

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



ТАБАЕВА Анастасия Фидагилевна

**Разработка методик расчета временных и стоимостных параметров процесса
резки в системах автоматизированного проектирования управляющих
программ для машин листовой лазерной резки с ЧПУ**

05.13.12 – Системы автоматизации
проектирования (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа 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»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Петунин Александр Александрович

Официальные оппоненты: **Мартынов Виталий Владимирович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет», г. Уфа,
заведующий кафедрой экономической
информатики;

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

Янишевская Анна Генриховна,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Омский государственный
технический университет», г. Омск, профессор
кафедры «Инженерная геометрия и САПР»
факультета информационных технологий и
компьютерных систем

Защита состоится «27» января 2021 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.09.24 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д.19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1732>

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Огородникова Ольга Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В машиностроении и других отраслях промышленности в раскройно-заготовительном производстве большая часть продукции изготавливается из листового материала на технологическом оборудовании термической резки с числовым программным управлением (далее по тексту ЧПУ). К такому оборудованию относятся, в частности, машины лазерной, плазменной, кислородной резки. Машины лазерной резки с ЧПУ имеют широкое применение, что обусловлено возможностью обработки многих видов материалов различной толщины, высокой скоростью резки, возможностью обработки контуров различной сложности и хорошего качества реза, адаптации к постоянным изменениям номенклатуры выпускаемой продукции. Как известно, применение систем автоматизированного проектирования (САПР), предназначенных для разработки управляющих программ (УП) для машин листовой резки с ЧПУ, обеспечивает автоматизацию процесса проектирования УП. Проектирование УП для технологического оборудования листовой резки состоит из нескольких этапов. Первый этап предполагает предварительное геометрическое моделирование заготовок и разработку раскройной карты листового материала. На этапе проектирования раскроя возникает известная задача оптимизации фигурного раскроя листового материала, которая с точки зрения геометрической оптимизации относится к классу трудно решаемых проблем раскроя-упаковки (Cutting & Packing), т.н. проблема «нестинга». На следующем этапе проектирования УП осуществляется процесс назначения траектории перемещения режущего инструмента (маршрута резки) для полученного на первом этапе варианта раскроя. На этом этапе возникают актуальные научно-практические задачи оптимизации маршрута режущего инструмента. Целью этих задач обычно является минимизация стоимости и (или) времени процесса резки, связанного с обработкой требуемых контуров деталей из листового материала, за счет определения оптимальной последовательности вырезки контуров и выбора необходимых точек для термической врезки в листовую материал с учетом технологических ограничений процесса резки. В рамках данной диссертационной работы задачи раскроя-упаковки не рассматриваются за исключением связанной с проблемой «нестинга» задачи формирования на листовом материале групп типовых деталей, обеспечивающих решение задачи оптимальной маршрутизации инструмента при вырезке этих групп. Следует отметить, что современные специализированные САПР предоставляют базовый инструментарий для решения задач рационального раскроя материалов и подготовки УП для технологического оборудования листовой резки с ЧПУ. Вместе с тем разработчики систем автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой резки с ЧПУ не уделяют должного внимания проблеме оптимизации маршрута резки. Существующее программное обеспечение САПР не гарантирует получение оптимальных траекторий перемещения инструмента при одновременном соблюдении технологических требований резки, обусловленных необходимостью уменьшения термических деформаций материала, которые могут приводить к существенным искажениям геометрии вырезаемых деталей. Прежде всего, отметим, что в настоящее время отсутствуют научно-обоснованные методики точного вычисления стоимостных и временных параметров целевых функций в задаче оптимизации построения маршрута резки при проектировании УП из-за сложности учета различных технологий и режимов резания, особенностей используемого оборудования с ЧПУ и эксплуатационных затрат. В частности, в существующих САПР значение скорости рабочего хода инструмента при расчете времени резки принимается величиной постоянной, однако, как показывает

практика, фактическая скорость резки может меняться в зависимости от различных технологических факторов, а также характеристик спроектированной УП. В свою очередь, для расчета стоимости процесса резки на оборудовании листовой лазерной резки с ЧПУ зачастую учитывается только длина рабочего хода инструмента, которая принимается равной суммарному периметру граничных контуров вырезаемых деталей и не учитываются другие параметры траектории перемещения инструмента, а также эксплуатационные характеристики процесса резки и особенности используемого оборудования.

Отметим также, что пользователи САПР, в основном, используют интерактивный режим проектирования УП. При этом при проектировании маршрута резки зачастую применяется стандартная техника резки «по замкнутому контуру» и путь инструмента строится только с точки зрения минимизации холостых переходов режущего инструмента. Однако этот параметр не единственный, который влияет на стоимость процесса резки. Известно, что наибольшее влияние на величину целевых функций стоимости и времени термической резки оказывают число точек врезки и длина перемещения режущего инструмента на рабочем ходе. Поэтому в настоящее время при проектировании УП наибольший интерес представляют специальные способы резки, которые направлены на уменьшение значений основных параметров резки (числа точек врезки, длины холостых и рабочих перемещений режущего инструмента), а не только длины холостых перемещений инструмента. При этом необходимо одновременно соблюдать технологические ограничения процесса термической резки.

Таким образом, задачи разработки методик для точного расчета стоимостных и временных параметров процесса резки, а также для построения маршрута резки с применением специальных техник резки в САПР УП для оборудования листовой резки с ЧПУ остаются нерешенными и определяют актуальность данной диссертационной работы. Сформулированные задачи представляют общетеоретический и очевидный практический интерес для повышения эффективности САПР УП для оборудования листовой резки с ЧПУ. Актуальность задачи возрастает и в связи с всё более широким распространением в промышленности лазерного оборудования с ЧПУ, которое позволяет получать детали с достаточной точностью и с необходимым качеством, и в связи с возрастающей конкуренцией в сфере оказания услуг по листовой резке.

Степень разработанности темы исследования. Методы проектирования технологических процессов раскроя, включая методы формирования маршрута резки, исследовались в работах, как отечественных, так и зарубежных ученых. Как отмечалось выше, разработка оптимизационных методов решения задачи «нестинга» не входит в круг рассматриваемых в диссертационной работе задач, тем не менее, следует упомянуть о значительном вкладе советских и российских исследователей в теорию оптимизации раскроя-упаковки. Работы в этой предметной области были начаты выдающимися учёными Залгаллером В.А. и Канторовичем Л.В. и продолжены в уфимской научной школе Мухачевой Э.А. и её учениками: Валеевой А.Ф., Верхотуровым М.А., Картаком В.М., Мартыновым В.В., Филипповой А.С., и др. Методологические и теоретические основы создания САПР листового раскроя для задачи «нестинга» были заложены Гилем Н.И., Петуниным А.А., Стояном Ю.Г., Фроловским В.Д.

Разработкой алгоритмов для маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ занимались, в частности, следующие российские исследователи: Верхотуров М.А., Макаровских Т.А., Мурзакаев Р.Т., Петунин А.А., Ченцов А.Г.,

Ченцов П.А., Фроловский В.Д., Хачай М.Ю. и др., а также зарубежные исследователи: Arkin E., Ascheuer N., Cattrysse D., Dewil R., Gambardella L., Hoefl J., Jing Y., Kim Y., Lee M., Sherif, S.U., Yang W. и др.

В большой части работ, посвященных проектированию маршрута инструмента для машин листовой резки с ЧПУ, описываются методы и соответствующие им алгоритмы, которые основаны на применении стандартной резки деталей «по замкнутому контуру». Она предполагает вырезку граничных контуров деталей целиком и сводит задачу оптимальной маршрутизации к задаче минимизации только холостых перемещений режущего инструмента, что сильно ограничивает множество допустимых решений задачи. В подавляющей части работ по проблеме исследования (см., например, публикации Мурзакаева Р.Т., Ченцова А.Г., Arkin E., Ascheuer N., Cattrysse D., Dewil R., Hoefl J., Jing Y., Lee M., Lin S., Yang W., Zhao Y. и многих других) используется дискретизация граничных контуров деталей, что позволяет применять различные математические модели дискретной оптимизации. Можно отметить только отдельные публикации, где оптимизационные алгоритмы ориентированы на поиск решений среди континуальных множеств.

Часть работ отечественных и зарубежных ученых Верхотурова М.А., Петунина А.А., Полищука Е.Г., Ченцова П.А., Dewil R., Han G., Kim Y. предлагает алгоритмы проектирования маршрута перемещения режущего инструмента, ориентированные на снижение температуры листового материала в процессе термической резки на оборудовании с ЧПУ.

В целом, следует отметить явную недостаточность исследований по вопросам применения специальных техник резки и методик их использования при проектировании маршрута резки в существующих САПР УП. Остается также открытым вопрос точного вычисления стоимостных и временных параметров процесса резки для оборудования термической резки с ЧПУ, поскольку, насколько нам известно, до настоящего времени исследований по этому вопросу проведено не было. Это касается как проведения исследований для определения поправочных коэффициентов для величины рабочей скорости перемещения режущего инструмента, так и методик расчета стоимости резки деталей на машинах листовой резки с ЧПУ. Актуальность разработки этих методик усиливает и тот факт, что в России на предприятиях реального сектора экономики практически нигде не применяют научно-обоснованные методы расчета стоимости резки. Таким образом, разработка методик точного вычисления стоимостных и временных параметров процесса резки для задач оптимизации маршрута инструмента, а также разработка методик проектирования маршрута инструмента с использованием специальных техник резки, являются актуальными задачами создания и применения САПР УП для машин листовой фигурной резки с ЧПУ.

Цель работы заключается в исследовании и разработке методик расчета временных и стоимостных параметров процесса резки, а также методик проектирования маршрута резки для номенклатур типовых деталей в системах автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой лазерной резки с ЧПУ. Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать научно-обоснованную методику для расчета параметров целевой функции стоимости резки в задаче оптимизации траектории перемещения режущего инструмента при проектировании УП с учетом эксплуатационных затрат и особенностей используемого оборудования лазерной резки с ЧПУ;

- разработать методику для расчета рабочей скорости перемещения режущего инструмента с целью точного вычисления целевой функции времени резки в задаче

оптимизации маршрута резки при проектировании УП для оборудования лазерной резки с ЧПУ;

- разработать методики проектирования маршрута резки с применением специальных способов в САПР УП для оборудования листовой резки с ЧПУ для некоторых номенклатур типовых деталей в раскройно-заготовительном производстве;

- разработать алгоритмы и реализовать разработанные методики для построения маршрута резки в САПР УП с использованием специальных способов резки при одновременном соблюдении технологических ограничений процесса термической резки;

- реализовать методику для расчета стоимости процесса резки на оборудовании лазерной резки с ЧПУ в виде отдельного модуля для расширения функциональных возможностей САПР УП для оборудования листовой лазерной резки с ЧПУ;

- провести верификацию и апробацию разработанных методик и алгоритмов.

Научная новизна результатов. Автором разработаны методики, применение которых в САПР УП для оборудования листовой лазерной резки с ЧПУ позволяет повысить эффективность их функционирования за счёт получения рациональных вариантов маршрута резки при уменьшении времени и стоимости резки при одновременном соблюдении технологических ограничений. Также разработанные методики точного вычисления стоимостных и временных параметров процесса резки могут применяться в автоматических процедурах для получения корректного результата вычисления целевых функций и поиска оптимального маршрута резки в САПР УП. В данной работе основные экспериментальные исследования были проведены для оборудования лазерной резки с ЧПУ. Вместе с тем, результаты работы могут быть использованы и для другого типа оборудования листовой термической резки с ЧПУ, учитывая особенности конкретной технологии резки. Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Впервые разработана научно-обоснованная методика расчета параметров целевой функции стоимости в задаче оптимизации построения маршрута резки для оборудования лазерной резки с ЧПУ. Получены табличные значения этих параметров для ряда марок материалов различной толщины с целью использования их в САПР УП для машин лазерной резки с ЧПУ;

2. Впервые разработана методика и получены формулы расчета фактической рабочей скорости перемещения режущего инструмента в целевой функции времени резки в задаче оптимизации построения маршрута резки для лазерного оборудования с ЧПУ;

3. Разработаны новые методики построения маршрута резки в САПР УП для машин листовой резки с ЧПУ при изготовлении некоторых номенклатур типовых деталей. Методики основаны на применении специальных техник листовой резки и позволяют уменьшить значения основных временных и стоимостных параметров процесса резки. При этом одновременно соблюдаются условия технологичности и снижаются термические деформации, возникающие в процессе резки.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

1. в разработке методики для расчета параметров целевой функции стоимости в задаче оптимизации построения маршрута резки для оборудования лазерной резки с ЧПУ и в полученных табличных значениях этих параметров для целого ряда марок материалов различной толщины. Это обеспечивает построение корректной оптимальной траектории инструмента при автоматизированном проектировании маршрута минимальной стоимости;

2. в разработке методики для точного расчета рабочей скорости перемещения режущего инструмента для целевой функции времени резки в задаче оптимизации построения маршрута резки. Получены формулы для расчета фактических значений рабочей скорости для оборудования лазерной СО₂ резки с ЧПУ. Это обеспечивает построение корректной оптимальной траектории инструмента при автоматизированном проектировании минимального по времени маршрута резки;

3. в разработке новых методик маршрутизации режущего инструмента при резке некоторых номенклатур типовых деталей на основе использования специальных техник листовой резки на машинах с ЧПУ. Методики позволяют уменьшить значения основных параметров резки на оборудовании с ЧПУ. Разработанные методики используются в производственном процессе при проектировании УП в САПР «СИРИУС», «BySoft» и «Tru Tops»;

4. в программной реализации разработанных методик в виде макропрограмм для оптимизации маршрута резки в САПР «СИРИУС» при соблюдении технологических ограничений термической резки;

5. в разработке модуля для расчета стоимости процесса листовой лазерной резки и его интеграции с существующей САПР «СИРИУС».

Полученные результаты используются в образовательном процессе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», что подтверждается соответствующим актом внедрения. Результаты диссертации внедрены на предприятиях: ООО «Уралинтех», АО «ПО «УОМЗ», ЗАО «РЦЛТ», что подтверждается соответствующими актами.

Методология и методы исследования. Методологическую базу исследования составили фундаментальные и прикладные работы отечественных и зарубежных ученых в области автоматизированного проектирования маршрута резки для машин листовой резки с ЧПУ и в области разработки алгоритмов оптимальной маршрутной оптимизации. В качестве инструментов исследования использовались следующие методы: анализ, синтез, классификация, формализация, математические методы обработки данных. Формулы для вычисления фактических значений скорости рабочего хода режущего инструмента выведены с использованием полученных результатов экспериментального исследования на оборудовании лазерной СО₂ резки с ЧПУ (ByStar3015). Обработка экспериментальных данных выполнена средствами программы «Mathcad». Разработка методики для расчета параметров целевой функции стоимости резки выполнена на основании анализа особенностей технологического оборудования лазерной резки с ЧПУ и эксплуатационных затрат, связанных с процессом резки. Для оценки эффективности полученных результатов была проведена апробация разработанных технологий и методик на промышленных предприятиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методики вычисления стоимостных и временных параметров целевых функций в задаче оптимизации маршрута резки при автоматизированном проектировании УП для оборудования лазерной листовой резки с ЧПУ. Разработанные методики обеспечивают корректный результат вычисления целевых функций и построения оптимального маршрута резки с учетом технологических особенностей оборудования термической резки, режимов резания и эксплуатационных затрат;

2. Методики и схемы построения маршрута резки в САПР УП для оборудования листовой резки с ЧПУ, основанные на применении специальных техник резки для определенных номенклатур деталей, которые изготавливаются из

листового материала. Разработанные методики обеспечивают сокращение времени и стоимости резки по сравнению с резкой «по замкнутому контуру»;

3. Элементы систем автоматизированного проектирования, которые позволяют повысить эффективность их функционирования и расширить их функциональные возможности при решении задач оптимальной маршрутизации инструмента для машин листовой резки с ЧПУ.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается результатами экспериментальных исследований, приведенными в ряде публикаций и полученными при использовании методик, алгоритмов и программных средств, созданных при непосредственном участии соискателя. Достоверность полученных результатов подтверждается также решением практических задач при внедрении результатов диссертационного исследования на промышленных предприятиях Свердловской области и хорошим согласованием полученных результатов с экспериментальными данными. Основные положения диссертации были представлены на международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в изданиях ВАК, Scopus, WoS, известны в научном сообществе и положительно оценены специалистами.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях, в том числе: II Всероссийская молодежная научно-практическая конференция с международным участием «Инженерная мысль машиностроения будущего» (Екатеринбург, 2013); III Международная конференция «Информационные Технологии и Системы» (Банное, Россия, 2014); II Международная конференция «Интеллектуальные технологии обработки информации и управления» (Уфа, 2014); II Международная конференция «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений» (Уфа, 2014); IV Международная конференция «Информационные Технологии и Системы» (Банное, Россия, 2015); 41^я Международная конференция «Applications of Mathematics in Engineering and Economics» (AMEE'15) (Болгария, 2015); II Международная конференция «International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing» (Челябинск, 2016); 11 Международная конференция «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур» (Екатеринбург, 2016); VI Международная конференция «Информационные Технологии и Системы» (Банное, Россия, 2017); III Международная конференция «International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing» (Челябинск, 2017); 19 Международная конференция «Computer Science and Information Technologies» (Германия, 2017); Международная конференция «Mathematical optimization theory and operations research» (Екатеринбург, 2019); Международная научно-техническая конференция «International conference on industrial engineering» (Сочи, 2019); Международная конференция «International conference on rheology and modeling of materials» (Венгрия, 2019).

Личный вклад автора состоит в проведении теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы, проведении аналитических расчетов на основе полученных результатов, а также в разработке соответствующих методик и элементов систем автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой CO₂ лазерной резки с ЧПУ (ByStar 3015). Все экспериментальные исследования на машине лазерной резки с ЧПУ и анализ их результатов, а также формулировка выводов, сделаны автором самостоятельно. В опубликованных совместных работах постановка и разработка алгоритмов для

решения задач осуществлялись совместными усилиями соавторов при непосредственном активном участии соискателя.

По теме диссертационной работы опубликовано 18 научных работ, среди которых 10 статей в журналах, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, включая 6 статей в изданиях, индексируемых в международных базах WoS и Scopus, 8 работ опубликовано в других изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Общий объем диссертации составляет 164 с., в том числе 65 рисунков, 18 таблиц. Список литературы включает 118 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Приведены основания для выполнения работы, ее апробация и структура.

В первой главе проводится анализ проблемы автоматизированного проектирования УП в раскройно-заготовительном производстве для оборудования термической фигурной резки с ЧПУ. Описаны основные технологические особенности и ограничения термической резки, которые необходимо соблюдать при проектировании УП. Проводится анализ существующих САПР УП для оборудования листовой резки с ЧПУ, выделены актуальные проблемы. Приведена формализация оптимизационной задачи проектирования маршрута резки. Даны классификация задач оптимальной маршрутизации инструмента и классификация способов резки, применяемых в САПР УП для формирования маршрута резки. В настоящее время выделяют 3 класса техник резки¹: *резка «по замкнутому контуру»* (рисунок 1), *мульти сегментная резка* (для вырезки одного контура используются не менее двух сегментов резки) и *мультиконтурная резка* (резка предполагает вырезку нескольких контуров в одном сегменте). Определение сегмента резки дано ниже.

Маршрут резки считается заданным, если заданы: точки врезки и выключения инструмента, траектория перемещения инструмента на рабочем ходе между точкой врезки и точкой выключения инструмента, порядок резки (он определяет холостые перемещения инструмента между точкой выключения инструмента и следующей точкой врезки). На рисунке 1 цифрами обозначена последовательность резки контуров согласно условию предшествования с применением стандартной техники резки «по замкнутому контуру».

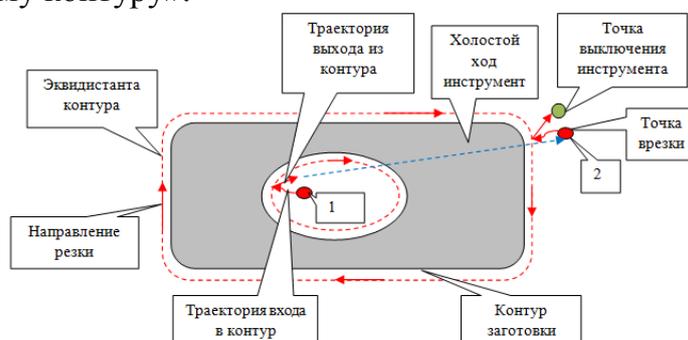


Рисунок 1 – Пример схемы резки заготовки «по замкнутому контуру»

¹ Petunin, A.A. Optimization models of tool path problem for CNC sheet metal cutting machines /A.A. Petunin, C. Stylios// IFAC – Paper OnLine. – 2016. – Vol. 49(12). – p. 23-28.

Введем некоторые определения, касающиеся маршрута резки².

Определение 1. *Сегмент резки* S – это траектория перемещения инструмента на рабочем ходе между точкой врезки M и соответствующей ей точкой выключения инструмента M^* .

Определение 2. *Базовый сегмент резки* B^S для сегмента S – часть траектории сегмента резки, которая не содержит траекторию входа в контур и выхода из него.

Пусть для вырезки деталей было использовано K сегментов резки, S_k – k сегмент резки ($k \in \overline{1, K}$). Маршрут резки деталей с точки зрения сегментов резки определяется кортежем R^2 :

$$R = (M_0, M_1, S_1, M_1^*, M_2, S_2, M_2^*, \dots, M_K, S_K, M_K^*, i_1, i_2, \dots, i_K), \quad (1)$$

где M_0 – начальная точка положения инструмента, i_1, i_2, \dots, i_K – последовательность, в соответствии с которой вырезаются используемые сегменты резки S_1, S_2, \dots, S_K . Линейное перемещение инструмента на холостом ходе между точкой выключения инструмента и следующей точкой врезки однозначно определяется этой последовательностью. Если применить комбинаторную терминологию, то последовательность однозначно задается перестановкой порядка K , т.е. упорядоченным набором натуральных чисел от 1 до K (биекцией на множестве $\overline{1, K}$), которая числу $k \in \overline{1, K}$ ставит в соответствие элемент i_k из набора.

В качестве критериев оптимизации (целевых функций) в задаче оптимизации маршрута инструмента рассматриваются стоимость резки F_{cost} и время резки T_{cut} , которые вычисляются по следующим формулам^{3,4}:

$$F_{cost} = L_{on} \cdot C_{on} + L_{off} \cdot C_{off} + N_{pt} \cdot C_{pt}, \quad (2)$$

$$T_{cut} = \frac{L_{on}}{V_{on}} + \frac{L_{off}}{V_{off}} + N_{pt} \cdot t_{pt}, \quad (3)$$

где L_{off} и L_{on} – длина переходов режущего инструмента на холостом и рабочем ходе соответственно; V_{off} и V_{on} – скорость режущего инструмента на холостом и рабочем ходе соответственно; N_{pt} – количество точек врезки; t_{pt} – время, затрачиваемое на одну точку врезки; C_{on} – стоимость единицы пути с включенным режущим инструментом; C_{off} – стоимость единицы пути на холостом ходе; C_{pt} – стоимость одной точки врезки.

Значения целевых функций (2) и (3) однозначно определяются маршрутом резки, задаваемым (1), т.к. геометрия сегментов S_1, S_2, \dots, S_K позволяет вычислить L_{on} , а координаты точек $M_0, M_1, M_1^*, M_2, M_2^*, \dots, M_K, M_K^*$ и последовательность i_1, i_2, \dots, i_K задают набор холостых перемещений инструмента, который определяет

² Petunin, A.A. General model of tool path problem for the CNC sheet cutting machines /A.A. Petunin// IFAC – PapersOnLine. – 2019. – Vol. 52 (13). – p. 2662-2667.

³ Petunin, A.A. Modeling of tool path for the CNC sheet cutting machines /A.A. Petunin// AIP: proceedings inter. conf. – 2015. – 1690: 060002(1)-060002(7).

⁴ Верхотуров, М.А. Математическое обеспечение задачи оптимизации пути режущего инструмента при плоском фигурном раскрое на основе цепной резки /М.А. Верхотуров, П.Ю. Тарасенко// Вестник УГАТУ. Управление, ВТиГ. – 2008. – Т.10, №2 (27). – с.123-130.

суммарную длину L_{off} . Тогда сформулированные задачи оптимизации маршрута перемещения инструмента для машин листовой резки с ЧПУ можно представить в самом общем виде как задачу минимизации некоторой числовой функции F , заданной на множестве G допустимых коротежей R^5 :

$$F(R) \rightarrow \min_{R \in G}.$$

В Главе 1 приведен анализ методов и алгоритмов для решения оптимизационной задачи маршрутизации режущего инструмента при подготовке УП. На основании результатов анализа состояния предметной области сформулированы цель и задачи исследования, приведенные во введении.

Во второй главе разработаны методики точного расчета стоимостных и временных параметров для целевых функций (2) и (3) на примере лазерной листовой резки на технологическом оборудовании с ЧПУ.

Неточность вычисления фактического времени резки T_{cut} связана с тем, что скорость режущего инструмента V_{on} , программируемая в УП как константа, фактически таковой не является и может меняться в зависимости от различных технологических факторов, а также характеристик спроектированной УП. В Главе 2 были сформулированы гипотезы для определения факторов, влияющих на изменение значений V_{on} . Исследования были проведены для следующих марок листовых материалов на лазерном CO_2 комплексе с ЧПУ: 10кп ($\Delta=1-10$ мм) и АМг3М ($\Delta=1-5$ мм). Для каждой толщины материала 10кп и АМг3М были разработаны 200 УП (с количеством кадров n от 10 до 5000) и 180 УП (n от 10 до 2000) соответственно.

Результаты исследования показали, что фактическое значение рабочей скорости зависит от количества кадров УП. Статистический материал был обработан в программе «Mathcad» и с помощью метода наименьших квадратов были построены аппроксимирующие функции и найдены коэффициенты этих функций для зависимости V_{on} от количества кадров в УП. Для всех значений исследуемых марок материала и толщин было установлено, что значение суммы квадратов отклонений между наблюдаемыми фактическими значениями $V_{on}^{факт}$ и соответствующими им расчетными величинами достигает min при аппроксимации экспериментальных данных логарифмической функцией. Фактическая средняя скорость рабочего хода инструмента является монотонно убывающей функцией от n в УП (рисунок 2).

Обобщенные результаты для всех исследованных марок материала и толщин приведены в таблице 1. При этом $\{n \in \mathbb{N} | 10 \leq n \leq 5000\}$ для листового материала марки 10кп ($\Delta = 1-10$ мм) и $\{n \in \mathbb{N} | 10 \leq n \leq 2000\}$ для листового материала АМг3М ($\Delta = 1-5$ мм). В случае же использования материала других марок необходимо проведение дополнительных исследований, либо использование имеющихся данных по материалу с близкими физическими свойствами. Была выполнена оценка адекватности полученных формул (таблица 1) по сравнению с реальными значениями V_{on} для произвольных 50 УП в производственном процессе при обработке листовых материалов АМг3М ($\Delta = 1-5$ мм) и 10кп ($\Delta = 1-10$ мм) на лазерном CO_2 комплексе с ЧПУ. При этом анализ результатов показал, что относительные отклонения реальных значений от рассчитанных по формулам из таблицы 1 не превышают 5-8 %.

⁵ Петунин А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А. Оптимальная маршрутизация инструмента машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением. Математические модели и алгоритмы: монография. Екатеринбург – УрФУ, 2020. – 248 с.

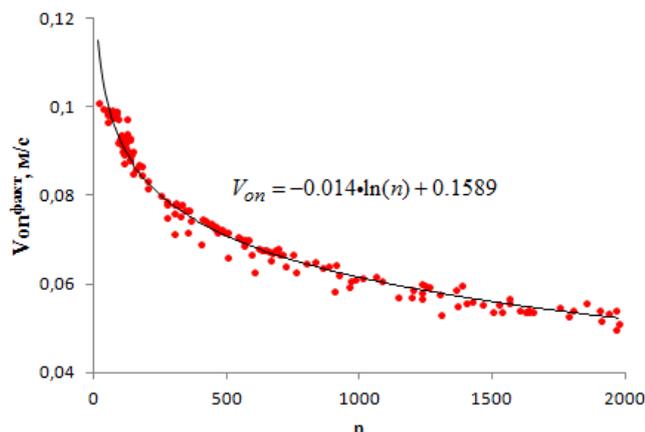


Рисунок 2 – Зависимость скорости режущего инструмента на рабочем ходе от числа кадров для АМГЗМ, $\Delta=1\text{мм}$

Таблица 1 – Обобщенная таблица формул для вычисления значений фактической рабочей скорости инструмента на лазерном CO_2 комплексе с ЧПУ

Материал и толщина материала (Δ ,мм)	Значение V_{on} , заданное в УП, м/с	Формула для вычисления значений V_{on} в зависимости от количества кадров n в УП
10кп, $\Delta=1$	0,13	$V_{on} = -0.025 \cdot \ln(n) + 0.25$
10кп, $\Delta=2$	0,0975	$V_{on} = -0.015 \cdot \ln(n) + 0.1711$
10кп, $\Delta=3$	0,06	$V_{on} = -0.009 \cdot \ln(n) + 0.1062$
10кп, $\Delta=3.5$	0,042	$V_{on} = -0.006 \cdot \ln(n) + 0.0759$
10кп, $\Delta=4$	0,04	$V_{on} = -0.006 \cdot \ln(n) + 0.0709$
10кп, $\Delta=8$	0,027	$V_{on} = -0.003 \cdot \ln(n) + 0.0443$
10кп, $\Delta=10$	0,023	$V_{on} = -0.002 \cdot \ln(n) + 0.0359$
АМГЗМ, $\Delta=1$	0,1	$V_{on} = -0.014 \cdot \ln(n) + 0.1589$
АМГЗМ, $\Delta=2$	0,048	$V_{on} = -0.004 \cdot \ln(n) + 0.0641$
АМГЗМ, $\Delta=3$	0,025	$V_{on} = -0,001 \cdot \ln(n) + 0,0315$
АМГЗМ, $\Delta=5$	0,015	$V_{on} = -7 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(n) + 0,0182$

Полученные формулы используются в САПР «СИРИУС» для оптимизации маршрута инструмента по времени резки T_{cut} в автоматическом режиме с использованием точного и эвристического алгоритмов⁶. Приведен пример (рисунок 3) оптимизации времени резки (3) (с применением алгоритма динамического программирования) при резке 15 фигурных заготовок для одной и той же раскройной карты. На рисунке 3а показан оптимальный маршрут резки, для которого значение целевой функции (3) при $V_{on} = const = 0.1\text{ м/с}$ составляет $T_{cut} = 126.27\text{ с}$. Однако фактическое время резки по УП, составленной для этого маршрута, оказалось значительно больше. В свою очередь для оптимального маршрута резки (рисунок 3б) значение времени резки составило $T_{cut} = 141.38\text{ с}$ при $V_{on}(n) = -0.014 \cdot \ln(n) + 0.1589$. Следует отметить, что каждый контур вырезается «по замкнутому контуру», рассматривается задача GTSP.

⁶ Chentsov, A.G. Model of megalopolises in the tool path optimization for CNC plate cutting machines /A.G. Chentsov, P.A. Chentsov, A.A. Petunin, A.N. Seseikin // International Journal of Production Research. – 2018. – 56(1). p.4819-4830.

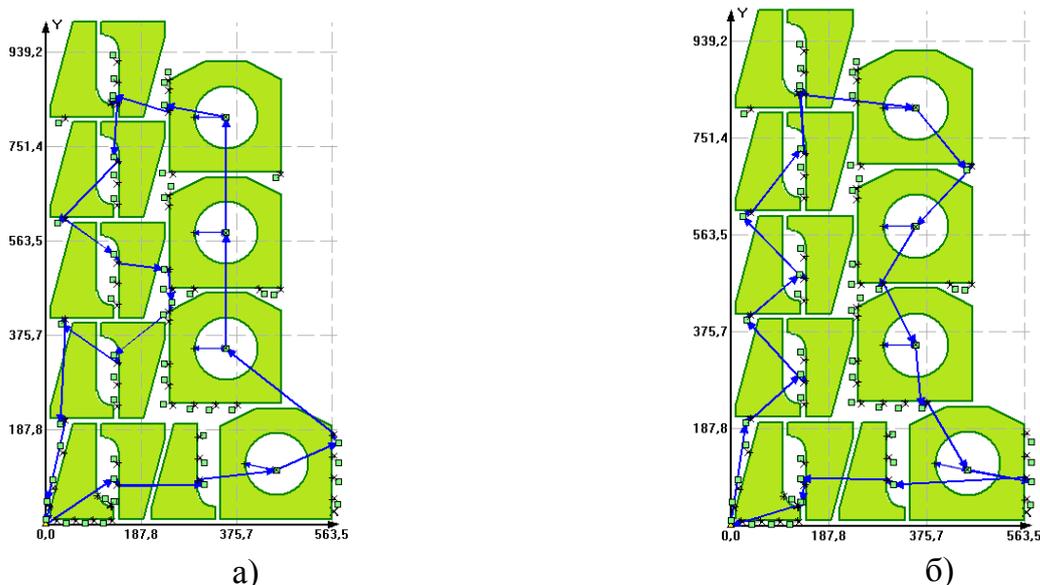


Рисунок 3 – Раскройная карта и оптимальный по времени маршрут перемещения режущего инструмента для 15 заготовок (материал АМг3М $\Delta=1$ мм) при условии, что $V_{on} = const = 0.1 м / с$ (а) и $V_{on}(n) = -0.014 \cdot \ln(n) + 0.1589$ (б)

Результаты показали, что точное вычисление целевой функции (3) для данного примера обеспечило точное вычисление значения экстремума целевой функции и правильный результат поиска оптимального маршрута резки, полученного с учетом числа кадров УП. Этот пример иллюстрирует необходимость получения таблиц типа таблица 1 при решении конкретных оптимизационных задач построения маршрута резки в САПР УП для машин листовой термической резки с ЧПУ.

В Главе 2 разработана методика вычисления стоимостных параметров целевой функции F_{cost} для лазерного оборудования с ЧПУ. Стоимость резки - это сложный интегрированный показатель, который включает в себя произведенные во время резки затраты на электроэнергию и расходные материалы, на обслуживание машины с ЧПУ, а также другие эксплуатационные затраты. С учетом разработанной методики формула (2) запишется в следующем виде:

$$F_{cost} = L_{on} \cdot t_{on} \cdot C_{on}^{лаз} + L_{off} \cdot t_{off} \cdot C_{off}^{лаз} + C_{pt}^{лаз} \cdot t_{pt} \cdot N_{pt}. \quad (4)$$

$$\text{При этом } C_{on} = C_{on}^{лаз} \cdot t_{on}, \quad (5)$$

$$C_{off} = t_{off} \cdot C_{off}^{лаз}, \quad (6)$$

$$C_{pt} = t_{pt} \cdot C_{pt}^{лаз}. \quad (7)$$

В свою очередь параметры $C_{on}^{лаз}$, $C_{off}^{лаз}$ и $C_{pt}^{лаз}$ можно определить по следующим формулам:

$$C_{on}^{лаз} = P_{on} \cdot C_{э/э} + V_{тех}^{on} \cdot C_{техМ^3} + V_{лаз}^{on} \cdot C_{лазМ^3} + \sum_{i=1}^I \frac{C_{расхЕд}^i}{t_{расхСрок}^i} + \sum_{x=1}^X C_{3п}^x + \frac{(\frac{1}{N}) \cdot C_{оборуд}}{n \cdot t_{смены}}, \quad (8)$$

$$C_{off}^{лаз} = P_{off} \cdot C_{э/э} + \sum_{x=1}^X C_{3п}^x + \frac{\left(\frac{1}{N}\right) \cdot C_{оборуд}}{n \cdot t_{смены}}, \quad (9)$$

$$C_{pt}^{лаз} = P_{pt} \cdot C_{э/э} + V_{mex}^{pt} \cdot C_{mexM^3} + V_{лаз}^{pt} \cdot C_{лазM^3} + \sum_{i=1}^I \frac{C_{расхЕд}^i}{t_{расхСрок}^i} + \sum_{x=1}^X C_{3п}^x + \frac{\left(\frac{1}{N}\right) \cdot C_{оборуд}}{n \cdot t_{смены}}, \quad (10)$$

где t_{on} , t_{off} – время, затрачиваемое на 1 метр рабочего и на 1 метр холостого хода инструмента соответственно, час; P_{on} , P_{off} и P_{pt} – затраты электроэнергии за 1 час работы лазерного комплекса на рабочем, за 1 час работы на холостом ходе и на 1 точку врезки соответственно, кВт/ч; V_{mex}^{on} и V_{mex}^{pt} – расход технологического газа на 1 метр рабочего хода и на 1 точку врезки соответственно, м³/ч; $V_{лаз}^{on}$ и $V_{лаз}^{pt}$ – расход лазерного газа на 1 метр рабочего хода и на 1 точку врезки соответственно, м³/ч; $C_{э/э}$ – стоимость электроэнергии за 1 кВт; $C_{лазM^3}$ – стоимость 1м³ лазерного газа; C_{mexM^3} – стоимость 1м³ технологического газа; $C_{расхЕд}^i$ – стоимость i -го расходного материала; $t_{расхСрок}^i$ – срок службы i -го расходного материала, час; $C_{3п}^x$ – стоимость 1ч работы x -го обслуживающего персонала; N – срок полезного использования оборудования; n – количество рабочих смен в году; $t_{смены}$ – длительность рабочей смены, ч; $C_{оборуд}$ – первоначальная стоимость лазерного комплекса, остальные обозначения аналогичны обозначениям, принятым в (2), (3).

Параметры V_{mex}^{on} и V_{mex}^{pt} необходимо учитывать при расчете стоимости резки только в тех случаях, когда применяется вспомогательный рабочий газ (например, кислород или азот в зависимости от типа обрабатываемого материала), параметры $V_{лаз}^{on}$ и $V_{лаз}^{pt}$ – при обработке материала на проточном газовом лазере.

Изложенная методика является универсальной для машин лазерной резки с ЧПУ, которая может применяться для вычисления значений целевой функции стоимости процесса резки, а также для создания таблиц стоимостных параметров для разного лазерного оборудования с ЧПУ, для разных марок обрабатываемых материалов и толщин. Аналогичный подход следует использовать и при расчете стоимостных параметров целевой функции F_{cost} для другого технологического оборудования листовой резки с ЧПУ, учитывая конструктивные и технологические особенности конкретного оборудования.

Во второй части Главы 2 разработаны методики, основанные на применении специальных техник резки, для проектирования траектории перемещения режущего инструмента с целью уменьшения значений основных параметров резки. Предлагаемые методики применимы для некоторых номенклатур типовых деталей, изготавливаемых из листового материала на оборудовании с ЧПУ. Выделены два типа заготовок с наружным контуром типа круг и многоугольник. При этом допускается наличие пазов/вырезов по контуру заготовки и наличие отверстий/окон внутри заготовки. Однотипные заготовки объединяются в группу или «блок». На

рисунках 4,5 приведены схемы резки для круглых заготовок без дополнительных резов и с дополнительными резами соответственно, на рисунках 6,7 – для многоугольных заготовок без дополнительных резов и с дополнительными резами соответственно.

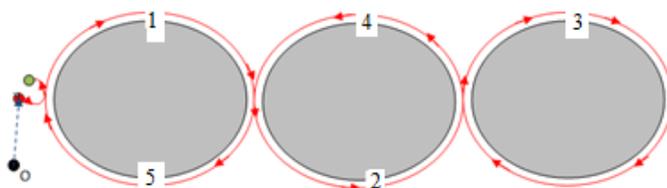


Рисунок 4 – Пример схемы резки трех круглых заготовок с применением специальной техники резки без дополнительных резов

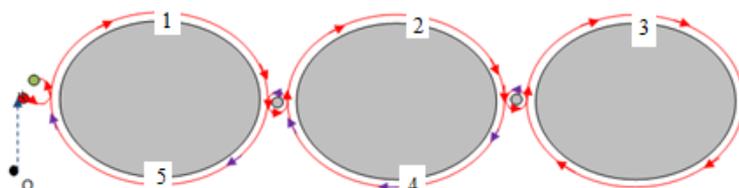


Рисунок 5 – Пример схемы резки трех круглых заготовок с применением специальной техники резки с дополнительными резами

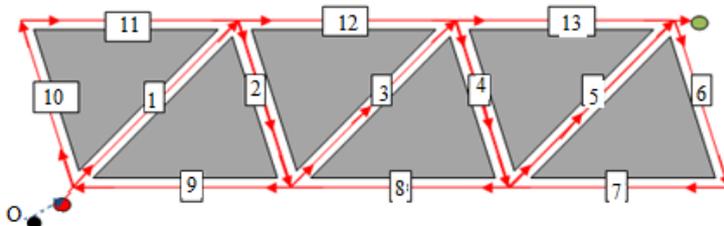


Рисунок 6 – Схема резки шести треугольных заготовок с помощью специального способа резки без дополнительных резов

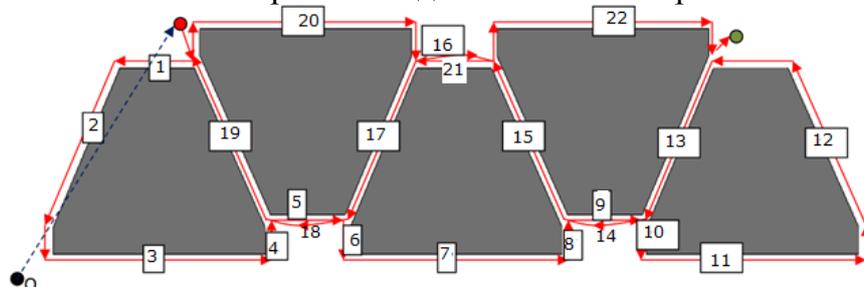


Рисунок 7 – Схема резки пяти заготовок с помощью специального способа резки с дополнительными резами

Цифрами обозначены последовательность резки частей контуров за один сегмент. Остальные обозначения на рисунках 4-7 аналогичны рисунку 1. В отличие от резки «по замкнутому контуру» в предлагаемых способах вырезка контуров происходит по частям, за счет этого уменьшаются значения основных параметров резки, что подтверждается расчетами, приведенными в Главе 4. Предложенные способы резки относятся к мультиконтурной резке и являются модификациями существующих специальных способов резки и в случае способа для многоугольных заготовок в какой-то степени объединяют их («цепная» резка, совмещенный рез). Применение предложенных способов резки при проектировании маршрута инструмента позволяет значительно улучшить стоимостные и временные характеристики резки.

В случае резки круглых заготовок с дополнительными резами (для вырезки заготовок разного размера или для вырезки заготовок без изменения обхода контуров)

параметр L_{on} может увеличиться на величину фактической длины дополнительных резов $L_{дон}^{\Sigma факт}$. При этом $L_{дон}^{\Sigma факт} < L_{дон}^{\Sigma}$. Поэтому в данном способе необходимо вычислять максимально допустимую длину дополнительных резов $L_{дон}^{\Sigma}$ при переходе от одного контура к другому без выключения режущего инструмента, при которой выгодно осуществлять переход между контурами на рабочем ходе по сравнению с резкой «по замкнутому контуру». При этом $L_{дон}^{\Sigma}$ вычисляется по формуле:

$$L_{дон}^{\Sigma} = \frac{C_{pt} \cdot N_{pt}^{L_{дон}} + C_{off} \cdot L_{off}^{L_{дон}}}{C_{on}}, \quad (11)$$

где $N_{pt}^{L_{дон}}$ – количество точек врезки, на которое уменьшается общее количество точек врезки N_{pt} за счет применения специальной техники резки; $L_{off}^{L_{дон}}$ – длина холостых перемещений режущего инструмента, на которое уменьшается значение параметра L_{off} за счет применения специальной техники резки, остальные обозначения аналогичны обозначениям, принятым в (2).

Следует отметить, что для реализации резки многоугольных заготовок за один сегмент их необходимо располагать так, чтобы у любой вершины количество ребер было четным (за исключением случая 2х вершин с нечетным количеством ребер, в этом случае эти вершины будут являться точками входа и выхода режущего инструмента, см. рисунок 6). Или с точки зрения теории графов у каждой вершины должно быть четное количество ребер (т.н. эйлеров граф). В противном случае необходимо строить дополнительные непересекающиеся с контурами заготовок резы без выключения режущего инструмента (на рисунке 7 показаны дополнительные резы на участках 14,16 и 18). В данном случае $L_{дон}^{\Sigma}$ необходимо вычислять по формуле:

$$L_{дон}^{\Sigma} = \frac{C_{pt} \cdot N_{pt}^{L_{дон}} + C_{off} \cdot L_{off}^{L_{дон}} + C_{on} \cdot L_{он}^{совмещ}}{C_{on}}, \quad (12)$$

где $L_{он}^{совмещ}$ – общая длина совмещенных резов, остальные обозначения аналогичны обозначениям, принятым в (2), и (11).

При этом $L_{дон}^{\Sigma факт} < L_{дон}^{\Sigma}$. В противном случае придется вводить дополнительные точки врезки.

Предложенные способы применения специальных техник резки и формирование групп однотипных заготовок на этапе проектирования раскроя листовых материалов на фигурные заготовки, среди которых присутствуют круглые и многоугольные, можно интерпретировать как методы формирования наборов базовых сегментов для последующего решения задач оптимизации маршрута резки средней и большой размерности.

В третьей главе приведена программная реализация разработанных в Главе 2 методик в подсистеме проектирования маршрута резки для универсальной САПР УП для оборудования листовой резки с ЧПУ. При построении маршрута резки предлагается объединять однотипные детали в «блоки» и реализацию специальных

техник резки, предложенных в Главе 2, осуществлять для каждого «блока» с учетом технологических ограничений процесса термической резки, после чего можно осуществлять оптимизацию холостых перемещений режущего инструмента известными алгоритмами, описанными в Главе 1. На рисунке 8 приведен разработанный алгоритм для построения маршрута резки с применением специальных техник резки.

Отметим, что на 5 шаге алгоритма происходит проверка на расположение «блока» заготовок относительно листа. Для снижения температуры в процессе резки листового материала на машине термической резки с ЧПУ необходимо выполнить следующее. В случае если «блок» заготовок граничит с краем листа или вырезанной частью листа, то точки врезки автоматически выбираются таким образом, чтобы после врезки сначала вырезалась часть контура, которая граничит с вырезанной частью или с краем листа, а заканчивалась резка по участку контура, который граничит с не вырезанной частью листа⁷ (точки врезки и выбор направления резки контуров выбираются согласно правилу «жесткости заготовки»). В конечном итоге строится маршрут перемещения режущего инструмента для всех контуров в «блоке», при этом соблюдаются технологические ограничения процесса термической резки с использованием специальной техники.

Алгоритм, приведенный на рисунке 8, реализован в виде специальных функций (макропрограмм) «АвтоКруг» и «МногоугР» в САПР «СИРИУС» для проектирования маршрута резки при подготовке УП. В основу разработанных макропрограмм легли предложенные специальные техники резки для круглых и многоугольных заготовок, приведенные в Главе 2. При формировании маршрута резки соблюдаются технологические ограничения процесса термической резки и уменьшаются значения основных параметров резки на машине с ЧПУ, как показывают результаты, приведенные в Главе 4. Для оценки адекватности реализованных в САПР «СИРИУС» способов построения маршрута резки с точки зрения сокращения термических деформаций был произведен расчет температурных полей в процессе лазерной резки заготовок в САЕ «RAPID»⁸. Анализ температурных полей подтверждает целесообразность применения вышеописанного правила для выбора точек врезки и направления обхода контуров при построении маршрута резки. В результате снижается неравномерность температурных полей в материале, что позволяет уменьшить искажения геометрических форм и размеров вырезаемых деталей.

Во второй части Главы 3 обоснована необходимость разработки модуля для расчета стоимости процесса резки и сформулированы основные требования, предъявляемые к нему. Выполнена программная реализация модуля «Расчет стоимости резки» с использованием платформы .NET Framework. В основу модуля для расчета стоимости процесса резки легла методика, предложенная в Главе 2. Алгоритм для расчета стоимости резки приведен на рисунке 9. Разработанный модуль интегрирован в САПР «СИРИУС». Модуль может быть расширен и для других технологий листовых резок при условии корректировки методики расчета стоимостных параметров, учитывая особенности конкретной технологии резки и используемого технологического оборудования с ЧПУ.

⁷ Петунин, А.А. О некоторых стратегиях формирования маршрута инструмента при разработке управляющих программ для машин термической резки материала /А.А. Петунин// Вестник УГАТУ. Управление, ВТиИ. – 2009. – Т.13, №2 (35). – с. 280-286.

⁸ Петунин, А.А. Расчет тепловых полей при термической резке заготовок из листовых материалов /А.А. Петунин, Е.Г. Полищук// Информационные технологии и системы: сборник трудов 5^{ой} междунар. конференции. – 2016. – с. 142-144.

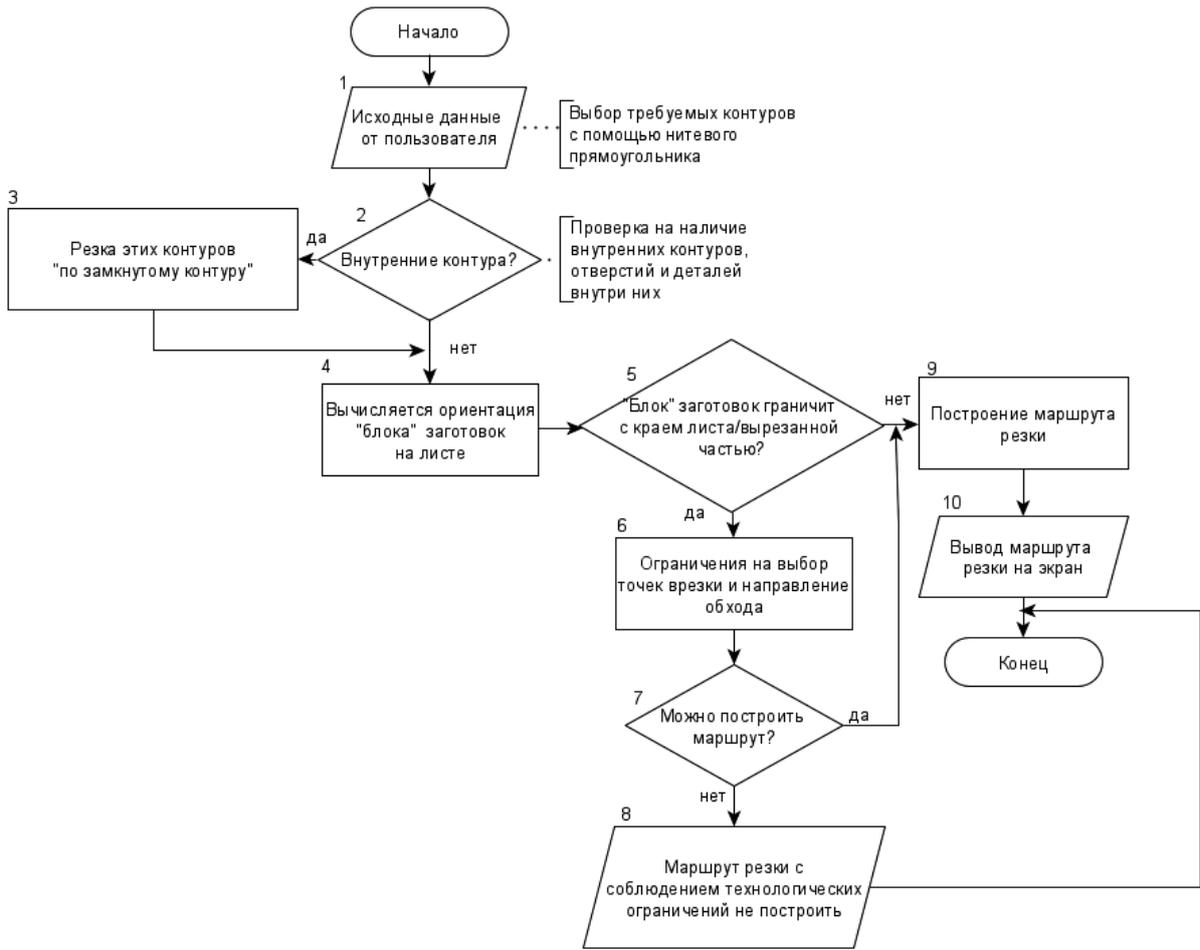


Рисунок 8 – Алгоритм построения маршрута резки с применением специальных техник резки при соблюдении технологических ограничений термической резки

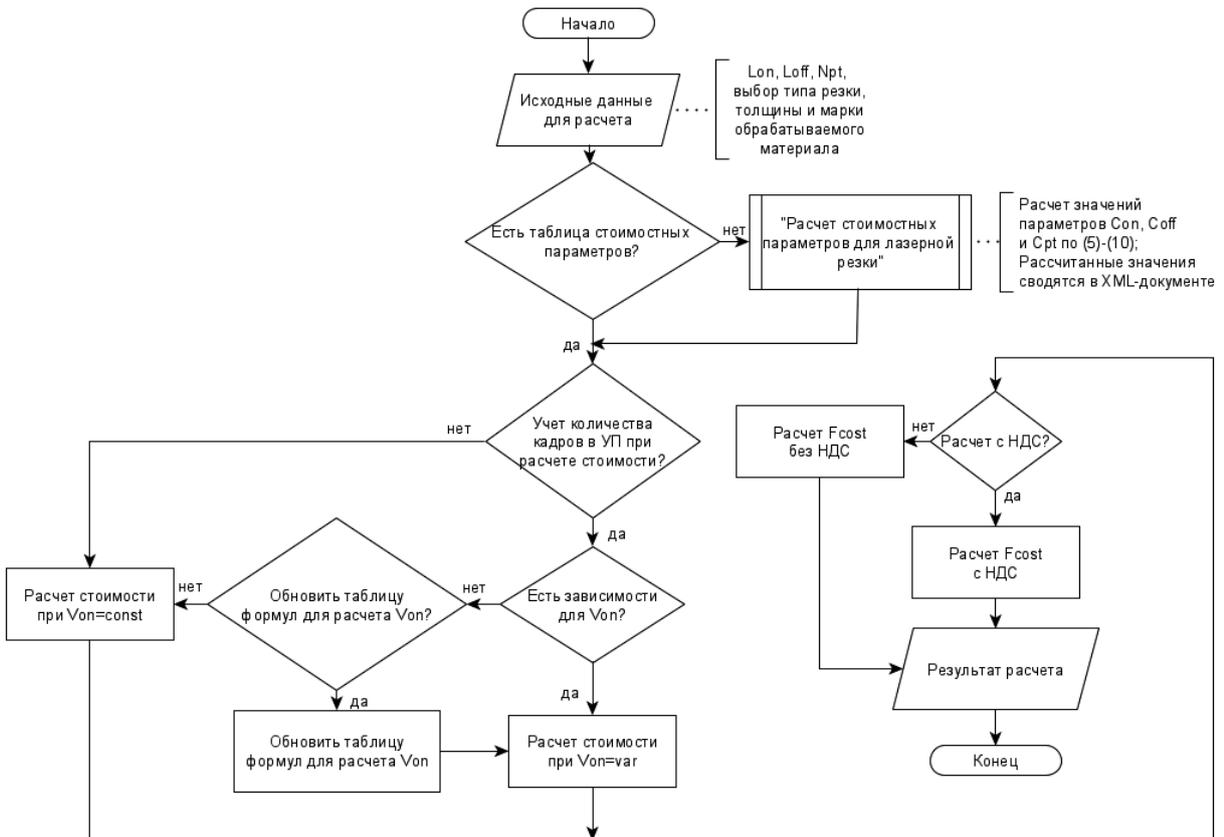


Рисунок 9 – Алгоритм для расчета стоимости резки

Четвертая глава посвящена применению разработанных методик и алгоритмов на практике. Рассмотрен пример проектирования УП в САПР «СИРИУС» при выполнении условий технологичности и одновременном снижении стоимости процесса резки, расхода газа, электроэнергии, расходных материалов и увеличении срока службы технологического оборудования за счет применения разработанных в Главе 2 и реализованных в САПР «СИРИУС» методик построения маршрута резки для некоторых типовых деталей.

Во второй части Главы 4 произведен расчет экономической эффективности от внедрения результатов, полученных в работе. Для оценки эффективности разработанных методик, применяемых при проектировании маршрута резки при подготовке УП, по сравнению с резкой «по замкнутому контуру» был произведен анализ и расчет основных показателей процесса резки на лазерном CO₂ комплексе с ЧПУ для раскройных карт на примере резки листовых материалов АМгЗМ, 10кп и 12Х18Н10Т различной толщины.

Построение маршрута резки для многоугольных и круглых заготовок осуществлялось с помощью макропрограмм «АвтоКруг» и «МногоугР» в САПР «СИРИУС», расчет стоимости – в модуле «Расчет стоимости резки». На рисунке 10 приведены две раскройные карты и спроектированные для них маршруты резки с применением специальных техник резки. В таблице 2 приведены значения параметров N_{pt} , L_{on} , L_{off} для этих раскройных карт, в таблице 3 приведены значения F_{cost} на примере резки листового материала сплава АМгЗМ ($\Delta=1-5$ мм). При этом в таблицах 2 и 3 тип резки «по замкнутому контуру» обозначается, как «станд.», для случая использования специальных техник резки для круглых и многоугольных заготовок – «спец.».

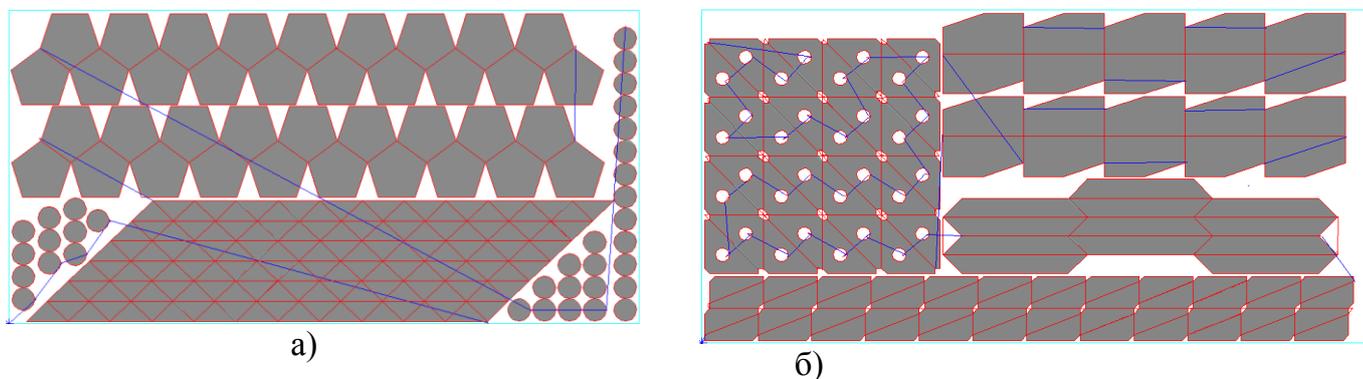


Рисунок 10 – Спроектированный маршрут резки для раскройной карты №1 (а) и для раскройной карты №2 (б) с использованием макропрограмм «АвтоКруг» и «МногоугР»

С целью получения усредненных значений эффективности разработанных методик для построения маршрута резки по сравнению с резкой «по замкнутому контуру» произведен расчет стоимости резки 100 раскройных карт. Проведенные исследования и расчеты показывают, что в результате применения специального способа резки для круглых заготовок значения N_{pt} и L_{off} в среднем сокращаются на 60% и 65% соответственно, в свою очередь значения F_{cost} сокращаются в среднем на 15%. Для случая применения специального способа резки для многоугольных заготовок в среднем значение N_{pt} сокращается на 57%, значение L_{off} на 56%, значение L_{on} на 20%, при одновременном снижении значения F_{cost} в среднем на 35%.

Таблица 2 – Значения основных параметров резки N_{pt} , L_{on} и L_{off} для раскройных карт №1 и №2

Раскройная карта	Тип резки	N_{pt} , шт	%	L_{off} , м	%	L_{on} , м	%
Раскройная карта №1	спец.	12	94	2,3	92	65,32	34
	станд.	204		29,7		98,5	
Раскройная карта №2	спец.	45	69	6,5	71	59,46	25
	станд.	144		22,4		79,23	

Таблица 3 – Значения F_{cost} для раскройных карт №1 и №2 для сплава АМг3М

Марка материала и толщина	Тип резки	F_{cost} , руб	%	F_{cost} , руб	%
		Раскройная карта №1		Раскройная карта №2	
АМг3М, $\Delta=1$ мм	спец.	1258,97	52	1274,18	37
	станд.	2598,56		2015,09	
АМг3М, $\Delta=2$ мм	спец.	2028,00	51	2037,381	36
	станд.	4102,79		3187,81	
АМг3М, $\Delta=3$ мм	спец.	6229,82	48	6156,63	35
	станд.	12044,99		9402,67	
АМг3М, $\Delta=5$ мм	спец.	21823,12	44	20965,53	32
	станд.	38911,53		30650,90	

Таким образом, предложенные методики проектирования маршрута резки позволяют уменьшать значения N_{pt} , L_{on} и L_{off} с одновременным снижением стоимости резки. Реализация этих методик в САПР УП для оборудования термической резки с ЧПУ позволяет получать рациональные варианты маршрута резки при одновременном уменьшении искажений по форме и размерам вырезаемых деталей.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

В **приложениях** приведены акты внедрения, графики зависимости рабочей скорости режущего инструмента от количества кадров в УП для лазерного CO₂ комплекса с ЧПУ, результаты расчета стоимости резки и раскройные карты, для которых был произведен расчет.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В соответствии с целью и задачами исследования получены следующие научные и практические результаты:

1. Впервые разработана методика расчета стоимостных параметров целевой функции F_{cost} в задаче оптимизации траектории перемещения инструмента для оборудования лазерной резки с ЧПУ. Разработанная методика используется на ряде предприятий Свердловской области для расчета табличных значений стоимостных параметров и себестоимости деталей, изготавливаемых из листового материала на оборудовании лазерной резки с ЧПУ. Применение разработанной методики в САПР УП обеспечивает построение корректной оптимальной траектории инструмента при автоматизированном проектировании маршрута минимальной стоимости;

2. Впервые разработана методика и получены формулы для вычисления фактических значений параметра V_{on} в целевой функции времени резки в задаче оптимизации траектории перемещения режущего инструмента для оборудования лазерной резки с ЧПУ. Полученные формулы используются в САПР «СИРИУС» для оптимизации маршрута инструмента по времени резки T_{cut} в автоматическом режиме с использованием точного и эвристического алгоритмов, что обеспечивает построение корректной оптимальной траектории инструмента при автоматизированном проектировании минимального по времени маршрута резки;

3. Для некоторых номенклатур типовых деталей разработаны методики и алгоритмы проектирования траектории перемещения режущего инструмента с применением специальных способов резки, ориентированные на минимизацию F_{cost} и T_{cut} ;

4. Осуществлена программная реализация предложенных методик и алгоритмов резки в виде макропрограмм для построения траектории перемещения режущего инструмента в САПР «СИРИУС». Кроме того, разработанные методики используются в интерактивном режиме в производственном процессе при проектировании УП в САПР «BySoft» и САПР «Tru Tops»;

5. Предложен алгоритм и разработан модуль с использованием платформы .NET Framework для расчета стоимости процесса резки деталей из листового материала. Модуль интегрирован в САПР «СИРИУС». Расчет стоимостных параметров проводится в соответствии с авторской методикой, учитывающей эксплуатационные затраты, возникающие в процессе лазерной резки на оборудовании с ЧПУ;

6. Описанные методики при соблюдении технологических ограничений процесса термической резки и при одновременном уменьшении значений времени и стоимости резки позволяют имплементировать их в существующие САПР УП и получать рациональные варианты маршрута резки;

7. Результаты диссертационной работы внедрены и используются на промышленных предприятиях Свердловской области. В результате внедрения предложенных методик и программных средств снижается до 45% стоимость изготовления типовых деталей из листового материала на оборудовании лазерной резки с ЧПУ при одновременном выполнении условий технологичности. В целом, как показывает опыт, внедрение автоматизированного проектирования УП с реализованными методиками и алгоритмами, разработанными в настоящей работе, позволяет сокращать сроки подготовки УП и получать УП, которые обеспечивают сокращение суммарной стоимости раскроя (стоимость использованного материала плюс стоимость процесса резки);

8. В учебном процессе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» результаты работы используются при выполнении практических работ по дисциплинам «Автоматизация конструкторского и технологического проектирования», «Автоматизация проектирования раскройно-заготовительного производства» при подготовке бакалавров. Выпущено учебное электронное пособие «Автоматизация проектирования раскроя листового материала и подготовка управляющих программ для машин с ЧПУ в САПР «СИРИУС»».

Перспективы дальнейшей разработки темы. Можно выделить следующие направления дальнейшего развития и совершенствования алгоритмического и

программного обеспечения САПР УП для оборудования листовой фигурной резки с ЧПУ:

1. Разработка новых алгоритмов проектирования УП в автоматическом режиме на базе применения различных специальных техник резки для широкой номенклатуры деталей, учитывающих ограничения процесса резки и оптимизирующих временные и стоимостные характеристики резки;
2. Реализация разработанных методик, алгоритмического и программного обеспечения в рамках универсальных САПР УП для всех типов оборудования листовой резки с ЧПУ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

1. Петунин, А.А. Об оптимизации маршрута инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ при условии непостоянства скорости рабочего хода /А.А. Петунин, **А.Ф. Таваева**// Фундаментальные исследования. – 2015. – №6-1. – С.56-62 (0.42 п.л./0.3 п.л.).
2. **Tavaeva, A.F.** Cost minimizing of cutting process for CNC thermal and water-jet machines /**A.F. Tavaeva, D.V. Kurenov**// AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1690. – 020003 (0.42 п.л./0.35 п.л.) (Scopus, WoS).
3. **Tavaeva, A.F.** The cutter speed determination of CNC laser cutting machines for precise calculation of objective function of tool path problem /**A.F. Tavaeva, A.A. Petunin** // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing: proceedings of 2nd International Conference. – 2016. – 7911618 (0.24 п.л./0.19 п.л.) (Scopus, WoS).
4. **Таваева, А.Ф.** Некоторые вопросы оптимизации маршрута инструмента для машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением /**А.Ф. Таваева, А.А. Петунин**// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – №9. – С. 147-153 (0.42 п.л./0.35 п.л.).
5. **Таваева, А.Ф.** Вычисление стоимости лазерной резки в задаче оптимизации маршрута режущего инструмента на машинах с ЧПУ/**А.Ф. Таваева, А.А. Петунин**// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – №12. – С. 194-202 (0.54 п.л. / 0.5 п.л.).
6. **Tavaeva, A.F.** Investigation of cutting speed influence on optimality of the tool path route for CNC laser cutting machines /**A.F. Tavaeva, A.A. Petunin**// Industrial Engineering, Applications and Manufacturing: proceedings of 3rd International Conference. – 2017 – 8076452 (0.3 п.л./0.25 п.л.) (Scopus, WoS).
7. **Таваева, А.Ф.** Точное вычисление стоимости резки заготовок из листового материала на машине лазерной резки с числовым программным управлением в задаче оптимизации маршрута перемещения режущего инструмента /**А.Ф. Таваева, А.А. Петунин**// Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Т.6. – №4 (23). – С.298-312 (0.9 п.л./0.85 п.л.).
8. **Tavaeva, A.** A cost minimizing at laser cutting of sheets parts on CNC machines /**A. Tavaeva, A. Petunin, S. Ukolov, V. Krotov**// Communications in Computer and Informational Science. – 2019. – P.422-437 (1 п.л./0.8 п.л.) (Scopus).
9. **Tavaeva, A.F.** Methods of Cutting Cost Minimizing in Problem of Tool Route Optimization for CNC Laser Machines /**A.F. Tavaeva, A.A. Petunin, E.G. Polishchuk**// Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – P.447-455 (0.54 п.л./0.47 п.л.) (Scopus).

10. Petunin A. The dependence of actual laser cutting speed on CNC sheet equipment on number of NC program commands for metal grades 1.0114 and AWAIMG / A. Petunin, **A. Tavaeva**// Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol.1527. – Issue 1. – 012013 (0.42 п.л./0.2 п.л.) (Scopus).

Публикации в других изданиях:

11. **Таваева, А.Ф.** Об одном способе минимизации пути режущего инструмента для машин термической резки /**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// Инженерная мысль машиностроения будущего: труды 2^{ой} всероссийской молодежной научно-практической конференции. – 2013. – С. 365-373 (0.54 п.л./0.45 п.л.).

12. **Таваева, А.Ф.** К вопросу о разработке алгоритмов маршрутизации инструмента лазерных машин листовой резки с ЧПУ при использовании «цепной» техники резки /**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// Информационные технологии и системы: труды 3^й междунар. научной конференции. – 2014. – С.48-51 (0.24 п.л./0.2 п.л.).

13. **Таваева, А.Ф.** Определение условий эффективного применения специальных методов резки при разработке автоматических методов оптимизации маршрута инструмента /**А.Ф. Таваева**// Интеллектуальные технологии обработки информации и управления: труды 2^{ой} международной конференции. – 2014. – С. 225-231 (0.42 п.л.).

14. **Таваева, А.Ф.** К вопросу оптимизации стоимостных параметров лазерной резки на машинах с ЧПУ /**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений: сборник трудов 2^{ой} международной конференции. – 2014. – С. 74-78 (0.3 п.л./0.2 п.л.).

15. **Таваева, А.Ф.** Определение поправочных коэффициентов для скорости рабочих переходов инструмента в целевой функции для задач оптимизации маршрута инструмента /**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// Информационные технологии и системы: труды 4^{ой} международной научной конференции. – 2015. – С.48-50 (0.2 п.л./0.15 п.л.).

16. **Tavaeva, A.F.** Standard and special cutting techniques and their effective combination at solving of problem of tool path optimization for CNC thermal cutting machines /**A.F. Tavaeva**, А.А. Petunin// Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы 11^{ой} международной конференции. – 2016. – С.22-23 (0.12 п.л./0.09 п.л.).

17. **Таваева, А.Ф.** Определение зависимости изменения рабочей скорости инструмента от числа кадров управляющей программы для машины лазерной резки с ЧПУ /**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// Информационные технологии и системы: труды 6^й международной научной конференции. – 2017. – С.303-309 (0.42 п.л./0.3 п.л.).

18. **Tavaeva, A.F.** About effectiveness of special cutting techniques application during development of automatic methods of tool path optimization applied to CNC thermal cutting machines /**A.F. Tavaeva**, А.А. Petunin, V.I. Krotov// Computer science and information technologies: proceedings of 19th intern. workshop. – 2017. – P. 221-226 (0.36 п.л./0.3 п.л.).

Подписано в печать __. __. 2020. Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,39.
Тираж 100 экз. Заказ № _____.