ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

(к протоколу № 2)

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета УрФУ 05.09.24 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,

на соискание ученой степени доктора наук

|  |  |
| --- | --- |
| г. Екатеринбург | от 22 февраля 2022 г. |
| ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ЗАСЕДАНИЯ –  заместитель председателя диссертационного совета  д-р физ.-мат. наук, доц.  А.Н. СЕСЕКИН | УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  диссертационного совета  д-о техн. наук, доц.  О.М. ОГОРОДНИКОВА |

На заседании совета присутствуют 9 членов диссертационного советаиз 12 человек, входящих в состав совета, в том числе 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Петунин Александр Александрович | - д-р техн. наук, 05.13.12 (техн. науки) |
|  | Сесекин Александр Николаевич | - д-р физ.-мат. наук, 05.13.12 (техн. науки) |
|  | Огородникова Ольга Михайловна | - д-р техн. наук, 05.13.12 (техн. науки) |
|  | Емельянов Игорь Георгиевич | - д-р техн. наук, 05.13.12 (техн. науки) |
|  | Картак Вадим Михайлович | - д-р физ.-мат. наук, 05.13.12 (техн. науки) |
|  | Коновалов Анатолий Владимирович | - д-р техн. наук, 05.13.12 (техн. науки) |
|  | Лавров Владислав Васильевич | - д-р техн. наук, 05.13.12 (техн. науки) |
|  | Митюшов Евгений Александрович | - д-р физ.-мат. наук, 05.13.12 (техн. науки) |
|  | Паршин Сергей Владимирович | - д-р техн. наук, 05.13.12 (техн. науки) |
|  | Попов Владимир Юрьевич | - д-р физ.-мат. наук, 05.13.12 (техн. науки) |
|  | Спирин Николай Александрович | - д-р техн. наук, 05.13.12 (техн. науки) |
|  | Шнайдер Дмитрий Александрович | - д-р техн. наук, 05.13.12 (техн. науки) |

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Уважаемые члены диссертационного совета, утвержденный состав диссертационного совета 12 человек. На заседании диссертационного совета присутствуют 9 членов совета, в том числе 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации. Кворум имеется. Мы можем начинать заседание

На повестке дня защита диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Уколова Станислава Сергеевича «Разработка алгоритмов оптимальной маршрутизации инструмента для САПР управляющих программ машин листовой резки с ЧПУ», по специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (промышленность).

Диссертация выполнена на кафедре «Информационные технологии и автоматизация проектирования» Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Диссертация к защите представляется впервые.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Петунин Александр Александрович, профессор кафедры информационных технологий и автоматизации проектирования Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Официальные оппоненты:

**Верхотуров Михаил Александрович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, заведующий кафедрой информатики;

**Коновалов Анатолий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГБУН Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, заведующий лабораторией механики деформаций;

**Ложников Павел Сергеевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск, заведующий кафедрой комплексной защиты информации.

Официальный оппонент Верхотуров Михаил Александрович в связи с распространением коронавирусной инфекции на территории Российской Федерации участвуют в заседании в удаленном интерактивном режиме.

Согласно п. 38 Положения о совете по защите диссертаций в УрФУ разрешается проведение заседаний советов УрФУ в отсутствие по уважительной причине оппонента, а также участие официальных оппонентов в заседании диссертационного совета в удаленном интерактивном режиме при условии аудиовизуального контакта с участниками заседания.

Аудиовизуальный контакт с оппонентами установлен.

Есть вопросы по повестке дня? Нет вопросов.

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ:** Оглашает биографические данные Уколова Станислава Сергеевича. Знакомит членов диссертационного совета с содержанием документов, представленных соискателем. Отмечает, что представленные диссертантом документы и материалы предварительной экспертизы полностью соответствуют установленным требованиям.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Уважаемые коллеги, есть вопросы по кандидатуре диссертанта? Нет вопросов. Станислав Сергеевич, Вам предоставляется слово для изложения основных положений исследования, не более 20 минут на доклад, пожалуйста.

**ДИССЕРТАНТ:** Докладывает основное содержание диссертационной работы. Доклад сопровождается мультимедийной презентацией.

(Текст доклада и материалы презентации прилагаются).

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо, Станислав Сергеевич! Уважаемые коллеги, пожалуйста, вопросы.

**Кислов А.Н., д-р физ-мат. наук:** Вы могли бы кратко сформулировать защищаемые положения?

**ДИССЕРТАНТ:** Два алгоритма – решения обобщенной задачи коммивояжера с ограничениями предшествования и непрерывной резки, и методика интеграции этих алгоритмов в существующие САПР на основе открытых форматов данных.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Еще, пожалуйста, вопросы. Профессор Попов, пожалуйста.

**Попов В.Ю., д-р физ-мат. наук, проф.:** Прозвучали некоторые слова о распараллеливании, в частности об использовании кластера ИММ, многоядерного Xeon. Естественно, возникает вопрос, почему не использовались графические сопроцессоры, просто было неинтересно или есть какие-то принципиальные трудности?

**ДИССЕРТАНТ:** Использование графических сопроцессоров не рассматривалось, ввиду отсутствия опыта их использования, а кластер был доступен и имеется опыт запуска на нём аналогичного кода.

**Попов В. Ю., д-р физ-мат. наук, проф.:** Ещё один вопрос. Вы говорили о процедуре выбора окрестности, что-то можно модифицировать, поменять пару контуров, если что – тройку контуров и т. д. Кто или что управляет тем, что меняем? Как сам алгоритм догадывается, что именно поменять?

**ДИССЕРТАНТ:** Есть просто набор трансформаций, сначала используются парные, потом – тройные. Это заложено в алгоритм разработчиком, своего рода директивный протокол, разработанный на основании экспертных оценок.

**Митюшов Е.А., д-р физ-мат. наук, проф.:** При формировании целевой функции стоимость врезки – один из критериев. Стоимость врезки будет разная в разных местах? В чём тогда оптимизация, ведь стоимость резки по длине маршрута одна и та же, поскольку материал один и тот же?

**ДИССЕРТАНТ:** В проведенном исследовании полные целевые функции очень сильно редуцированы до холостого хода. Здесь мы оптимизируем только холостой ход, стоимость собственно резки и стоимость резки – константа. В дальнейших работах, и в диссертации уже есть раздел про это, использовать эти алгоритмы для более сложных классов задач, для сегментной резки. В этом случае меняется состав вырезаемых сегментов и количество точек врезки. И это даёт большую оптимизацию.

**Лавров В.В., д-р техн. наук, проф.:** Свойства материала или задачи термической деформации как-то учитываются при проектировании термической резки?

**ДИССЕРТАНТ:** В текущем состоянии – пока нет. Учёт ограничений термической резки планируется в этих алгоритмах, но пока это просто фигурная резка.

**Лавров В.В., д-р техн. наук, проф.:** Результат Вашей работы – это раскройная карта. Алгоритмы, реализованные в виде ПО, дают возможность технологу указывать точки врезки с учётом минимизации холостого хода.

**ДИССЕРТАНТ:** Раскройная карта – это исходные данные для алгоритмов. Точки врезки мы находим, верно.

**Лавров В.В., д-р техн. наук, проф.:** Вопрос по интеграции. Вы разработали алгоритмы на основе JSON-файлов, JavaScript и т. д. для обмена с существующими САПР. Вы написали специализированное ПО для возможности конвертирования. Вопрос – а не существует базы данных? Исходные данные хранятся в виде файлов, библиотек?

**ДИССЕРТАНТ:** Да, это может быть реализовано как набор файлов, двоичных или текстовых. Их можно хранить в базе данных, но вопрос того, в каком формате хранить файлы в базе данных, он точно так же возникает.

**Лавров В.В., д-р техн. наук, проф.:** Насколько эффективны разработанные алгоритмы, они применимы для крупных или мелких серий? Это не крупные серии, уникальные какие-то вещи режутся?

**ДИССЕРТАНТ:** Алгоритм дискретной оптимизации реализован на Python и вероятно время его работы хотелось бы улучшить. Пока он вряд ли применим на очень больших масштабах.

**Картак В.И., д-р физ-мат. наук, доцент.:** Какова размерность практических задач, которые Вы решали?

**ДИССЕРТАНТ:** На данный момент это десятки контуров. Первый оппонент предоставил нам свои примеры в 400 – 600 контуров, решения для них были найдены, но это, конечно, тяжело.

**Картак В.И., д-р физ-мат. наук, доцент.:** Не было ли оценок оценки хотя бы сверху сложности этой задачи? Хотя бы комбинаторной?

**ДИССЕРТАНТ:** В тексте диссертации приведены такие оценки, опирающиеся на понятие идеала частично упорядоченного множества. В общем, это конечно, экспоненциальная сложность. Но для ограничений предшествования определённого класса, то там есть задачи полиномиальной сложности.

**Картак В.И., д-р физ-мат. наук, доцент.:** Не было ли попыток представить эту задачу в виде задачи целочисленного линейного программирования?

**ДИССЕРТАНТ:** Да, при сравнении с решателем Gurobi, для него используется модель целочисленного линейного программирования, разработанная вне рамок данной диссертации. В работе есть ссылка.

**Спирин Н.А., д-р техн. наук, проф.:** Целью диссертации является разработка оптимальной маршрутизации инструмента, но не холостого хода. Оптимизируется холостой ход или весь маршрут?

**ДИССЕРТАНТ:** на данном этапе строго говоря, оптимизируется холостой ход. В тексте диссертации имеется пример использования алгоритма решения задачи непрерывной резки, там оптимизируется и количество точек врезки, и маршрут собственно резки. Но это всё-таки следующий этап исследований

**Спирин Н.А., д-р техн. наук, проф.:** Достоверность результатов подтверждается результатами экспериментальных исследований, о каком физическом эксперименте идёт речь?

**ДИССЕРТАНТ:** Только численный эксперимент.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Пожалуйста, еще вопросы? Вопросов больше нет. Станислав Сергеевич, пока присаживайтесь. Слово предоставляется научному руководителю – доктору технических наук, доценту Петунину Александру Александровичу.

**ПЕТУНИН А.А., д-р техн. наук, доц.:** Оглашает отзыв (отзыв прилагается).

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо, Александр Александрович. Есть вопросы к научному руководителю? Нет вопросов. Слово предоставляется ученому секретарю для оглашения основных положений заключения кафедры, на которой выполнялась работа, и отзывов, поступивших на автореферат.

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ:** Диссертация Уколова Станислава Сергеевича выполнена на кафедре «Информационные технологии и автоматизация проектирования» Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

В деле имеется положительное заключение кафедры от 27 октября 2021 г. (протокол № 4), в котором отмечается актуальность выполненной работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, личный вклад соискателя, достоверность полученных результатов, соответствие научной специальности. Диссертация «Разработка алгоритмов оптимальной маршрутизации инструмента для САПР управляющих программ машин листовой резки с ЧПУ» Уколова Станислава Сергеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (промышленность).

(Заключение кафедры прилагается)

На автореферат поступило 5 отзывов, все положительные. Позвольте, мне не зачитывать все отзывы, а сделать их обзор с указанием отмеченных в них замечаний. Поступили отзывы от следующих специалистов:

– **Ченцов Александр Георгиевич**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ФГБУН Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, главный научный сотрудник. Без замечаний.

– **Захарова Галина Борисовна**, кандидат технических наук доцент, ФГБОУ ВО Уральский государственный архитектурно-художественный университет, г. Екатеринбург, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской части. Содержит замечания и вопросы:

1) На рис. 2 на стр. 10 приведена классическая задача коммивояжера TSP как один из частных случаев задачи резки, хотя как правило последняя сводится к обобщённой задаче коммивояжера GTSP. Не ясно, каким образом простая задача коммивояжера может применяться для поиска оптимального решения задачи маршрутизации режущего инструмента.

2) Понятно, что ограничение предшествования сокращает время счёта для алгоритма главы три, не использующего дискретизацию контуров. А как аналогичный эффект достигается для алгоритма ветвей и границ второй главы?

3) Не для всех реализованных в работе алгоритмов приведено время счета. Хотелось бы получить представление о сравнительном быстродействии этих алгоритмов.

– **Мельников Андрей Витальевич**, доктор технических наук, профессор, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, г. Ханты-Мансийск, директор. Содержит замечания:

4) В автореферате при описании разработанных в работе алгоритмов решения задач маршрутизации говорится только об ограничениях типа условий предшествования, при этом не обговаривается учёт других технологических ограничений термической резки.

5) На стр. 18 упомянуто, что алгоритм, использующий модель непрерывно-дискретной оптимизации, сравнивается с точным алгоритмом Александра Георгиевича Ченцова, разработанным на основе метода динамического программирования. В дополнение к этому следовало бы привести сравнение и с алгоритмом ветвей границ, разработанным в диссертационной работе. Имеется в виду и факт получения глобального экстремума и вычислительные затраты на его получение.

– **Таваева Анастасия Фидагилевна**, кандидат технических наук, главный специалист акционерного общества «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова», г. Екатеринбург. Содержит замечания и пожелания:

6) Хотелось бы сравнить результаты работы алгоритмов второй и третьей глав на одних и тех же раскройных планах, что позволило бы лучше судить о применимости этих алгоритмов для разработки управляющих программ для машин листовой резки с ЧПУ.

7) В автореферате отсутствуют экспериментальные данные о быстродействии реализации алгоритма, использующего непрерывно-дискретную оптимизацию.

8) Интересно было бы исследовать влияние уровня вложенности деталей в раскройном плане на быстродействие описанных алгоритмов.

– **Мартынов Виталий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, заведующий кафедрой экономической информатики. Содержит замечания:

9) К недостаткам автореферата можно отнести почти полное отсутствие описания деталей программной реализации алгоритмов, приведён псевдокод только одного программного блока.

10) С точки зрения оформления неудачно выбрано расположение в тексте рисунка 1 на стр. 8.

11) Сформулированные основные результаты и выводы по работе не коррелируют однозначно с поставленными задачами.

(Отзывы, поступившие на автореферат, прилагаются)

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо, Ольга Михайловна. Станислав Сергеевич, пожалуйста, ответьте на замечания и вопросы, содержащиеся в отзывах на автореферат.

**ДИССЕРТАНТ:** Ответы на вопросы и замечания к.т.н., доцента **Захаровой Галины Борисовны:**

*На рис. 2 на стр. 10 приведена классическая задача коммивояжера TSP как один из частных случаев задачи резки, хотя как правило последняя сводится к обобщённой задаче коммивояжера GTSP. Не ясно, каким образом простая задача коммивояжера может применяться для поиска оптимального решения задачи маршрутизации режущего инструмента.*

Ответ: Обобщённая задача коммивояжера вырождается в классическую, если на каждом контуре определена только одна возможная точка врезки. Такой случай приведён в тексте диссертации на стр. 56. Этот класс задач, в частности, рассматривается в работах первого оппонента профессора М. А. Верхотурова.

Кроме того, алгоритм решения задачи непрерывной резки в главе 3 фактически сводит последнюю как раз к классической задаче коммивояжера, только расстояния между городами, роль которых выполняют контуры деталей, задаётся не в виде матрицы, а вычисляется «на лету» в ходе работы эвристики поиска оптимальных позиций точек врезки.

*Понятно, что ограничение предшествования сокращает время счёта для алгоритма главы три, не использующего дискретизацию контуров. А как аналогичный эффект достигается для алгоритма ветвей и границ второй главы?*

Ответ: В двух блоках алгоритма ветвей и границ учёт ограничения предшествования позволяет снизить вычислительную сложность: 1) в момент релаксации исходной задачи PCGTSP в задачу ATSP и 2) в процедуре ветвления. В обоих случаях в ходе исследования удалось увеличить эффективность отсечения (соответственно рёбер графа и ветвей дерева), по сравнению с подходами, описанными в литературе.

*Не для всех реализованных в работе алгоритмов приведено время счета. Хотелось бы получить представление о сравнительном быстродействии этих алгоритмов.*

Согласен с замечанием. Алгоритмы тестировались в разное время и на разных задачах. Первым был разработан алгоритм решения задачи непрерывной резки и нас интересовала его работоспособность. Сейчас, с появлением библиотеки задач резки, планируется провести численный эксперимент по сравнению всех задействованных алгоритмов.

Ответы на вопросы / замечания д.т.н., профессора **Мельникова Андрея Витальевича:**

*В автореферате при описании разработанных в работе алгоритмов решения задач маршрутизации говорится только об ограничениях типа условий предшествования, при этом не обговаривается учёт других технологических ограничений термической резки.*

Согласен с замечанием. Учёт других ограничений термической резки не входил в задачи исследования. Для практического применения разработанных алгоритмов именно для термической резки, требуется их доработка. Поскольку этот вопрос уже решён на практике для алгоритма А. Г. Ченцова и П. А. Ченцова, эта доработка будет носить скорее технический характер.

*На стр. 18 упомянуто, что алгоритм, использующий модель непрерывно-дискретной оптимизации, сравнивается с точным алгоритмом* *А. Г. Ченцова, разработанным на основе метода динамического программирования. В дополнение к этому следовало бы привести сравнение и с алгоритмом ветвей границ, разработанным в диссертационной работе. Имеется в виду и факт получения глобального экстремума и вычислительные затраты на его получение.*

Согласен с замечанием. В момент исследований алгоритма непрерывной резки алгоритм решения задачи PCGTSP ещё не существовал, именно поэтому для сравнения был использован алгоритм А. Г. Ченцова. Впрочем, для конкретных примеров, приведённых в автореферате и диссертации, на которых тестировалась задача CCP, оба алгоритма дают одинаковые маршруты. С появлением библиотеки задач резки стало возможным провести полноценное сравнение всех задействованных алгоритмов, и такой эксперимент сейчас готовится.

Ответы на вопросы / замечания по автореферату д.т.н., профессора **Мартынова Виталия Владимировича**

*К недостаткам автореферата можно отнести почти полное отсутствие описания деталей программной реализации алгоритмов, приведён псевдокод только одного программного блока*

Не согласен с оценкой. Объём автореферата не позволяет приводить исходные коды программ в значительном количестве. В тексте диссертации приводится псевдокод ещё нескольких других программных блоков, хотя и не покрывающих разработанные алгоритмы целиком. Полный исходный код алгоритма ветвей и границ вместе с исходными данными и результатами численных экспериментов выложен в репозиторий git на сайте GitHub, и находится в свободном доступе. Ссылка на репозиторий приведена в тексте диссертации.

*С точки зрения оформления неудачно выбрано расположение в тексте рисунка 1 на стр. 8.*

Согласен с замечанием. Для подготовки текста диссертации и автореферата использовалась система компьютерной вёрстки LaTeX, в которая расположение рисунков и таблиц в тексте определяется внутренними алгоритмами системы.

*Сформулированные основные результаты и выводы по работе не коррелируют однозначно с поставленными задачами.*

Частично согласен с замечанием, хотя различия носят, на мой взгляд, стилистический характер. Задачи исследования ставились в общем виде, а результаты описаны более подробно. Так, результаты 1–4 относятся к первой задаче исследования, результаты 4–6 – ко второй, результаты 8–9 к четвёртой задаче, и результат 10 однозначно соответствует третьей задаче исследования.

Ответы на вопросы / замечания к.т.н. **Таваевой Анастасии Фидагилевны**

*Хотелось бы сравнить результаты работы алгоритмов второй и третьей глав на одних и тех же раскройных планах, что позволило бы лучше судить о применимости этих алгоритмов для разработки управляющих программ для машин листовой резки с ЧПУ.*

Отчасти этот вопрос освещён в тексте диссертации на стр. 54 и 76, где приведены результаты работы обоих алгоритмов для задач большой размерности (423 и 620 контуров).

Видно, что в значительной части маршруты резки, полученные разными алгоритмами, совпадают. В задачах меньшей размерности совпадение как правило полное. При этом длина полученного маршрута как правило немного короче для случая непрерывно-дискретной оптимизации, что легко объяснимо. Разница может составлять от 1% до 10% для сложных раскройных планов.

*В автореферате отсутствуют экспериментальные данные о быстродействии реализации алгоритма, использующего непрерывно-дискретную оптимизацию.*

Согласен. На это замечание уже дан комментарий выше.

*Интересно было бы исследовать влияние уровня вложенности деталей в раскройном плане на быстродействие описанных алгоритмов.*

Согласен с замечанием. Уровень вложенности оказывает существенное влияние на производительность алгоритмов, и это влияние отчётливо проявляется в численных экспериментах, проведённых в ходе диссертационной работы. Насколько я знаю, А. Г. Ченцов и Я. В. Салий проводили такое исследование для некоторых вариантов алгоритмов маршрутизации, но для разработанных алгоритмов это следует исследовать отдельно.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Коллеги, есть вопросы по прозвучавшим ответам? Нет вопросов. Спасибо. Присаживайтесь, пожалуйста. Переходим к дискуссии с официальными оппонентами. Слово предоставляется официальному оппоненту – доктору технических наук, профессору **Верхотурову Михаилу Александровичу**. Аудиовизуальный контакт с Михаилом Александровичем установлен. Пожалуйста, прошу Вас.

**Верхотуров М.А., д-р техн. наук, проф.:** Оглашает отзыв(отзыв прилагается).

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо.Пожалуйста, Станислав Сергеевич, ответьте на вопросы оппонента.

**ДИССЕРТАНТ:**

*В диссертационной работе использовано несколько языков программирования – С, Julia, Python, JavaScript. Чем вызвано такое разнообразие? Каковы причины выбора этих языков программирования?*

В значительной степени были продолжено использование тех языков, которые уже использовались в исследованиях, проводимых в нашей научной школе, хотя есть и объективные основания для выбора. Язык Python, например, использовался для решения задачи PCGTSP из-за наличия (и опыта использования) специализированных библиотек для работы с графами и матрицами. Язык C подошёл для решения задачи CCP благодаря хорошей производительности и простоте – эта эвристика не требует сложных структур данных. Использование языка JavaScript мотивировано прежде всего его доминированием (хотя уже и не абсолютным) в современных браузерах.

*Численные эксперименты второй главы (решение задачи PCGTSP) проводились на открытой библиотеке PCGTSPLIB, содержащей абстрактные экземпляры обобщённой задачи коммивояжера с ограничениями предшествования, зачастую асимметричные. В то же время автор принимал участие в разработке библиотеки экземпляров задач именно маршрутизации инструмента, где матрица расстояний и частичный порядок определяются геометрией плоских деталей. Проведение численных экспериментов над этой библиотекой дало бы более наглядные результаты и лучше бы продемонстрировало возможность применения алгоритма для проектирования управляющих программ машин листовой резки с ЧПУ.*

Согласен с замечанием. На момент разработки алгоритмов в этой библиотеке ещё не было примеров интересной размерности (30–40 контуров). Поэтому алгоритм решения задачи PCGTSP, конечно, тестировался на примерах из библиотеки (небольшой размерности), но основное исследование выполнялось на библиотеке PCGTSPLIB, в том числе для сравнения с другими исследованиями, опирающимися на ту же библиотеку. Сейчас задачи на резку добавлены в библиотеку и планируется проведение численных экспериментов для сравнения всех задействованных в работе алгоритмов.

*Вопросы оптимизации раскроя намеренно не включены в круг исследуемых в диссертационной работе. Тем не менее, интересны перспективы применения описанных в алгоритмах для совместной оптимизации процессов раскроя и резки плоских деталей.*

Да, задача совместной оптимизации раскроя и резки INRP (Integrated Nesting & Routing Problem) представляет большой теоретический и практический интерес, являясь ещё более сложной, чем задачи раскроя и резки по отдельности. Полагаю, что разработанные алгоритмы и модели могут применяться решении этой задачи в дальнейших исследованиях. В диссертации приведён пример применения непрерывно-дискретной модели для решения задачи сегментной резки.

*Из текста диссертации непонятна методика получения оценок различных методов построения нижней оценки в табл. 2.2 на стр. 44*

Согласен с замечанием. Для получения этих оценок использовались как раз раскройные планы из библиотеки задач резки сравнительно небольшого размера (например, e5x\_1 с 23 кластерами), для них выполнялся полный алгоритм ветвей и границ со всеми вариантами расчёта и собиралась статистика по полученным оценкам для каждого варианта. Распределение оценок оказывается, как и ожидалось, близким к нормальному, по этим распределениям и получены цифры в указанной таблице.

*Чем можно объяснить использование диссертантом метода обхода в ширину на стр. 48, а не, например, обхода в глубину?*

При обходе в глубину (например, в оригинальной работе Салмана), алгоритм ветвей и границ быстро находит решение (не обязательно оптимальное) и может его использовать для отсечения ветвей дерева поиска, при этом нижние оценки не получаются или получаются значительно позже. В нашем случае первоначальное решение получается эвристикой PCGLNS, поэтому отсечение работает с самого начала и применяется обход в ширину, чтобы сразу же начать получать нижние оценки и постепенно уточнять их по мере работы алгоритма.

*Можно ли сравнить эффективность получения точного решения задачи GTSP алгоритмами, разработанными А. Г. Ченцовым, и алгоритмами, предложенными автором диссертации?*

Алгоритм А. Г. Ченцова всегда находит точное решение, однако он работает не для всех задач, существует граница сложности, максимальное количество контуров (порядка 33). Алгоритм ветвей и границ способен находить точные решения для некоторых из таких задач, это было одной из мотиваций к его разработке. На рис. 2.1 на стр.  38 как раз приведён эмпирически подобранный пример (34 контура), который (на момент исследования) не решался алгоритмом А. Г. Ченцова, но легко решался алгоритмом ветвей и границ. Кроме того, он даёт приближенное решение и нижнюю оценку возможных решений. Если сравнивать быстродействие (для тех задач, которые решаются обоими алгоритмами), то алгоритм А. Г. Ченцова в общем работает заметно быстрее. Конкретные цифры будут получены после проведения соответствующего исследования, которое уже запланировано.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо. Михаил Александрович, принимаете прозвучавшие ответы? Спасибо!

Слово предоставляется официальному оппоненту – доктору технических наук, профессору, **Коновалову Анатолию Владимировичу.**.

**Коновалов А.В., д-р техн. наук, проф.:** Оглашает отзыв(отзыв прилагается).

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо. Пожалуйста, Станислав Сергеевич, ответьте на вопросы.

**ДИССЕРТАНТ:**

*В описании численных экспериментов для алгоритма решения задачи PCGTSP (вторая глава) указано, что они проводились на вычислительном кластере «Уран» института математики и механики им. Н. Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук и приведены его характеристики – 16-ядерные Intel Xeon, 128G RAM. На каком оборудовании проводились численные эксперименты третьей главы с задачей непрерывной резки?*

Данный алгоритм в настоящее время реализован только под ОС Windows и не может исполняться на кластере. Расчёты велись на обычных персональных компьютерах и ноутбуках, например 4-ядерный Intel Core i7 CPU, 8 Gb RAM, операционная система Windows 7.

*При разработке управляющих программ для оборудования термической резки с ЧПУ важным является учёт тепловых деформаций, возникающих в процессе резки. Каким образом возможно реализовать такой учёт в описанных в диссертационной работе алгоритмах?*

Полагаю, что это возможно. На данный момент существуют два основных подхода к учёту тепловых деформаций – 1) использование эмпирических правил типа «жёсткости детали» и «жёсткости листа», опирающиеся на геометрическим соображения, и 2) прямой расчёт тепловых полей, возникающих в процессе резки. Второй подход значительно более трудоёмкий, он доминирует в исследованиях зарубежных коллег. У нас он также исследовался, но скорее для подтверждения первого подхода, который уже реализован в программном обеспечении Routing Manager, использующим алгоритмы А. Г. Ченцова и П. А. Ченцова. Задача реализации его в новых алгоритмах представляется скорее технической, чем научной.

*В доказательстве утверждения 3.1 на стр. 68 функция φ(t) названа выпуклой, во избежание двусмысленности следовало бы уточнить, что она является выпуклой вниз, а не вверх, что подтверждается тем, что её вторая производная неотрицательна.*

Согласен с замечанием, имелась в виду функция, выпуклая вниз.

*В тексте диссертации списки оформлены вразнобой, иногда пункты списков начинаются со строчной буквы, иногда с прописной, в конце ставится иногда точка, иногда точка с запятой, а иногда ничего.*

Согласен с замечанием.

*В тексте диссертации также имеются опечатки, так в формуле на стр. 18 вместо CJ должно быть Cj по смыслу.*

Согласен с замечанием. Хотя при подготовке текста диссертации использовались средства проверки правописания, отловить все ошибки они не в состоянии, в особенности опечатки в математических формулах.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Анатолий Владимирович, принимаете прозвучавшие ответы? Спасибо! Слово предоставляется официальному оппоненту – доктору технических наук, доценту Ложникову Павлу Сергеевичу. Пожалуйста, прошу Вас.

**Ложников П.С., д-р техн. наук, доц.:** Оглашает отзыв(отзыв прилагается).

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо. Пожалуйста, Станислав Сергеевич, ответьте на вопросы оппонента.

**ДИССЕРТАНТ:**

*Во введении (раздел 1.1) описаны различные техники резки, применяемые в современном производстве, а именно: стандартная, мультиконтурная и мультисегментная. В то же время, описанные алгоритмы ориентированы на использование только резки по замкнутому контуру, то есть стандартной. Каким образом возможно использовать нестандартные техники резки в рамках разработанного в диссертации алгоритмического обеспечения для решения задач оптимальной маршрутизации инструмента?*

Мультиконтурная резка может применяться в обоих разработанных алгоритмах без какой-либо их модификации. На рисунке изображен пример мультиконтурной резки, полученной алгоритмом решения задачи PCGTSP с использованием перемычек (мостиков). Мультисегментная резка напрямую в этих алгоритмах вестись не может, требуется некоторая их доработка.

*Алгоритм решения задач PCGTSP, описанный в Главе 2, решает их в самой общей постановке, для произвольных входных данных, тогда как задачи, возникающие при оптимизации маршрута резки, существенно эвклидовы. Каким образом учитывается это их свойство в алгоритме? Возможно ли использовать геометрические соображения для улучшения работы алгоритма?*

Непосредственное использование геометрических соображений в текущем дизайне алгоритма вряд ли возможно, потому что исходный файл задания очищен от геометрической информации. Тем не менее, по результатам исследований в алгоритм был добавлен механизм релаксации H2 на основе цепей длины 2, как описано на стр. 42. Он позволяет точнее учитывать взаимное расположение контуров на плоскости, то есть косвенно использует их геометрию. Примерно в половине случаев этот механизм приводит к улучшению нижней оценки. Вообще же, на мой взгляд использование геометрических соображений может оказаться чрезвычайно полезным для получения более точных оценок.

*Если результаты работы алгоритма сопоставимы с результатами, полученными универсальным решателем Gurobi, то в чём смысл разработки специализированного алгоритма?*

Решатель Gurobi является коммерческим программным продуктом, требующим лицензирования для своего использования. По этой причине в диссертационной работе он использовался как научный инструмент, в качестве базы сравнения, использование его в составе САПР управляющих программ непосредственно на производстве не планировалось.

*Английские аббревиатуры систематически вводятся без расшифровки, например САМ на стр. 5 или названия классов задач резки (ССР, ЕСР, ICP и т. д.) на стр. 7. Часть из них приведена в списке сокращений на стр. 97, но не все.*

Частично согласен с замечанием. Аббревиатуры классов задач расшифрованы на стр. 29, но это следовало сделать раньше по тексту.

*В тексте работы имеются грамматические ошибки. Так, на стр. 5, 7 и 31 пропущен дефис в термине* *«САD/САМ-система», хотя в других местах он употребляется.*

Частично согласен с замечанием. Конкретно термин «САD/САМ-система» может писаться в обоих вариантах, но в тексте диссертации следовало бы конечно соблюсти единообразие.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Павел Сергеевич, принимаете прозвучавшие ответы?

**Ложников П.С., д-р техн. наук, доц.:** Да, принимаю, но есть дополнительный вопрос. Сейчас в нашей стране идёт процесс импортозамещения. В работе использован универсальный решатель Gurobi, Вы упомянули, что его использование затрудняет внедрение, особенно на закрытых, оборонных предприятиях. Возможно ли будет использование в качестве стандартной библиотеки?

**ДИССЕРТАНТ:** Мне сложно судить, но существуют аналоги с открытым кодом, например. Вероятно, их можно использовать. Использование самого Gurobi мне представляется маловероятным.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Уважаемые коллеги, может ещё у кого-то есть вопросы по существу ответов соискателя? Нет больше. Переходим к свободной дискуссии. Может любой высказаться о существе работы, как члены диссертационного совета, так и присутствующие. Пожалуйста, кто хочет выступить? Нет желающих? Михаил Юрьевич Хачай, пожалуйста!

**Хачай М.Ю., д-р физ-мат. наук, профессор, институт математики и механики им. Н.Н. Красовского, зав. отделом математического программирования:** Мне очень приятно, что меня пригласили на это заседание, очень важно для нас, математиков, видеть, где можно наши алгоритмы применить в индустрии. Мне бы хотелось отметить многолетнее сотрудничество между школой профессора Петунина А. А. и нашим институтом, с нашей стороны руководителем этих работ является А. Г. Ченцов, которого неоднократно уже сегодня упоминали. И мне кажется, что результаты, полученные в этой работе, являются существенным приближением. Я заранее должен извиниться, мне трудно оценить их значимость с производственной точки зрения, тут я полностью опираюсь на мнение А. А. Петунина. А вот с точки зрения математики я бы хотел отметить следующий вклад данной работы: впервые в мире построен алгоритм и границ для специальной версии обобщённой задачи коммивояжера PCGTSP. Работ до работы Станислава Сергеевича и вашего покорного слуги просто не было, посвящённых таким алгоритмам. Поэтому с математической точки зрения и с точки зрения информатики это очень серьёзный результат. Второй момент; неоднократно здесь возникали вопросы по поводу сравнения с динамическим программированием. Здесь, мне кажется, тоже получен был существенный вклад. Почему не удавалось сравнивать с классическим динамическим программированием? Он замечательный, он – классика! Но в классическом своём приложении он работает в двух режимах – он либо выдаёт оптимальное решение, либо не выдаёт ничего. То, что предложил Станислав Сергеевич в своей работе – приближенное динамическое программирование с нижними оценками, оно позволяет получать допустимые решения, даже если вычислительная сложность задачи не позволяет получить оптимальное. И при этом, в отличие от эвристик, у этого допустимого решения есть оценка, насколько оно хорошо. Это тоже очень большой вклад, и мне кажется, что в этом смысле, учитывая NP-трудность решаемых задач, даже если не удалось получить точное решение, удавалось получить допустимое решение с гарантированными оценками точности. Третий момент, который мне лично очень нравится: у нас в прикладной информатике, к сожалению, достаточно частое явление таково, что в приличных журналах публикуется статья, где описываются результаты численных экспериментов. Приводятся таблицы, графики. При этом ни исходного кода, ни результатов экспериментов, кроме таблиц авторы не предъявляют. Данная работа положительно отличается от большинства других тем, что все исходные коды алгоритмов предоставлены в открытом коде. Любой желающий может поставить их к себе на машину и повторить. Эксперимент, а это очень важно в экспериментальной науке. Результаты должны быть воспроизводимы. Вот результаты этой работы воспроизводимы. Наверное, на этом я закончу. Я бы призвал членов совета поддержать эту работу. Спасибо.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо, Уважаемые коллеги, ещё может быть кто-то хочет высказаться о работе? Ну, я пару слов тоже скажу. В течение того периода, когда Станислав Сергеевич пришёл в Уральский федеральный университет, мы часто работали вместе, на многих конференциях бывали вместе, и я должен отметить, что его выступления на международных конференциях – это выступления квалифицированного человека, доклады вызывали интерес и он умел грамотно и правильно отвечать на поставленные вопросы. Я тоже считаю, что работа уже созрела для того, чтобы стать диссертационной работой, буду поддерживать эту работу и призываю вас тоже поддержать эту диссертационную работу. Может, ещё кто-то хочет что-нибудь добавить? Нет больше? Тогда слово предоставляется диссертанту.

**ДИССЕРТАНТ:** Хочу поблагодарить всех присутствующих за то, что они пришли, дали возможность представить результаты работы, это важно для меня. Отдельно я хотел бы поблагодарить во-первых научного руководителя Александра Александровича Петунина, который был не только научным руководителем, но и примером целеустремленного, собранного человека, который умеет достигать своих целей. Хотел бы поблагодарить Михаил Юрьевича Хачая, у которого я очень многому научился в смысле проведения научной работы и отсутствующих здесь Александра Георгиевича Ченцова и Ефима Григорьевича Полищука. И спасибо оппонентам, Михаилу Александровичу Верхотурову, с которым заочно я уже давно знаком, Коновалову Анатолию Владимировичу, с которым мы плотнее взаимодействовали в последнее время и Ложникову Павлу Сергеевичу.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо, Станислав Сергеевич. Теперь мы должны перейти к процедуре тайного голосования. Сначала нам нужно выбрать счетную комиссию. Предлагается следующий состав комиссии: д-р физ.-мат. наук Попов Владимир Юрьевич, д-р физ.-мат. наук Митюшов Евгений Александрович; д-р физ.-мат. наук Картак Вадим Михайлович. Кто за данный состав комиссии? Воздержались? Против? Нет. Счетная комиссия утверждается единогласно. Членов комиссии прошу приступить к работе.

(Проводится процедура открытого голосования)

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Слово предоставляется председателю счетной комиссии, д-ру физ. мат. наук Попову Владимиру Юрьевичу.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ СЧЕТНОЙ КОМИССИИ:** Оглашает протокол № 1 заседания счетной комиссии от 22 февраля 2022 года. Состав избранной комиссии: Попов В.Ю. (председатель), Митюшов Е.А., Картак В.М. Комиссия избрана для подсчета голосов при тайном голосовании по вопросу присуждения Уколову Станиславу Сергеевичу ученой степени кандидата технических наук. Утвержденный состав диссертационного совета 12 человек. Присутствовало на заседании 9 членов совета, в том числе по специальности рассматриваемой диссертации – 9 докторов наук. Роздано бюллетеней – 9, осталось нерозданных бюллетеней – 3, оказалось в урне бюллетеней – 9.

Результаты голосования по вопросу присуждения ученой степени кандидата технических наук Уколову Станиславу Сергеевичу следующие: за – 9, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Результаты голосования положительные. Кто за то, чтобы утвердить протокол счетной комиссии, прошу проголосовать. Против? Нет. Воздержался? Нет. Протокол счетной комиссии утвержден единогласно. Станислав Сергеевич, решением диссертационного совета Вам присуждается ученая степень кандидата технических наук. Поздравляем Вас с присуждением ученой степени и желаем дальнейших успехов.

Уважаемые коллеги, согласно Положению нам необходимо принять решение диссертационного совета по диссертации **Уколова Станислава Сергеевича**. Все ли получили экземпляры проекта решения? Все ли ознакомились с проектом решения? Есть ли замечания и редакционные правки?

(Идет обсуждение проекта решения)

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Коллеги, кто за то, чтобы утвердить данное решение по диссертации с учетом высказанных замечаний и дополнений? Прошу проголосовать. Кто против? Нет. Кто воздержался? Нет. Решение по диссертации утверждается единогласно в следующей редакции:

**РЕШЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА УрФУ 05.09.24 ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

от «22» февраля 2022 г. № 1

*вставить текст решения совета!!!*

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Уважаемые члены диссертационного совета, будут замечания, вопросы по процедуре защиты? Замечаний нет. Разрешите на этом считать заседание диссертационного совета законченным.

Председатель заседания –

заместитель председателя

диссертационного совета

УрФУ 05.09.24 А.Н. Сесекин

Ученый секретарь

диссертационного совета

УрФУ 05.09.24 О.М. Огородникова

Со стенограммой ознакомлен,

Соискатель С.С. Уколов