

Отзыв официального оппонента

доктора технических наук, доцента Ложникова Павла Сергеевича
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).

Актуальность темы исследования

В настоящее время в России в машиностроении и других отраслях промышленности широко применяется технологическое оборудование листовой резки с числовым программным управлением (ЧПУ) для получения заготовок из листового материала. Применение систем автоматизированного проектирования (САПР) обеспечивает автоматизацию процесса разработки управляющих программ для такого оборудования. При этом возникает актуальная задача оптимальной маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ. В качестве целевых функций этой задачи оптимизации чаще всего рассматриваются функции времени и стоимости процесса резки.

Современные специализированные САПР предоставляют базовый функционал подготовки управляющих программ, однако в них не уделяется должного внимания проблеме оптимизации маршрута резки и не гарантируется получение оптимальных траекторий перемещения инструмента при одновременном соблюдении разнообразных технологических ограничений на получаемый маршрут. Зачастую вообще используется интерактивный режим проектирования управляющих программ и не производится попыток оценить оптимальность полученных маршрутов резки. Общая задача маршрутизации режущего инструмента машин листовой резки с ЧПУ очень сложна, её общая математическая модель до сих пор не сформулирована, в литературе представлены исследования только её частных случаев. Наиболее популярны подходы, основанные на дискретизации контуров деталей и сведении задачи оптимальной маршрутизации к моделям дискретной оптимизации в форме различных типов задачи коммивояжера с дополнительными ограничениями. Рассматриваются и варианты использования моделей графов, но они носят в большой степени теоретический характер, поскольку не слишком пригодны для решения реальных задач проектирования. Также практически отсутствуют методы оценки качества решений. В этой связи остаются актуальными вопросы разработки новых точных алгоритмов, эвристик и

метаэвристических подходов для автоматического решения различных классов задач маршрутизации режущего инструмента, в особенности обеспечивающих получение эффективных оценок получаемых решений.

Соответствие паспорту научной специальности

Рассмотренные в диссертации Уколова С. С. вопросы связаны с повышением эффективности применения подсистем САПР для разработки управляющих программ машин листовой резки с ЧПУ. Объект исследования, его цель и задачи, направления теоретических и экспериментальных исследований, а также область исследования соответствуют паспорту научной специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (промышленность).

Структура и объём диссертации

Диссертация изложена на 135 страницах, состоит из введения, четырёх глав, заключения, списков сокращений, литературы, иллюстраций и таблиц и четырёх приложений. Список литературы включает 121 источник на русском и английском языках. Структура и оформление диссертации соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11–2011 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления».

Во *введении* обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены её апробация, основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* даётся анализ задачи оптимизации маршрута резки при проектировании управляющих программ для оборудования листовой резки с ЧПУ, проведена её формализация и обзор существующих методов и алгоритмов её решения. Также в первой главе на основе анализа как отечественных, так и зарубежных литературных источников приводятся классификация методов резки, применяемых в САПР управляющих программ для формирования маршрута резки, и классификация задач оптимальной маршрутизации инструмента.

Во *второй главе* рассматривается оригинальный вариант алгоритма ветвей и границ для решения обобщённой задачи коммивояжера с ограничениями предшествования (PCGTSP) в качестве примера использования полностью дискретных моделей оптимизации в процессе проектирования управляющих программ для машин листовой резки с ЧПУ.

Даётся формулировка задачи, и рассматриваются основные подходы к её решению, на основе которых разработан и реализован оригинальный алгоритм, состоящий из блоков построения нижней оценки на основе многократной релаксации исходной задачи, её динамического обновления в процессе счёта, ветвления и сортировки ветвей, отсечения ветвей дерева поиска. Разработаны две версии этого алгоритма – в виде классического алгоритма ветвей и границ, а также версии, использующую схему динамического программирования Хелда-Карпа, и за счёт этого допускающую параллельные вычисления для сокращения времени счёта. Приведены результаты решения задач PCGTSP из общедоступной библиотеки PCGTSP LIB.

В *третьей главе* описывается алгоритм решения задачи непрерывной резки, использующий модели как непрерывной, так и дискретной оптимизации. Непрерывная оптимизация производится в процессе поиска положений точек врезки на контурах, минимизирующих длину холостого хода за счёт многократного использования несложных геометрических соображений, восходящих к принципу Ферма. Полученное решение представляет доставляет локальный минимум задачи минимизации длины холостого хода, также сформулирован ряд достаточных условий глобального минимума. Для дискретной оптимизации используется широко известный метод переменных окрестностей, позволяющий находить последовательность обработки контуров. Работа алгоритма начинается с удаления контуров, содержащих вложенные контуры, и завершается их восстановлением, что позволяет строго выполнять ограничения предшествования, уменьшая при этом вычислительную сложность. Решения, даваемые алгоритмом, исследуются на примерах реальных раскройных планов, кроме того, демонстрируется, что алгоритм может применяться для решения задачи обобщённой сегментной резки для минимизации полного времени и / или стоимости резки, а не только длины холостого хода.

В *четвёртой главе* описывается методика интеграции разработанных алгоритмов в существующие САПР разработки управляющих программ для машин листовой резки с ЧПУ на основе использования открытых текстовых форматов обмена данными. В качестве основного формата используется популярный формат JSON, разработаны специальные схемы для хранения геометрической информации о деталях и раскройных планах, заданий на резку и получаемых маршрутов резки. Разработаны конвертеры для основных использованных в работе форматов файлов, в том числе для интеграции с САПР «Сириус» и «T-Flex CAD».

В *заключении* представлены основные результаты и выводы диссертации, а также обозначены перспективы дальнейшей разработки темы диссертации.

Диссертация обладает внутренним единством и написана автором самостоятельно.

Научная новизна и теоретическая значимость работы

В ходе диссертационной работы разработаны алгоритмы, находящие оптимальные и приближенные решения разных классов задач, относящихся к общей задаче маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ – как полностью дискретных, так и непрерывно дискретных. Они значительно повышают размерность задач, для которых могут быть получены точные решения (с первых десятков контуров деталей до примерно сотни), а также способны давать решения близкие к оптимальным для задач большей размерности. Применение метода ветвей и границ также позволяет получать оценки качества получаемых решений, в том числе и предварительно полученных другими алгоритмами. Применяемые в данной работе схемы учёта ограничений предшествования позволяют значительно сократить вычислительную сложность алгоритмов, что также повышает размерность решаемых задач, для которых удаётся находить эффективные оценки, особенно в случае значительной вложенности.

Практическая значимость работы

Разработанные в ходе диссертационной работы алгоритмы могут быть использованы для проектирования управляющих программ машин листовой резки с ЧПУ в автоматическом режиме, повышения эффективности его применения, сокращения времени проектирования, получения более экономичных управляющих программ с соблюдением ограничения предшествования. Алгоритмы уже применяются в составе отечественных САПР «Сириус» и «Т-Flex» в тестовом режиме, а разработанные схемы информационного обмена позволяют легко проводить интеграцию с другими САПР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственный контракт № 075-03-2020-582/4), её теоретические и практические результаты внедрены и используются в научно-исследовательском и образовательном процессе в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», что подтверждается соответствующим актом внедрения.

Степень обоснованности научных положений и достоверности полученных результатов

Обоснованность научных и практических результатов диссертации Уколова С. С. подтверждена использованием фундаментальных и прикладных работ отечественных и зарубежных учёных по теме исследования, применением современных методов анализа информации, вычислительных методов и программных средств.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских конференциях, по теме диссертации имеется 18 публикаций, включая 9 научных статей, опубликованных в рецензируемых научных журналах, определённых ВАК и Аттестационным советом УрФУ. Публикации автора с достаточной полнотой отражают основное содержание, результаты и выводы диссертационной работы.

Автореферат диссертации полностью отражает её содержание и результаты при одновременном сохранении структуры построения.

Замечания и вопросы

1. 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?
2. 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 евклидовы. Каким образом учитывается это их свойство в алгоритме? Возможно ли использовать геометрические соображения для улучшения работы алгоритма?
3. Если результаты работы алгоритма сопоставимы с результатами, полученными универсальным решателем Gurobi, то в чём смысл разработки специализированного алгоритма?
4. Английские аббревиатуры систематически вводятся без расшифровки, например CAM 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.

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

Высказанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общего положительного впечатления от материала диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Уколова Станислава Сергеевича представляет собой самостоятельную и законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему и обладающую признаками новизны и практической значимости. Полученные результаты и научно обоснованные решения, которые изложены в диссертации, применимы в САПР управляющих программ для машин листовой резки с ЧПУ с целью повышения эффективности их функционирования, а также могут использоваться на промышленных предприятиях при подготовке управляющих программ средствами САПР. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (промышленность).

Диссертация обладает структурным единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора в исследование. Разделы диссертации взаимосвязаны и логично дополняют друг друга. Полученные автором результаты достоверны. Выводы и заключения, сделанные диссертантом, обоснованы и соответствуют представленным в работе результатам. Диссертация и автореферат в полном объеме соответствуют критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени Первого президента России Б. Н. Ельцина», которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата наук. Диссертационная работа Уколова С. С. на тему «Разработка алгоритмов оптимальной маршрутизации инструмента для САПР управляющих программ машин листовой резки с ЧПУ» соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ. Диссертация отвечает требованию указания ссылок на заимствованные материалы или отдельные результаты.

Считаю, что 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 (05.13.19 – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность), доцент, заведующий кафедрой комплексной защиты информации ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет».

7 февраля 2022 г.

Ложников Павел Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет».

Адрес: 644050, Россия, г. Омск, пр. Мира, д. 11.

Телефон: +7(3812) 21-77-02.

E-mail: lozhnikov@mail.ru

