

## Отзыв

официального оппонента, доктора технических наук, профессора Коновалова Анатолия Владимировича 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**

Диссертационная работа Уколова С. С. посвящена разработке алгоритмов, направленных на решение актуальной научно-практической задачи оптимизации маршрута режущего инструмента, которая возникает в современных САПР на этапе проектирования управляющих программ для оборудования листовой резки с ЧПУ. Решение поставленных в диссертационной работе задач позволяет повысить эффективность функционирования систем автоматизированного проектирования управляющих программ. Актуальность темы исследования вызвана тем, что в силу высокой сложности самой задачи маршрутизации резки, отсутствует единый подход к её решению, независимые исследовательские группы решают отдельные варианты общей задачи, учитывающие некоторые аспекты, а на практике зачастую применяется интерактивная разработка маршрута, не позволяющая гарантировать оптимальность результата. Поскольку задача резки содержит в себе эвклидову задачу коммивояжёра на плоскости, она является NP-трудной, что делает её точное решение при современных размерах раскройных планов непрактичным, но повышает потребность в развитии эвристических и метаэвристических подходов, дающих за приемлемое время решения, близкие к оптимальным, при этом позволяя получать оценки найденных решений, что до сих пор является редкостью в данной области исследований.

Таким образом, диссертационная работа Уколова С. С., посвящённая разработке автоматических алгоритмов оптимальной маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ, выполнена на актуальную тему.

### **Научная новизна результатов**

В данной диссертационной работе проведён поиск и анализ идей разных авторов и путём их объединения получены работоспособные алгоритмы оптимизации маршрута инструмента оборудования листовой резки с ЧПУ: исследованы методы релаксации задачи PCGTSP и отобраны наиболее оптимальные на исследованных примерах их комбинации; разработаны более строгие схемы учёта ограничений предшествования как для полностью дискретной, так и для непрерывно-дискретной оптимизации, позволяющие

уменьшить вычислительную сложность задачи; эвристика поиска оптимальных позиций точек врезки на непрерывных контурах дополнена комбинаторной оптимизацией для поиска последовательности обработки контуров; исследованы методы генерации окрестностей в пространстве перестановок. В результате значительно повышен размер задач, которые могут эффективно решаться, в особенности при большой вложенности контуров. Кроме того, оценки, получаемые при помощи метода ветвей и границ, могут использоваться также для оценивания качества других алгоритмов, использующих как дискретные модели оптимизации, так и непрерывно-дискретные, что представляет интерес как с теоретической, так и практической точки зрения.

### **Объём и структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и четырёх приложений. Полный объём диссертации составляет 135 страниц, включая 24 рисунка и 7 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 121 наименование.

Во введении дано обоснование диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, актуальность, теоретическая и практическая значимость работы, описаны методы исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведена информация об апробации работы, сведения о личном вкладе автора в работу.

В первой главе даны основные определения, отмечены основные технологические ограничения и особенности листовой резки. Приведены классификация применяемых в САПР управляющих программ техник резки и классификация задач оптимальной маршрутизации инструмента. Приведена формализация оптимизационной задачи проектирования маршрута резки. На основе литературного обзора выполнен анализ методов и алгоритмов для решения оптимизационной задачи маршрутизации режущего инструмента при подготовке управляющих программ для машин листовой резки с ЧПУ.

Во второй главе рассматривается обобщённая задача коммивояжера с ограничениями предшествования (PCGTSP), естественным образом возникающая при поиске оптимального маршрута режущего инструмента после применения дискретизации к контурам деталей. Исследованы основные подходы, описанные в литературе, применяемые для решения этой задачи и на их основе разработан первый специализированный алгоритм ветвей и границ. Основу алгоритма представляет собой механизм построения нижних оценок на основе последовательной релаксации исходной задачи PCGTSP к асимметричной задаче коммивояжера ATSP и далее к задаче о поиске минимального остовного дерева и задачи о назначениях. В некоторых случаях задача ATSP не слишком большой размерности решается также



непосредственно, при помощи решателя Gurobi. На основе полученной нижней оценки принимается решение об отсечении текущей ветви дерева поиска, при этом используется допустимое решение исходной задачи, полученное при помощи недавно разработанной эвристики PCGLNS. В ходе численных экспериментов на примерах из открытой библиотеки PCGTSPLIB, продемонстрировано, что алгоритм работоспособен и в текущей реализации на языке Python показывает производительность, сравнимую с коммерческим решателем Gurobi.

В третьей главе исследуется подход к задаче оптимальной маршрутизации режущего инструмента с применением непрерывной оптимизации и описывается алгоритм решения задачи непрерывной резки СССР. Описывается схема учёта ограничений предшествования путём предварительного удаления некоторых контуров с последующим их восстановлением. Поиск позиций точек врезки на контурах деталей при фиксированном порядке обхода последних осуществляется при помощи многократной независимой релаксации. Для поиска оптимальной перестановки контуров применяется метод переменных окрестностей, описаны несколько приёмов построения окрестностей разного размера в пространстве перестановок. В ходе численных экспериментов сравнивалось решение задачи непрерывной резки с решением полученной из неё дискретной задачи маршрутизации, что позволяет сделать вывод о том, что с практической точки зрения данный алгоритм находит оптимальные решения задачи непрерывной резки.

Четвёртая глава посвящена методологии использования алгоритмов решения разных классов задачи маршрутизации режущего инструмента в существующих САПР. С учётом современного состояния технологии разработки программного обеспечения сформулированы требования к схемам и форматам файлов информационного обмена, показано, что таким требованиям удовлетворяет формат JSON (JavaScript Object Notation), разработаны схемы файлов, применяемых на всех этапах проектирования управляющих программ для машин листовой резки с ЧПУ и разработан ряд конвертеров для взаимодействия с существующими САПР, в том числе решающих задачу визуализации разных этапов проектирования управляющих программ, с элементами интерактивности.

В заключении приводятся выводы по всем результатам работы и предложены пути дальнейшего развития темы.

В приложениях приводится акт внедрения, даны описания использованных в ходе диссертационной работы форматов файлов.

## **Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, и их достоверность**

При анализе предметной области и в процессе написания работы автор опирается на труды отечественных и зарубежных исследователей. Достоверность и обоснованность научных положений, сформулированных в диссертации, подтверждается использованием адекватных методов анализа информации на основе системного подхода с использованием математических методов обработки данных и современных методов исследования. Все полученные результаты подтверждены экспериментально, представляются надёжно проверенными и апробированными, опубликованы в рецензируемых научных журналах, докладывались на всероссийских и международных конференциях. Автореферат и публикации автора полностью отражают полученные в диссертационной работе результаты. Автором по теме диссертации осуществлено 18 публикаций, из них 9 научных статей в журналах, индексируемых в международных базах данных WoS, Scopus и входящих в список ВАК.

### **Практическая ценность работы**

Внедрение методик и алгоритмов, разработанных в диссертационной работе и реализованных в САПР «Сириус» и «T-Flex», позволяет в автоматическом режиме строить оптимальные и близкие к оптимальным маршруты режущего инструмента машин листовой резки с ЧПУ, тем самым сокращая сроки подготовки управляющих программ и уменьшая стоимость и продолжительность процесса резки. Использование нескольких автоматических алгоритмов, а также применение концепции сегмента резки открывает возможность ансамблевой оптимизации, за счёт минимизации не только холостого хода, но и полной целевой функции стоимости / времени, учитывающей активный ход режущего инструмента и операции врезки.

Результаты исследований используются в учебном процессе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», что подтверждается актом внедрения, приведённом в Приложении А.

### **Замечания по работе**

По содержанию диссертации имеются следующие замечания:

1. 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?



2. 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?
3. В доказательстве утверждения 3.1 на стр. 68 функция  $\varphi(t)$  названа выпуклой, во избежание двусмысленности следовало бы уточнить, что она является выпуклой вниз, а не вверх, что подтверждается тем, что её вторая производная неотрицательна.
4. 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.
5. В тексте диссертации также имеются опечатки, так в формуле на стр. 18 вместо  $C_j$  должно быть  $C_j$  по смыслу.

### **Заключение по работе**

Сделанные замечания не оказывают влияния на общую положительную оценку работы, её основные выводы и положения, выносимые на защиту. Текст диссертации Уколова С. С. представляет собой законченную научно-квалификационную работу на актуальную тему, выполненную на высоком уровне, самостоятельно, написанную логически последовательно. Текст диссертации изложен грамотным языком, не содержит заимствованного материала без ссылки на автора или источник заимствования. Актуальность темы не вызывает сомнений. Публикации по теме диссертации не содержат результатов научных работ, выполненных в соавторстве, без ссылок на соавторов. Автореферат диссертации соответствует диссертационной работе по всем признакам: по цели, задаче, основным положениям, определениям актуальности, научной значимости новизны и др. Результаты, полученные в процессе исследования, опубликованы и с исчерпывающей полнотой отражают существо рецензируемой работы.

Диссертация в полном объёме соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней в ФГАО ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата наук. Тематика и содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (промышленность).

По объёму, актуальности тематики, достоверности и новизне полученных результатов, ценности для науки и практики диссертационная работа Уколова Станислава Сергеевича «Разработка алгоритмов оптимальной маршрутизации инструмента для САПР управляющих программ машин листовой резки с ЧПУ», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук, соответствует требованиям п. 9 Положения о

присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор 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 (05.16.05 – Обработка металлов давлением), профессор, заведующий лабораторией механики деформаций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук.

«10» февраля 2022 г.



Коновалов Анатолий Владимирович

*Полное наименование организации:* Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН).

*Адрес организации:* 620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34.

*Телефон:* +7(343) 362-30-11

*E-mail:* [avk@imach.uran.ru](mailto:avk@imach.uran.ru)

Подпись Коновалова Анатолия Владимировича заверяю,  
Ученый секретарь ИМАШ УрО РАН, к.т.н.

А.М. Поволоцкая

