

## ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Буровой Ирины Герасимовны на диссертацию

Азимова Рустама Шухратулловича на тему «Решение задач поиска путей в графе с заданными контекстно-свободными ограничениями с использованием методов линейной алгебры», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей.

. Диссертационная работа Рустама Шухратулловича Азимова посвящена исследованию применимости методов линейной алгебры к задаче поиска путей в графе с заданными контекстно-свободными ограничениями (КС-ограничениями) для получения высокопроизводительных реализаций на основе параллельных вычислений.

Как известно, поиск путей является одной из важнейших задач анализа графов. Имеются разные вариации решения этой задачи: непосредственный поиск определённых путей, задача достижимости (сами пути не ищутся, но доказывается их существование) и т.д. В рамках решения этих задач могут задаваться специальные свойства искомых путей. Одним из способов описания таких свойств является использование формального языка над некоторым алфавитом (использования ограничения). Можно ограничить множество слов, получаемых конкатенацией меток на дугах рассматриваемых путей. Таким образом, в задачах поиска путей в помеченном графе с заданным формальным языком можно рассматривать только те пути, которые образуют слова, принадлежащие этому языку. В настоящее время активно исследуются ограничения, представленные в виде контекстно-свободных (КС) языков. Такие языки позволяют описывать более широкий набор ограничений, чем активно используемые на практике регулярные выражения. Далее, одним из распространённых способов получения высокопроизводительных реализаций алгоритмов анализа графов является использование методов линейной алгебры. При этом существующие алгоритмы, фактически, переводятся на язык линейной алгебры, т.е. для представления графа используются разреженные матрицы (такие матрицы, которые имеют малое количество ненулевых элементов), а для анализа и преобразований графа используются операции над матрицами (умножение матриц, сложение, транспонирование матриц и т.д.). Однако возможность использования методов линейной алгебры в задачах поиска путей в графе с заданными КС-ограничениями в настоящее время исследована очень слабо. Как показывает практика, существующие решения данной задачи страдают от недостаточной производительности и не справляются с постоянно растущими размерами реальных графов. Поэтому **тема** данной работы - исследование применимости методов линейной алгебры к задаче поиска путей в графе с заданными КС-ограничениями для получения высокопроизводительных реализаций представляется актуальной.

Работа состоит из введения, 6 глав, заключения. В первой главе вводятся основные термины и определения, используемые в работе, приводится формальная постановка задач поиска путей в графе с заданными КС-ограничениями, рассматриваются существующие алгоритмы для их решения. Кроме того, даны основные идеи использования методов линейной алгебры для решения задач анализа графов, а также перечислены существующие библиотеки линейной алгебры. Во второй главе представлен подход к решению класса

РК № 33-06-275 от 04.03.2023

задач по поиску путей в графе с ограничениями, заданными КС-языком, с помощью методов линейной алгебры. В третьей главе изложен алгоритм, для решения задачи достижимости, поиска одного, а также поиска всех путей в графе с заданными КС-ограничениями с использованием операций умножения матриц, сформулированы и доказаны утверждения о корректности и временной сложности полученного алгоритма. В четвертой главе изложен алгоритм поиска путей в графе с заданными КС-ограничениями, который не требуют трансформации входной КС-грамматики, а также использует операции линейной алгебры для задач достижимости, поиска одного пути и поиска всех путей. Глава 5 содержит результаты экспериментов. В шестой главе представлено сравнение полученных результатов с основными существующими решениями задачи поиска путей в графе с заданными КС-ограничениями.

### **Отметим следующие важные полученные результаты**

1. Разработан подход к поиску путей в графе с заданными КС-ограничениями на основе методов линейной алгебры, который позволяет использовать теоретические и практические достижения линейной алгебры для решения данной задачи.
2. Разработан алгоритм, использующий предложенный подход и решающий задачи поиска путей в графе с заданными КС-ограничениями. Доказана завершаемость и корректность предложенного алгоритма. Получена теоретическая оценка сверху временной сложности алгоритма.
3. Разработан алгоритм поиска путей в графе с заданными КС-ограничениями, использующий предложенный подход и не требующий преобразования входной КС-грамматики. Доказана завершаемость и корректность предложенного алгоритма. Получена теоретическая оценка сверху временной сложности алгоритма. Предложенный алгоритм позволяет избежать значительного увеличения размеров входной грамматики и увлечения времени работы алгоритма.
4. Проведено экспериментальное исследование разработанных алгоритмов на реальных RDF данных и графах, построенных для статического анализа программ. Было проведено сравнение полученных реализаций между собой, с существующими решениями из области статического анализа и с решениями, основанными на различных алгоритмах синтаксического анализа. Результаты сравнения показывают, что предложенные реализации для задачи достижимости позволяют ускорить время анализа и снизить потребление памяти.

В работе есть ряд опечаток (например, стр.46). Рисунки в ряде случаев не имеют подписей (например, стр.18), плохо форматированы (например, стр.94). Распараллеливание упоминается в работе, но детальной проработки распараллеливания нет. Алгоритмы распараллеливания не приведены, не указано, в каком случае и как следует распараллелить, нет таблиц с ускорением и эффективностью. Однако эти перечисленные недостатки в целом не влияют на положительную оценку диссертационной работы, на ее главные теоретические и практические результаты.

Основные научные результаты диссертации были представлены на ряде международных научных конференций. Также исследование было поддержано грантами РНФ и грантом РФФИ. Это подтверждает достоверность и новизну результатов. Список цитированной литературы 79 наименований. Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Из 8 публикаций три работы опубликованы в журналах из «Перечня российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук», рекомендовано ВАК. Семь работ индексируются в базе данных Scopus. Для работ, написанных в соавторстве, даны сведения о личном вкладе автора.

Диссертация Азимова Рустама Шухратулловича на тему: «Решение задач поиска путей в графе с заданными контекстно-свободными ограничениями с использованием методов линейной алгебры» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Азимов Рустам Шухратуллович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Председатель диссертационного совета

доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры вычислительной математики  
Санкт-Петербургского государственного университета

И.Г.Бурова

02.03.2023

198504 Санкт-Петербург,  
Петродворец,  
Университетский пр. 28.  
[i.g.burova@spbu.ru](mailto:i.g.burova@spbu.ru)