

На правах рукописи

Ларионов Александр Александрович

**ПРОГРАММНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО
ПОИСКА ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА В ИСЧИСЛЕНИИ
ПОЗИТИВНО-ОБРАЗОВАННЫХ ФОРМУЛ**

05.13.17 — Теоретические основы информатики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск — 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Иркутский государственный университет”

Научный руководитель: кандидат технических наук доцент
Черкашин Евгений Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук ...

кандидат технических наук доцент
Фёдоров Роман Константинович ...

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, г.Новосибирск

Защита состоится “14” февраля 2013 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Новосибирский государственный технический университет” по адресу 630092, г.Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан “ ” января 2013 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

Чубич Владимир Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке методов эффективного поиска логического вывода (ЛВ) в исчислении позитивно-образованных формул (ПО-формул) и реализации этих методов в форме программной системы автоматического доказательства теорем (АДТ).

Актуальность исследования.

Одним из подходов к интеллектуализации программных систем является разработка алгоритмов обработки информации, основанных на моделировании процесса рассуждений. Наиболее формализованные подходы базируются на автоматическом построении ЛВ в некоторой системе формализованных знаний (логического описания предметной области). Программные системы для поиска ЛВ называют системами АДТ, поскольку утверждения, для которых существует ЛВ, являются теоремами (в заданном исчислении).

Формализации некоторых предметных областей, таких как, аксиоматизации математических теорий, верификация программного и аппаратного обеспечения и др. являются весьма объемными, поэтому использование систем АДТ для построения ЛВ становится единственно возможным вариантом решения таких задач. Системы АДТ применяются также в системах планирования действий, системах поддержки принятия решений, экспертных системах, где важным фактором является время решения задачи и другие критерии.

Основным классом исчислений, используемых в современных системах АДТ, являются исчисления первого порядка, которые достаточно выразительны для формализации многих задач, корректны, полны и полуразрешимы. Такой подход к решению задач интересен своей универсальностью, и может применяться для автоматического решения любых проблем различных предметных областей, формализованных в первопорядковых логических языках. Кроме того, ЛВ, как решение задачи, интерпретируем человеку в терминах объектов и их свойств, т.е. в сущностях большего абстрактного уровня, чем логические операции с наборами значений булевых переменных при сведении формализаций к задачам выполнимости в пропозициональной логике.

Системы АДТ появились в середине XX века как результат развития

аппарата математической логики и вычислительных систем. Они успешно применяются для решения как практических задач, так и открытых математических проблем¹. Причем, важен не только сам факт установления выводимости формулы и ширина класса решаемых задач, но и затраченные вычислительные ресурсы: время решения задачи, количество шагов вывода, расход оперативной памяти. Для анализа и интерпретации полученного ЛВ важными факторами являются количество шагов вывода и способ его получения, позволяющие порождать альтернативные варианты ЛВ и другие способы интерпретации результатов ЛВ. Повышение эффективности поиска ЛВ увеличивает вероятность получения решения новых открытых математических проблем, даёт возможность использовать системы АДТ в новых предметных областях². В работах С.Н. Васильева развиты теоретические методы применения АДТ в управлении динамическими системами. Масштабное тестирование систем АДТ³ показывает, что далеко не все классы задач покрыты эффективными решателями. Таким образом, проблема повышения эффективности поиска ЛВ и расширения классов решаемых задач системами АДТ является актуальной задачей. В силу полуразрешимости исчислений первого порядка данная проблема всегда является актуальной.

Существенный вклад в разработку методов АДТ и программных систем поиска ЛВ внесли Ж. Эрбран, Дж.А. Робинсон, Л. Уос, Е.В. Бет, С.Ю. Маслов, Р. Ковальский, Д. Уоррен, Д. Кнут, А. Воронков, А. Рязанов, В. МакКьюн, М. Стикель, П. Граф, К. Коровин и др.

В качестве теоретического базиса созданной системы АДТ использовано исчисление позитивно-образованных формул (ПО-формул), разработанное под руководством академика С.Н. Васильева и к.ф.-м.н. А.К. Жерлова на основе языка типово-кванторных формул, изначально использовавшегося для формализации свойств динамических систем и синтеза теорем в методе векторных функций А.М. Ляпунова. Основными достоинствами ПО-

¹McCune W. Solution of the Robbins Problem // J. of Automated Reasoning, V. 19(3), p. 263–276, 1997.

²Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федунев Е.А., Федосов Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами / М.:ФИЗМАТЛИТ, 2000.

³The TPTP (Thousands of Problems for Theorem Provers). URL:<http://www.tptp.org>

формализма, повлиявшими на его выбор в качестве теоретического базиса разработанной системы, в контексте АДТ и повышения эффективности поиска ЛВ являются машинная-ориентированность исчисления, обусловленная *хорошей структурированностью* формул и *единственностью* правила вывода и схемы аксиом; сокращение шагов ЛВ, обеспеченная *крупноблочностью структуры* формулы и правила вывода; сокращение расхода памяти, благодаря компактному представлению ПО-формул по сравнению с широко используемым языком дизъюнктов; расширение класса решаемых задач.

Созданные ранее системы АДТ, базирующиеся на исчислении ПО-формул, либо являются неэффективными, либо носят демонстрационный характер, либо направлены на решение очень узкого класса задач. Таким образом, проблема повышения эффективности поиска ЛВ актуальна и для систем АДТ, базирующихся на исчислении ПО-формул.

Объект исследования. Исчисление позитивно-образованных формул и логический вывод в данном исчислении.

Предмет исследования. Свойства языка и исчисления ПО-формул, современных структур данных и алгоритмов поиска ЛВ в исчислениях первого порядка, разработка структур данных и алгоритмов, обеспечивающих создание новых программных систем и технологий эффективного поиска ЛВ в исчислениях ПО-формул. Эффективность поиска ЛВ задается следующими критериями: время решения задачи; количество шагов ЛВ; объём использованной оперативной памяти; ширина класса успешно решаемых задач.

Цель и задачи диссертационной работы. Цель работы — разработка программной системы для эффективного поиска логического вывода в исчислении позитивно-образованных формул.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработка эффективных структур данных представления ПО-формул в памяти компьютера.
2. Создание оригинальных методик (стратегий) эффективного поиска ЛВ в исчислении ПО-формул.
3. Адаптация существующих методик АДТ для исчисления ПО-формул с целью повышения эффективности поиска ЛВ.

4. Разработка эффективной программной системы АДТ, создание инструментальных средств для программирования систем АДТ в исчислении ПО-формул.
5. Аprobация разработанных программных средств на решении тестовых и практических задач. Сравнение с другими системами АДТ.

Методика исследования состоит в применении современных методов математической логики, теории программирования, информационного моделирования, методов искусственного интеллекта.

Научная новизна работы

1. Изучены свойства исчисления ПО-формул, влияющие на применимость известных методик повышения эффективности поиска ЛВ.
2. Впервые предложены и реализованы подходы обработки неограниченных переменных, стратегия k, m -ограничения, структуры данных экономного представления ПО-формул с дизъюнктивным ветвлением, обработка предиката равенства без прямого представления аксиом равенства в виде ПО-формулы.
3. Впервые, для исчисления ПО-формул успешно применены широко используемые подходы: индексирование термов, параллельные схемы алгоритмов поиска ЛВ, разделение данных, кэширование результатов, системы переписывания термов.
4. Значительно расширен класс решаемых задач при помощи систем АДТ, базирующихся на исчислении ПО-формул. Построены новые варианты решения задач АДТ по сравнению с другими методами АДТ.

Научная и практическая значимость

1. Созданы система АДТ и инструментальная среда разработки систем АДТ, направленные на построение ЛВ формул исчисления ПО-формул первого порядка.
2. Выделены классы задач, для которых созданная система является более эффективной, чем современные высокопроизводительные системы АДТ и предложены специальные стратегии, повышающие эффективность поиска ЛВ.
3. Реализована инфраструктура тестирования разработанных алгоритмов

и программного обеспечения АДТ на тестовых задачах из библиотеки ТРТР.

Исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, выполнены в ФГБОУ ВПО “Иркутский государственный университет” и в Институте динамики систем и теории управления СО РАН.

Исследования поддержаны Федеральной целевой программой, базовым финансированием СО РАН и грантом РФФИ: Федеральная целевая программа “Научные и научно–педагогические кадры инновационной России” на 2009-2013 годы, госконтракт № П696; базовые проекты научно–исследовательской работы ИДСТУ СО РАН, Проект IV.31.2.4., № гос. регистрации: 01201001350, программа IV.31.2., Проект IV.32.1.2., № гос. регистрации: 01201001346; РФФИ, № 08-07-98005-р_Сибирь_а; программа “Университетский кластер”.

Разработанные программные средства используются в учебном процессе в Институте математики, экономики и информатики Иркутского государственного университета (ИМЭИ ИГУ), Национальном исследовательском Иркутском государственном техническом университете (НИ ИрГТУ) и в научной деятельности Института динамики систем и теории управления СО РАН (ИДСТУ СО РАН).

Личный вклад автора

1. Разработка оригинальных стратегий эффективного поиска ЛВ в исчислении ПО–формул [1,2,5,7,8].
2. Адаптация существующих методик эффективного поиска ЛВ в исчислении ПО–формул [1,3,6,7].
3. Реализация структур данных для представления ПО–формул [1,5,7,8].
4. Реализация программной системы АДТ ПО–формул [2,3,5,7,8].
5. Тестирование разработанной системы АДТ на задачах из библиотеки ТРТР [2,5,7].

Под руководством к.т.н. Черкашина Е.А. проведена разработка структур данных для представления ПО–формул с использованием разделения оперативной памяти. Совместно с Давыдовым А.В. созданы методики поиска ЛВ с использованием неограниченных переменных.

Из печатных работ, опубликованных диссертантом в соавторстве, в текст глав 2, 3 и 4 диссертации вошли те результаты, непосредственно определяющие творческий вклад автора диссертации на этапах проектирования и разработки программного обеспечения. В перечисленных публикациях все результаты по реализации и использованию программной системы, принадлежат автору.

Апробация работы и публикации. Материалы работы обсуждались на конференциях и семинарах: Международная конференция “Мальцевские чтения”, 24-28 августа 2009г., г.Новосибирск; семинар ИДСТУ СО РАН “Ляпуновские чтения”, ИДСТУ СО РАН, г. Иркутск, 21-23 декабря 2009г.; Всероссийская конференция молодых ученых “Математическое моделирование и информационные технологии”, 15-21 марта 2010г., г.Иркутск; Международная конференция “Облачные вычисления. Образование. Исследования. Разработки”, 15–16 апреля 2010г., г.Москва; Международный симпозиум по компьютерным наукам в России. Семинар “Семантика, спецификация и верификация программ: теория и приложения”, 14-15 июня 2010г., г.Казань; 4-я Всероссийская конференция “Винеровские чтения”, 9–14 марта 2011г., г.Иркутск; 34-й Международный симпозиум “MIPRO”, 23-27 мая 2011г., г.Опатия, Хорватия; 4-я Всероссийская мультikonференция по проблемам управления, 3-8 октября 2011г., с.Дивноморское; 13-я Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ–2012), 16–20 октября 2012г., г.Белгород.

По теме диссертации опубликовано 14 работ, основные публикации – [1–8], в том числе 3 статьи [1–3] в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ

Соответствие паспорту специальности. Материал диссертации соответствует формуле специальности 05.13.17 – Теоретические основы информатики. Диссертация посвящена исследованию процессов создания, накопления и обработки информации, представленной в виде фактов и знаний; созданию и исследованию новых моделей знаний, методов представления и обработки знаний; исследованию принципов создания и функционирования программных средств автоматизации представления обработки знаний.

В диссертации получены результаты по следующим пунктам “Области исследований”: 2. Исследование информационных структур, разработка и анализ моделей информационных процессов и структур; 8. Исследование и когнитивное моделирование интеллекта, включая моделирование поведения, моделирование рассуждений различных типов, моделирование образного мышления. Результаты диссертации имеют научное и народнохозяйственное значение для решения проблем повышения производительности обработки знаний в ПО-исчислении, они позволяют развить научные основы современных информационных технологий обработки формализованных знаний средствами вычислительной техники и в ускорении на этой основе научно-технического прогресса.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 95 наименований и приложений. Общий объём работы – 164 страницы, из которых 122 страницы – основной текст, включающий 14 рисунков и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и научная новизна диссертационной работы, сформулирована цель, поставлены задачи исследования.

В первой главе даются сведения о теоретическом базисе работы.

В разделе 1.1. даются исторические предпосылки формирования области АДТ, представлены краткие описания основных используемых методов и систем АДТ, предложена классификация современных систем АДТ по уровню управляемости процессом поиска ЛВ и класса решаемых задач.

В разделе 1.2. дано формальное описание исчисления ПО-формул и его особенностей.

Для пояснения терминологии, приведем пример ПО-формулы:

$$\forall: True - \exists: A(e), B(f(t)) - \begin{cases} \forall x: B(x) - \begin{cases} \exists: C(x, e) \\ \exists: C(e, x) \end{cases} \\ \forall x, y: : C(x, e) - \exists: C(y, x) \\ \forall x: C(x, f(t)) - \exists: False \end{cases}$$

ПО-формулы обладают древовидной структурой, поэтому их удобно изображать в виде деревьев и использовать соответствующую терминологию. Каждый узел есть типовый квантор, состоящий из квантора, переменных, конъюнкта и дочерних узлов. Корневой узел (0-го уровня) называется *корнем*; узлы 1-го уровня называются *базами*, а максимальные подформулы, начинающиеся с этого узла, называются *базовыми подформулами*; узлы 2-го уровня называются *вопросами*; узлы третьего уровня — *консеквентами*. Если вопрос имеет более одного непосредственных наследника, то, в соответствии с семантикой ПО-формул, будем говорить, что в вопросе имеется *дизъюнктивное ветвление*. Переменные вопроса, которые управляются соответствующим квантором, но не встречаются в конъюнкте вопроса, называются *неограниченными*. Вопрос, содержащий в консеквенте $\exists: False$, называется *целевым*.

В приведенном примере формула содержит одну базу ($\exists: A(e), B(f(t))$) без переменных и с двумя атомами-фактами в конъюнкте, три вопроса, первый из которых с дизъюнктивным ветвлением, второй вопрос содержит неограниченную переменную y , поскольку она не входит в конъюнкт, содержащий один атом $A(x)$. Третий вопрос является целевым.

В исчислении ПО-формул для доказательства утверждения, опровергается его отрицание, поэтому аксиома исчисления ПО-формул — тождественно ложное высказывание

$$\forall: True \left(\exists \bar{x}_1: False \left(\tilde{\Phi}_1 \right), \dots, \exists \bar{x}_n: False \left(\tilde{\Phi}_n \right) \right).$$

Таким образом, процесс вывода в исчислении ПО-формул является процессом опровержения.

Будем говорить, что вопрос $\forall \bar{y}: A$ к базе $\exists \bar{x}: B$ имеет *ответ* θ тогда и только тогда, когда θ есть подстановка $\bar{y} \rightarrow H^\infty$ и $A\theta \subseteq B$, где H^∞ есть эрбранов универсум, основанный на \exists -переменных из \bar{x} , константных и функциональных символах, которые встречаются в соответствующей базе.

Если ПО-формула F имеет структуру $\forall: True \left(\exists \bar{x}: B(\Phi), \Sigma \right)$, где Σ есть список других базовых подформул, и Φ есть список подформул-вопросов содержащий подформулу-вопрос $\forall \bar{y}: A(\exists \bar{z}_i: C_i(\Psi_i))_{i=1, \dots, k}$, тогда заключение ωF

есть результат применения правила вывода ω к вопросу $\forall \bar{y}: A$ с ответом θ , и $\omega F = \forall: True(\exists \bar{x} \cup \bar{z}_i: B \cup C_i \theta (\Phi \cup \Psi_i \theta)_{i=\overline{1,k}}, \Sigma)$.

После соответствующего переименования некоторых переменных в каждой подформуле, выражение ωF будет удовлетворять всем условиям правильно построенных ПО-формул.

Любая конечная последовательность ПО-формул $F, \omega F, \omega^2 F, \dots, \omega^n F$, где $\omega^n F$ — аксиома исчисления ПО-формул, называется *опровержением* F в исчислении ПО-формул. Иногда будем использовать слово “вывод” вместо слова “опровержение”.

Процедура ЛВ заключается в ответах на вопросы, приводящих к добавлению в базовую подформулу новых атомов-фактов, новых вопросов, либо расщеплению базовых подформул на несколько подформул, в случае ответа на вопрос с дизъюнктивным ветвлением. Ответ на целевой вопрос приводит к опровержению соответствующей базовой подформулы.

В разделе 1.3. выделено три основных направления повышения эффективности поиска ЛВ в исчислении ПО-формул: 1) поиск ответов на вопросы с неограниченными переменными, требующие выбора элемента из эрбранова универсума, который, в общем случае, является бесконечным множеством. Какой именно элемент выбрать изначально неизвестно. 2) Разработка эффективных структур данных для представления ПО-формулы и эффективной обработки выражений языка ПО-формул; фактором, присущим для всех методов и систем АДТ, является неограниченная планка сложности решаемых задач. Некоторые формализации изначально являются весьма крупными. Отсюда вытекает потребность в 3) обеспечении экономного использования памяти, и функционирования системы в режиме полного заполнения доступной оперативной памяти. Исходя из перечисленных особенностей в разделе 1.4. дана постановка задачи.

Во второй главе предложен ряд подходов (стратегий), повышающих эффективность поиска ЛВ в исчислении ПО-формул, и, главным образом, направленных на решение проблем, изложенных в Главе 1. Среди предложенных методик есть как адаптированные для исчисления ПО-формул методики, используемые в других системах АДТ, так и оригинально разработанные.

Дано их подробное описание.

В разделе 2.1. представлены основные *структуры данных*, используемые в разработанной системе АДТ. Дерево состояний вывода (ДСВ) является основной структурой хранения информации о состояниях ЛВ. Структура разработана так, что позволяет одновременно решать несколько задач. Во-первых, реализовывать методику экономии памяти — разделение общих базовых подформул; во-вторых, позволяет производить поиск вывода с возвратом (backtracking); в-третьих, собирать разнообразные статистические данные о ЛВ. ДСВ строится на основе маркированных списков.

В разделе 2.2. предложено несколько вариантов *методики экономии памяти*. 1) Агрессивное разделение термов, позволяющее разделять общие участки оперативной памяти среди термов. Например, в термах $A(g(a, f(x)), h(c))$ и $B(k, g(a, f(x)))$, подтермы $g(a, f(x))$ являются разделяемым участком памяти. Такой подход используется во многих системах АДТ. 2) Мягкое разделение термов, разделяет общие подтермы, используемые в качестве ответных подстановок. 3) Разделение базовых подформул. Базовые подформулы, порожденные в результате дизъюнктивного ветвления, разделяют общую часть исходной базовой подформулы. Данная стратегия реализуется за счёт средств ДСВ. 4) Удаление неиспользуемых фактов из базы. 5) Использование формул минимального веса. На очередном шаге вывода из возможных ответов предпочтение дается такому, который приводит к формуле наименьшего веса. Под весом формулы или терма понимается количество узлов в дереве, представляющем выражение. 6) Запрет на использование повторяющихся выражений.

В разделе 2.3. показана необходимость повышения скорости доступа к разным частям формулы. Для решения данной проблемы адаптирован метод *индексирования термов* — индексирование путями (path indexing), широко применяемый в других системах АДТ. Метод обобщен и позволяет индексировать ПО-формулы. Кроме того, произведено совмещение данного метода со структурами данных и алгоритмами обработки ДСВ.

В разделе 2.4. предложено несколько вариантов решения проблемы *эффективного поиска ЛВ ПО-формул с неограниченными переменными*. Реализация подстановок для неограниченных переменных выполнена в виде

нескольких стратегий. 1) Стратегия ленивых конкретизаций. В качестве подстановки для неограниченной переменной выбирается не конкретный элемент эрбранова универсума, а неопределенный эрбранов элемент (НЭЭ), который, в дальнейшем, исходя из стратегии поиска необходимых термов для построения шага вывода, постепенно конкретизируется до основного терма, либо в некоторых ситуациях так и остается недоопределенным. НЭЭ постепенно конкретизируется таким образом, чтобы на очередном шаге вывода возможно было построить новый ответ на какой-либо или заданный вопрос. Под “постепенной конкретизацией” понимается процедура, аналогичная ленивым вычислениям: НЭЭ доопределяется настолько точно, насколько это достаточно для ответа на текущий вопрос. Кроме того, для этой стратегии предлагается ряд других ограничений, повышающих эффективность. 2) Стратегия фильтрации эрбранова универсума. Данная стратегия – альтернатива предыдущей – основывается на явном использовании элементов эрбранова универсума, но с наложением на него определённых ограничений, выводимых из других подформул-вопросов.

В разделе 2.5. описана *стратегия k, m -ограничения*. Заданный ответ используется в ЛВ, если за последующие k шагов произойдет заданное событие по меньшей мере m раз. Пользуясь терминологией ДСВ, это означает, что для данного узла дерева используется ответ в случае, если построенное в результате дальнейшего вывода поддереву, корнящееся с этого узла, не превысит глубину k , и до этого момента произойдет m раз заданное событие. Построение всех вариантов развития ЛВ, требует применения техники бэктрекинга, реализованного с использованием возможностей ДСВ. Предложено три специализации данной стратегии. 1) k, m -опровержение: за k шагов будет опровергнуто m баз. Данный вариант является дальнейшим развитием стратегии k -опровержения, предложенной ранее А.К. Жерловым. 2) k -неопровержимость: ответ на вопрос с дизъюнктивным ветвлением принимается, если за k шагов соответствующая база не опровергается с использованием только вопросов не содержащих дизъюнктивное ветвление. 3) k, m -конкретизация: за k шагов будет конкретизировано m НЭЭ.

В разделе 2.6. изложены варианты *параллельных схем алгоритмов по-*

иска ЛВ. Во-первых, опровержение каждой базовой подформулы возможно исполнять в отдельном процессе; во-вторых, поиск ответов на все вопросы можно также производить независимо друг от друга (на каждый вопрос ответы порождаются в отдельном процессе); в-третьих, поиск подстановок для каждого атома в вопросе тоже производится параллельно. Перечисленные стратегии обладают единым для всех свойством — свойством однородности. Они сводятся к применению некоторой операции (опровержение базы, поиск ответов и т.д.) для каждого элемента некоторого множества (базы, вопросы и т.д.).

В разделе 2.7. рассматриваются вопросы поиска ЛВ ПО-формул с предикатом *равенства*.

В третьей главе рассматриваются вопросы реализации программной системы.

Программная система АДТ реализована в среде программирования D. Язык D и его система программирования обладают рядом особенностей, позволяющих повысить продуктивность и упростить реализацию алгоритмов системы.

В разделе 3.1. показана *архитектура программной системы*. Архитектура представляет собой набор взаимодействующих друг с другом функциональных блоков.

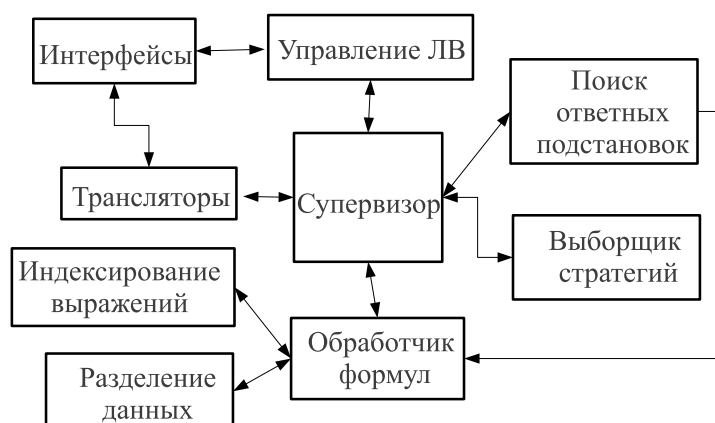


Рис. 1. Архитектура системы

В остальных разделах главы приводится описание основных подсистем. *Супервизор* управляет процессом поиска ЛВ и собирает статистику о про-

цессах со всего ДСВ. Он обеспечивает алгоритмы информацией об ограничениях ресурсов, используемых эвристиках и т.п. В супервизоре находится список всех текущих листовых вершин ДСВ. Большинство стратегий реализовано на уровне супервизора, поскольку, в общем случае, необходимо использовать информацию о всех данных предшествующего или последующего вывода.

Подсистема выбора стратегий отвечает за выбор необходимых стратегий, улучшающих эффективность поиска ЛВ. Выбор стратегий осуществляется автоматически, исходя из структурных характеристик опровергаемой ПО-формулы.

Поиск ответных подстановок включает в себя три подсистемы: хранилище подстановок, алгоритм композиции подстановок и алгоритм унификации термов с учетом НЭЭ.

Обработчик формул предназначен для трансформации формулы во время очередного шага вывода. Показана схема перехода от одного шага ЛВ к следующему. Дано описание мягкого и жесткого копирования термов для корректной работы с НЭЭ и копирования формул в другой процесс поиска ЛВ.

Менеджер памяти. В системе АДТ для каждой разновидности структур (records) выделяется собственный массив, а также ведется собственный однонаправленный список свободных структур. Сборка мусора синхронизирована со сборщиком мусора используемой системы программирования D.

Учитывая множественность возможных ответов, возвратов поиска в выводе, большой глубины вывода, большого количества атомов в базе и т.д. в системе АДТ реализовано *кеширование* некоторых результатов работы процедур, чтобы не производить повторные вычисления.

Транслятор из TRTP в ПО-формулы. Тестирование и сравнение с другими системами АДТ проведено на наборе задач из библиотеки TRTP (Thousands of Problems for Theorem Provers, www.tptp.org). Для взаимодействия с данной библиотекой задач реализован транслятор из её внутренних форматов (FOF, CNF) в формат ПО-формул, используемый в разработанной системе АДТ.

Системные предикаты. В логических языках программирования, например, Прологе, введены так называемые системные предикаты (встроенные предикаты, built-in predicates), которые выполняют некоторое побочное действие, например, вывод значения на экран, чтение значения из файла и др., или их истинность вычисляется из значений параметров, например, `var(X)` в Прологе определяет, является ли терм `X` переменной. Рассмотрено использование системных предикатов для управления поиском ЛВ в исчислении ПО-формул.

В четвёртой главе дано описание классов задач, для решения которых предназначена система АДТ; дано описание набора тестовых задач; проведено сравнение с передовыми системами АДТ; даны комментарии по использованию разработанных стратегий; сделаны выводы и приведена оценка разработанной системы АДТ.

Тестирование системы АДТ проводилось на задачах из библиотеки ТРТР (Thousands of Problems for Theorem Provers, www.tptp.org). Данная библиотека является де-факто стандартом для тестирования систем АДТ. Общее количество задач всех форматов более 20000, подходящих задач для тестирования более 1000. Кроме того, в библиотеке зарегистрированы системы ТРТР, которые являются передовыми (state-of-the-art systems) современными системами АДТ, с которыми имеет смысл производить сравнение на соответствие мировому уровню.

Задачи классифицированы по следующим признакам: рейтинг, предметная область, количественные характеристики формулы, статус и формат формализации. Наиболее важным параметром проверки эффективности системы АДТ является рейтинг, который измеряется числом от 0.0 до 1.0. Задача с рейтингом 0.0 решается любой системой АДТ из ТРТР. Задача с рейтингом 1.0 ещё не была решена ни одной системой. Задачи с рейтингом от 0.04 уже относятся к классу сложных (difficult). Тестирование проведено по всем видам рейтинга от 0.0 до 1.0.

В таблице представлены сводные результаты по решенным задачам и предметным областям. Показаны примеры решения некоторых задач и сравнение с другими системами АДТ. Исходя из экспериментов даны коммента-

рии по эффективности применения предложенных стратегий. Таблицы решенных задач по наиболее удачным предметным областям представлены в приложении, где также приведены задачи, взятые с чемпионата мира среди систем АДТ 2012 (CASC-J6).

Таблица 1. – Рейтинг решенных задач

Рейтинг	Всего задач	Решено
Рейтинг 0.0–0.03	192	171
Рейтинг 0.04–0.20	435	373
Рейтинг 0.21–0.32	128	75
Рейтинг 0.33–0.49	115	44
Рейтинг 0.5–0.67	223	21
Рейтинг 0.68–0.92	72	5
Рейтинг 0.93–1.0	56	0

Лучшие показатели по предметным областям.

Таблица 2. – Предметные области

Предметная область	Всего задач	Решено
Геометрия (GEO)	242	204
Менеджмент (MGT)	22	22
Синтаксические (SYN)	275	180
Семантический веб (SWB)	25	22

Максимальный рейтинг задач, которые удалось решить 0.92, т.е. практически достигнута максимальная планка сложности проблем.

Примеры решенных задач: формализации теоремы о неразрешимости проблемы остановки машины Тьюринга (рейтинг 0.33); задачи модальной логики, транслированные в классический язык логики предикатов первого порядка (рейтинг 0.62 и 0.54). Сравнение проведено с самыми передовыми системами АДТ, и, исходя из результатов тестирования системы, делаются следу-

ющие выводы.

Тестирование решенных задач подтвердило предположение авторов исчисления ПО-формул о том, что крупноблочная структура формул и правила вывода позволяют повысить эффективность поиска ЛВ. Задачи, формализация которых в языке ПО-формул обладает свойством крупноблочности, а именно больших конъюнктов, решаются более эффективно в сравнении с другими системами АДТ. Наблюдается небольшой выигрыш в задачах, формализация которых в языке ПО-формул включает экзистенциальные переменные и глубокие вопросы. Все перечисленные свойства: крупноблочность, явное использование двух видов кванторов, сохранение исходной структуры знания являются основными отличительными свойствами от метода резолюции. Продемонстрирована эффективность данных отличий. Лучшие системы, включенные в библиотеку ТРТР, находятся на более выигрышной позиции при решении задач, содержащих много предикатов равенства.

С точки зрения предметных областей наилучшая эффективность системы показана на задачах геометрии, менеджмента, семантического веба и некоторых других. Манипуляции с включением и отключением предложенных и реализованных стратегий показывают, что они положительно влияют на эффективность поиска ЛВ. По сравнению с предыдущими версиями систем АДТ, базирующихся на ПО-формулах, повышена эффективность решения, а также достигнуты некоторые пределы эффективности, в частности, найден минимальный вывод для некоторых задач.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработаны новые программные методики и технологии эффективного поиска ЛВ в исчислении ПО-формул: специальные структуры представления ПО-формул, стратегии поддержки неограниченных переменных, k, m -ограничение, алгоритмическая поддержка предиката равенства без явного использования аксиом равенства. Разработанные методики реали-

зуют полезные свойства исчислений ПО–формул в программных системах АДТ.

2. Успешно адаптированы и применены существующие методики повышения эффективности поиска ЛВ для исчисления ПО–формул: индексирование термов, параллельные схемы алгоритмов, разделение данных для термов. Адаптация сохраняет полезные свойства исчислений ПО–формул.
3. Реализована новая версия программной системы для эффективного поиска ЛВ в исчислении ПО–формул первого порядка с функциональными символами и предикатом равенства. Создан программный инструмент и технологии разработки специализированных версий программы АДТ, направленные на решение определенных классов задач АДТ.
4. Разработана инфраструктура тестирования алгоритмов и стратегий ЛВ для созданной программной системы АДТ на задачах из библиотеки ТРТР. Выделены классы задач, которые система решает эффективнее, чем другие передовые системы АДТ. Значительно расширен класс успешно решаемых задач по сравнению с предыдущими системами АДТ, базирующимися на исчислении ПО–формул.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Давыдов А.В., Ларионов А.А., Черкашин Е.А. Об исчислении позитивно–образованных формул для автоматического доказательства теорем // Моделирование и анализ информационных систем. 2010. Т. 17, №4. С. 60–69.

2. Ларионов А.А., Черкашин Е.А., Терехин И.Н. Системные предикаты для управления логическим выводом в системе автоматического доказательства теорем для исчисления позитивно–образованных формул // Вестник Бурятского государственного университета. 2011. Вып. 9. Серия “Математика. Информатика”. С. 94–98.

3. Ларионов А.А., Черкашин Е.А. Параллельные схемы алгоритмов автоматического доказательства теорем в исчислении позитивно–образованных формул // Дистанционное и виртуальное обучение. 2012. №2. С. 93–100.

4. Davydov A.V., Larionov A.A., Cherkashin E.A. On the calculus of positively constructed formulas for automated theorem proving // Automatic Control and Computer Sciences (AC&CS). 2011. №1. pp.402–407. [Об исчислении позитивно-образованных формул для автоматического доказательства теорем]
5. A.A. Larionov, E.A. Cherkashin, A.V. Davydov. Theorem Proving Software, Based on Method of Positively–Constructed Formulae // MIPRO–2011. 34-th International convention on information and communication technology, electronics and microelectronics. Croatia, Opatija. 2011. Vol. III. pp. 365–368. [Программа для автоматического доказательства теорем, основанная на исчислении позитивно-образованных формул]
6. А.В. Давыдов, А.А. Ларионов. Об исчислении позитивно-образованных формул для автоматического доказательства теорем // Труды 5-го Международного симпозиума по компьютерным наукам в России. Семинар “Семантика, спецификация и верификация программ: теория и приложения”. Казань. 2010. С. 109–116.
7. Ларионов А.А., Черкашин Е.А., Давыдов А.В. Программная система для автоматического доказательства теорем в исчислении позитивно-образованных формул // Труды IV Всероссийской конференции “Винеровские чтения”. Часть II. Иркутск: ИрГТУ, 2011. С. 190–197.
8. Ларионов А.А., Терехин И.Н., Черкашин Е.А., Давыдов А.В. Программная система КВАНТ/4 для автоматического доказательства теорем // Труды ИМЭИ ИГУ. Математика и информатика: сборник научных трудов / под ред.: Королькова Ю.Д. [и др.]. Иркутск: Изд-во ИГУ. 2011. Вып. 1. С. 77–85.

Ларионов Александр Александрович
ПРОГРАММНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПОИСКА
ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА В ИСЧИСЛЕНИИ
ПОЗИТИВНО-ОБРАЗОВАННЫХ ФОРМУЛ
Автореферат