

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Березуна Даниила Андреевича на тему «Трассирующая нормализация», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»

Диссертация относится к **актуальному** направлению теоретической информатики и программирования – лямбда-исчислению, которое зарекомендовало себя как эффективный математический аппарат для моделирования и оптимизации компьютерных программ. В работе исследована проблема нормализации лямбда-термов простого типизированного лямбда-исчисления, рассмотрена вычислительная стратегия головной линейной редукции, основанная на подходе трассирующей нормализации. Данный подход может использоваться в различных актуальных областях, в частности в оптимизации вычислений, автоматизации построения доказательств теорем, и других областях.

Автор исследует открытый вопрос расширения подхода трассирующей нормализации до исчисления, полного по Тьюрингу. В своей диссертации он обосновал корректность своего алгоритма трассирующей нормализации для нетипизированного лямбда-исчисления, исследовал адаптации трассирующей нормализации для различных стратегий вычислений и рассмотрел представления различных языковых конструкций в рамках предложенного подхода при компиляции функциональных языков программирования. Кроме того, автор выполнил программную реализацию изложенных в диссертации результатов. Таким образом, налицо **научная новизна** представленного исследования

Основные результаты диссертации заключаются в следующем.

1. Разработан алгоритм трассирующей нормализации для нетипизированного лямбда-исчисления, соответствующий нормальному порядку редукций.
2. Представлена модель полной головной линейной редукции, являющаяся расширением известной модели головной линейной редукции. Предложенная модель формализована в виде системы переходов, доказана корректность этой модели относительно головной редукции.
3. Доказана корректность представленного алгоритма трассирующей нормализации относительно предложенной модели полной головной линейной редукции путём его формализации в виде системы переходов и дальнейшей симуляции системы переходов для полной головной линейной редукции.
4. Предложенный алгоритм адаптирован для других, отличных от нормального порядка, стратегий вычислений: аппликативного порядка редукций и вызова по необходимости.
5. Предложен и реализован на примере нетипизированного лямбда-исчисления новый метод компиляции функциональных языков программирования в низкоуровневое представление путём специализации представленного алгоритма трассирующей нормализации на входной терм.

Данные результаты в должной степени обоснованы, их достоверность подтверждена формальными доказательствами, а также пилотной программной реализацией и экспериментами. Все результаты работы опубликованы в 5 печатных работах, из них две одиночные статьи изданы в журналах из «Перечня российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные

результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук”, две статьи опубликованы в изданиях, входящих в базы цитирования SCOPUS и Web of Science.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и двух приложений. Объём диссертации составляет 114 страниц с 31 рисунком и 1 таблицей.

В главе 1 автор излагает основные понятия бестипового и простого типизированного лямбда-исчисления и приводит обзор существующих подходов к нормализации лямбда-термов и к трассирующей нормализации. Рассматриваются сильная и слабая стратегии редукции лямбда-термов, головная редукция, и соответствующие им нормальные формы, а также соответствующие им деревья Бема и абстрактные синтаксические деревья. Наиболее подробно рассматривается головная линейная редукция лямбда-термов, автор доказывает теорему о связи лямбда-терма и результата применения к нему головной линейной редукции, а также устанавливает связь между завершаемостью головной линейной редукции и завершаемостью головной редукции.

Во второй главе автор представляет модель полной головной линейной редукции, которая является расширением модели головной линейной редукции, предложенной V. Danos и L. Regnier. Автор приводит формальное представление обеих моделей в виде систем переходов и доказывает корректность обеих моделей путем установления согласованности обеих моделей с головной редукцией лямбда-термов. Доказательство данного факта (теорема 2) является нетривиальным и использует введенное автором понятие функции расширения exp , которая по состоянию системы переходов вычисляет соответствующий ему лямбда-терм, получаемый последовательной редукцией всех простых редексов, накопившихся в процессе движения от начального состояния. Следствием теоремы 2 является тот факт, что головная линейная редукция завершается тогда и только тогда, когда завершается головная редукция. Далее вводится модель полной головной линейной редукции, которая является расширением головной линейной редукции, рекурсивно применяющим последнюю к аргументам при достижении конечного состояния. Автор приводит определение полной головной линейной редукции в виде системы переходов, являющийся расширением системы переходов для головной линейной редукции. Автор обосновывает корректность полной головной линейной редукции путем использования функции расширения (exp) состояний системы переходов до соответствующего лямбда-терма, и доказывает теорему (теорема 3) о том, что полная головная линейная редукция завершается тогда и только тогда, когда терм имеет нормальную форму.

Глава 3 посвящена ключевому результату диссертации - изложению алгоритма трассирующей нормализации нетипизированного лямбда-исчисления. Алгоритм получает на вход произвольный лямбда-терм, и нормализует его (в том случае, когда нормальная форма существует). Процедура нормализации является альтернативой по отношению к классическим процедурам нормализации, основанным на заменах подтермов, и выполняется путем обхода абстрактного синтаксического дерева терма, оставляя сам терм неизменным. Автор использует хвосто-рекурсивные преобразования путем замен вложенных вызовов семантической функции на вызов дополнительной функции продолжения и дефункционализации. Далее в преобразованиях используется семантика истории и окружений, на основе которой производится замена окружения из хвосто-рекурсивной семантики на структуру данных. Заключительным шагом трассирующей нормализации является преобразование окружения в историю вычислений. Глава завершается примером работы алгоритма трассирующей нормализации.

Глава 4 посвящена обоснованию корректности алгоритма трассирующей нормализации нетипизированного лямбда-исчисления. Автор сначала рассматривает ограниченную версию алгоритма трассирующей нормализации в виде системы переходов и устанавливает соответствие между системами переходов для головной линейной редукции и ограниченной версии алгоритма трассирующей нормализации, определив функцию преобразования состояний одной системы переходов в состояния другой. Затем автор устанавливает взаимно однозначное соответствие между головной линейной редукцией и ограниченной версией алгоритма трассирующей нормализации нетипизированного лямбда-исчисления. Автор доказывает утверждение (теорема 4) о корректности алгоритма восстановления состояния системы переходов для головной линейной редукции из соответствующего состояния системы переходов для ограниченного


алгоритма трассирующей нормализации. Затем автор доказывает утверждение (теорема 5) о согласованности алгоритма трассирующей нормализации нетипизированного лямбда-исчисления с полной головной линейной редукцией, следствием которого является утверждение о завершаемости алгоритма трассирующей нормализации в том и только том случае, когда нормальная форма входного терма существует.

Последующие главы диссертации посвящены вопросам приложения полученных теоретических результатов для решения различных задач, относящихся к вопросам компиляции программ. В главе 5 рассматривается задача компиляции путём специализации компилируемых программ. Автор показывает, как алгоритм трассирующей нормализации может быть использован для генерации компилятора путём его специализации. Глава 6 посвящена вопросам связи трассирующей нормализации и стратегий вычисления: автор адаптирует алгоритм трассирующей нормализации для стратегии аппликативного порядка редукций, а также показывает, как семантика функциональных конструкций может быть представлена с помощью подхода трассирующей нормализации на примере языка программирования PCF. Автор представил в диссертации разработанную им экспериментальную реализацию алгоритма трассирующей нормализации нетипизированного лямбда-исчисления на языках Haskell и Racket.

В качестве **замечания** можно рекомендовать диссертанту в будущих исследованиях провести подробный анализ преимуществ своего метода нормализации, связанных с выигрышем в сложности решения задачи нормализации.

Диссертация Д.А.Березуна соответствует паспорту специальности 05.13.11: методы, модели и алгоритмы проектирования и анализа программ и программных систем, их эквивалентных преобразований, верификации и тестирования. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. Работа полностью удовлетворяет требованиям Положения "О порядке присуждения учёных степеней", предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Березун Даниил Андреевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.11 — математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

Миронов Андрей Михайлович,
к.ф.-м.н., доцент кафедры математической
теории интеллектуальных систем
механико-математического факультета
Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова


2.03.2018

Подпись Миронова А.М. Березуна
Специальность по адресу
/Землесекция 1/5

