. Таким образом, предложен набор семантик для анализа поведения моделируемых сетями параллельных процессов.

Рассмотрен предложенный П. Буххольцем класс стохастических сетей Петри с дискретным временем и невидимыми переходами. Для сетей этого типа введен и исследован ряд новых отношений поведенческой эквивалентности, позволяющих сравнивать и анализировать поведение моделируемых сетями параллельных вероятностных процессов.

Разработано стохастическое расширение алгебры конечных недетерминированных процессов AFP<sub>0</sub>, предложенной В. Котовым и Л.А. Черкасовой, имеющей семантику в терминах упомянутых стохастических сетей. Разработана аксиоматизация семантической эквивалентности.

Введены понятия временных тестовых отношений для моделей как с дискретными, так и непрерывными временными интервалами. Даны альтернативные характеристики введенных понятий. Решена проблема распознавания временных тестовых эквивалентностей и предпорядков для класса дискретно-временных структур событий. Выделен подкласс структур событий с непрерывным временем, для которого данная проблема распознавания разрешима. Также построена формула временной логики, характеризующая подкласс структур событий с непрерывным временем с точностью до временных must-предпорядков.

Введены и исследованы тестовые эквивалентности для различных временных расширений популярной модели с семантикой "истинного" параллелизма, введенной Винскем, - структур событий. Рассмотрены различные семантики, по-разному учитывающие отношение параллелизма на событиях структур. Дана альтернативная характеристика тестовых отношений и разработаны алгоритмы разрешимости тестовых эквивалентностей.

Исследованы поведенческие эквивалентности параллельных процессов реального времени с семантикой истинного

параллелизма, представленные структурами событий с плотным временем. Рассмотрены интерливинговые и параллельные варианты бисимуляционной и трассовой эквивалентностей. Решены проблемы разрешимости рассматриваемых поведенческих эквивалентностей на множестве конечных временных структур событий.

#### 4. Сравнение с отечественным и мировым уровнем.

Предложенная стохастическая алгебра является оригинальной, так как в научной литературе не рассматривались подобные исчисления неинтерливинговых стохастических процессов. Алгебра является стохастическим расширением исчисления AFP\_0. Параллельная композиция, использованная в предложенной алгебре, отлична от рассмотренных ранее П.Р. Д'Ардженио, Х. Херманнсом и Дж.-П. Катоненом в исчислениях стохастических процессов. Кроме того, в качестве семантической области алгебры выступает новый класс стохастических сетей. Таким образом, используемый подход является новым как для отечественных, так и для зарубежных исследований.

В зарубежной литературе (например, Стефаном, Вайзе или Диазом, Эскригом) делались попытки дать альтернативные характеристики временных тестовых отношения для моделей систем переходов и алгебр процессов, но предложенные характеристики оказываются неверными для временных структур событий. Учитывая, что процессы, представленные структурами событий, можно представить и с помощью систем переходов или алгебр, надо полагать, что существующие результаты не полны. Найденная нами характеристика не содержит неточностей коллег и кажется полной. Есть статьи (например, Инголфсдоттир, Стефана, или Ларсена и др.), в которых сконструированы характеристические логические формулы для бисимуляций в контексте моделей без времени и с ним, аналогов построения характеристических формул для тестовых эквивалентностей нет.

Результаты по параллельным стохастическим, тестовым и временным эквивалентностям также новы и имеют мировой уровень, так как в литературе, как правило, рассматривались только интерливинговые отношения.

#### 5. Публикации, участие в конференциях и т.п.

Публикации - 13.

[Tar00] Tarasyuk I.V.: Tau-equivalences and refinement for Petri nets based design. Technische Berichte TUD-FI00-11, 41 pages, Fakultät Informatik, Technische Universität Dresden, Germany, November 2000.

[BT00] Buchholz P., Tarasyuk I.V.: A class of stochastic Petri nets with step semantics and related equivalence notions. Technische Berichte TUD-FI00-12, 18 pages, Fakultät Informatik, Technische Universität Dresden, Germany, November 2000.

[BT01] Buchholz P., Tarasyuk I.V.: Net and algebraic approaches to probabilistic modeling. Joint Novosibirsk Computing Center and Institute of Informatics Systems Bulletin, Series Computer Science 15, pages 31-64, Novosibirsk, 2001.

[Boz00a] Боженкова Е.Н.: Анализ свойств параллельных процессов и процессов реального времени, представленных моделями структур событий. Диссертация по специальности 05.13.11 - математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов, систем и сетей, 108 страниц, Новосибирск, 2000.

[Boz00b] Боженкова Е.Н.: Исследование эквивалентных отношений для структур событий с дискретным временем. Препринт ИСИ СО РАН 75, 28 страниц, Новосибирск, 2000.

[BV00] Боженкова Е.Н., Вирбицкайте И.Б.: Отношения эквивалентности для структур событий с непрерывным временем. Программирование 5, страницы 18-30, Москва, 2000.

[Boz01] Bozhenkova E.N.: Towards decidability of timed testing. Joint Novosibirsk Computing Center and Institute of Informatics Systems Bulletin, Series Computer Science 15, pages 17-29, Novosibirsk, 2001.

[And00] Андреева М.В.: Параллельные варианты tau-тестовых эквивалентностей временных структур событий. Препринт ИСИ СО РАН 77, 23 страницы, Новосибирск, 2000.

[ABV00] Andreeva M.V., Bozhenkova E.N., Virbitskaite I.B.: Analysis of Timed Concurrent Models Based on

Testing Equivalence. *Fundamenta Informaticae* 43, pages 1-20, 2000.

[VA02] Вирбицкайте И.Б., Андреева М.В.: Параллельная тестовая эквивалентность временных структур событий. Препринт ИСИ СО РАН, Новосибирск, 2002 (готовится к публикации).

[MV01] Moskaljova N.S., Virbitskaite I.B.: On the category of event structures with dense time. Proceedings of 13th International Symposium on Fundamentals of Computation Theory (FCT'01), Riga, Latvia, August 2001. LNCS 2138, pages 287-298, 2001.

[Mos02a] Москалева Н.С.: Теоретико-категорная характеристика трассовой эквивалентности временных параллельных моделей. Препринт ИСИ СО РАН 99, 15 страниц, Новосибирск, 2002 (готовится к публикации).

[Mos02b] Москалева Н.С.: Теоретико-категорное исследование параллельных процессов реального времени. Вестник Новосибирского государственного университета (НГУ). Серия: математика, механика, информатика, страницы, 18 страниц, Новосибирск, 2002 (готовится к публикации).

Участие в научных мероприятиях - 6.

1st Euro Summer School on Trends in Computer Science - 00 (FMPA'00), Berg en Dal (Nijmegen), The Netherlands, July 3-7, 2000 (Тарасюк И.В.).

18th Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS'01), Dresden, Germany, February 15-17, 2001 (Тарасюк И.В.).

1st International School on Formal Methods for the Design of Computer, Software and Communication Systems: Process Algebras (SFM-01:PA), Bertinoro, Italy, July 23-28, 2001 (Тарасюк И.В., Боженкова Е.Н.).

13th European Summer School on Logic, Language and Information (ESSLLI'01), Helsinki, Finland, August 13-24, 2001 (Тарасюк И.В.).

6th International Conference on Parallel Computing Technologies - 2001 (PaCT'01), Novosibirsk, Russia, September 3-7, 2001 (Тарасюк И.В.).

13th International Symposium on Fundamentals of Computation Theory (FCT'01), Riga, Latvia, August 2001 (Москалева Н.С.).

Гранты - 5.

Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ), грант 00-01-00898, 2000-2002 (Тарасюк И.В., Боженкова Е.Н., Андреева М.В., Москалева Н.С.).

Стипендия талантливых молодых ученых РАН, 2000-2002 (Тарасюк И.В.).

Гранты поддержки молодых ученых, подчиненные гранту РФФИ 00-01-00898: 01-01-06134 (Боженкова Е.Н.), 01-01-06135 (Андреева М.В.).

Грант поддержки поездок на конференции 01-01-10760 (Боженкова Е.Н.).

6. Планируемые до конца проекта результаты и т.п.

Предполагается определить другие бисимуляционные эквивалентности стохастических сетей Петри в интерливинговой и шаговой семантиках. Кроме того, в планы входит исследование возможности стохастического расширения более выразительных алгебраических исчислений. В качестве такой алгебры может выступить исчисление Petri Box Calculus (PBC), введенное А. Бестом и Р. Девиллерсом. В PBC возможно, например, специфицировать бесконечные параллельные процессы с использованием операторов рекурсии и итерации, в то время как AFP<sub>0</sub> описывает только конечные процессы.

Планируется исследовать разрешимость временных тестовых отношений для временных моделей с невидимыми действиями, причем не только для временного must-предпорядка, но и для остальных временных тестовых

отношений.

Планируется продолжение исследований тестовых эквивалентностей, а также построение алгебраического языка спецификаций временных параллельных процессов и изучение взаимосвязи между временными алгебраическими и поведенческими эквивалентностями.

Предполагается продолжить исследование и рассмотреть другие типы поведенческих эквивалентностей (например, сохраняющую историю бисимуляцию) методами теории категорий.

## 7. Резюме публикаций.

[Tar00] Для сетей Петри с невидимыми переходами (соответствующими внутренней активности) был определен и исследован ряд поведенческих эквивалентностей. Кроме рассмотренных в литературе, были введены новые следовые и бисимуляционные отношения, по-разному учитывающие параллелизм и конфликт. Бисимуляционные отношения включают обычные, ST-, сохраняющие историю и ветвистые эквивалентности, а также их комбинации. Кроме упомянутых базисных эквивалентностей, были также рассмотрены "обратные-прямые" отношения, требующие моделирования обратных вычислений. Такие отношения тесно связаны с эквивалентностями логик, имеющих модальности прошлого. Проведено сравнение эквивалентностей и построена диаграмма их взаимосвязей. Исследовано сохранение данных отношений при операции детализации, заменяющей переходы сетей на подсети и соответствующей переходу на более низкий уровень структурной абстракции. В результате выяснено, какие эквивалентности могут быть использованы при нисходящей разработке. Изучена взаимосвязь отношений на подклассах: на сетях без невидимых переходов и последовательных сетях. Это позволило лучше понять свойства эквивалентностей и облегчить сравнение сетей упомянутых подклассов.

[BT00] Рассмотрен введенный П. Буххольцем класс стохастических сетей Петри с дискретным временем и невидимыми переходами. Функционирование таких сетей протекает поэтапно, и на каждом этапе с определенной вероятностью могут вместе сработать несколько переходов, что соответствует параллельному выполнению помечающих их видимых действий. Таким образом, данные стохастические сети имеют шаговую семантику. Для упомянутого сетевого класса нами предложен ряд следовых и бисимуляционных эквивалентностей, абстрагирующихся от невидимых действий и в разной степени учитывающих параллелизм (т.е. интерливинговые и шаговые). Также введены бисимуляционные отношения, требующие обратного или обратного-прямого моделирования поведения. Проведено сравнение всех 8 предложенных поведенческих эквивалентностей в соответствии с их различающей способностью. Построена полная графовая диаграмма взаимосвязей этих отношений, не содержащая избыточных дуг. В результате получен набор критериев равенства для сравнения поведения стохастических сетей рассматриваемого класса. В качестве применения продемонстрировано использование "обратных-прямых" эквивалентностей для сравнения стационарного поведения исследуемых сетей.

[BT01] В. Котовым и Л.А. Черкасовой была предложена алгебра конечных недетерминированных процессов AFP<sub>0</sub>. Семантика этого исчисления была определена на подклассе ациклических сетей Петри, так называемых, A-сетях. Исчисление имеет три естественные операции: параллелизм, последовательную композицию и альтернативу. Мы разработали стохастическое расширение данной алгебры, исчисление StAFP<sub>0</sub>, семантика формул которого определяется стохастическими A-сетями. Предложена аксиоматизация семантической эквивалентности StAFP<sub>0</sub> (изоморфизма сетевых представлений формул). Доказана возможность сведения любой формулы алгебры к "полностью расслоенному виду" с помощью упомянутой системы аксиом. Такой вид формулы является параллельной композицией подформул с последовательной композицией и альтернативой. Это соответствует параллельному объединению последовательных сетевых компонент. Следовательно, приведение к данному виду позволяет визуально представить специфицируемый стохастический параллельный процесс и упрощает семантическое сравнение формул.

[Voz00b] Предлагается временное расширение модели структур событий - структуры событий с временными дискретными интервалами. Для этой модели вводятся и исследуются временные тестовые эквивалентности и предпорядки; дается характеристика временных тестовых отношений. Проблема распознавания исследуемых отношений сводится к проблеме распознавания бисимуляций и пребисимуляций.

[BV00] Вводятся и исследуются варианты тестовой и бисимуляционной эквивалентностей для структур событий с реальным (непрерывным) временем. Выделяется подкласс, в котором данные эквивалентности совпадают. Предлагаются алгоритмы их распознавания.

[Voz01] Исследуется проблема разрешимости временных тестовых отношений для модели с непрерывным временем.

Для класса временных структур событий без невидимых действий удается построить формулу временной логики  $L_{nu}$ , которая характеризует временную структуру событий с точностью до временного must-предпорядка. Проблема распознавания временных must-отношений сводится к проблеме проверки на модели (model-checking).

[And00] Делается попытка ввести и исследовать варианты тестовой (may-) эквивалентности дискретно-временных структур событий с глобальными часами в интерливинговой, шаговой и частично-упорядоченной семантиках, дается их следовая характеристика. В заключение проводится сравнительный анализ введенных эквивалентностей.

[ABV00] Цель - расширение различных понятий тестовых эквивалентностей на структуры событий с непрерывным локальным временем. Приводятся альтернативные характеристики введенных временных тестовых отношений. Также предлагаются алгоритмы разрешимости временных тестовых эквивалентностей для подкласса рассматриваемой модели. Основная идея установления разрешимости данных эквивалентностей заключается в сведении их к соответствующим символьным бисимуляциям.

[VA02] Исследуются варианты временной тестовой эквивалентности непрерывно-временных структур событий в различных семантиках, рассматриваются взаимосвязи введенных тестовых эквивалентностей в контексте различных классов временных структур событий.

[MV01] Цель - показать применимость теоретико-категорного подхода при исследовании моделей истинного параллелизма с плотным временем. В частности, определяется категория временных структур событий и ее подкатегория временных слов. Затем, используя теоретико-категорное понятие конструкции открытого морфизма, вводится абстрактное понятие бисимуляции и доказывается эквивалентность введенного определения и стандартного понятия интерливинговой бисимуляции. С помощью такой характеристики решается проблема разрешимости интерливинговой бисимуляции в контексте конечных временных структур событий.

[Mos02a] Исследуется временное расширение трассовой эквивалентности в контексте параллельных моделей с плотным временем, представленных временными структурами событий. Предложено абстрактное теоретико-категорное понятие интерливинговой трассовой эквивалентности. Доказывается совпадение классического определения трассовой эквивалентности и введенного абстрактного определения. С использованием полученной характеристики решается проблема разрешимости исследуемой эквивалентности на множестве конечных временных структур событий.

[Mos02b] Исследуется проблема разрешимости эквивалентных понятий для структур событий с непрерывным глобальным временем методами теории категорий. В частности, вводятся и исследуются временные параллельные варианты трассовой и бисимуляционной эквивалентностей, предлагаются их абстрактные теоретико-категорные определения в терминах существования симметричной конструкции варианта открытого морфизма. Проблема разрешимости рассматриваемых эквивалентностей решается с помощью техники регионов Алура.