

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Четвериной Ольги Александровны

**«Повышение качества компиляции кода в режиме по умолчанию»,  
представленную к защите на соискание ученой степени физико-  
математических наук по специальности 05.13.11 – математическое и  
программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и  
компьютерных сетей.**

### Актуальность

Возможности наращивания производительности микропроцессоров за счет увеличения тактовых частот в настоящее время достигли предела, обусловленного законами физики. Поэтому дальнейшее развитие архитектуры направлено на увеличение количества исполняющих устройств для обеспечения параллельного исполнения операций. Для эффективного использования большого количества устройств необходимо обеспечить выявление параллелизма кода и его качественное планирование. Для архитектур со статическим планированием, к которым относится Эльбрус, планирование потока команд полностью осуществляется компилятором. Задача оптимального планирования на практике не может быть решена точно из-за большой вычислительной сложности и влияния входных данных на работу программы. В ряде случаев выполнение программы может быть значительно ускорено за счет использования многоэтапных механизмов настройки компиляции, в частности, путем оптимизации по профилю, однако применение подобных методов не всегда возможно из-за необходимости проведения тренировочных запусков и больших временных затрат на компиляцию. Таким образом, тема повышения качества компиляции в режиме по умолчанию, которой посвящена диссертационная работа Четвериной О.А., является *актуальной*.

### Структура работы

В **первой главе** представлен анализ существующих способов настройки компиляции приложений. С целью повышения качества компиляции в режиме по умолчанию предложен метод попроцедурной настройки оптимизации методами машинного обучения. Суть метода заключается в предварительном формировании фиксированного набора оптимизационных последовательностей,

из которого по вычислимым характеристикам процедуры в процессе компиляции выбирается наиболее подходящая. Реализация предложенного метода требует решения ряда независимых задач, сформулированных и решенных в последующих главах.

Во **второй главе** рассматривается задача разработки методов, позволяющих приблизить оптимизацию по умолчанию к оптимизации с использованием профильной информации. Предложен новый метод увеличения количества инструкций, исполняемых в одной итерации сложных циклов с неравновесными ветвлениями, который заключается в дублировании части путей цикла. Предложены также алгоритмы оптимизации работы с кэш-памятью, которые за счет некоторых дополнительных вычислений и небольшой дополнительной нагрузки на кэш позволяют повысить производительность в среднем.

**Третья глава** посвящена анализу необходимых свойств функционала оценки качества компиляции и построению его точного представления. Рассмотрены варианты функционала для разных случаев, таких как компиляция для достижения максимальной производительности кода и JIT-компиляция. Предложенный подход к оценке качества компиляции достаточно универсален и может быть полезен при разработке компиляторов для различных архитектур.

**Глава 4** посвящена формулировке и решению задачи машинного обучения для минимизации функционала оценки качества компиляции. Проанализированы описанные в литературе модели машинного обучения и показано, что они не могут быть непосредственно использованы для решения поставленной задачи. Автором предложены две альтернативные модели — алгоритм построения последовательности закономерностей при классификации по функционалу качества, улучшающий решение на каждом шаге, и алгоритм минимизации частичной ошибки, позволяющий продолжать поиск решения даже в случае локальных ям. Для обоих алгоритмов доказаны теоремы об их сходимости. Представлен также набор признаков процедур, используемый в процессе машинного обучения.

Предложенный подход был опробован на приложениях пакетов SPEC CINT2000 и SPEC CFP2000 и показал значительное сокращение как времени выполнения, так и времени компиляции приложений.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы и возможные направления дальнейших исследований.

### **Научная новизна и практическая значимость**

В диссертационной работе представлены следующие новые научные результаты:

- Единый функционал для попроцедурной многокритериальной оценки качества компиляции.
- Теоремы и лемма о соответствии точек на границе Парето минимумам функционала и о представлении функций, сохраняющих порядок при растяжениях.
- Утверждение о представлении функционала качества компиляции для одновременного учета времени исполнения и времени компиляции.
- Определение задачи минимизирующей классификации с заданной функцией потери. Алгоритм ее решения и метод перехода к аддитивной функции потери для отдельных минимумов. Теоремы о сходимости.
- Методы оптимизации циклов посредством раскрутки части их путей и теоремы, позволяющие оценить их эффективность. Метод выбора адресов данных для подкачки нерегулярных чтений структур. Алгоритм конвейеризации с забросом чтений и ограничением планируемого времени исполнения цикла.

Разработанные автором методы были внедрены в качестве одного из базовых режимов в оптимизирующем компиляторе с языков высокого уровня Си, С++, Фортран-77 и Фортран-90 для микропроцессоров «Эльбрус» и Sparc V9.

Предложенные во второй главе алгоритмы оптимизации могут быть полезны при разработке компиляторов для архитектур со статическим планированием. Метод обобщенной многокритериальной оценки качества компиляции может быть применен для настройки компиляторов для различных архитектур. Направления дальнейших исследований могут включать адаптацию других методов классификации для решения задачи машинного обучения, разработку методов полностью автоматического построения оптимизационных последовательностей.

## **Достоверность и обоснованность научных положений и выводов работы**

Результаты исследований были доложены на семи научных конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, (в том числе 6 в журналах из перечня ВАК, среди них 1 в журнале, индексируемом системой Scopus). Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Замечания**

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

- В разделе 2.1 приведены оценки эффективности частичной раскрутки (1), (2), (3). Полезно было бы привести примеры, иллюстрирующие указанные оценки.
- В главе 3 описано построение функционала оценки качества компиляции и показано его применение к компилятору для архитектуры Эльбрус. Безусловным плюсом было бы проведение аналогичного эксперимента для альтернативного компилятора.
- В тексте диссертации имеются многочисленные погрешности и опечатки, затрудняющие восприятие материала. Например, в разделе 4.3 не описаны некоторые переменные, использованные в формулах вычисления характеристик процедур. На стр. 79 в формулировке Леммы 3 упоминается неизвестная функция  $q$  (видимо, должно быть  $g$ ). В подписи к рис. 13, иллюстрирующему изменение времени исполнения, непонятна фраза «100% означает ускорение времени компиляции в 2 раза».
- Существуют более современные версии пакетов spс95 и spс2000, использованных в работе для замеров производительности.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы.

### **Заключение**

Диссертация Четвериной Ольги Александровны «Повышение качества компиляции кода в режиме по умолчанию» представляет собой завершенное

исследование, проведенное на высоком научно-техническом уровне. Основные результаты диссертации опубликованы в научных изданиях и докладывались на российских и международных конференциях и семинарах. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее основное содержание.

Диссертация отвечает требованиям Положения ВАК РФ о порядке присуждения учёных степеней, а ее автор Четверина Ольга Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей».

Доктор физико-математических наук, заведующий  
сектором Федерального государственного  
учреждения «Федеральный научный центр Научно-  
исследовательский институт системных  
исследований Российской академии наук»

З.А. Галатенко

«04» апреля 2019 г.