

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора Верхотурова Михаила Александровича на диссертационную работу Уколова Станислава Сергеевича «Разработка алгоритмов оптимальной маршрутизации инструмента для САПР управляющих программ машин листовой резки с ЧПУ», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования (промышленность)»

На отзыв представлена диссертационная работа, состоящая из введения, четырёх глав с выводами, заключения, списка литературы из 121 наименования, списков сокращений, иллюстраций, таблиц и четырёх приложений, всего на 135 страницах.

Актуальность темы диссертации

В диссертационной работе Уколова С. С. исследованы вопросы повышения эффективности систем автоматизированного проектирования (САПР) управляющих программ для оборудования листовой резки с числовым программным управлением (ЧПУ), связанные с разработкой автоматических алгоритмов оптимальной маршрутизации режущего инструмента для уменьшения стоимости процесса резки и его продолжительности. Рассматриваются как полностью дискретные модели оптимизации, так и смешанная непрерывно-дискретная оптимизация, менее рассматриваемая в литературе по теме диссертации. Большую практическую значимость представляет собой возможность оценки качества получаемых решений и получения как приближенных к оптимальным, так и оптимальных решений.

Сформулированные и решенные в диссертационной работе задачи являются актуальными и представляют общетеоретический и очевидный практический интерес.

Анализ содержания диссертационной работы

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована её актуальность, представлены цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость результатов.

В первой главе приводится формализация оптимизационных задач построения маршрута резки для машин листовой резки с ЧПУ, даются основные определения, описаны технологические особенности оборудования и вызванные им ограничения на допустимые решения задачи маршрутизации. Рассмотрена классификация задач маршрутизации

инструмента в зависимости от используемых техник резки и учитываемых технологических ограничений. Приведён обзор подходов, используемых при решении задач маршрутизации режущего инструмента разных классов.

Во второй главе описывается алгоритм на основе метода «ветвей и границ», строящий оценки длины маршрута, а при достаточном времени и находящий оптимальный маршрут. Основу алгоритма представляет декомпозиция исходной задачи на две задачи, допускающие независимые решения разными методами и объединение их результатов с постоянным уточнением нижней оценки. Представлены две реализации – в виде классической схемы обхода дерева поиска в ширину и на основе схемы динамического программирования Хелда и Карпа, несколько отличающиеся производительностью. Работа алгоритма исследована на модельных задачах разной размерности.

Третья глава посвящена описанию алгоритма решения задачи непрерывной резки, сочетающего в себе схему учёта ограничений предшествования, эвристику поиска позиций точек врезки, то есть непрерывную оптимизацию и комбинаторную оптимизацию последовательности обработки контуров в процессе резки. Численные эксперименты, выполненные на реальных раскройных планах, показывают небольшое преимущество алгоритма по сравнению с чисто дискретными моделями. Продемонстрировано использование алгоритма для решения задач сегментной и обобщённой сегментной резки.

В четвёртой главе описываются применяемые в ходе диссертационной работы схемы информационного обмена и методика использования алгоритмов оптимальной маршрутизации режущего инструмента в существующих САПР на основе открытых форматов файлов, а также сами форматы файлов и разработанные конвертеры для интеграции задействованных подсистем и программных модулей. Также открытые форматы используются для решения задачи визуализации, в том числе использующей элементы интерактивности, разных этапов разработки управляющих программ для машин листовой резки с ЧПУ.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы, а также намечены направления дальнейших исследований по теме диссертации.

В приложениях приведены акт внедрения и описание применявшихся и разработанных в ходе диссертационной работы форматов файлов.

Материалы диссертации изложены последовательно и логично, проиллюстрированы рисунками, схемами и таблицами, позволяющими оценить полученные результаты, текст написан в научном стиле и

соответствует требованиям к научно-квалификационным работам. Автореферат диссертации полностью соответствует её содержанию.

Научная новизна полученных результатов

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан первый специализированный алгоритм ветвей и границ для решения обобщенной задачи коммивояжера с ограничениями предшествования. Алгоритм дает точные решения для задач, значительно большего размера, чем было доступно ранее – до 150 контуров. Кроме того, нижняя оценка, вычисляемая в ходе работы алгоритма, может использоваться для оценивания качества решений, даже полученных другими методами.
2. Эвристика поиска оптимальных положений точек врезки в контуры, не использующая механизм дискретизации, в сочетании с алгоритмами комбинаторной оптимизации, способна эффективно находить решения задачи непрерывной резки, а также легко обобщается на задачи сегментной и обобщенной сегментной резки.
3. Предложены схемы использования ограничения предшествования для эффективного уменьшения вычислительной сложности задач маршрутизации режущего инструмента, как использующих дискретную оптимизацию, так и основанных не смешанных непрерывно-дискретных схемах.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, сформулированных в работе

Достоверность полученных результатов, научных положений и выводов, изложенных в диссертации, подтверждается результатами исследований, приведёнными в 18 публикациях, среди которых 9 научных работ в журналах, определённых ВАК и Аттестационным советом УрФУ, включая 8 статей в журналах, индексируемых в международных базах *WoS* и *Scopus*. Основные положения диссертации были представлены на международных и всероссийских научных конференциях и обсуждались в узкопрофессиональной среде специалистов. Исследования выполнены с использованием современного оборудования, программного обеспечения, полученные результаты обработаны с применением статистических методов и подтверждены экспериментально.

Практическая значимость результатов диссертационной работы

Как продемонстрировано в диссертационной работе, описанные в ней алгоритмы в текущей реализации вполне способны решать задачи оптимальной маршрутизации инструмента технологического оборудования листовой резки с ЧПУ в процессе разработки управляющих программ, причём речь идёт обработке раскройных планов вполне реалистичного размера, содержащих сотни деталей и контуров. Разработанные программные модули способны решать задачи маршрутизации в полностью автоматическом режиме, что в свою очередь открывает возможность применения нескольких разных алгоритмов оптимизации одновременно, а также решения более сложных классов задач резки для ещё большего снижения времени и стоимости резки.

Результаты диссертационной работы также используются в образовательном процессе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», на что представлен акт внедрения.

Замечания и вопросы по работе

1. В диссертационной работе использовано несколько языков программирования – *C, Julia, Python, JavaScript*. Чем вызвано такое разнообразие? Каковы причины выбора этих языков программирования?
2. 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.
3. Вопросы оптимизации раскроя не включены в перечень исследуемых в диссертации, тем не менее, интересны перспективы применения описанных алгоритмов для совместной оптимизации процессов раскроя и резки плоских деталей.
4. Из текста диссертации непонятна методика получения оценок различных методов построения нижней оценки в табл. 2.2 на стр. 44?

5. Чем можно объяснить использование диссертантом метода обхода в ширину на стр. 48, а не, например, обхода в глубину?
6. Можно ли сравнить эффективность получения точного решения задачи GTSP алгоритмами, разработанными А. Г. Ченцовым, и алгоритмами, предложенными автором диссертации?

Отмеченные замечания и вопросы не ставят под сомнение уровень диссертационной работы.

Соответствие диссертации критериям Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ

Содержание диссертации полностью соответствует поставленным задачам и подробно отражает последовательность их решения. Диссертация написана логичным, понятным языком, выводы и рекомендации изложены аргументированно. Диссертация Уколова С. С. в полном объеме отвечает критериям, которые установлены Положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени Первого президента России Б. Н. Ельцина».

Заключение по диссертационной работе

Диссертация Уколова Станислава Сергеевича «Разработка алгоритмов оптимальной маршрутизации инструмента для САПР управляющих программ машин листовой резки с ЧПУ» является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые результаты, имеющие конкретное практическое применение. Диссертация изложена грамотным языком, характерным для научно-технических работ, и имеет внутреннее единство. В работе логика изложения материала соответствует поставленным целям.

Диссертация в полной мере отвечает требованиям по актуальности работы, научной новизне, практической значимости, личному вкладу автора работы, апробации и отражению результатов в публикациях. В целом, диссертационная работа Уколова С. С. по своей актуальности, новизне и практической значимости вносит значительный вклад в разработку новых научно обоснованных решений для создания и повышения эффективности функционирования САПР управляющих программ для оборудования листовой резки с ЧПУ.

Оценивая диссертационную работу Уколова Станислава Сергеевича следует отметить, что она соответствует паспорту специальности 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования(промышленность)» в части п. 3, а также требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней в

УрФУ», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. На использованные в диссертации результаты других авторов, в том числе, полученные при проведении совместных исследований, в работе даны соответствующие ссылки. Личный вклад автора в диссертационную работу не вызывает сомнений. Основные результаты, обладающие научной новизной, представленные в диссертационной работе, получены лично автором или при его непосредственном участии.

Считаю, что автор диссертации Уколов Станислав Сергеевич заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования (промышленность)».

Даю согласие на обработку моих персональных данных.

Официальный оппонент, доктор технических наук (05.13.06), профессор, заведующий кафедрой информатики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет».



Верхотуров Михаил Александрович

«09» февраля 2022 г.

Адрес: 450008, Россия, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12

Телефон: +7(908) 350-35-56

e-mail: verhotur@vmk.ugatu.ac.ru

Подпись Верхотурова Михаила Александровича заверяю,

