

Форма «Т». Титульный лист заявки в Российский научный фонд
Конкурс 2020 года «Проведение фундаментальных научных исследований и
поисковых научных исследований отдельными научными группами»

Название проекта Теоретические основы маршрутной оптимизации в задачах разработки управляющих программ для вырезки заготовок на машинах листовой резки с числовым программным управлением		Номер проекта <div style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">20-19-00508</div> <div style="text-align: center;">  </div>	
		Код типа проекта: ОНК(2020)	
		Отрасль знания: 09	
		Основной код классификатора: 09-601 Дополнительные коды классификатора: 09-604 01-203	
		Код ГРНТИ 50.03.03	
Фамилия, имя, отчество (при наличии) руководителя проекта: Петунин Александр Александрович		Контактные телефон и e-mail руководителя проекта: +79126158982, a.a.petunin@urfu.ru	
Полное и сокращенное наименование организации, через которую должно осуществляться финансирование проекта: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина" ФГАОУ ВО "УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина", Уральский федеральный университет, УрФУ			
Объем финансирования проекта в 2020 г. 6000 тыс. руб.		Год начала проекта: 2020	Год окончания проекта: 2022
Фамилии, имена, отчества (при наличии) основных исполнителей (полностью)	Хачай Михаил Юрьевич Ченцов Павел Александрович <i>(руководитель проекта в данной графе не указывается)</i>		
Гарантирую, что при подготовке заявки не были нарушены авторские и иные права третьих лиц и/или имеется согласие правообладателей на представление в Фонд материалов и их использование Фондом для проведения экспертизы и для обнародования (в виде аннотаций заявок).			
Подпись руководителя проекта _____/А.А. Петунин/		Дата регистрации заявки 13.11.2019 г.	
Подпись руководителя организации* <small>* Либо уполномоченного представителя, действующего на основании доверенности или распорядительного документа. В случае подписания формы уполномоченным представителем организации (в т.ч. - руководителем филиала) к печатному экземпляру заявки прилагается копия распорядительного документа или доверенности, заверенная печатью организации. Непредставление копии распорядительного документа или доверенности в случае подписания формы уполномоченным представителем организации, а также отсутствие расшивки подписи, является основанием недопуска заявки к конкурсу.</small>			
_____/_____/			
Печать (при наличии) организации			

Форма 1. Сведения о проекте

1.1. Название проекта

на русском языке

Теоретические основы маршрутной оптимизации в задачах разработки управляющих программ для вырезки заготовок на машинах листовой резки с числовым программным управлением

на английском языке

Theoretical foundations of tool path optimization in the development of NC programs for part producing by the CNC sheet cutting machines

1.2. Приоритетное направление развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, критическая технология

Указывается согласно перечню (Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года №899) в случае, если тематика проекта может быть отнесена к одному из приоритетных направлений, а также может внести вклад в развитие критических технологий Российской Федерации.

3. Информационно-телекоммуникационные системы.

13. Технологии информационных, управляющих, навигационных систем.

Направление из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации») (при наличии)

H1 Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта

1.3. Ключевые слова (приводится не более 15 терминов)

на русском языке

машины листовой резки с ЧПУ, управляющая программа, оптимизация маршрута инструмента, сегмент резки, задача CCP, SCCP, условия предшествования, динамические ограничения, стоимость резки, динамическое программирование, эвристические алгоритмы, сложность алгоритма, полиномиальная аппроксимация, САПР

на английском языке

CNC sheet cutting machines, NC program, tool path optimization, cutting segment, CCP task, SCCP, precedence conditions, dynamic constraints, cutting cost, dynamic programming, heuristic algorithms, algorithm complexity, polynomial approximation, CAD

1.4. Аннотация проекта (объемом не более 2 стр.; в том числе кратко – актуальность решения указанной выше научной проблемы и научная новизна)

Данная информация может быть опубликована на сайте Фонда в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет».

на русском языке

В проекте рассматривается проблема оптимальной маршрутизации инструмента машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением (ЧПУ), возникающая при проектировании управляющих программ (УП) для данного класса технологического оборудования. Участники проекта планируют исследовать вопросы разработки единой теоретической и методологической концепции для решения маршрутных задач такого рода, включая разработку математических моделей и оптимизационных алгоритмов, а также методов соблюдения необходимых технологических требований резки при моделировании маршрута инструмента. Проект впервые позволит решать некоторые классы задач непрерывно-дискретной оптимизации с изменяющимися (динамическими) ограничениями, порождаемыми особенностями термической резки листовых материалов. В качестве основного математического аппарата для решения задач маршрутизации, описываемых дискретными моделями (Generalized Travel Salesmen Problem (GTSP), Endpoint Cutting Problem (ECP)), применяется специальная схема динамического программирования, разработанная проф. А.Г. Ченцовым для решения проблемы о последовательном обходе мегаполисов. Отдельным разделом проекта является разработка алгоритмов для решения задач с континуальным множеством допустимых решений (Continues Cutting Problem (CCP), Segment CCP(SCCP)). Эти задачи также не рассматривались ранее отечественными и зарубежными исследователями из-за их сложности. Для их решения в рамках проекта предусмотрена разработка нового математического аппарата.

Проект в целом ориентирован на разработку теоретических и методологических основ оптимизации перемещения (траектории) инструмента машин с числовым программным управлением (ЧПУ) для резки фигурных заготовок из

листовых материалов, а также на создание соответствующего программного обеспечения. К технологическому оборудованию листовой резки с ЧПУ относятся, в частности, машины для лазерной, плазменной, газовой, гидроабразивной и электроэрозионной резки материала.

Теоретические аспекты проекта касаются прежде всего формализации задач оптимизации траектории инструмента (маршрута резки) машин листовой резки с ЧПУ на единой концептуальной основе «сегментной резки», предложенной участниками проекта. В рамках этой концепции будут исследованы известные дискретные оптимизационные модели (GTSP, ECP) с дополнительными специфическими ограничениями, что порождает необходимость разработки новых эффективных алгоритмов их решения. При этом некоторые виды ограничений приводят к принципиально новым математическим постановкам и моделям, не исследованным ранее. Речь идёт о так называемых "динамических ограничениях". Ряд таких постановок был сформулирован авторами впервые. Кроме того, на основе введенных авторами проекта понятий "сегмента резки" и "базового сегмента резки" возникает возможность расширить существующие классы и определить новые классы оптимизационных задач формирования траектории инструмента, для которых возможно разработка эффективных алгоритмов оптимизации и соответствующего программного обеспечения. Для решения задач классов CCP и SCCP с непрерывными моделями будут использованы геометрические и комбинаторные алгоритмы. Будет также разработано специальное программное обеспечение для моделирования температурных полей в материале при термической резке, которое позволит уменьшить тепловые деформации материала за счет выбора технологически допустимого маршрута резки.

Главной теоретической и методологической задачей проекта в области разработки алгоритмического обеспечения является разработка комплекса вычислительных алгоритмов, позволяющих получать точные и приближенные решения оптимизационных задач в реальном диапазоне размерностей (30-200 заготовок). (Многие из исследуемых задач, которые описываются дискретными моделями, являются NP-полными). Авторы проекта ставят перед собой задачу разработать адекватный математический аппарат для решения широкого класса задач оптимизации траектории инструмента машин листовой резки с ЧПУ, в том числе, как отмечалось выше, и не исследуемых в настоящее время зарубежными учеными из-за сложностей математической формализации и математических постановок.

Следует отметить, что используемые на российских предприятиях отечественные и зарубежные системы автоматизированного проектирования (САПР) для проектирования раскроя и разработки УП для машин листовой резки с ЧПУ (CAD/CAM системы) обеспечивают автоматизацию процесса разработки УП, однако не позволяют решить многие оптимизационные задачи. При этом пользователям САПР часто приходится применять интерактивные методы проектирования УП. Проблема разработки методов, алгоритмов и соответствующего программного обеспечения, позволяющих в автоматическом режиме минимизировать временные и стоимостные параметры процесса резки заготовок из листовых материалов остаётся актуальнейшей задачей раскройно-заготовительного производства. В качестве основных в проекте рассматриваются задачи минимизации времени листовой резки на машинах с ЧПУ и стоимости резки для полученной на этапе проектирования раскроя материала раскройной карты. Для решения основных задач будут построены оригинальные математические методы, алгоритмы и комплексы программ, включающие оптимальные процедуры на основе нестандартных вариантов динамического программирования и непрерывной оптимизации, итерационные методы, специальные преобразования системы ограничений.

Предполагается детально исследовать вопросы согласования решений, доставляемых точными и эвристическими алгоритмами в реальном диапазоне размерностей, построение методов и алгоритмов с элементами параллельной структуры. Ещё одна сложная проблема связана с эффективной аппроксимируемостью экстремальных маршрутных задач. На настоящий момент участниками проекта получены обнадеживающие результаты в этой области для случая геометрических постановок. Тем не менее, постановки, реально возникающие в прикладных задачах, могут быть далеки от евклидовых. В данном проекте будет исследован вопрос аппроксимируемости обобщенной задачи коммивояжера (GTSP) и задачи об оптимальной маршрутизации транспортных средств (VRP) в специальных классах ненормируемых метрических пространств, напр. В пространствах фиксированной размерности удвоения. Новые результаты планируется получить путем комбинации новых подходов к иерархической декомпозиции метрических постановок задач в применении к построению аппроксимационных схем, современных результатов в области билипшицевого вложения метрических пространств в числовые пространства и авторских результатов в области построения эффективных алгоритмов с оценками для геометрических постановок исследуемых маршрутных задач. Практическая цель проекта заключается в разработке соответствующего программного обеспечения для формирования маршрута резки, удовлетворяющего как технологическим требованиям листовой резки, так и выбранным оптимизационным критериям. Следует отметить, что авторы проекта имеют приоритеты в исследованиях проблемы формирования траектории инструмента с учетом минимума термических деформаций листового материала, а также в разработке точных алгоритмов решения некоторых классов рассматриваемых в проекте задач. Важной особенностью разрабатываемого программного обеспечения является его возможность интеграции с любыми отечественными и зарубежными CAD/CAM системами, предназначенными для проектирования раскроя листовых материалов и

подготовки управляющих программ для машин листовой резки с ЧПУ, что в перспективе позволит решить задачу реального импортозамещения САМ систем, используемых на российском рынке. В целом, можно отметить, что реализация проекта позволит добиться реальной оптимизации временных и стоимостных параметров процесса листовой резки заготовок на машинах с ЧПУ.

на английском языке

The project considers the problem of optimal tool path routing for then CNC sheet cutting machines that arises in the design of control programs (NC program) for this class of technological equipment. The project participants plan to investigate the development of a unified theoretical and methodological concept for solving those routing problems, including the development of mathematical models and optimization algorithms, as well as methods for observing the necessary technological requirements for cutting when modeling a tool path route. The project will be first to allow to solve some classes of continuous-discrete optimization problems with dynamic constraints generated by the features of thermal cutting of sheet materials. As a basic mathematical apparatus for solving routing problems described by discrete models (Generalized Travel Salesmen Problem (GTSP), Endpoint Cutting Problem (ECP)), a special dynamic programming scheme developed by prof. A.G. Chentsov to solve the problem of a sequential bypass of megalopolises is applied. A separate section of the project is the development of algorithms for solving problems with a continuous set of feasible solutions (Continues Cutting Problem (CCP), Segment CCP (SCCP)). These tasks were also not considered previously by domestic and foreign researchers because of their complexity. To solve them, the project provides for the development of a new mathematical apparatus.

The project is focused in general on the development of theoretical and methodological foundations for optimizing the movement (trajectory) of the tool of CNC machines for cutting figure parts from sheet materials, as well as the development of appropriate software. The technological CNC equipment for sheet cutting includes machines for laser, plasma, gas, waterjet and EDM cutting.

The theoretical aspects of the project relate primarily to the formalization of the tasks of optimizing the tool path (cutting route) of CNC sheet cutting machines on a single conceptual basis of "segment cutting" proposed by the project participants. Within the framework of this concept, well-known discrete optimization models (GTSP, ECP) with additional specific constraints will be investigated, which allows the development of new effective algorithms for their solution. At the same time, some types of constraints lead to fundamentally new mathematical formulations and models that have not been studied previously. We are talking about the so-called "dynamic constraints". Several such statements were formulated by the authors for the first time. In addition, on the basis of the concepts introduced by the authors of the project, (i.e. "cutting segment" and "base cutting segment"), it becomes possible to expand the existing classes and define new classes of optimization problems of toolpath routing, for which it is possible to develop effective optimization algorithms and related software. To solve problems of CCP and SCCP classes with continuous models, geometric and combinatorial algorithms will be used. Special software will also be developed to simulate the temperature distribution in the material during thermal cutting, which will reduce the thermal deformation of the material by choosing a technologically acceptable cutting route. The main theoretical and methodological task of the project in the field of development of algorithmic support is the development of a series of computational algorithms that allow obtaining accurate and approximate solutions to optimization problems in a real range of dimensions (30-200 parts). (Most problems under study described by discrete models are NP-hard). The authors of the project set themselves the task of developing an adequate mathematical apparatus for solving a wide class of problems of optimizing the tool path of CNC sheet cutting machines, including, as noted above, not currently studied by foreign scientists due to the difficulties of mathematical formalization and mathematical formulations. It should be noted that domestic and foreign computer-aided design systems (CAD) used at Russian enterprises for the design of cutting and development of control programs for CNC sheet cutting machines (CAD / CAM systems) provide automation of the CP development process, however, they do not allow solving many optimization problems. At the same time, CAD users often have to use interactive design methods for NC program. The problem of developing methods, algorithms, and related software that automatically minimize the time and cost parameters of the process of cutting parts from sheet materials remains an urgent task.

The main tasks in the project are to minimize both sheet cutting time on CNC machines and cutting costs. To solve the main problems, original mathematical methods, algorithms and program complexes will be built, including optimal procedures based on non-standard options for dynamic programming and continuous optimization, iterative methods, special transformations of the constraint system. It is supposed to study in detail the issues of matching decisions delivered by exact and heuristic algorithms in a real range of dimensions, building methods and algorithms with elements of a parallel structure. Another complex problem is related to the effective approximability of extreme route problems. At present, the project participants obtained encouraging results in this area for the case of geometric settings. Nevertheless, the statements that arise in applied problems can be far from Euclidean. In this project, we will study the approximability of the generalized traveling salesman problem (GTSP) and the optimal routing of vehicles (VRP) in special classes of non-normative metric

spaces, e.g. in spaces of fixed dimension doubling. It is planned to obtain new results by combining new approaches to the hierarchical decomposition of metric problem statements as applied to the construction of approximation schemes, modern results in the field of bi-Lipschitz embedding of metric spaces into numerical spaces, and original results in the field of constructing effective algorithms with estimates for geometric statements of the studied route problems. The practical goal of the project is to develop appropriate software for developing a cutting route that satisfies both the technological requirements of sheet cutting and the selected optimization criteria. It should be noted that the authors of the project have priorities in researching the problem of developing the tool path considering the minimum thermal deformations of the sheet material, as well as in developing accurate algorithms for solving some classes of problems considered in the project. An important feature of the software being developed is its ability to integrate with any domestic and foreign CAD / CAM systems designed for designing cutting of sheet materials and preparing control programs for CNC sheet cutting machines, which in the future will solve the problem of real import substitution of CAM systems used in Russian the market. In general, it can be noted that the implementation of the project will also allow real optimization of the time and cost parameters of the process of sheet cutting on CNC machines.

1.5. Ожидаемые результаты и их значимость (указываются результаты, их научная и общественная значимость (соответствие предполагаемых результатов мировому уровню исследований, возможность практического использования ожидаемых результатов проекта в экономике и социальной сфере))

Данная информация может быть опубликована на сайте Фонда в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет».
на русском языке

В области математической формализации задач оптимизации траектории инструмента машин листовой резки с ЧПУ предполагается:

- на основе введенного авторами проекта понятия "сегмент резки" обобщить существующие математические постановки задач оптимизации и расширить их классификацию;
- формализовать "динамические ограничения" в используемых математических оптимизационных моделях в случае необходимости соблюдения правила "жёсткости листа";
- определить математические формулы для целевых функций оптимизационных задач в зависимости от исходных данных задачи (геометрические характеристики раскройных карт, число сегментов резки, технология резки, особенности технологического оборудования, свойства материала и др.);
- разработать методы формирования "базовых сегментов резки" в зависимости от исходных данных задачи и с учетом соблюдения правил "жесткости" листа;
- разработать методики сведения задачи оптимизации траектории с фиксированным числом сегментов резки (SCCP) к известным оптимизационным моделям непрерывной и дискретной оптимизации с дополнительными ограничениями (TSP, задача о последовательном обходе мегаполисов (спец. тип GTSP), CCP (непрерывно-дискретная модель задачи оптимизации траектории инструмента), ECP и др.

В области разработки оптимизационных алгоритмов для исследуемых моделей предполагается:

- разработать точные алгоритмы решения задачи GTSP с учетом "условий предшествования" и "динамических ограничений", обеспечивающие получения глобального оптимума за приемлемое время для размерностей, соответствующим диапазону 30-35 фигурных заготовок;
- разработать приближенные алгоритмы решения задачи оптимизации траектории инструмента для расширенного класса CCP (SCCP) с использованием непрерывно-дискретной модели и базовых сегментов резки, содержащих несколько контуров вырезаемых деталей и с учетом "динамических ограничений";
- разработать алгоритмы решения задач CCP и SCCP для непрерывных моделей с возможностью выбора точек врезки из континуальных множеств;
- разработать приближенные алгоритмы решения задачи оптимизации траектории инструмента для всех используемых дискретных моделей (TSP, GTSP, ECP) и базовых сегментов резки, содержащих несколько контуров вырезаемых деталей, а также с учетом "динамических ограничений";
- разработать алгоритмы моделирования тепловых полей при термической резке листовых материалов на машинах с ЧПУ;
- оценить вычислительную сложность разработанных алгоритмов и разработать способы ее сокращения, в том числе, для постановок изучаемых маршрутных задач (GTSP и VRP) в метрических (ненормируемых) пространствах фиксированной размерности.

В области разработки программного обеспечения для решения задач оптимизации траектории инструмента предполагается:

- разработать комплекс программ, обеспечивающий формирования маршрута резки, удовлетворяющего как технологическим требованиям листовой резки, так и критериям времени резки и стоимости резки для всех типов технологического оборудования с ЧПУ, используемого для вырезки фигурных заготовок из листового материала;
- разработать программное обеспечение для вычисления температурных полей при резке заготовок на машинах термической резки;
- исследовать зависимость соблюдения правил "жёсткости листа" от температуры материала в зоне завершения резки "сегмента резки";
- провести интеграцию разработанного программного обеспечения с отечественными CAD/CAM системами (T-Flex CAD, T-Flex ЧПУ, САПР "СИРИУС" (CAD/CAM система для проектирования фигурного раскроя листового материала и подготовки управляющих программ для машин термической резки материала с ЧПУ, разработанная с участием авторов проекта));
- разработать библиотеку тестовых примеров и провести тестирование разработанного комплекса программ.

Запланированные результаты соответствуют уровню результатов ведущих мировых исследователей, значительная часть запланированных результатов превосходит мировой уровень. Практическая значимость проекта очевидна. Разработанный комплекс программ будет обеспечивать гарантированное сокращение затрат при производстве заготовок из листовых материалов на машинах с ЧПУ и может быть интегрирован с любым программным обеспечением для проектирования фигурного раскроя и генерации управляющих программ для машин с ЧПУ

на английском языке

In the field of mathematical formalization of the tool path problem for the CNC sheet cutting machines it is assumed:

- on the basis of the concept of cutting segment introduced by the authors of the project, to summarize the existing mathematical formulations of optimization problems and expand their classification.
- to formalize the "dynamic constraints" (the sheet hardness rule) in the used mathematical optimization models.
- to determine the mathematical formulas for the objective functions of optimization problems depending on the initial data of the problem (geometric characteristics of nesting result, the number of cutting segments, cutting technology, features of process equipment, material properties, etc.)
- to develop methods for the formation of "basic cutting segments" depending on the initial data of the problem and taking into account compliance with the rules of "stiffness" of the sheet.
- to develop techniques for reducing the trajectory optimization problem with a fixed number of cutting segments (SCCP) to known optimization models of continuous and discrete optimization with additional constraints (TSP, the task of sequential bypass of megacities (special type GTSP), CCP (continuous discrete model of the optimization problem tool paths), ECP, etc.

In the field of development of optimization algorithms for the studied models it is supposed:

- to develop precise algorithms for solving the GTSP problem taking into account the "precedence constraints" and "dynamic constraints", which provide for obtaining a global optimum in an acceptable time for the dimensions corresponding to a range of 30-35 figured parts;
- to develop approximate algorithms for solving the problem of tool trajectory optimization for the extended class of CCP (SCCP) using a continuous-discrete model and basic cutting segments containing several contours of the cut out parts and taking into account the "dynamic constraints";
- to develop algorithms for solving CCP and SCCP problems for continuous models with the ability to select pierce points from continual sets;
- to develop approximate algorithms for solving the problem of tool path optimization for all used discrete models (TSP, GTSP, ECP) and basic cutting segments containing several contours of the cut out parts, as well as taking into account "dynamic constraints";
- to develop algorithms for modeling thermal fields during thermal cutting of sheet materials on CNC machines;
- to obtain theoretical performance bounds of the developed algorithms for the studied routing problems (GTSP and VRP) formulated in metric (non-normalizable) spaces of fixed dimension .

In the field of software development for solving problems of toolpath optimization, it is assumed:

- develop a set of programs that provide the formation of a cutting route that meets both the technological requirements of sheet cutting and the criteria for cutting time and cutting cost for all types of CNC process equipment used for cutting of figured parts from sheet material;

- develop software for calculating temperature fields when cut parts on thermal cutting machines;
- to investigate the dependence of compliance with the "sheet hardness rule" on the material temperature in the zone of completion of the cutting of the "cutting segment"
- to realize the integration of the developed software with domestic CAD/CAM systems (T-Flex CAD, T-Flex CNC, CAD SIRIUS "(CAD / CAM system for designing of nesting and preparing NC programs for the CNC thermal cutting machines, developed with the participation of the project authors));
- develop a library of test examples and test the developed set of programs.

The planned results correspond to the level of the results of the leading world researchers, a significant part of the planned results exceeds the world level. The practical significance of the project is obvious. The developed software package will ensure guaranteed cost reduction in the production of parts from sheet materials on CNC machines and can be integrated with any software for designing of the nesting and generating of NC programs for CNC sheet cutting machines

1.6. В состав научного коллектива будут входить:

Несоответствие состава научного коллектива (в том числе отсутствие информации в соответствующих полях формы) требованиям пункта 12 конкурсной документации является основанием недопуска заявки к конкурсу.

10 исполнителей проекта (включая руководителя),

В соответствии с требованиями пункта 12 конкурсной документации от 4 до 10 человек. Вне зависимости от того, в трудовых или гражданско-правовых отношениях исполнители состоят с организацией.

в том числе

5 исполнителей в возрасте до 39 лет включительно,

из них:

1 очных аспирантов, адъюнктов, интернов, ординаторов, студентов.

1.7. Планируемый состав научного коллектива с указанием фамилий, имен, отчеств (при наличии) членов коллектива, их возраста на момент подачи заявки, ученых степеней, должностей и основных мест работы, формы отношений с организацией (трудовой договор, гражданско-правовой договор) в период реализации проекта.

Петунин Александр Александрович, 64 года, доктор технических наук, профессор УрФУ, трудовой договор

Хачай Михаил Юрьевич, 48 лет, доктор физико-математических наук, проф. РАН, зав. отделом. ИММ УрО РАН, профессор УрФУ, трудовой договор

Ченцов Павел Александрович, 41 год, кандидат физико-математических наук, н.с. ИММ УрО РАН, с.н.с. УрФУ, трудовой договор

Березин Иван Михайлович, 33 года, кандидат технических наук, н.с. Института Машиноведения УрО РАН, с.н.с. УрФУ, трудовой договор

Емельянова Анастасия Алексеевна, 21 год, студент УрФУ, трудовой договор

Полищук Ефим Григорьевич, 71 год, кандидат физико-математических наук, доцент, с.н.с. УрФУ, трудовой договор

Таваева Анастасия Фидагилевна, 29 лет, главный специалист АО "ПО" "УОМЗ", м.н.с. УрФУ, трудовой договор

Удинцева Екатерина Владимировна, 33 года, м.н.с. УрФУ, трудовой договор

Уколов Станислав Сергеевич, 48 лет, ведущий программист УрФУ, трудовой договор

Шипачева Екатерина Николаевна, 27 лет, программист, м.н.с. УрФУ, трудовой договор

Соответствие профессионального уровня членов научного коллектива задачам проекта

на русском языке

Петунин А. А. - д.т.н., лауреат премии Губернатора Свердловской области в сфере информационных технологий за 2016 г. в номинации "За выдающийся вклад в развитие научных исследований в сфере информационных технологий", известный ученый в области оптимизации технологических процессов раскроя промышленных материалов и подготовки управляющих программ для машин листовой резки с ЧПУ, разработки моделей и алгоритмов оптимизации траектории инструмента с учетом сложных технологических ограничений, имеет опыт руководства научными и образовательными проектами, в том числе крупными научно-исследовательскими проектами, успешно выполненными для предприятий реального сектора экономики. Руководитель и участник грантов РФФИ, руководитель научной лаборатории оптимального раскроя промышленных материалов и оптимальных маршрутных технологий УрФУ, финансируемой в рамках федерального Проекта 5-100, член международных программных комитетов нескольких крупных постоянно действующих международных научных конференций. За последние 5 лет опубликовал 27 работ, индексируемых в базах данных Scopus и WoS.

Хачай М. Ю. - д.ф.-м.н, проф. РАН, один из ведущих специалистов в стране в области алгоритмического анализа

труднорешаемых задач комбинаторной оптимизации и анализа данных. Автор серии недавних работ, в которых получены рекордные результаты в области эффективной аппроксимируемости комбинаторных задач маршрутизации, которые могут быть использованы для маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ. Член AMS, EurOpt, IAPR, RuORS. Член редколлегии журналов PRIA, "Труды института математики и механики", "Дискретный анализ и исследование операций", "Вестник Южно-Уральского государственного университета", Ural mathematical Journal. Премия УрО РАН им. акад. А.И.Субботина; Грант Президента РФ для молодых докторов, 2006-07 и 2008-09 гг. Лучший результат по РАН 2015, 2017 и УрО РАН 2016, 2018 и 2019 гг. Имеет опыт успешного руководства грантами РНФ и РФФИ.

Ченцов П. А. - Лауреат премии Губернатора Свердловской области в сфере информационных технологий за 2016 г. в номинации "За выдающийся вклад в развитие научных исследований в сфере информационных технологий. Автор ряда методов и алгоритмов решения маршрутных задач и задач распределения заданий между исполнителями. Автор нескольких программных решений в области разработки программного обеспечения, специалист по применению параллельных вычислений и метода динамического программирования для решения маршрутных задач.

Березин И. М. - к.т.н., высококвалифицированный специалист в области инженерных расчетов, автоматизации конструкторского и технологического проектирования, В область его научных интересов входят, в частности, задачи расчета температурных полей при термической резке листового материала, имеет опыт руководства грантом РФФИ.

Емельянова А.А. - студент 4 курса УрФУ, владеет несколькими языками программирования. ВКР Емельяновой соответствует теме проекта. Научный руководитель - Е.Г.Полищук.

Полищук Е.Г. - высококвалифицированный математик, один из ведущих специалистов УрФУ по применению метода конечных элементов для теплофизических инженерных расчетов. Автор САПР "РАПИД", предназначенной для моделирования, анализа и оптимизации технологических процессов горячей объемной штамповки. Автор ряда работ по вычислительной геометрии.

Таваева А. Ф. - ведущий специалист АО "ПО" "УОМЗ" по разработке управляющих программ для машин лазерной резки листового металла. В последние 3 года провела ряд уникальных исследований по определению зависимости скорости лазерной резки от исходных параметров задачи оптимизации траектории инструмента с целью точного вычисления целевых функций. Разработала методику определения стоимости лазерной резки для машин с ЧПУ. Подготовила кандидатскую диссертацию по теме проекта. Научный руководитель - А.А.Петунин.

Удинцева Е.В. - квалифицированный программист, специалист по разработке интерактивного 2D раскроя. Один из авторов модуля интерактивного раскроя для CAD/CAM системы "Сириус", предназначенной для проектирования плоского фигурного раскроя и генерации управляющих программ для машин термической резки металла.

Уколов С.С.- высококлассный программист, специалист в области сетевых технологий и разработки приложений для решения задач вычислительной геометрии и комбинаторной оптимизации. Аспирант УрФУ. Научный руководитель - Петунин А.А. Один из авторов CAD/CAM системы "Сириус".

Шипачева Е. Н.- квалифицированный программист, специалист по разработке эволюционных алгоритмов комбинаторной оптимизации и разработке приложений для известной отечественной САПР T-Flex CAD. Автор работы по интеграции системы T-Flex CAD с программным обеспечением для моделирования маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ. Имеет публикации, индексируемые в базах данных Scopus и WoS.

на английском языке

A. Petunin - Doctor of Technical Sciences, laureate of the Sverdlovsk Region Governor Prize in the field of information technology for 2016 in the nomination "For outstanding contribution to the development of scientific research in the field of information technology", a famous scientist in the field of optimization of technological processes of industrial materials cutting and the control programs preparation for CNC sheet cutting machines, the development of models and algorithms for optimizing the tool path considering complex technological constraints, has the experience of scientific and educational projects leadership, including large research projects successfully executed for the enterprises of the real sector of the economy. Head and participant of grants from the Russian Federal Property Fund, head of the research laboratory of the optimal cutting of industrial materials and optimal route technologies of the Ural Federal University, funded by the federal Project 5-100, member of the international program committees of several large permanent international scientific conferences. Over the past 5 years, he has published 27 works indexed in Scopus and WoS databases.

M. Khachay - Doctor of Physics and Mathematics, prof. of Russian Academy of Science, one of the leading experts in the country in the field of algorithmic analysis of hard-to-solve problems of combinatorial optimization and data analysis. The author of a series of recent works in which record results were obtained in the field of effective approximability of combinatorial routing problems that can be used for routing the tool of CNC sheet cutting machines. Member of AMS, EurOpt, IAPR, RuORS. Member of the editorial boards of PRIA journals, Proceedings of the Institute of Mathematics and

Mechanics, Discrete Analysis and Operational Research, Bulletin of the South Ural State University, Ural mathematical Journal. Prize of the Ural Branch of RAS Acad. A.I. Subbotina; Grant of the President of the Russian Federation for young doctors, 2006-07 and 2008-09. The best result for the RAS 2015, 2017 and the Ural Branch of the RAS 2016, 2018 and 2019. He also has experience in successfully managing grants from the Russian Science Foundation and the Russian Federal Property Fund. P. Chentsov - Laureate of the Sverdlovsk Region Governor Prize in the field of information technologies for 2016 in the nomination "For outstanding contribution to the development of scientific research in the field of information technologies, author of a number of methods and algorithms for solving routing problems and tasks of task distribution between performers. Author of several software solutions in the field of software development, a specialist in the use of parallel computing and a dynamic programming method for solving route problems.

I. Berezin - Ph.D., a highly qualified specialist in the field of engineering calculations, automation of design and technological design, His research interests include, in particular, the tasks of calculating temperature fields during thermal cutting of sheet material, has experience in managing a RFBR grant.

A. Emelyanova A. - 4th year student of Ural Federal University, develops software using several programming languages. Her graduation qualification work corresponds to the project theme. Scientific supervisor is E. Polishchuk.

E. Polishchuk - a highly qualified mathematician, one of the leading specialists of the Ural Federal University on the application of the finite element method for thermophysical engineering calculations. The author of CAD "RAPID", intended for modeling, analysis and optimization of technological processes of hot forging. The author of several works on computational geometry.

A. Tavaeva - leading specialist of JSC "Ural Optical and Mechanical Plant" for the development of control programs for laser cutting machines for sheet metal. In the last 3 years, she conducted a number of unique studies to determine the dependence of laser cutting speed on the initial parameters of the task of optimizing the tool path in order to accurately calculate the objective functions. Developed a methodology for determining the cost of laser cutting for CNC machines. She prepared a Ph.D. thesis on the topic of the project. Scientific supervisor is A. Petunin.

E. Udintseva - A qualified programmer, a specialist in the development of interactive 2D cutting. One of the authors of the interactive cutting module for CAD / CAM system "Sirius", designed for the development of 2D figure cutting and generation of control programs for thermal metal cutting machines.

S. Ukolov - a highly skilled programmer, specialist in the field of network technologies and application development for solving problems of computational geometry and combinatorial optimization. Graduate student of Ural Federal University. Scientific supervisor is A. Petunin. One of the authors of the CAD / CAM system "Sirius".

E. Shipacheva - qualified programmer, specialist in the development of evolutionary algorithms for combinatorial optimization and application development for the famous Russian CAD system T-Flex CAD. He is the author of the integration of the T-Flex CAD system with software for modeling the routing of tools for CNC sheet cutting machines. Author of publications indexed in Scopus and WoS databases.

1.8. Планируемый объем финансирования проекта Фондом по годам (указывается в тыс. рублей):

Несоответствие планируемого объема финансирования проекта (в том числе отсутствие информации в соответствующих полях формы) требованиям пункта 10 конкурсной документации является основанием недопуска заявки к конкурсу.

2020 г. - 6000 тыс. рублей,

2021 г. - 6000 тыс. рублей,

2022 г. - 6000 тыс. рублей.

1.9. Научный коллектив по результатам проекта в ходе его реализации предполагает опубликовать в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях не менее

Приводятся данные за весь период выполнения проекта. Уменьшение количества публикаций (в том числе отсутствие информации в соответствующих полях формы) по сравнению с порогом, установленным в пункте 16.2 конкурсной документации является основанием недопуска заявки к конкурсу.

29 публикаций,

из них

21 в изданиях, индексируемых в базах данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus).

Информация о научных изданиях, в которых планируется опубликовать результаты проекта, в том числе следует указать в каких базах индексируются данные издания - «Сеть науки» (Web of Science Core Collection), «Скопус» (Scopus), РИНЦ, иные базы, а также указать тип публикации - статья, обзор, тезисы, монография, иной тип
International Journal of Production Research (IF=2.623, Q1 SJR)

Optimization Methods and Software, ISSN: 1055-6788 (IF 1.183, Q1 SJR)
Acta Polytechnica Hungarica (IF=0.298, Q2 SJR).
Automation and Remote Control, ISSN: 0005-1179 (IF 0.562, Q2 SJR)
Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics, ISSN: 0081-5438 (IF 0.623, Q2 SJR)
Lecture Notes in Computer Science (Q2 SJR).
Communications in Computer and Information Science (Q3 SJR)
IFAC-PapersOnLine (IF=0.234, Q3 SJR)
Pollack Periodica, (IF=0.229, Q3 SJR)
Trudy Inst. Math. and Mech., ISSN: 0134-4889
Izvestiya Inst. Math. i Inform. Umutrskogo Gos. Univ. ISSN: 2226-3594 и др.

Две монографии (2020 и 2022) предполагается опубликовать в научных издательствах Уральского Федерального университета и Уральского отделения Российской Академии Наук

Иные способы обнародования результатов выполнения проекта

1.10. Число публикаций членов научного коллектива, опубликованных в период с 1 января 2015 года до даты подачи заявки,

192, из них

91 – опубликованы в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection или в Scopus.

1.11. Планируемое участие научного коллектива в международных коллаборациях (проектах) (при наличии)

Проект RSF-FWO: Объединённая задача раскрытия и маршрутизации – новые алгоритмы и методы (в случае поддержки).
Номер заявки проекта: 20-41-01001

Руководитель проекта подтверждает, что

- все члены научного коллектива (в том числе руководитель проекта) удовлетворяют пунктам 6, 7, 13 конкурсной документации;
- на весь период реализации проекта он будет состоять в трудовых отношениях с организацией;
- при обнародовании результатов любой научной работы, выполненной в рамках поддержанного Фондом проекта, он и его научный коллектив будут указывать на получение финансовой поддержки от Фонда и организацию, а также согласны с опубликованием Фондом аннотации и ожидаемых результатов поддержанного проекта, соответствующих отчетов о выполнении проекта, в том числе в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»;
- помимо гранта Фонда проект не будет иметь других источников финансирования в течение всего периода практической реализации проекта с использованием гранта Фонда;
- проект не является аналогичным по содержанию проекту, одновременно поданному на конкурсы научных фондов и иных организаций;
- проект не содержит сведений, составляющих государственную тайну или относимых к охраняемой в соответствии с законодательством Российской Федерации иной информации ограниченного доступа;
- доля членов научного коллектива в возрасте до 39 лет включительно в общей численности членов научного коллектива будет составлять не менее 50 процентов в течение всего периода практической реализации проекта;
- в установленные сроки будут представляться в Фонд ежегодные отчеты о выполнении проекта и о целевом использовании средств гранта.

Подпись руководителя проекта _____/А.А. Петунин/

Форма 2. Сведения о руководителе и основных исполнителях проекта

собираются автоматически (частично) на основе анкетных данных руководителя и исполнителей, подтвердивших свое участие. Список исполнителей формируется в "Форме Т"

Форма 2. Сведения о руководителе

2.1. Фамилия, имя, отчество (при наличии)

на русском языке

Петунин Александр Александрович

на английском языке фамилия и инициалы

Petunin A.

WoS ResearcherID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу www.ResearcherID.com.

P-2487-2016

Scopus AuthorID (при наличии)

Scopus AuthorID формируется в базе данных Scopus автоматически при появлении у автора хотя бы одной статьи в данной базе. AuthorID указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске автора в базе данных Scopus (Author Search) в результатах поиска нажать на фамилию автора.

56780066100

2.2. Дата рождения (указывается цифрами – число, месяц, год)

28.09.1955

2.3. Гражданство

РОССИЯ

2.4. Ученая степень, год присуждения

В случае наличия нескольких ученых степеней, указывается та из них, которая наиболее соответствует тематике проекта.

Доктор технических наук, 2010

2.5. Награды и премии за научную деятельность, членство в ведущих научных сообществах (при наличии), участие в редколлегиях ведущих рецензируемых научных изданий (при наличии), участие в оргкомитетах или программных комитетах известных международных конференций, иной опыт организации международных мероприятий

Лауреат премии Губернатора Свердловской области в сфере информационных технологий за 2016 г. в номинации "За выдающийся вклад в развитие научных исследований в сфере информационных технологий"

член Программных международных комитетов следующих международных научных конференций:

1. International conference "Mathematical Optimization Theory and Operations Research" (MOTOR2019), Екатеринбург, Россия, (MOTOR2020), Новосибирск, Россия
2. X International Conference Optimization and Applications (OPTIMA-2019), Петровац, Черногория
3. International conference "Optimization problems on graphs and network structures" (AIST 2019), Казань, Россия
4. International Workshop "Computer Science and Information Technologies" (CSIT) (2009-2017)
5. International Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS), Уфа, Россия (2015-2017)
6. XI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИССЛЕДОВАНИИ СЛОЖНЫХ СТРУКТУР» (ICAM'2016), Екатеринбург, Россия
7. The 2 nd International Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support and the International Workshop on Robots and Robotic Systems (ITIDS+RRS'2014), Уфа, Россия
8. The International Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support and the Intended Russian-German Workshop on Models and Algorithms of Applied Optimization" (ITIDS+MAAO '2013), Уфа, Россия
9. Международная конференция: "Информационные технологии и системы" (ITIS), Банное, Россия (2013-2016)

2.6. Основное место работы на момент подачи заявки – должность, полное наименование организации (сокращенное наименование организации)

Руководитель проекта может на момент подачи заявки не являться работником организации, но, в случае победы в конкурсе, должен заключить с ней трудовой договор. В случае, если руководитель проекта не является гражданином Российской Федерации, организацией должны быть выполнены все процедуры, предусмотренные законодательством Российской Федерации при трудоустройстве иностранных граждан.

профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина" (ФГАОУ ВО "УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина", Уральский федеральный университет, УрФУ, Свердловская обл)

2.7. Область научных интересов – ключевые слова (приводится не более 15 ключевых слов)

на русском языке

раскрой-упаковка, машины листовой резки с ЧПУ, маршрутизация инструмента, управляющая программа, дискретная оптимизация, динамические ограничения, стоимость резки, эвристические алгоритмы, САПР

на английском языке

cutting & packing, the CNC sheet metal cutting machines, cutting path problem, NC program, discrete optimization, dynamic constraints, heuristic algorithms, cost of cutting, CAD/CAM system

2.8. Область научных интересов – коды по классификатору Фонда

01-114 01-203 01-507 09-601 09-604

2.9. Перечень публикаций руководителя проекта, опубликованных в период с 1 января 2015 года до даты подачи заявки, подтверждающий выполнение условия пункта 9 конкурсной документации

Для лиц, находившихся в указанный в настоящем пункте период в отпусках по беременности и родам, отпусках по уходу за ребенком, а также отпусках работникам, усыновившим ребенка, допускается наличие соответствующих публикаций также в период, предшествующий 1 января 2015 года, и равный продолжительности таких отпусков.

Достаточно привести ссылки на публикации в количестве, равном установленному в конкурсной документации порогу. В случае представления публикации в изданиях, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus), входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR (принадлежность издания к Q1 определяется по базе данных <http://www.scimagojr.com/>), данная статья в настоящем пункте указывается как одна публикация, но учитывается как две публикации. При этом необходимо указать на принадлежность издания к Q1 и на год принадлежности издания к Q1. Несоответствие количества публикаций (в том числе отсутствие информации в соответствующих полях формы или отсутствие информации о принадлежности издания к Q1), приводимое в перечне и/или численно в строке ниже, требованиям пункта 9 конкурсной документации является основанием недопуска заявки к конкурсу в соответствии с подпунктом «е» пункта 21 конкурсной документации.

на английском языке

1. Chentsov, A.G., Chentsov, P.A., Petunin, A.A., Seseikin, A.N.: Model of megalopolises in the tool path optimisation for CNC plate cutting machines. International Journal of Production Research (IF=2.623, Q1 SJR) 2018, 56(14), pp. 4819-4830. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1421784>
2. Petunin, A.A., Chentsov, A.G., Chentsov, P.A. Optimizing Insertions in a Constraint Routing Problem with Complicated Cost Functions (2019). Journal of Computer and Systems Sciences International (IF=0.513, Q2 SJR), 58 (1), pp. 113-125. DOI: 10.1134/S106423071901012X
3. Petunin, A. A., Chentsov, A. A., Chentsov, A. G., & Chentsov, P. A. (2017). Elements of Dynamic Programming in Local Improvement Constructions for Heuristic Solutions of Routing Problems with Constraints (неперевод). Automation and Remote Control (IF=0.328, Q2 SJR) , 78(4), 666-681. <https://doi.org/10.1134/S0005117917040087>
4. Kolios, S., Stylios, C., & Petunin, A. (2015). A WebGIS platform to monitor environmental conditions in ports and their surroundings in south eastern europe. Environmental Monitoring and Assessment (IF=0.606, Q2 SJR), 187(9) doi:10.1007/s10661-015-4786-x
5. Kovacs, G., Petunin, A., Ivanko, J., & Yusupova, N. (2016). From the first chess-automaton to the mars pathfinder. Acta Polytechnica Hungarica, (IF=0.298, Q2 SJR) 13(1), 61-81. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84953395910&origin=inward&txGid=42d2db08395a684f6e801205eeb5c2f8>
6. Petunin, A. A., Chentsov, A. G., & Chentsov, P. A. (2017). About routing in the sheet cutting. Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software (IF=0.261, Q3 SJR), 10(3), 25-39. <https://doi.org/10.14529/mmp170303>
7. Tavaeva A., Petunin A., Ukolov S., Krotov V. (2019) A Cost Minimizing at Laser Cutting of Sheet Parts on CNC Machines. In: Bykadorov I., Strusevich V., Tchemisova T. (eds) Mathematical Optimization Theory and Operations Research. MOTOR 2019. Communications in Computer and Information Science (IF=0.168, Q3 SJR), vol 1090 , pp. 438-451. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33394-2_33
8. Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S., Voropayev V.V., Petunin A.A. Research into Dry Turning of Welded Surface by

- Replaceable Cutting Insert with Closed Loop Heat Removal // Journal of Physics: Conference Series.(IF=0.241, Q3 SJR) 2018. Series 1045 (2018) 012024 P. 1-5. doi :10.1088/1742-6596/1045/1/012024
9. Berezin, I. M., Petunin, A. A., Kryuchkov, D. I., & Kovács, G. L. (2017). Finite-element simulation of the cold stamping process of spherical vessels. *Pollack Periodica* (IF=0.232, Q3 SJR), 2017, 12(1), 81-92.
<https://doi.org/10.1556/606.2017.12.1.7>.
10. Petunin, A. A., & Stylios, C. (2016). Optimization models of tool path problem for CNC sheet metal cutting machines. *IFAC-PapersOnLine* (IF=0.234, Q3 SJR), 49(12), 23-28. doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.544
11. Chentsov, P. A., & Petunin, A. A. (2016). Tool routing problem for CNC plate cutting machines. *IFAC-PapersOnLine*(IF=0.234, Q3 SJR), 49(12), 645-650. doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.762
12. Chentsov, A.G., Chentsov, P.A., Petunin, A.A., Sesekin, A.N.: Routing problems: constraints and optimality. *IFAC-PapersOnLine* (IF=0.234, Q3 SJR), 2016, 49 (12), pp. 640-644. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.756>
13. Verkhoturov, M., Petunin, A., Verkhoturova, G., Danilov, K., & Kurennov, D. (2016). The 3D object packing problem into a parallelepiped container based on discrete-logical representation. *IFAC-PapersOnLine*(IF=0.234, Q3 SJR), 49(12), 1-5. doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.540
14. Kovács, G. L., & Petunin, A. (2016). An information technology view of manufacturing automation - product life-cycle management. *Pollack Periodica*, (IF=0.229, Q3 SJR) 11(2), 3-14. doi:10.1556/606.2016.11.2.1
15. Kolios, S., Loukadakis, D., Stylios, C., Kazantzidis, A., & Petunin, A. (2016). A WebGIS application for cloud storm monitoring. *B Databases and Information Systems - 12th International Baltic Conference, DB and IS 2016, Proceedings* (Vol. 615, pp. 151-163). (Communications in Computer and Information Science (IF=0.169, Q3 SJR); Vol. 615). Springer Verlag.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-40180-5_11
16. Liagkou, V., Stylios, C., & Petunin, A. (2019). Handling Privacy and Concurrency in an Online Educational Evaluation System. *Baltic Journal of Modern Computing*, 7(1), 86-98. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2019.7.1.07>
17. Martynov, V. V., Zakieva, E. S., & Petunin, A. A. (2019). Modeling the Initial Shape in the Tasks of Automating the Design of Electronic Means Placement on a Flat Material. B S. U. Uvaysov (Ed.), 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production, SED 2019 - Proceedings [8798437] (2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production, SED 2019 - Proceedings). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/SED.2019.8798437>
18. Aleksandr A. Petunin, Efim G. Polyshuk, Pavel A. Chentsov, Stanislav S. Ukolov and Vladimir I. Krotov (2019). The thermal deformation reducing in sheet metal at manufacturing parts by CNC cutting machines. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (IF=0.19, SJR) 613 (2019) 012041 IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/613/1/012041.
19. Dolgii, Y. F., Petunin, A. A., Sesekin, A. N., & Tashlykov, O. L. (2018). Optimal control of the system of coupled cylinders. B G. Venkov, N. Popivanov, & V. Pasheva (Ed.), *Proceedings of the 44th International Conference on Applications of Mathematics in Engineering and Economics, AMEE 2018* (Том 2048). [020007] American Institute of Physics Inc.
<https://doi.org/10.1063/1.5082025>
20. Katz, E., Kurennov, D., & Petunin, A. (2018). Simulation of multi-axis machining using the BSP-dexel representation. B 50th International Symposium on Robotics, ISR 2018, Munich, Germany, 2018, pp. 1-4. URL:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8470581&isnumber=8470559>
14. Petunin, A. A., Sesekin, A. N., Tashlykov, O. L., & Chentsov, A. G. (2017). Route optimization on the nuclear objects and in mechanical engineering. *CEUR Workshop Proceedings*, 1825, 69-79
21. Shipacheva, E. N., Petunin, A. A., & Berezin, I. M. (2017). A genetic algorithm used for solving one optimization problem. B Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2017: Proceedings of the 11th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (Том 1915). [040052] American Institute of Physics Inc.. <https://doi.org/10.1063/1.5017400>
22. Kartak V.M., Marchenko A.A., Petunin A.A., Sesekin A.N., Fabarisova A.I. OPTIMAL AND HEURISTIC ALGORITHMS OF PLANNING OF LOW-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS: AIP Conference Proceedings. Series 9. "Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences: 9th International Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, AMiTaNS 2017" 2017. C. 110002.DOI: 10.1063/1.5007408
23. Tavaeva, A. F., & Petunin, A. A. (2017). Investigation of Cutting Speed Influence on Optimality of the Tool Path Route for CNC Laser Cutting Machines. B 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings [8076452] Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076452>
24. Tavaeva, A. F., & Petunin, A. A. (2017). The cutter speed determination of CNC laser cutting machines for precise calculation of objective function of tool path problem. B 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 - Proceedings [7911618] Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc..
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911618>
25. Kurennov, D., Petunin, A. A., Repnitskii, V. B., & Shipacheva, E. N. (2016). About one algorithm of the broken line

- approximation and a modeling of tool path for CNC plate cutting machines. B Pasheva, N. Popivanov, & G. Venkov (Ред.), APPLICATIONS OF MATHEMATICS IN ENGINEERING AND ECONOMICS (AMEE'16) (Том 1789). [060004] (AIP Conference Proceedings; Том 1789). American Institute of Physics Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4968496>
26. Petunin, A. A., Polishuk, E. G., Chentsov, A. G., Chentsov, P. A., & Ukolov, S. S. (2016). About some types of constraints in problems of routing. B Pasheva, N. Popivanov, & G. Venkov (eds), APPLICATIONS OF MATHEMATICS IN ENGINEERING AND ECONOMICS (AMEE'16) (Том 1789). [060002] (AIP Conference Proceedings; Том 1789). American Institute of Physics Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4968494>
27. Petunin, A. A. (2015). Modeling of tool path for the CNC sheet cutting machines. B Pasheva, N. Popivanov, & G. Venkov (eds), 41st International Conference "Applications of Mathematics in Engineering and Economics", AMEE 2015 (Том 1690). [060002] (AIP Conference Proceedings; Том 1690). American Institute of Physics Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4936740>
28. Petunin, A.A.:(2019) General Model of Tool Path Problem for the CNC Sheet Cutting Machines. IFAC-PapersOnline. Proc. of MIM 2019, Berlin. (accepted)
29. Petunin, A.A., Polishuk, E.G., and Ukolov, S.S.: (2019). On the New Algorithm for Solving Continuous Cutting Problem. IFAC-PapersOnline. Proc. of MIM 2019, Berlin. (accepted)

Для русскоязычных названий сведения приводятся на русском языке и в переводе на английский язык. При этом должно быть понятно, что речь идет об одном и том же документе (например, добавляйте слово «перевод»).

Перечень содержит 28 публикаций в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection, Scopus.

Перечень содержит 1 публикаций в изданиях, входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR (принадлежность издания к Q1 определяется по базе данных <http://www.scimagojr.com/>).

2.10. Основные научные результаты руководителя проекта за период с 1 января 2015 года (результаты должны подтверждаться сведениями из заявки, например - публикациями)

на русском языке

1. На основе вновь введенного понятия "сегмента резки" формализована задача маршрутизации инструмента машины фигурной листовой резки с ЧПУ в общем случае в виде модели непрерывно-дискретной оптимизации [1,10, 27]
2. Расширена существующая классификация оптимизационных задач маршрутизации инструмента машин листовой резки (введены классы задач SCCP, GSCCP). [10, 27, 28]
3. Проведена дискретизация предложенной оптимизационной модели в виде обобщенной задачи курьера с дополнительными ограничениями нового типа ("динамическими" ограничениями, зависящими от истории построения частичного маршрута резки). [2, 3, 6, 12, 28]
4. Для известного класса задач ССР и новых классов задач маршрутизации инструмента с фиксированным числом сегментов резки в дискретном случае разработаны точный алгоритм решения, использующий специальную схему динамического программирования, а также ряд приближенных алгоритмов для задач большой размерности, учитывающих технологические требования термической резки ("жесткость листа" и "жесткость детали"). [3, 11, 21, 29]
5. Для непрерывной модели известной задачи маршрутизации инструмента ССР впервые разработан эффективный приближенный алгоритм решения, позволяющий задавать вход инструмента в контур в произвольной точке контура и учитывающий технологические требования резки [26, 29]
6. Разработано программное обеспечение для расчета температурных полей при термической резке листового материала. Показана зависимость величин температуры от выполнения эвристического геометрического правила "жесткости детали". [7, 10, 18]
7. Разработана методика вычисления целевой функции "стоимость резки" в задаче оптимизации маршрута инструмента для лазерных (CO2) машин с ЧПУ. [7, 23, 24]
8. Исследована зависимость скорости резки машины лазерной резки с ЧПУ от числа кадров управляющей программы. [23, 24]

на английском языке

1. Based on the newly introduced concept of "cutting segment", the routing task of the tool of a CNC sheet metal cutting machine is formally formulated in the general case as a continuous-discrete optimization model [1,10, 27]
2. The existing classification of optimization routing problems for the tool of sheet cutting machines has been expanded (SCCP, GSCCP task classes have been introduced). [10, 27, 28]
3. The proposed optimization model was discretized in the form of a generalized courier problem with additional constraints of a new type ("dynamic" constraints depending on the history of the construction of a partial cutting route). [2, 3, 6, 12, 28]

4. For the well-known class of CCP tasks and new classes of tool routing problems with a fixed number of cutting segments, in the discrete case, an exact solution algorithm has been developed using a special dynamic programming scheme, as well as a number of approximate algorithms for large-dimensional tasks that take into account the technological requirements of thermal cutting ("rigidity sheet" and "part rigidity"). [3, 11, 21, 29]
5. For a continuous model of the well-known CCP tool routing problem, an effective approximate solution algorithm was developed for the first time, which allows setting the tool input to the contour at an arbitrary point in the contour and taking into account the technological requirements of cutting [26, 29]
6. Software has been developed for calculating temperature fields during thermal cutting of sheet material. The dependence of temperature values on the fulfillment of the heuristic geometric rule "part rigidity" is shown..[7, 10, 18]
7. A methodology for calculating the objective function "cutting cost" in the task of tool path optimizing for the CNC laser (CO2) machines has been developed. [7, 23, 24]
8. The dependence of the cutting speed of the CNC laser cutting machine on the number of frames of the control program is investigated. [23, 24]

2.11. Общее число публикаций руководителя проекта за период с 1 января 2015 года, 60, из них:
27 - опубликовано в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection или Scopus.

2.12. Дополнительный список публикаций руководителя проекта с 1 января 2015 года *(монографии, результаты интеллектуальной деятельности, имеющие правовую охрану, публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, публикации в изданиях, индексируемых в системах цитирования Web of Science Core Collection, Scopus, приводится не более 10 публикаций, при наличии публикации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» указывается ссылка на нее (обязательно для публикаций в индексируемых изданиях), указывается, при наличии, импакт-фактор научного издания (по JCR Science Edition, JCR Social Sciences Edition или SJR))*

Пункт не является обязательным к заполнению. Могут приводиться публикации, свидетельствующие о научной квалификации и достижениях руководителя проекта, за исключением публикаций, указанных в пункте 2.9 настоящей формы.

на английском языке

1. Patent for utility model "Cutter" № RU179894. The state registration date is May 28, 2018. Authors: Kuznetsov V.P., Gorgots V.G., Skorobogatov A.S., Petunin A.A.,
2. Patent for utility model "Cutter with a combined cooling" № RU175079. The state registration date is November 27, 2017. Authors: Kuznetsov V.P., Gorgots V.G., Skorobogatov A.S., Petunin A.A.

2.13. Опыт выполнения научных проектов *(указываются наименования фондов (организаций), форма участия, номера, названия проектов и сроки выполнения за последние 5 лет)*
на русском языке

1. Руководитель гранта РФФИ № 17-08-01385 "Оптимизация маршрутов в условиях ограничений для типичных инженерных задач управления инструментом при листовой резке на машинах с ЧПУ и снижения дозовой нагрузки персонала на радиационно опасных объектах". Срок реализации проекта : 2017-2019.
2. Руководитель НИОКРТ по госконтракту № 02.G25.31.0148 от Уральского федерального университета, реализуемого в рамках Договора АО «Свердловский инструментальный завод» с Минобрнауки России, выполняемого по Постановлению Правительства РФ № 218 "О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, в рамках подпрограммы "Институциональное развитие научно-исследовательского сектора" государственной программы Российской Федерации "Развитие науки и технологий" на 2013 - 2020 годы". Срок реализации проекта : 2016-2018.
3. Руководитель госбюджетной темы №Н977.426.039/17 «Задачи оптимального раскроя и оптимальной маршрутизации» (2017-2018).
4. Участник (исполнитель) гранта РФФИ № 16-01-00649 А "Проблема соблюдения ограничений в задачах оптимизации и управления". Срок реализации проекта: 2016-2018.
5. Участник (исполнитель) гранта РФФИ № 19-01-00573 "Проблема точного и приближенного соблюдения ограничений в задачах управления". Срок реализации проекта: 2019-2021.
6. Руководитель научного проекта «Создание и развитие научной лаборатории «Лаборатория оптимального раскроя промышленных материалов и оптимальных маршрутных технологий», реализуемого в рамках Программы повышения конкурентоспособности Уральского федерального университета, финансируемой из Проекта повышения конкурентоспособности ведущих российских университетов 5-100. Проект выполняется при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.A03.21.0006 Срок выполнения проекта: 2014-2020.

1. Head of the RFBR grant No. 17-08-01385 "Optimization of routes under constraints for typical engineering tasks of tool management for sheet cutting on CNC machines and reducing the dose load of personnel at radiation-hazardous facilities." The project implementation period: 2017-2019.
2. The head of R&D project on state contract No. 02.G25.31.0148 from the Ural federal university implemented within the Agreement of OAO "Sverdlovsky instrumentalny zavod" from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation which is carried out according to the Order of the Government of the Russian Federation No. 218 "About the measures of the state support of development of cooperation of the Russian educational organizations of the higher education, the public scientific institutions and organizations implementing complex projects on creation of high technology production within the subprogramme "Institutional development of research sector" of the state program of the Russian Federation "Development of science and technologies" for 2013 - 2020". Project implementation term: 2016-2018.
3. Head of the state budget theme No. H977.426.039 / 17 "Tasks of optimal cutting and optimal routing" (2017-2018).
4. Participant (performer) of the RFBR grant No. 16-01-00649 A "The problem of compliance with constraints in optimization and control problems". The project implementation period: 2016-2018.
5. Participant (performer) of the RFBR grant No. 19-01-00573 A "The problem of exact and approximate compliance with constraints in control problems". The project implementation period: 2019-2021.
6. Head of the scientific project "Creation and Development of the Scientific Laboratory" Laboratory for the Optimal Cutting of Industrial Materials and Optimal Routing Technologies", implemented as part of the Competitiveness Improvement Program of the Ural Federal University, funded by the Competitiveness Enhancement Project of leading Russian universities 5-100. The work is supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.A03.21.0006. Duration of the project: 2014-2020.

В том числе проектов, финансируемых РНФ (при наличии):

2.14. Планируемое участие в научных проектах (в любом качестве) в 2020 году

Общее количество – 3, из них:

руководство – 2, участие в качестве исполнителя – 1,

а именно:

1. Участник (исполнитель) гранта РФФИ № 19-01-00573 "Проблема точного и приближенного соблюдения ограничений в задачах управления". Срок реализации проекта: 2019-2021.
2. Данный проект (в случае поддержки)
3. Проект RSF-FWO: Объединённая задача раскроя и маршрутизации – новые алгоритмы и методы. Номер заявки проекта: 20-41-01001 (в случае поддержки)

(указываются в том числе грантодатели или заказчики проектов и источник финансирования, например – государственное задание учредителя, гранты РФФИ, ФПИ, РНФ, иных фондов или иных организаций, государственный контракт (заказчик, программа), иной хозяйственный договор, иные гранты и субсидии).

2.15. Доля рабочего времени, которую планируется выделить на руководство данным проектом в случае победы в конкурсе Фонда -

50 процентов.

Имеется в виду – от полной занятости в рамках трудовых или гражданско-правовых правоотношений, т.е. занятость в свободное от основной работы время также должна учитываться.

2.16. Предполагаемая форма трудовых отношений с организацией, через которую будет осуществляться финансирование:

Организация будет являться основным местом работы (характер работы – не дистанционный): **да;**

Трудовой договор по совместительству (характер работы – не дистанционный): **нет;**

Трудовой договор о дистанционной работе (место осуществления трудовой деятельности расположено** на территории Российской Федерации): **нет.**

**Трудовой кодекс Российской Федерации не предусматривает возможность заключения трудового договора о дистанционной работе с гражданином, проживающим и осуществляющим трудовую деятельность за пределами территории Российской Федерации.

2.17. Опыт образовательной деятельности за последние 5 лет (указывается информация о руководстве аспирантами, адъюнктами, интернами, ординаторами, разработке и чтении новых образовательных курсов в российских и

зарубежных вузах)

С 2003г. является руководителем аспирантов по специальности 05.13.12 - Системы автоматизации проектирования и по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника» (направленность: «Системы автоматизации проектирования (по отраслям»).

2 аспиранта успешно защитили диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. В настоящее время руководит работой 4-х аспирантов.

Принимал участие в разработке образовательной программы аспирантуры по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника» (направленность: «Системы автоматизации проектирования (по отраслям»)), образовательной программы магистратуры по направлению 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» («Автоматизация конструкторского и технологического проектирования на базе универсальных промышленных САПР»), образовательной программы магистратуры по направлению 09.04.03 «Прикладная информатика («Программное обеспечение информационных систем»), образовательных программ бакалавриата по направлениям 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» и 09.03.03 «Прикладная информатика»

Разработал и читает несколько новых образовательных курсов для студентов Уральского федерального университета по перечисленным направлениям, в том числе:

- 1.Автоматизация проектирования раскройно-заготовительного производства.
- 2.Автоматизация конструкторского и технологического проектирования.
- 3.Элементы математического программирования
- 4.САПР в машиностроении.
5. Основы научных исследований.
6. Системы быстрого прототипирования.

Разработал Программу Кандидатского экзамена по специальной дисциплине по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника»

2.18. Почтовый адрес

620073, г.Екатеринбург, ул.Родонитовая,9, кв.228

2.19. Контактный телефон

+79126158982

2.20. Электронный адрес (E-mail)

a.a.petunin@urfu.ru

2.21. Участие в проекте:

Руководитель проекта

2.22. Файлы с дополнительной информацией (резюме, другая дополнительная информация, которая, по мнению руководителя проекта, может быть полезна для принятия решения о целесообразности финансирования данного проекта)

В формате pdf, до 3 Мб.

на русском языке

на английском языке

С условиями конкурса Фонда (в том числе, с пунктами 6 и 7 конкурсной документации) ознакомлен и согласен.
Подтверждаю свое участие в проекте.

Фамилия, имя и отчество	Петунин Александр Александрович
Данные документа, удостоверяющего личность*** (серия, номер, сведения о дате и органе выдачи)	<div></div> <div></div> <div></div> <div>Внимание! Данное поле заполняется вручную в печатном экземпляре заявки. Заполнение обязательно!</div>
Адрес проживания	620073, г.Екатеринбург, ул.Родонитовая,9, кв.228
Оператор персональных данных	Российский научный фонд

Я выражаю согласие**** на обработку указанным выше оператором персональных данных, внесенных в настоящую форму мною лично.

Обработка Российским научным фондом (адрес: г. Москва, ул. Солянка, д. 14, строение 3) указанных выше персональных данных может осуществляться **посредством** их сбора, систематизации, накопления, хранения, уточнения, использования, блокирования, распространения на официальном сайте Российского научного фонда, передачи и уничтожения **с целью** проведения экспертизы заявок на конкурсы, проводимые Российским научным фондом, экспертизы проектов и программ, финансируемых Российским научным фондом, подготовки аналитических материалов по конкурсам, долговременного сохранения документированной информации об участниках программ, получивших финансирование Российского научного фонда, общедоступного раскрытия информации о руководителях программ и проектов, финансируемых Российским научным фондом. Указанная обработка моих данных может осуществляться в течение 75 лет со дня заполнения настоящей формы в печатной форме. Хранение настоящей формы может быть поручено ООО «РАЙСВОЛФ» (107150, Москва, ул. Бойцовая, д. 22), оказывающему Российскому научному фонду услуги архивного хранения документов. Настоящее согласие может быть отозвано посредством направления на указанный выше адрес оператора персональных данных заявления с требованием о прекращении обработки персональных данных. Заявление должно содержать номер документа, удостоверяющего личность субъекта персональных данных; сведения о дате выдачи указанного документа и выдавшем его органе, а также собственноручную подпись субъекта персональных данных.

*** Непредставление данных документа, удостоверяющего личность, является основанием недопуска заявки к конкурсу.

**** Заполнение является обязательным в соответствии с требованиями Федерального закона от 27 июля 2006 г. №152-ФЗ «О персональных данных».

Подпись руководителя проекта _____/А.А. Петунин/

Дата подписания «___» _____ 2019 г.

Форма 2. Сведения об основном исполнителе проекта

2.1. Фамилия, имя, отчество (при наличии)

на русском языке

Хачай Михаил Юрьевич

на английском языке фамилия и инициалы

Khachay M.Y.

WoS ResearcherID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу www.ResearcherID.com.

H-3251-2013

Scopus AuthorID (при наличии)

Scopus AuthorID формируется в базе данных Scopus автоматически при появлении у автора хотя бы одной статьи в данной базе. AuthorID указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске автора в базе данных Scopus (Author Search) в результатах поиска нажать на фамилию автора.
6507117765

2.2. Дата рождения (указывается цифрами – число, месяц, год)

25.12.1970

2.3. Гражданство

РОССИЯ

2.4. Ученая степень, год присуждения

В случае наличия нескольких ученых степеней, указывается та из них, которая наиболее соответствует тематике проекта.

Доктор физико-математических наук, 2005

2.5. Награды и премии за научную деятельность, членство в ведущих научных сообществах (при наличии), участие в редколлегиях ведущих рецензируемых научных изданий (при наличии)

Член AMS, EurOpt, IAPR, RuORS

Член редколлегий журналов PRIA, "Труды института математики и механики", "Дискретный анализ и исследование операций", "Вестник Южно-Уральского государственного университета", Ural mathematical Journal.

Премия УрО РАН им. акад. А.И.Субботина; Грант Президента РФ для молодых докторов, 2006-07 и 2008-09 гг.

Лучший результат по РАН 2015, 2017 и УрО РАН 2016, 2018 и 2019 гг.

2.6. Основное место работы на момент подачи заявки – должность, полное наименование организации (сокращенное наименование организации)

заведующий отделом, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики и механики им.Н.Н.Красовского Уральского отделения Российской академии наук (ИММ УрО РАН, Свердловская обл)

2.7. Область научных интересов – ключевые слова (приводится не более 15 ключевых слов)

на русском языке

комбинаторная оптимизация, вычислительная сложность и аппроксимируемость, методы обучения, распознавание образов

на английском языке

combinatorial optimization, computational complexity, polynomial-time approximation, machine learning, pattern recognition

2.8. Область научных интересов – коды по классификатору Фонда

01-114 01-201 01-202 01-203 01-726 01-727

2.9. Общее число публикаций за период с 1 января 2015 года,

98, из них:

2.10. Список публикаций основного исполнителя проекта с 1 января 2015 года (монографии, результаты интеллектуальной деятельности, имеющие правовую охрану, публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, публикации в изданиях, индексируемых в системах цитирования Web of Science Core Collection, Scopus, приводится не более 10 публикаций, при наличии публикации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» указывается ссылка на нее (обязательно для публикаций в индексируемых изданиях), указывается, при наличии, импакт-фактор научного издания (по JCR Science Edition, JCR Social Sciences Edition или SJR))

Пункт не является обязательным к заполнению. Могут приводиться публикации, свидетельствующие о научной квалификации и достижениях.

на английском языке

Для русскоязычных названий сведения приводятся на русском языке и в переводе на английский язык. При этом должно быть понятно, что речь идет об одном и том же документе (например, добавляйте слово «перевод»).

1. Michael Khachay. Committee polyhedral separability: complexity and polynomial approximation. Machine Learning (IF=1.889, Q1 WoS, Q1 SJR). 2015. Vol. 101, issue 1. P. 231-251. (<https://doi.org/10.1007/s10994-015-5505-0>)
2. Michael Khachay and Katherine Neznakhina. Approximability of the minimum-weight k-size cycle cover problem. Journal of Global Optimization (IF=1.631 Q1 WoS, Q1 SJR). 2016. Vol. 66. no. 1. p. 65-82. (<https://doi.org/10.1007/s10898-015-0391-3>)
3. Michael Khachay and Daniel Khachay. Attainable accuracy guarantee for the k-medians clustering in [0, 1]. Optimization Letters. 2019 (IF=1.339 Q2 WoS, Q1 SJR) 2019, Vol. 14, issue 8, P. 1837-1853 (<https://doi.org/10.1007/s11590-018-1305-3>)
4. Khachay, M., Neznakhina, K.: Complexity and approximability of the Euclidean generalized traveling salesman problem in grid clusters. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 2019 (IF=1.01, Q3 WoS, Q3 SJR) (<https://doi.org/10.1007/s10472-019-09626-w>)
5. Khachai, M., Dublnin R. Approximability of the Vehicle Routing Problem in Finite-Dimensional Euclidean Spaces. Proc. Steklov Inst. Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR). 2017. Vol. 297, Suppl. 1. P. 117-128 (<https://doi.org/10.1134/S0081543817050133>)
6. Khachai, M., Neznakhina E. Approximation Schemes for the Generalized Traveling Salesman Problem. Proc. Steklov Inst. Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR). 2017. Vol. 299, Suppl. 1. P. 97-105. (<https://doi.org/10.1134/S0081543817090127>)
7. Alexander Chentsov. An Exact Algorithm with Linear Complexity for a Problem of Visiting Megalopolises / Chentsov A.G., Khachay M.Yu., Khachay D.M // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q3 SJR), 2016, Vol. 295, Suppl. 1, pp. S38–S46.
8. Khachai, M.Yu. and Neznakhina, E.D.: A polynomial-time approximation scheme for the Euclidean problem on a cycle cover of a graph. Proc. Steklov Inst. Mathematics (IF= 0.302). 2015. Vol.289, suppl.1. C.111-125 (<https://doi.org/10.1134/S0081543815050107>)
9. Gimadi, E.Kh., Kel'manov, A.V., Pyatkin, A.V. and Khachai, M.Yu.: Efficient algorithms with performance guarantees for some problems of finding several cliques in a complete undirected weighted graph. Proc. Steklov Inst. Mathematics (IF= 0.302, Q2 SJR). 2015. Vol.289, suppl.1. C.88-101. (<https://doi.org/10.1134/S0081543815050089>)
10. Michael Khachay, Maria Poberiy and Daniel Khachay. Integer Partition Problem: Theoretical Approach to Improving Accuracy of Classifier Ensembles. Intern. J. Artificial Intelligence (Q2 SJR). 2015. Vol.13, № 1. C. 135-146. (<http://www.ceser.in/ceserp/index.php/ijai/article/view/3532>)
11. Khachay, M. and Ogorodnikov, Y.: Approximation scheme for the capacitated vehicle routing problem with time windows and non-uniform demand. Lecture Notes in Computer Science (Q2 SJR). 2019. Vol. 11548. P. 309-327 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-22629-9_22)
12. Khachay, M. and Ogorodnikov, Y.: Improved Polynomial Time Approximation Scheme for Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows. Communications in Computer and Information Science. 2019. Vol. 974. P. 155-169 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-10934-9_12)
13. Khachay, M., Neznakhina, K.: Pseudo-pyramidal tours and efficient solvability of the euclidean generalized traveling salesman problem in grid clusters // Lecture notes in Computer Science (Q2 SJR). 2019. Vol. 11353 P. 441-446 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-05348-2_38)
14. Khachay, M., Ogorodnikov, Y.: Efficient PTAS for the Euclidean CVRP with time windows. Lecture Notes in Computer Science (Q2 SJR). 2018. Vol. 11179. P. 318-328 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-11027-7_30)
15. Khachay, M., Neznakhina, K.: Towards Tractability of the Euclidean Generalized Traveling Salesman Problem in Grid Clusters Defined by a Grid of Bounded Height. Communications in Computer and Information Science (Q3 SJR). 2018. Vol. 871. P. 68-77 (https://doi.org/10.1007/978-3-319-93800-4_6)
16. Khachay, M., Neznakhina, K.: Polynomial time solvable subclass of the generalized traveling salesman problem on grid

clusters. Lecture Notes in Computer Science. (Q2 SJR), 2018. Vol. 11179, P. 318-328. (https://doi.org/10.1007/978-3-319-73013-4_32)

17. Khachay D., Khachay M., Poberiy M. Hitting Set Problem for Axis-Parallel Squares Intersecting a Straight Line Is Polynomially Solvable for Any Fixed Range of Square Sizes. Lecture Notes in Computer Science (Q2 SJR), 2018. vol 10716. Springer, Cham. P. 334-345 (https://doi.org/10.1007/978-3-319-73013-4_31)

18. Khachay, M., Neznakhina, K.: Generalized pyramidal tours for the generalized traveling salesman problem. Lecture Notes in Computer Science. 2017. Lecture Notes in Computer Science (Q2 SJR), 2017. Vol. 10627. P. 265-277 (https://doi.org/10.1007/978-3-319-71150-8_23)

19. Khachay, M. Polynomial Time Approximation Scheme for the Minimum-weight k-Size Cycle Cover Problem in Euclidean space of an arbitrary fixed dimension / M.Khachay, K.Neznakhina // IFAC-PapersOnLine (Q3 SJR). 2016. Vol. 49, Issue 12 : 8th IFAC Conf. on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM 2016), Troyes, France, 28–30 June 2016. P. 6–10. (<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.541>)

20. Khachay, M. and Dubinin, R.: PTAS for the Euclidean Capacitated Vehicle Routing Problem in R^d . Lecture Notes in Computer Science (Q2 SJR). 2016. Vol. 9869. P.193-205 (https://doi.org/10.1007/978-3-319-44914-2_16)

21. Chentsov, A., Khachay, M., and Khachay, D. Linear time algorithm for Precedence Constrained Asymmetric Generalized Traveling Salesman Problem. IFAC-PapersOnLine (Q3 SJR). 2016. Vol. 49, Issue 12, P. 651-654 (<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.767>)

22. Khachay, M. and Zaytseva, H.: Polynomial Time Approximation Scheme for Single-Depot Euclidean Capacitated Vehicle Routing Problem. Lecture Notes in Computer Science (Q2 SJR). 2015. Vol. 9486: Combinatorial Optimization and Applications. P. 178-191 (https://doi.org/10.1007/978-3-319-26626-8_14)

2.11. Опыт выполнения научных проектов и участия в них (указываются наименования фондов (организаций), форма участия, номера, названия проектов и сроки выполнения за последние 5 лет)

РНФ, 14-11-00109, "Эффективность и устойчивость алгоритмов математического программирования и анализа данных", 14-11-00109 (продление на 2017-18 гг.) (рук.)

РФФИ, 19-08-20007, "Международная конференция «Математическая теория оптимизации и исследование операций - Mathematical Optimization Theory and Operations Research (MOTOR 2019)»" (рук.)

РФФИ, 19-07-01243, "Проектирование, обоснование и численное тестирование эффективных алгоритмов комбинаторной и выпуклой оптимизации, анализа данных и вычислительной геометрии" (рук.)

РФФИ, 16-07-00266, "Вопросы эффективной аппроксимированности труднорешаемых задач статистического обучения и комбинаторной оптимизации" (рук.)

РФФИ, 15-07-20062, "Проект организации и проведения XV-й Всероссийской конференции "Математическое программирование и приложения" (рук.)

РФФИ, 14-07-06803, "Проект организации международной молодежной научной конференции "Анализ изображений, сетей и текстов -- 2014" (АИСТ'2014)" (рук.)

РФФИ, 13-07-00181, "Разработка, обоснование и программная реализация эффективных коллективных методов распознавания и алгоритмического обучения" (рук.)

Проект УрО РАН 12-01-1016 "Вопросы оптимальной коррекции несобственных задач оптимизации и обучения распознаванию образов", исполняемый в рамках Программы Фундаментальных исследований №15 Президиума РАН (рук.)

РФФИ, 10-07-00134 "Исследование задач комбинаторной оптимизации, связанных с коллективными алгоритмами обучения распознаванию" (рук.)

РФФИ, 07-07-00168 "Коллективный подход в распознавании: теория, алгоритмы и программная реализация" (рук.)

РНФ, 14-11-00085, "Приближенные и генерические алгоритмы для труднорешаемых задач алгебры и комбинаторной оптимизации" (исп.)

РФФИ, 17-08-01385, "Оптимизация маршрутов в условиях ограничений для типичных инженерных задач управления инструментом при листовой резке на машинах с ЧПУ и снижения дозовой нагрузки персонала на радиационно опасных объектах" (исп.)

2.12. Планируемое участие в научных проектах (в любом качестве) в 2020 году

Общее количество – 2, из них:

руководство – 1, участие в качестве исполнителя – 1,
а именно:

РФФИ 19-07-01243 "Проектирование, обоснование и численное тестирование эффективных алгоритмов комбинаторной и выпуклой оптимизации, анализа данных и вычислительной геометрии" (рук.)
+данный проект РНФ, в случае его поддержки

(указываются в том числе грантодатели или заказчики проектов и источник финансирования, например – государственное задание учредителя, гранты РФФИ, ГПИ, РНФ, иных фондов или иных организаций, государственный контракт (заказчик, программа), иной хозяйственный договор, иные гранты и субсидии).

2.13. Доля рабочего времени, которую планируется выделить на участие в данном проекте в случае победы в конкурсе Фонда -

35 процентов.

Имеется в виду – от полной занятости в рамках трудовых или гражданско-правовых правоотношений, т.е. занятость в свободное от основной работы время также должна учитываться.

2.14. Участие в образовательной деятельности *(указывается информация о руководстве аспирантами, разработке и чтении новых образовательных курсов в российских и зарубежных вузах)*

Трое учеников: А.В.Качалков (2007), М.И.Поберий (2011) и Е.Д.Незнахина (2018) - кандидаты наук.

Руководство 2 аспирантами, чтение лекционных курсов в УрФУ и ОмГТУ:

"Математические модели управления запасами", "Математическая экономика",

"Распознавание образов и анализ данных", "Дополнительные главы распознавания образов"

2.15. В 2018 или в 2019 годах участвовал в качестве руководителя проекта (руководителя направления комплексной научной программы организации), финансируемого Фондом, или исполнителя проекта, финансируемого Фондом, в следующих проектах (при наличии):

Являлся руководителем проекта № 14-11-00109 (продление), 2017-2018 гг. **(успешно завершен)**

2.16. Контактный телефон, электронный адрес (E-mail)

+73433753505, mkhachay@imm.uran.ru

2.17. Участие в проекте:

Основной исполнитель проекта

С условиями конкурса Фонда (в том числе, с пунктами 7 и 8 конкурсной документации) ознакомлен и согласен.
Подтверждаю свое участие в проекте.

Фамилия, имя и отчество	Хачай Михаил Юрьевич
Данные документа, удостоверяющего личность*** (серия, номер, сведения о дате и органе выдачи)	<div></div> <div></div> <div></div> <div>Внимание! Данное поле заполняется вручную в печатном экземпляре заявки. Заполнение обязательно!</div>
Адрес проживания	620016, г. Екатеринбург, ул. Краснолесья, д. 20, кв. 103
Оператор персональных данных	Российский научный фонд

Я выражаю согласие**** на обработку указанным выше оператором персональных данных, внесенных в настоящую форму мною лично.

Обработка Российским научным фондом (адрес: г. Москва, ул. Солянка, д. 14, строение 3) указанных выше персональных данных может осуществляться **посредством** их сбора, систематизации, накопления, хранения, уточнения, использования, блокирования, распространения на официальном сайте Российского научного фонда, передачи и уничтожения **с целью** проведения экспертизы заявок на конкурсы, проводимые Российским научным фондом, экспертизы проектов и программ, финансируемых Российским научным фондом, подготовки аналитических материалов по конкурсам, долговременного сохранения документированной информации об участниках программ, получивших финансирование Российского научного фонда, общедоступного раскрытия информации о руководителях программ и проектов, финансируемых Российским научным фондом. Указанная обработка моих данных может осуществляться в течение 75 лет со дня заполнения настоящей формы в печатной форме. Хранение настоящей формы может быть поручено ООО «РАЙСВОЛФ» (107150, Москва, ул. Бойцовая, д. 22), оказывающему Российскому научному фонду услуги архивного хранения документов. Настоящее согласие может быть отозвано посредством направления на указанный выше адрес оператора персональных данных заявления с требованием о прекращении обработки персональных данных. Заявление должно содержать номер документа, удостоверяющего личность субъекта персональных данных; сведения о дате выдачи указанного документа и выдавшем его органе, а также собственноручную подпись субъекта персональных данных.

*** Непредставление данных документа, удостоверяющего личность, является основанием недопуска заявки к конкурсу.

**** Заполнение является обязательным в соответствии с требованиями Федерального закона от 27 июля 2006 г. №152-ФЗ «О персональных данных».

Подпись исполнителя проекта _____/М.Ю. Хачай/

Дата подписания «___» _____ 2019 г.

Форма 2. Сведения об основном исполнителе проекта

2.1. Фамилия, имя, отчество (при наличии)

на русском языке

Ченцов Павел Александрович

на английском языке фамилия и инициалы

Chentsov P.A.

WoS ResearcherID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу www.ResearcherID.com.

K-1723-2018

Scopus AuthorID (при наличии)

Scopus AuthorID формируется в базе данных Scopus автоматически при появлении у автора хотя бы одной статьи в данной базе. AuthorID указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске автора в базе данных Scopus (Author Search) в результатах поиска нажать на фамилию автора.

6505893871

2.2. Дата рождения (указывается цифрами – число, месяц, год)

07.07.1978

2.3. Гражданство

РОССИЯ

2.4. Ученая степень, год присуждения

В случае наличия нескольких ученых степеней, указывается та из них, которая наиболее соответствует тематике проекта.

Кандидат физико-математических наук, 2005

2.5. Награды и премии за научную деятельность, членство в ведущих научных сообществах (при наличии), участие в редколлегиях ведущих рецензируемых научных изданий (при наличии)

Премия Губернатора Свердловской области в сфере информационных технологий 2016 года

2.6. Основное место работы на момент подачи заявки – должность, полное наименование организации (сокращенное наименование организации)

старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики и механики им.Н.Н.Красовского Уральского отделения Российской академии наук (ИММ УрО РАН, Свердловская обл)

2.7. Область научных интересов – ключевые слова (приводится не более 15 ключевых слов)

на русском языке

Задача коммивояжера, обобщённая задача курьера, условия предшествования, динамическое программирование

на английском языке

Travelling salesman problem, generalized problem of courier, precedence constraints, dynamic programming

2.8. Область научных интересов – коды по классификатору Фонда

01-114 09-602 09-604

2.9. Общее число публикаций за период с 1 января 2015 года,

23, из них:

11 - опубликовано в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection или Scopus.

2.10. Список публикаций основного исполнителя проекта с 1 января 2015 года (монографии, результаты

интеллектуальной деятельности, имеющие правовую охрану, публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, публикации в изданиях, индексируемых в системах цитирования Web of Science Core Collection, Scopus, приводится не более 10 публикаций, при наличии публикации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» указывается

ссылка на нее (обязательно для публикаций в индексируемых изданиях), указывается, при наличии, импакт-фактор научного издания (по JCR Science Edition, JCR Social Sciences Edition или SJR))

Пункт не является обязательным к заполнению. Могут приводиться публикации, свидетельствующие о научной квалификации и достижениях.

на английском языке

Для русскоязычных названий сведения приводятся на русском языке и в переводе на английский язык. При этом должно быть понятно, что речь идет об одном и том же документе (например, добавляйте слово «перевод»).

1. Chentsov, A.G., Chentsov, P.A., Petunin, A.A., Seseikin, A.N.: Model of megalopolises in the tool path optimisation for CNC plate cutting machines. International Journal of Production Research (IF=2.623, Q1 SJR) 2018, 56(14), pp. 4819-4830. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1421784>
2. Optimizing inserts in the routing problem with restrictions and complicated cost functions / A.A. Petunin, A. G. Chentsov, P. A. Chentsov // Journal of Computer and Systems Sciences (IF=0,513. Q4) 2019. 58 (1) P.117-125. DOI: 10.1134/S106423071901012X
3. About one approach to the development of cross-platform applications in C ++ / Chentsov, P.A. // Software Engineering. 2019.No 3.P. 105 - 113. DOI: 10.14529/mmp180207
4. Baklanov, A.P. A Heuristic Algorithm for the Double Integrator Traveling Salesman Problem / Artem P. Baklanov, Pavel A. Chentsov // CEUR-WS Proceedings. 2017. Vol.1894 : Modern Problems in Mathematics and its Applications : 48th Intern. Youth School-Conf., Yekaterinburg, 2017: proceedings. P. 203-208
5. Petunin, A. A., Chentsov, A. A., Chentsov, A. G., & Chentsov, P. A. (2017). Elements of Dynamic Programming in Local Improvement Constructions for Heuristic Solutions of Routing Problems with Constraints (перевод). Automation and Remote Control (IF=0.328, Q2 SJR) , 78(4), 666-681. <https://doi.org/10.1134/S00051179170400874>
6. Chentsov, P. A., & Petunin, A. A. (2016). Tool routing problem for CNC plate cutting machines. IFAC-PapersOnLine(IF=0.234, Q3 SJR), 49(12), 645-650. doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.762
7. Petunin, A. A., Polishuk, E. G., Chentsov, A. G., Chentsov, P. A., & Ukolov, S. S. (2016). About some types of constraints in problems of routing. B Pasheva, N. Popivanov, & G. Venkov (eds), APPLICATIONS OF MATHEMATICS IN ENGINEERING AND ECONOMICS (AMEE'16) (Том 1789). [060002] (AIP Conference Proceedings; Том 1789). American Institute of Physics Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4968494>
8. Petunin, A. A., Chentsov, A. G., & Chentsov, P. A. (2017). About routing in the sheet cutting. Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software (перевод) (IF=0.261, Q3 SJR), 10(3), 25-39. <https://doi.org/10.14529/mmp170303>
9. Petunin, A. A., Chentsov, A. A., Chentsov, A. G., & Chentsov, P. A. (2017). Elements of Dynamic Programming in Local Improvement Constructions for Heuristic Solutions of Routing Problems with Constraints (перевод). Automation and Remote Control (IF=0.328, Q2 SJR) , 78(4), 666-681. <https://doi.org/10.1134/S0005117917040087>
10. Chentsov, A.G., Chentsov, P.A. Optimization of the start point in the GTSP with the precedence conditions (2018) Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software, 11 (2), pp. 83-95. DOI: 10.14529/mmp180207
11. Chentsov, A.G., Chentsov, P.A. Routing under constraints: Problem of visit to megalopolises (2016) Automation and Remote Control, 77 (11), pp. 1957-1974. DOI: 10.1134/S0005117916110060

2.11. Опыт выполнения научных проектов и участия в них (указываются наименования фондов (организаций), форма участия, номера, названия проектов и сроки выполнения за последние 5 лет)

Участвовал в следующих научных проектах в качестве исполнителя:

РФФИ 20-08-00873 (в случае поддержки) Разработка математических моделей и алгоритмов решения прикладных оптимизационных маршрутных задач со сложными целевыми функциями и параметрами

РФФИ 19-01-00573 Проблема точного и приближенного соблюдения ограничений в задачах управления
РФФИ 18-07-00637 "Принципиальное ревоплощение" (radical reimplementation) в мультиагентном моделировании:
комбинаторная теория, высокопроизводительные вычисления, приложения
РФФИ 17-08-01385 Оптимизация маршрутов в условиях ограничений для типичных инженерных задач управления
инструментом при листовой резке на машинах с ЧПУ и снижения дозовой нагрузки персонала на радиационно опасных объектах

2.12. Планируемое участие в научных проектах (в любом качестве) в 2020 году

Общее количество – 3, из них:

руководство – 0, участие в качестве исполнителя – 3,

а именно:

РФФИ 20-08-00873 (в случае поддержки) Разработка математических моделей и алгоритмов решения прикладных оптимизационных маршрутных задач со сложными целевыми функциями и параметрами

РФФИ 19-01-00573 Проблема точного и приближенного соблюдения ограничений в задачах управления

РФФИ 18-07-00637 "Принципиальное ревоплощение" (radical reimplementation) в мультиагентном моделировании:
комбинаторная теория, высокопроизводительные вычисления, приложения

(указываются в том числе грантодатели или заказчики проектов и источник финансирования, например – государственное задание учредителя, гранты РФФИ, ФПИ, РНФ, иных фондов или иных организаций, государственный контракт (заказчик, программа), иной хозяйственный договор, иные гранты и субсидии).

2.13. Доля рабочего времени, которую планируется выделить на участие в данном проекте в случае победы в конкурсе Фонда -

35 процентов.

Имеется в виду – от полной занятости в рамках трудовых или гражданско-правовых правоотношений, т.е. занятость в свободное от основной работы время также должна учитываться.

2.14. Участие в образовательной деятельности (указывается информация о руководстве аспирантами, разработке и чтении новых образовательных курсов в российских и зарубежных вузах)

нет

2.15. В 2018 или в 2019 годах участвовал в качестве руководителя проекта (руководителя направления комплексной научной программы организации), финансируемого Фондом, или исполнителя проекта, финансируемого Фондом, в следующих проектах (при наличии):

2.16. Контактный телефон, электронный адрес (E-mail)

+79221400089, chentsov.p@mail.ru

2.17. Участие в проекте:

Основной исполнитель проекта

С условиями конкурса Фонда (в том числе, с пунктами 7 и 8 конкурсной документации) ознакомлен и согласен.
Подтверждаю свое участие в проекте.

Фамилия, имя и отчество	Ченцов Павел Александрович
Данные документа, удостоверяющего личность*** (серия, номер, сведения о дате и органе выдачи)	<div></div> <div></div> <div></div> <div>Внимание! Данное поле заполняется вручную в печатном экземпляре заявки. Заполнение обязательно!</div>
Адрес проживания	620014 г.Екатеринбург, ул.Маршала Жукова, д.10, кв.231
Оператор персональных данных	Российский научный фонд

Я выражаю согласие**** на обработку указанным выше оператором персональных данных, внесенных в настоящую форму мною лично.

Обработка Российским научным фондом (адрес: г. Москва, ул. Солянка, д. 14, строение 3) указанных выше персональных данных может осуществляться **посредством** их сбора, систематизации, накопления, хранения, уточнения, использования, блокирования, распространения на официальном сайте Российского научного фонда, передачи и уничтожения **с целью** проведения экспертизы заявок на конкурсы, проводимые Российским научным фондом, экспертизы проектов и программ, финансируемых Российским научным фондом, подготовки аналитических материалов по конкурсам, долговременного сохранения документированной информации об участниках программ, получивших финансирование Российского научного фонда, общедоступного раскрытия информации о руководителях программ и проектов, финансируемых Российским научным фондом. Указанная обработка моих данных может осуществляться в течение 75 лет со дня заполнения настоящей формы в печатной форме. Хранение настоящей формы может быть поручено ООО «РАЙСВОЛФ» (107150, Москва, ул. Бойцовая, д. 22), оказывающему Российскому научному фонду услуги архивного хранения документов. Настоящее согласие может быть отозвано посредством направления на указанный выше адрес оператора персональных данных заявления с требованием о прекращении обработки персональных данных. Заявление должно содержать номер документа, удостоверяющего личность субъекта персональных данных; сведения о дате выдачи указанного документа и выдавшем его органе, а также собственноручную подпись субъекта персональных данных.

*** Непредставление данных документа, удостоверяющего личность, является основанием недопуска заявки к конкурсу.

**** Заполнение является обязательным в соответствии с требованиями Федерального закона от 27 июля 2006 г. №152-ФЗ «О персональных данных».

Подпись исполнителя проекта _____/П.А. Ченцов/

Дата подписания «___» _____ 2019 г.

Форма 3. Сведения об организации

собираются автоматически на основе регистрационных данных организации, через которую будет осуществляться финансирование ("Форма Т")

3.1. Полное наименование *(приводится в соответствии с регистрационными документами)*

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина"

3.2. Сокращенное наименование

ФГАОУ ВО "УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина", Уральский федеральный университет, УрФУ

3.3. Наименование на английском языке

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin"

3.4. Организационно-правовая форма *(указывается по ОКОПФ)*

Федеральные государственные автономные учреждения

3.5. Форма собственности *(указывается по ОКФС)*

Федеральная собственность

3.6. Ведомственная принадлежность

Министерство науки и высшего образования РФ

3.7. ИНН, КПП, ОГРН, ОКТМО

6660003190, 667001001, 1026604939855, 65701000

3.8. Адрес

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д.19

3.9. Фактический адрес

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д.19

3.10. Субъект Российской Федерации

Свердловская обл

3.11. Должность, фамилия, имя, отчество *(при наличии) руководителя организации*

ректор, Кокшаров Виктор Анатольевич

3.12. Контактный телефон

+73433754472

3.13. Электронный адрес *(E-mail)*

rector@urfu.ru

Руководитель организации подтверждает, что:

- ознакомлен с условиями конкурса Фонда и согласен на финансирование проекта, в случае его поддержки, через организацию;
- согласен с пунктами 8, 14, 33, 35, 36 конкурсной документации, иными условиями конкурса;
- подтверждает сведения о руководителе проекта, изложенные в данной заявке;
- организация исполняет обязательства по уплате налогов в бюджеты всех уровней и обязательных платежей в государственные внебюджетные фонды, платежеспособна, не находится в процессе ликвидации, не признана несостоятельной (банкротом), на ее имущество не наложен арест и ее экономическая деятельность не приостановлена;
- в случае признания заявки победителем организация берет на себя следующие обязательства:
 - заключить с членами научного коллектива гражданско-правовые или трудовые (срочные трудовые) договоры;
Если таковые не заключены ранее. В случае, если член научного коллектива не является гражданином Российской Федерации, организацией должны быть выполнены все процедуры, предусмотренные законодательством Российской Федерации при трудоустройстве иностранных граждан.

- по поручению руководителя проекта выплачивать членам научного коллектива вознаграждение за выполнение работ по проекту;
- ежегодно в установленные сроки представлять отчет о целевом использовании гранта Российского научного фонда.

Руководитель организации гарантирует, что:

- вознаграждение за выполнение работ по реализации проекта будет ежегодно получать каждый член научного коллектива;
- общий размер ежегодного вознаграждения члена научного коллектива не будет превышать 30 процентов от суммы ежегодного вознаграждения всем членам научного коллектива;

Включая установленные законодательством Российской Федерации гарантии, отчисления по страховым взносам на обязательное пенсионное страхование, на обязательное медицинское страхование, на обязательное социальное страхование на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством, на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний.

- общий размер ежегодного вознаграждения членов научного коллектива в возрасте до 39 лет включительно не будет меньше 35 процентов от суммы ежегодного вознаграждения всех членов научного коллектива;
- общее число членов научного коллектива (вместе с руководителем проекта) не будет превышать 10 человек, при этом членом научного коллектива не будет являться работник организации, в непосредственном административном подчинении которого находится руководитель проекта;
- научному коллективу будет предоставлено помещение и обеспечен доступ к имеющейся экспериментальной базе для осуществления научного исследования.

Подпись руководителя организации (уполномоченного представителя, действующего на основании доверенности или распорядительного документа), **печать** (при ее наличии) **организации**

В случае подписания формы уполномоченным представителем организации (в т.ч. – руководителем филиала) к печатному экземпляру заявки прилагается копия распорядительного документа или доверенности, заверенная печатью организации.

_____/_____
М.П.

Форма 4. Содержание проекта

4.1. Научная проблема, на решение которой направлен проект

на русском языке

Разработка математических моделей и высокоэффективных алгоритмов для решения задач оптимизации технологических процессов резки фигурных заготовок из листовых материалов на машинах с числовым программным управлением

на английском языке

Development of mathematical models and high-performance algorithms for solving the technological processes optimization problems at cutting of figured parts from sheet materials on CNC machines

4.2. Научная значимость и актуальность решения обозначенной проблемы

на русском языке

Научная значимость и актуальность решения обозначенной проблемы обусловлены прежде всего тем, что современный математический аппарат не обеспечивает эффективные решения большинства оптимизационных задач, возникающих при проектировании технологических процессов раскроя листовых материалов на фигурные заготовки и последующей генерации управляющих программ для получения этих заготовок на машинах листовой резки с числовым программным управлением. Совершенствование процессов проектирования и технологической подготовки современного раскройно-заготовительного производства изделий зависит от оптимизации различных количественных и качественных факторов. Среди них можно выделить четыре основных фактора, влияющих на эффективность технологических процессов раскроя материала при применении машин листовой резки с ЧПУ:

- 1) величина расхода материала при получении из него заготовок известных форм и размеров;
- 2) время резки на машинах с ЧПУ, определяемое спроектированной управляющей программой (маршрутом инструмента);
- 3) стоимость резки;
- 4) качество управляющей программы с точки зрения соблюдения технологических требований резки на машине с ЧПУ.

Последние три фактора определяются результатом проектирования управляющей программы для конкретного технологического оборудования с ЧПУ. В настоящее время для оптимизации временных и стоимостных характеристик процесса резки применяются, в основном, интерактивные методы, не гарантирующие получения оптимального решения. С другой стороны, применение оптимизирующих модулей в используемых на предприятиях отечественных и зарубежных САПР (CAD-CAM системы) для проектирования раскроя и разработки управляющих программ для машин листовой резки с ЧПУ часто не обеспечивает соблюдение технологических требований резки материала на машинах с ЧПУ и не позволяет получать маршруты резки, близкие к оптимальным. Главная технологическая проблема, практически не учитываемая современными разработчиками программного обеспечения, заключается в деформациях материала в процессе резки на машинах с ЧПУ, что приводит к искажению геометрических форм и размеров получаемых заготовок. Авторами проекта разработан ряд методик, которые позволяют уменьшить термические деформации материала за счет ограничений на некоторые траектории инструмента резки. Кроме того, введенная участниками проекта концепция "сегмента резки" позволяет рассматривать задачи оптимизации маршрута инструмента с единых теоретических позиций, а разработка новых оптимизирующих методов и алгоритмов маршрутизации инструмента для машин листовой резки материала с ЧПУ обеспечит существенное повышение эффективности систем автоматизированного проектирования, предназначенных для генерации управляющих программ технологического оборудования с ЧПУ для резки листовых материалов. Прежде всего, речь идёт об оптимизации технологических процессов раскройно-заготовительного производства по временным и стоимостным параметрам, в том числе, и о сокращении затрат энергоресурсов при резке на 10-15%. Важной и актуальной задачей проекта является также создание импортозамещающего программного обеспечения, интегрируемое в отечественные (CAD-CAM системы). В качестве математических моделей для сформулированных задач предлагается использовать как известные модели дискретной оптимизации (в частности, модель обобщенной задачи курьера с дополнительными ограничениями в терминах задачи о мегаполисах), так и некоторые новые постановки непрерывно-дискретной маршрутизации, предполагающие применение алгоритмов с возможностью выбора точек врезки в листовую материал не из конечного набора, а из континуальных подмножеств плоскости.

Исследуемые прикладные задачи представляет серьёзный теоретический интерес с точки зрения прикладной математики: речь идет о построении методов и работоспособных алгоритмов для решения экстремальной задачи

маршрутизации с большим числом разнообразных ограничений, многие из которых ранее не рассматривались исследователями, в том числе и за рубежом. Изучение подходов к решению такого рода задач может потребовать поэтому разработки новых математических методов и, на их основе, построение оригинальных алгоритмов и комплексов программ.

Бесспорным представляется то, что при решении вышеупомянутой практической задачи требуются согласованные усилия инженеров, математиков и программистов. Именно такой подход и реализуется в проекте. Задача является комплексной, а её исследование может привести к установлению новых фактов научного характера, в том числе связанных с решением NP-трудных задач и созданию эффективного программного обеспечения.

на английском языке

The scientific significance and relevance of solving the indicated problem is primarily due to the fact that the modern mathematical apparatus does not provide effective solutions to most of the optimization problems that arise when designing technological processes for cutting sheet materials into curly blanks and subsequent generation of control programs for obtaining these blanks on numerical-controlled sheet cutting machines program management. The improvement of the design and technological preparation processes of the modern cutting and procuring production of products depends on the optimization of various quantitative and qualitative factors. Among them, four main factors can be identified that affect the efficiency of technological processes for cutting material when using CNC sheet cutting machines:

- 1) the amount of material consumption when receiving from it parts of known shapes and sizes;
- 2) the cutting time on CNC machines, determined by the designed NC program (tool path);
- 3) the cost of cutting;
- 4) the quality of the NC program in terms of compliance with the technological requirements of cutting on a CNC machine.

The last three factors are determined by the design of the control program for a specific technological equipment with CNC. Currently, to optimize the time and cost characteristics of the cutting process, mainly interactive methods are used that do not guarantee an optimal solution. On the other hand, the use of optimizing modules in domestic and foreign CAD (CAD-CAM) systems used in the design of cutting and development of control programs for CNC sheet cutting machines often does not ensure compliance with the technological requirements of cutting material on CNC machines and does not allow obtaining cutting paths close to optimal. The main technological problem, which is practically not taken into account by modern software developers, is the deformation of the material during cutting on CNC machines, which leads to a distortion of the geometric shapes and sizes of the resulting workpieces. The authors of the project developed a number of techniques that can reduce the thermal deformation of the material due to restrictions on some trajectories of the cutting tool. In addition, the concept of a "cutting segment" introduced by project participants allows us to consider the task of optimizing the tool route from a single theoretical point of view, and the development of new optimizing methods and routing algorithms for tools for sheet metal cutting machines with CNC will significantly increase the efficiency of computer-aided design systems designed to generate control programs of technological equipment with CNC for cutting sheet materials. First of all, we are talking about optimizing the technological processes of cutting-procurement for time and cost parameters, including the reduction of energy costs during cutting by 10-15%. An important and urgent task of the project is also the creation of import-substituting software, integrated into domestic (CAD-CAM systems).

As mathematical models for the formulated problems, it is proposed to use both the well-known discrete optimization models (in particular, the model of the generalized courier problem with additional restrictions in terms of the problem of megacities), as well as some new formulations of continuous-discrete routing, which involve the use of algorithms with the possibility of choosing insertion points in sheet material, not from a finite set, but from continual subsets of a plane.

The applied problems under study are of serious theoretical interest from the point of view of applied mathematics: we are talking about the construction of methods and workable algorithms for solving the extreme routing problem with a large number of various restrictions, many of which were not previously considered by researchers, including abroad. The study of approaches to solving such problems may therefore require the development of new mathematical methods and, on their basis, the construction of original algorithms and program complexes.

It is indisputable that in solving the aforementioned practical problem, the concerted efforts of engineers, mathematicians, and programmers are required. It is this approach that is being implemented in the project. The task is complex, and its study can lead to the establishment of new facts of a scientific nature, including those related to solving NP-hard problems and creating efficient software.

4.3. Конкретная задача (задачи) в рамках проблемы, на решение которой направлен проект, ее масштаб и комплексность

на русском языке

В проекте рассматривается задача оптимизации пути инструмента (the tool path problem) для технологического оборудования с ЧПУ, предназначенного для раскроя листовых материалов на заготовки сложной формы. В качестве критериев оптимизации естественным образом использованы время резки заготовок на машине с ЧПУ и стоимость затрат на резку.

Основные задачи проекта включают, в частности, следующие:

- Общая формальная постановка задачи оптимизации траектории инструмента для машин фигурной листовой резки на основе обобщенной модели задачи SCCP
 - Формализация «динамических» ограничений типа «Правило жесткости листа»
 - Разработка методики формирования «сегментов резки» и «базовых сегментов резки» для формирования исходных данных задачи SCCP с использованием специальных техник резки
 - Разработка точных алгоритмов решения задачи для модели GTSP с условиями предшествования и всеми типами динамических ограничений
 - Разработка приближенных алгоритмов решения задач оптимизации для больших размерностей (свыше 40 контуров)
 - Разработка приближенных алгоритмов для непрерывной модели задач CCP и SCCP
 - Определение «точных» формул целевых функций времени резки и стоимости резки в зависимости от исходных данных задачи
 - Разработка алгоритмов и программного обеспечения расчета температурных полей при термической резке
 - Разработка программного обеспечения для определения точек врезки, удовлетворяющих правилу жесткости детали на основе вычисления температурных полей, возникающих в процессе термической резки
 - Разработка библиотеки тестовых примеров с размещением в сети Интернет для проведения сравнительного анализа эффективности разработанных алгоритмов с алгоритмами зарубежных коллег.
 - Интеграция разрабатываемого программного обеспечения с существующими отечественными CAD/CAM системами
- Кроме того, важной задачей проекта помимо разработки математических моделей и вычислительных алгоритмов для решения задачи является задача создания комплексного программного обеспечения, позволяющего решать весь упомянутые задачи применительно ко всему спектру лазерных, плазменных, газовых и гидроабразивных машин для резки листовых материалов. Таким образом, масштаб и комплексность задачи позволяет говорить о серьезной значимости проекта для российской науки

на английском языке

The project addresses the problem of the tool path optimization for CNC equipment intended for cutting of sheet materials into complex shaped parts. As optimization criteria, the cutting time of billets on a CNC machine and the cost of cutting process are naturally used.

The main objectives of the project include:

- General formal formulation of the tool path optimization problem for a the sheet cutting machine based on the generalized model of the SCCP problem
 - Formalization of “dynamic” constraints of the type “sheet hardness rule”
 - Development of the method of forming “cutting segments” and “basic cutting segments” to form the initial data of the SCCP problem using special cutting techniques
 - Development of exact algorithms for solving the problem for the GTSP model with precedence conditions and all types of dynamic constraints
 - Development of approximate algorithms for solving optimization problems for large dimensions (over 40 contours)
- Development of approximate algorithms for the continuous model of the CCP and SCCP problems
- Determination of “exact” formulas of target functions of cutting time and cutting cost depending on the initial data of the task
 - Development of software for determining the tie-in points that satisfy the rule of part rigidity based on the calculation of temperature fields arising in the process of thermal cutting
 - Developing a library of test examples with online posting for conducting a comparative analysis of the effectiveness of the developed algorithms with the algorithms of foreign colleagues.
 - Integration of the developed software with existing russian CAD / CAM systems

In addition, an important task of the project in addition to the development of mathematical models and computational algorithms for solving the problem is the task of creating integrated software that allows you to solve all the problems mentioned in relation to the entire spectrum of laser, plasma, gas and water-jet machines for the cutting of sheet materials. Thus, the scale and complexity of the task allows us to speak about the serious importance of the project for Russian science.

4.4. Научная новизна исследований, обоснование достижимости решения поставленной задачи (задач) и возможности получения предполагаемых результатов

на русском языке

Предполагаемое исследование представляется значительным развитием серии недавно выполненных работ авторов проекта, в которых были получены оригинальные результаты по тематике проекта. Запланированные результаты, по мнению его авторов, обладают очевидной научной новизной и уровнем, по ряду направлений опережающим лучшие мировые аналоги.

Речь идет, прежде всего, о комплексной постановке исследуемой задачи на основе единой концепции "сегментной резки", расширении существующей классификации задач, для которых удастся построить эффективные алгоритмы решения, и об описании условий применения современного математического аппарата, в том числе, последних результатов авторов заявки. Фактически можно говорить о некоторых принципиально новых классах оптимизационных задач, например о задачах Segment Continuous Cutting Problem (SCCP) и задачах с динамическими (изменяющимися) ограничениями. Впервые планируется исследование задач Continuous Cutting Problem (CCP) и SCCP для случая непрерывных моделей с учетом технологических требований резки. Немаловажным моментом новизны данного исследования являются новые подходы к расчету тепловых полей, возникающих в процессах термической резки листовых материалов. Последнее позволит уменьшить геометрические искажения детали.

Кроме того, специальные способы решения дискретной модели в форме задачи о последовательном обходе мегаполисов на основе обоснованной авторами заявки специальной схемы динамического программирования позволит получать точные решения для практически значимых размерностей задач маршрутизации (35 и более контуров), для которых до последнего время использовались исключительно эвристические подходы. Авторам удалось формализовать некоторые виды сложных эвристических ограничений, что создало базу для разработки эффективных алгоритмов оптимизации траектории инструмента, имеющих наряду с очевидной теоретической ценностью и непосредственное практическое значение.

Большая часть успехов в области эффективной аппроксимируемости маршрутных задач достигнута исключительно для их постановок в конечномерных евклидовых пространствах. Однако характерные постановки задач маршрутизации инструмента машин листовой резки не ограничиваются евклидовыми моделями. Поэтому одно из направлений исследований данного проекта связано с проектированием точных и приближенных алгоритмов для сугубо ненормируемых метрических постановок задач маршрутизации,

Практически по всем сформулированным задачам проекта у авторов имеется серьезный задел, что говорит о возможности достижимости запланированных результатов. работы автором широко известны научному сообществу. Результаты работы прошли апробацию на многочисленных международных конференциях и по большей части опубликованы в рецензируемых журналах. Коллектив проекта обладает высокой квалификацией, максимально сбалансирован и может решать запланированные задачи.

на английском языке

The proposed research seems to be a significant extension for a series of recently published papers by the authors of the project, where original results on the subject of the project were obtained. To the best of our knowledge, the planned results have an evident scientific novelty and high level with respect to the best world analogues.

First of all, the topic of the proposed research includes the comprehensive formulation of the considered problem on the basis of a general "segment cutting" concept, the extension of existing problem classification, for which it is possible to build efficient solution algorithms, and the description of the conditions for using the modern mathematical apparatus, including the latest results of the authors of this project proposal. Actually, we can talk about some fundamentally new classes of optimization problems, e.g., the Segment Continuous Cutting Problem (SCCP) and problems with dynamic (varying in time) constraints. For the first time, a study of the Continuous Cutting Problem (CCP) and SCCP problems is planned for the case of continuous models taking into account the technological constraints of cutting. An important moment of the novelty of this research is new approaches to the evaluation of thermal fields arising in the processes of thermal cutting of sheet materials. The latter will reduce the geometric distortion of the parts cutted out.

In addition, special methods for solving a discrete model in the form of a problem of sequentially traversing megalopolises based on a special dynamic programming scheme substantiated by the authors of this proposal will allow to obtain exact solutions for practically significant dimensions of routing problems (35 or more contours), for which exclusively heuristic approaches were used so far. The authors were able to formalize some types of complex heuristic constraints, which created the basis for the development of effective algorithms for optimizing the tool path, which, along with obvious theoretical value, have clear practical value.

Most of the successes in the field of efficient approximability for routing problems have been achieved exclusively for their settings in finite-dimensional Euclidean spaces. However, the typical settings of such problems arising in sheet cutting are not limited to Euclidean models. Therefore, one of the research directions of this project is related to the design of exact and approximate algorithms for purely non-normalized metric statements of routing problems, For almost all the stated objectives of the project, the authors have a serious backlog, which indicates the possibility of achieving the planned results. works by the author are widely known to the scientific community. The results have been tested at numerous international conferences and for the most part published in peer-reviewed journals. The project team is highly qualified, as balanced as possible and can solve the planned tasks

4.5. Современное состояние исследований по данной проблеме, основные направления исследований в мировой науке и научные конкуренты

на русском языке

Если говорить в целом о проблеме оптимизации траектории инструмента для технологического оборудования листовой резки с ЧПУ, то в настоящее время не существует единой теоретической базы для решения этой проблемы. Существуют отдельные группы ученых, которые занимаются исследованием частными случаев этой проблемы. Кроме того, в рамках CAD/CAM систем, предназначенных для проектирования раскроя и управляющих программ для машин листовой резки с ЧПУ, есть отдельные модули, которые позволяют решать некоторые оптимизационные задачи, например (минимизацию холостого хода инструмента), однако при этом не обеспечивают соблюдение технологических требований резки материала на машинах с ЧПУ и не позволяют получать маршруты резки, близкие к оптимальным с точки зрения интегрированного критерия стоимости резки с учетом рабочего хода инструмента, затрат на врезку и т.д. Следует подчеркнуть, что алгоритмы, реализованные в коммерческом программном обеспечении, не описываются, как правило, в научной литературе.

В нашей стране первые работы по оптимизации проектирования маршрута листовой резки на машинах с ЧПУ были опубликованы проф. Верхотуровом М.А. (Уфа)[1-2] и проф. Фроловским В.Д. (Новосибирск)[3-5]. Однако эти работы не получили продолжения. В последние годы появилось несколько публикаций, проводимых под руководством проф. Панюкова А.В. (Челябинск) по этой тематике[6-8]. Отметим, что эти работы можно отнести к классу работ только по маршрутизации в графах, поскольку получаемые траектории не могут быть реализованы на машинах листовой резки с ЧПУ. Выделим также первые работы, проведенные в Перми[9-10]. Из зарубежных конкурентов следует выделить группу ученых из Бельгии [11-13], которые ведут аналогичные авторам заявки исследования. Вместе с тем, по охвату проблематики, эти работы уступают заявленному проекту, ограничиваясь, в основном, оптимизацией траектории инструмента только для лазерного оборудования. Кроме того, учет термических деформаций заготовок и искажение их геометрических размеров не являются предметом исследований этой группы учёных, что делает их работы в достаточной степени академическими и не в полной мере приемлемыми для практики. Ряд исследователей из Китая, Гонконга, Японии и др. стран также периодически публикуют свои результаты[14-20].

В целом, ещё раз можно отметить, что за рамками исследований современных отечественных зарубежных коллег остаются 3 принципиальных момента:

1. Разработка алгоритмов, обеспечивающих получение глобального оптимума оптимизационной задачи маршрутизации инструмента.
2. Практическое отсутствие учета тепловых искажений заготовок при термической резке, что приводит к не технологичным решениям и искажению геометрии получаемых заготовок
3. Разработка комплексного подхода к решению оптимизационных задач для различного технологического оборудования листовой фигурной резки с ЧПУ, что ограничивает рамки исследования узкой частью проблемы.
4. Отсутствие алгоритмов, позволяющих эффективно решать задачи с непрерывными моделями (CCP, SCCP)/
5. Отсутствие оценок вычислительной сложности разрабатываемых алгоритмов.

Применение эффективных классических метаэвристических алгоритмов дискретной оптимизации (метод ветвей и границ, метод эмуляции отжига, метод муравьиной колонии, эволюционные алгоритмы, метод переменных окрестностей и др.) для дискретных моделей оптимизации траектории инструмента машин с ЧПУ возможно только при адаптации этих алгоритмов к требованиям технологических ограничений листовой резки. Однако, эта адаптация наталкивается на серьёзные проблемы, связанные с невозможностью учета некоторых технологических ограничений при "лобовом" применении упомянутых методов. [21-30]. Таким образом, необходимость в создании новых оптимизационных постановок задач, алгоритмов и программного обеспечения представляется доминантой развития методов решения исследуемой оптимизационной проблемы.

Литература

1. Верхотуров М. А., Тарасенко П. Ю., Тарасенко Р. А. Раскрой листовых материалов на фигурные заготовки: оптимизация пути режущего инструмента на основе применения группировки//Альманах современной науки и образования. 2008. № 1(8).
2. Верхотуров М. А., Тарасенко П. Ю. Математическое обеспечение задачи оптимизации пути режущего инструмента при плоском фигурном раскрое на основе цепной резки//Вестник УГАТУ (сер. «Управление, ВТ и И»). 2008. Т. 10, № 2(27). С. 123-130.
3. Ganelina N. D., Frolovsky V. D. Constructing the shortest closed tour on a set of line segments using ant colony approach//Proc. of the 9th Intern. Conf. in Computer Graphics and Artificial Intelligence. Limoges, France, 2006. P. 197-202.
4. Ганелина Н. Д., Фроловский В. Д. Декомпозиционный метод оптимизации проектирования управляющих программ тепловой резки металла на оборудовании с ЧПУ//Научный Вестник НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2006. № 2 (23). С. 9-19.
5. Пушкарева Г. В. Применение гибридного генетического алгоритма для оптимизации маршрутов//Автометрия. 2006. Т. 42, № 2. С. 68-79.
6. Makarovskikh, T. A., and A. V., Panyukov. 2016. "AOE-Trails Constructing for a Plane Connected 4-Regular Graph." In CEUR Workshop Proceedings, Vladivostok, Russia, September 19--23, Vol. 1623, 62-71.
7. Makarovskikh, T., A., Panyukov, And E., Savitskiy. 2016. "Mathematical Models and Routing Algorithms for CAM of Technological Support of Cutting Processes." In 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2016 Troyes, France, 28--30 June 2016. IFAC-PapersOnLine, edited by A., Dolgui, R., Grubbström, D., Ivanov and F., Yalaoui, Vol. 29, 821-826. Elsevier.
8. Panyukova, T., 2011. "Optimal'nye Eilerovy Pokrytiya Ploskikh Grafov [Optimal Eulerian Covers for Plane Graphs]." Diskretnyi Analiz i Issledovanie Operatsii [Discrete Analysis and Operation Research] 18 (2): 64-74. (in Russian).
9. Murzakaev, R.T., Shilov, V.S., and Bryukhanova, A.A., ITAS NESTING: Software complex for material complicating cutting, Vestn. Permsk. Nats. Issl. Politekh. Univ. Elektrotekh., Inf. Tekhnol., Sist. Upr., 2015, no. 13, pp. 15–25.
10. Faizrahmanov, R.A., Murzakaev, R.T., Shilov, V.S., and Burkova, A.V., The way to research business process for considering usable rest under cutting the sheet materials, Vestn. Permsk. Nats. Issl. Politekh. Univ. Elektrotekh., Inf. Tekhnol., Sist. Upr., 2013, no. 7, pp. 143–148.
11. Dewil, R., P., Vansteenwegen, and D., Cattrysse. 2014. "Construction Heuristics for Generating Tool Paths for Laser Cutters." International Journal of Production Research 52 (20): 5965-5984.
12. Dewil, R., P., Vansteenwegen, and D., Cattrysse. 2016. "A Review of Cutting Path Algorithms for Laser Cutters." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 87: 1865-1884.
13. Dewil, R., P., Vansteenwegen, D., Cattrysse, M., Laguna, and T., Vossen. 2015. "An Improvement Heuristic Framework for the Laser Cutting Tool Path problem." International Journal of Production
14. Vicencio K, Davis B, Gentilini I (2014) Multi-goal path plan-ning based on the generalized traveling salesman problem with neighborhoods. IROS 2014:2985–299
15. Helsgaun, K., 2014. Solving the Equality Generalized Traveling Salesman Problem Using the Lin-Kernighan-Helsgaun Algorithm. Tech. Rep. December 2013, Roskilde University, Roskilde.
16. Hoeft, J., Palekar, U. S., Sep. 1997. Heuristics for the plate-cutting traveling salesman problem. IIE Trans-actions 29 (9), 719{731}.
17. Wang, G. G., Xie, S. Q., Jun. 2005. Optimal process planning for a combined punch-and-laser cutting machine using ant colony optimization. International Journal of Production Research 43 (11), 2195{2216}.
18. Xie, S. Q., Gan, J., Wang, G. G., Vn, C., 2009. Optimal process planning for compound laser cutting and punch using Genetic Algorithms. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems 2 (1/2), 20{38}.
19. Castelino, K., D'Souza, R., and Wright, P.K., Toolpath optimization for minimizing airtime during machining, J. Manuf. Syst., 2003, vol. 22, no. 3, pp. 173–180.
20. Dueck, G., New optimization heuristics: the great deluge algorithm and the record-to-record travel, J. Comput. Phys., 1993, vol. 104, no. 1, pp. 86–92.
21. Кононова П.А., Кочетов Ю.А. Локальный поиск с чередующимися окрестностями для задачи. Джонсона с пассивным буфером // Дискрет. анализ и исслед. операций. – 2012. – Т. 19, № 5. – С. 63–82.
22. Кочетов Ю.А. Вычислительные возможности локального поиска в комбинаторной оптимизации // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2008. – Т.48, No 5. – С. 747–764.
23. Кочетов Ю., Младенович Н., Хансен П. Локальный поиск с чередующимися окрестностями // Дискретный анализ и исследование операций. Серия 2. – 2003. – Т. 10, No 1. – С. 11–43.
24. Кочетов Ю.А., Плясунов А.В. Генетический локальный поиск для задачи о разбиении графа на доли ограниченной

мощности // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2012. – Т. 52, № 1. – С. 164–176.

25. Пантелеев А.В. Метаэвристические алгоритмы поиска глобального экстремума. – М: МАИПринт, 2009. – 159 стр.
26. An Efficient Hybrid Ant Colony System for the Generalized Traveling Salesman Problem (Mohammad Reihaneh, Daniel Karapetyan), Algorithmic Operations Research 7, 22–29, 2012.
27. Efficient local search algorithms for known and new neighborhoods for the generalized traveling salesman problem (Daniel Karapetyan, Gregory Gutin), European Journal of Operational Research 219, 234–251, 2012.
28. An algorithm for the satellite downlink scheduling problem (Daniel Karapetyan, Krishna T. Malladi, Snezana Mitrovic-Minic, Abraham Punnen), CORS 2012, 11–13 June 2012, 2012.
29. Efficient local search algorithms for known and new neighborhoods for the generalized traveling salesman problem (Daniel Karapetyan, Gregory Gutin), Operations Research Seminar, 9 February 2012, Vancouver, Canada, 2012.
30. Lin-Kernighan heuristic adaptations for the generalized traveling salesman problem (Daniel Karapetyan, Gregory Gutin), European Journal of Operational Research 208, 221–232, 2011.

на английском языке

If we talk in general about the problem of optimizing the toolpath for the technological equipment for CNC sheet cutting, then at present there is no single theoretical basis for solving this problem. There are separate groups of scientists who are engaged in the investigation of particular cases of this problem. In addition, as part of CAD / CAM systems designed for cutting design and control programs for CNC sheet cutting machines, there are separate modules that allow solving some optimization problems, for example (minimizing tool idling), but do not ensure compliance with technological requirements of cutting material on CNC machines and does not allow to get cutting routes that are close to optimal from the point of view of integrated cutting cost criteria, taking into account the tool stroke, the cost of piercing etc. It should be emphasized that the algorithms implemented in commercial software are not described, as a rule, in the scientific literature.

In our country, the first works on the optimization of the design of the sheet cutting route on CNC machines were published by prof. Verkhoturov MA (Ufa) [1-2] and prof. Frolovsky V.D. (Novosibirsk) [3-5]. However, these works have not been continued. In recent years, there have been several publications conducted under the guidance of prof. Panyukov AV (Chelyabinsk) on this subject [6-8]. Note that these works can be attributed to the class of work only on routing in graphs, since the resulting trajectories cannot be implemented on CNC-cut sheet machines. We also single out the first works carried out in Perm [9–10]. Among foreign competitors, a group of scientists from Belgium [11–13] should be distinguished, who conduct studies similar to those of the authors of the application. At the same time, in terms of the scope of these problems, these works are inferior to the declared project, being limited mainly to optimizing the tool path only for laser equipment. In addition, the consideration of thermal deformations of blanks and the distortion of their geometric dimensions are not the subject of research by this group of scientists, which makes their work sufficiently academic and not fully acceptable for practice. A number of researchers from China, Hong Kong, Japan and other countries also publish their results periodically [14–20].

In general, it can once again be noted that 3 fundamental points remain beyond the framework of studies of modern domestic foreign colleagues:

1. Development of algorithms that provide global optimum at optimization of the tool routing.
2. Practical lack of consideration of thermal distortions of blanks during thermal cutting, which leads to non-technological solutions and distortion of the geometry of the resulting blanks.
3. Development of an integrated approach to solving optimization problems for various technological equipment of the CNC sheet cutting, which limits the scope of research to a narrow part of the problem.
4. The Lack of algorithms to efficiently solve problems with continuous models (CCP, SCCP).
5. The lack of estimates of the computational complexity for the developed algorithms.

The use of efficient classical meta-heuristic discrete optimization algorithms (branch and bound method, annealing emulation method, ant colony method, evolutionary algorithms, variable neighborhood method, etc.) for discrete models of optimization of the toolpath of CNC machines is only possible if these algorithms are adapted to the requirements of technological limitations sheet cutting. However, this adaptation encounters serious problems associated with the inability to take into account some technological constraints (see, in particular, file 1, illustrating the application) in the "frontal" application of the mentioned methods. [21–30]. Thus, the need to create specialized optimization problem statements, algorithms and software seems to be the dominant development of methods for solving the optimization problem under study.

References

1. Verkhoturov M. A., Tarasenko P. Yu., Tarasenko R. A. Cutting sheet materials into figured blanks: optimizing the path of the

- cutting tool based on the use of grouping // Almanac of Modern Science and Education. 2008. No. 1 (8).
2. Verkhoturov M. A., Tarasenko P. Yu. Mathematical support for the problem of optimizing the path of the cutting tool with a flat figure cut on the basis of chain cutting. Vestnik UGATU (ser. "Management, VT and I"). 2008. V. 10, No. 2 (27). P. 123-130.
3. Ganelina N. D., Frolovsky V. D. Constructing the colony approach /// Proc. of the 9th Intern. Conf. in Computer Graphics and Artificial Intelligence. Limoges, France, 2006. p. 197-202.
4. Ganelina ND, Frolovsky VD. Decomposition method for optimizing the design of control programs for thermal cutting of metal on CNC equipment // Scientific Herald of the NSTU. Novosibirsk: NSTU Publishing House. 2006. № 2 (23). C. 9-19.
5. Pushkareva G.V. Use of hybrid genetic algorithm for route optimization // Avtometriya. 2006. V. 42, No. 2. S. 68-79.
6. Makarovskikh, T. A., and A. V., Panyukov. 2016. "AOE-Trails Constructing for a Plane Connected 4-Regular Graph." In CEUR Workshop Proceedings, Vladivostok, Russia, September 19--23, Vol. 1623, 62-71.
7. Makarovskikh, T., A., Panyukov, And E., Savitskiy. 2016. "Mathematical Models and Routing Techniques for Cutting Processes." In 8th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management and Control MIM 2016 Troyes, France, 28--30 June 2016. IFAC-PapersOnLine, edited by A. , Dolgui, R., Grubbström, D., Ivanov and F., Yalaoui, Vol. 29, 821-826. Elsevier.
8. Panyukova, T., 2011. "Optimal Eulerovy Pokrytiya Ploskikh Grafov [Optimal Eulerian Covers for Plane Graphs]." Discrete Analysis and Operation Research 18 (2): 64-74. (in Russian).
9. Murzakaev, R.T., Shilov, V.S., and Bryukhanova, A.A., ITAS NESTING: Software complex for material complicating cutting, Vestn. Permsk Nats. Issl. Politekh. Univ. Elektrotekh., Inf. Tekhnol., Sist. Upr., 2015, no. 13, pp. 15-25.
10. Faizrahmanov, R.A., Murzakaev, R.T., Shilov, V.S., and Burkova, A.V., The Ventn. Permsk Nats. Issl. Politekh. Univ. Elektrotekh., Inf. Tekhnol., Sist. Upr., 2013, no. 7, pp. 143–148.
11. Dewil, R., P., Vansteenwegen, and D., Cattrysse. 2014. "Construction Heuristics for Generating Tool Paths for Laser Cutters." International Journal of Production Research 52 (20): 5965-5984.
12. Dewil, R., P., Vansteenwegen, and D., Cattrysse. 2016. "A Review of Cutting Path Algorithms for Laser Cutters." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 87: 1865-1884.
13. Dewil, R., P., Vansteenwegen, D., Cattrysse, M., Laguna, and T., Vossen. 2015. "An Improving the Heuristic Framework for the Laser Cutting Tool Path problem." International Journal of Production
14. Vicencio K, Davis B, Gentilini I (2014) Multi-goal traveling with a team of problem with neighborhoods. IROS 2014: 2985–299
15. Helsgaun, K., 2014. Using the Lin-Kernighan-Helsgaun Algorithm. Tech. Rep. December 2013, Roskilde University, Roskilde.
16. Hoeft, J., Palekar, U.S., Sep. 1997. Heuristics for the plate-cutting traveling salesman problem. IIE Trans-actions 29 (9), 719 {731}.
17. Wang, G. G., Xie, S. Q., Jun. 2005. Punch-and-laser cutting machine using ant colony optimization. International Journal of Production Research 43 (11), 2195 {2216}.
18. Xie, S. Q., Gan, J., Wang, G. G., Vn, C., 2009. Genetic Algorithms. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems 2 (1/2), 20 {38}.
19. Castelino, K., D'Souza, R., and Wright, P.K., Tool for optimization of airtime during machining, J. Manuf. Syst., 2003, vol. 22, no. 3, pp. 173–180.
20. Dueck, G. Comput. J. Comput. Phys., 1993, vol. 104, no. 1, pp. 86–92.
21. Kononova P.A., Kochetov Yu.A. Local search with alternating neighborhoods for the task. Johnson with a passive buffer // Diskret. analysis and research operations. - 2012. - Vol. 19, No. 5. - Pp. 63–82.
22. Kochetov Yu.A. Computational capabilities of local search in combinatorial optimization // Journal of computational mathematics and mathematical physics. - 2008. - T.48, No 5. - C. 747-764.
23. Kochetov Yu., Mladenovich N., Hansen P. Local search with alternating neighborhoods // Discrete analysis and operations research. Series 2. - 2003. - Vol. 10, No 1. - P. 11–43.
24. Kochetov Yu.A., Plyasunov A.V. Genetic local search for a problem on splitting a graph into fractions of limited power // Journal of Computational Mathematics and Mathematical physics. - 2012. - Vol. 52, No. 1. - P. 164–176.
25. Panteleev A.V. Metaheuristic algorithms for searching global extremum. - M: MAIPrint, 2009. - 159 p.
26. An Efficient Hybrid Colony System for Traveling Salesman Problem (Mohammad Reihaneh, Daniel Karapetyan), Algorithmic Operations Research 7, 22–29, 2012.
27. Daniel Karapetyan, Gregory Gutin, European Journal of Operational Research 219, 234–251, 2012.
28. An algorithm for the satellite downlink scheduling problem (Daniel Karapetyan, Krishna T. Malladi, Snezana Mitrovic-Minic, Abraham Punnen), CORS 2012, 11–13 June 2012, 2012.

29. Daniel Karapetyan, Gregory Gutin, Operations Research Seminar, 9 February 2012, Vancouver, Canada, 2012.

30 Lin-Kernighan heuristic adaptations for the generalized traveling salesman problem (Daniel Karapetyan, Gregory Gutin), European Journal of Operational Research 208, 221–232, 2011.

4.6. Предлагаемые методы и подходы, общий план работы на весь срок выполнения проекта и ожидаемые результаты
(объемом не менее 2 стр.; в том числе указываются ожидаемые конкретные результаты по годам; общий план дается с разбивкой по годам)

на русском языке

Для решения поставленной задачи предполагается разработать специализированный математический аппарат, основанный на моделях непрерывно-дискретной оптимизации и учитывающий специальные ограничения, возникающие в исследуемой предметной прикладной области.

Основу алгоритмического обеспечения решения оптимизационных задач формирования траектории инструмента для машин листовой резки с ЧПУ должны составить:

- оригинальная концепция сегментной резки;
- адаптированные математические модели;
- специализированные эффективные алгоритмы непрерывной и дискретной оптимизации;
- методы уменьшения тепловых деформаций материала.

В качестве подхода к решению маршрутных задач с дискретными моделями предлагается использовать иерархический подход с активным применением на каждом уровне иерархии сочетания аппарата широко понимаемого ДП (имеется в виду применение метода ДП в задачах, осложненных ограничениями различных типов, что потребует расширения самой идеологии данного метода) и новых специальных эвристических методов. Такой подход потребует построения нестандартных расширений самих исходных задач; в частности, в ряде случаев потребуются преобразование системы ограничений. Так, условия предшествования, являющиеся типичным типом ограничений в задачах маршрутизации и определяющие требования к маршруту «в целом», в конструкциях ДП преобразуются (этот подход предложен участниками проекта) к некоторым правилам вычеркивания (заданий из списка). Эти правила порождают уже ограничения на текущие перемещения, которые хорошо встраиваются в схему на основе ДП, что позволяет гарантировать получение оптимального решения для больших размерностей, чем удавалось ранее. Наряду с «глобальным» ДП предполагается использовать и локальные варианты – оптимизирующие вставки, реализуемые в итерационном режиме.

Для поиска оптимальной последовательности обхода сегментов резки в случае больших размерностей (более 40 сегментов) будут использованы также адаптированные под условия задачи приближенные алгоритмы и метаэвристики. Среди них выделим метод переменных окрестностей (Н.Младенович) и эволюционные стратегии, а также специализированные эвристические алгоритмы поиска. Во всех этих алгоритмах также необходимо учитывать специальные виды ограничений.

На верхнем уровне иерархии основной подход к формированию сегментов резки будет заключаться в активном применении нестандартных техник резки (мультиконтурная и мультисегментная резка).

Помимо этого предполагается разработать и методы решения непрерывно-дискретных задач, в которых точки врезки для вырезания сегментов резки выбираются из континуальных множеств, связанных с геометрическими контурами, описывающими геометрию вырезаемых заготовок, а последовательность обработки - из дискретного множества перестановок.

В области математической формализации задач оптимизации траектории инструмента машин листовой резки с ЧПУ предполагается:

- обобщить существующие математические постановки задач оптимизации и расширить их классификацию с использованием введенного авторами проекта понятия "сегмент резки" и "базовый сегмент резки"; (2020-2021 г.)
- формализовать "динамические ограничения" в используемых математических оптимизационных моделях в случае необходимости соблюдения правила "жесткости листа"; (2020-2021 г.)
- определить точные математические формулы для целевых функций оптимизационных задач в зависимости от исходных данных задачи (геометрические характеристики раскройных карт, число сегментов резки, технология резки, особенности технологического оборудования, свойства материала и др.); (2021 г.)
- разработать методы формирования "базовых сегментов резки" в зависимости от исходных данных задачи и с учетом соблюдения правил "жесткости" листа; (2020-2021г..)

- разработать методики сведения задачи оптимизации траектории с фиксированным числом сегментов резки (SCCP) к известным оптимизационным моделям непрерывной и дискретной оптимизации с дополнительными ограничениями (TSP, задача о последовательном обходе мегаполисов (спец. тип GTSP), CCP (непрерывно-дискретная модель задачи оптимизации траектории инструмента), ECP и др. (2020-2021 г.)

В области разработки оптимизационных алгоритмов для исследуемых моделей предполагается:

- разработать точные алгоритмы решения задачи GTSP с учетом "условий предшествования" и "динамических ограничений", обеспечивающие получения глобального оптимума за приемлемое время для размерностей, соответствующим диапазону 30-35 фигурных заготовок; (2021 г.)
- разработать параллельные алгоритмы для решения маршрутных задач большой размерности с использованием суперкомпьютеров.(2020)
- разработать приближенные алгоритмы решения задачи оптимизации траектории инструмента для расширенного класса CCP (SCCP) с использованием непрерывно-дискретной модели и базовых сегментов резки, содержащих несколько контуров вырезаемых деталей и с учетом "динамических ограничений"; (2021 г.)
- разработать приближенные алгоритмы решения задачи оптимизации траектории инструмента для всех используемых дискретных моделей (TSP, GTSP, CVRP, ECP) и базовых сегментов резки, содержащих несколько контуров вырезаемых деталей, а также с учетом "динамических ограничений"; (2021г.)
- разработать алгоритмы моделирования тепловых полей при термической резке листовых материалов на машинах с ЧПУ (2021 г.);
- оценить вычислительную сложность разработанных алгоритмов и разработать способы её уменьшения. (2021 г.)
- в последние годы специалистам в области эффективной аппроксимируемости труднорешаемых задач удалось достичь существенных успехов на пути проектирования и обоснования полиномиальных алгоритмов с оценками и аппроксимационных схем для геометрических постановок маршрутных задач (TSP, GTSP, VRP и др.). Однако исследуемые в проекте задачи нередко допускают сведение к сугубо неевклидовым постановкам этих задач. Поэтому одно из направлений исследования данного проекта будет связана с вопросами эффективной аппроксимируемости именно таких метрических постановок маршрутных задач (2021-22 гг.)

В области разработки программного обеспечения для решения задач оптимизации траектории инструмента предполагается:

- разработать комплекс программ, обеспечивающий формирования маршрута резки, удовлетворяющего как технологическим требованиям листовой резки, так и критериям времени резки и стоимости резки для всех типов технологического оборудования с ЧПУ, используемого для вырезки фигурных заготовок из листового материала; (2022 г.)
- разработать программное обеспечение для вычисления температурных полей при резке заготовок на машинах термической резки (2020-2021);
- исследовать зависимость соблюдения правил "жёсткости листа" от температуры материала в зоне завершения резки "сегмента резки"; (2022г.)
- Получить формулы и сформированные таблицы зависимости рабочей скорости машин листовой резки с ЧПУ от числа кадров управляющей программы как минимум для 4-х наиболее распространенных типов технологического оборудования, используемого для резки заготовок (2022).
- реализовать разработанные ранее алгоритмы моделирования тепловых полей при термической резке листовых материалов на машинах с ЧПУ в виде подсистемы САПР;
- на основании полученных формул разработать программное обеспечение для точного расчета целевых функций стоимости и времени резки
- провести интеграцию разработанного программного обеспечения с отечественными CAD/CAM системами (T-Flex CAD, T-Flex ЧПУ, САПР "СИРИУС" (CAD/CAM система для проектирования фигурного раскроя листового материала и подготовки управляющих программ для машин термической резки материала с ЧПУ, разработанная с участием авторов проекта)); (2022г.)
- разработать программное обеспечение для решения задач оптимизации стоимости раскроя с интегрированным критерием, включающим стоимость использованного материала и стоимость процессов резки на различном технологическом оборудовании
- разработать библиотеку тестовых примеров с размещением её в сети Интернет и провести тестирование разработанного комплекса программ. (2022г.)

Планируемые результаты:

- математические постановки задач оптимизации с использованием введенного авторами проекта понятия "сегмент резки" и "базовый сегмент резки"
- Расширенная классификация задач маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ
- Формализация "динамических ограничений" в используемых математических оптимизационных моделях в случае необходимости соблюдения правила "жесткости листа";
- точные математические формулы для целевых функций оптимизационных задач в зависимости от исходных данных задачи (геометрические характеристики раскройных карт, число сегментов резки, технология резки, особенности технологического оборудования, свойства материала и др.);
- методы формирования "базовых сегментов резки" в зависимости от исходных данных задачи и с учетом соблюдения правил "жесткости" листа;
- методики сведения задачи оптимизации траектории с фиксированным числом сегментов резки (SCCP) к известным оптимизационным моделям непрерывной и дискретной оптимизации с дополнительными ограничениями (TSP, CCP, ECP и др.)
- точные алгоритмы решения задачи GTSP с учетом "условий предшествования" и "динамических ограничений", обеспечивающие получения глобального оптимума за приемлемое время для размерностей, соответствующим диапазону 30-35 фигурных заготовок;
- параллельные алгоритмы для решения маршрутных задач большой размерности с использованием суперкомпьютеров.
- приближенные алгоритмы решения задачи оптимизации траектории инструмента для расширенного класса CCP (SCCP) с использованием непрерывно-дискретной модели и базовых сегментов резки, содержащих несколько контуров вырезаемых деталей и с учетом "динамических ограничений";
- приближенные алгоритмы решения задачи оптимизации траектории инструмента для всех используемых дискретных моделей (TSP, GTSP, CVRP, ECP) и базовых сегментов резки, содержащих несколько контуров вырезаемых деталей, а также с учетом "динамических ограничений"; (2021г.)
- алгоритмы моделирования тепловых полей при термической резке листовых материалов на машинах с ЧПУ ;
- оценки вычислительной сложности разработанных алгоритмов и способы её уменьшения.
- эффективные приближенные алгоритмы для метрических постановок маршрутных задач
- комплекс программ, обеспечивающий формирования маршрута резки, удовлетворяющего как технологическим требованиям листовой резки, так и критериям времени резки и стоимости резки для всех типов технологического оборудования с ЧПУ , используемого для вырезки фигурных заготовок из листового материала;
- программное обеспечение для вычисления температурных полей при резке заготовок на машинах термической резки ;
- формулы и сформированные таблицы зависимости рабочей скорости машин листовой резки с ЧПУ от числа кадров управляющей программы
- программное обеспечение для решения задач оптимизации стоимости раскроя с интегрированным критерием, включающим стоимость использованного материала и стоимость процессов резки на различном технологическом оборудовании
- интеграция разработанного программного обеспечения с отечественными CAD/CAM системами (T-Flex CAD, T-Flex ЧПУ, САПР "СИРИУС"
- библиотека тестовых примеров
- 2 монографии по теме проекта

на английском языке

To solve this problem, it is supposed to develop a specialized mathematical apparatus based on continuous discrete optimization models and taking into account special restrictions that arise in the studied applied domain. The basis of the algorithmic support for solving optimization problems of forming the tool path for CNC sheet cutting machines should be:

- The original concept of segment cutting;
- adapted mathematical models;
- specialized effective algorithms for continuous and discrete optimization;
- methods for reducing thermal deformation of the material.

As an approach to solving route problems with discrete models, it is proposed to use a hierarchical approach with the active use at each level of the hierarchy of a combination of the apparatus of a widely understood DP (meaning the use of the DP method in problems complicated by restrictions of various types, which will require an expansion of the ideology of this

method itself) and new special heuristic methods. Such an approach will require the construction of non-standard extensions of the original tasks themselves; in particular, in some cases a transformation of the system of constraints will be required. So, precedence conditions, which are a typical type of restrictions in routing problems and defining requirements for the route as a whole, in DP constructions are converted (this approach was proposed by the project participants) to some rules for deleting (tasks from the list). These rules already create restrictions on current movements, which are well integrated into the DP-based scheme, which allows us to guarantee an optimal solution for large dimensions than was possible previously. Along with the "global" DP, it is also proposed to use local options - optimizing inserts implemented in iterative mode.

Approximate algorithms and metaheuristics adapted to the problem conditions will also be used to search for the optimal sequence of traversing cutting segments in the case of large dimensions (more than 40 segments). Among them, we distinguish the method of variable neighborhoods (N. Mladenovich) and evolutionary strategies, as well as specialized heuristic search algorithms. In all of these algorithms, special types of constraints must also be taken into account.

At the top level of the hierarchy, the main approach to the formation of cutting segments will be the active use of non-standard cutting techniques (multi-contour and multi-segment cutting).

In addition, it is planned to develop methods for solving continuously discrete problems in which the cut-in points for cutting cutting segments are selected from continuum sets associated with geometric contours describing the geometry of the cut workpieces, and the processing sequence from a discrete set of permutations.

In the field of mathematical formalization of optimization problems for the tool path of CNC sheet cutting machines, it is assumed:

- generalize the existing mathematical statements of optimization problems and expand their classification using the concepts of "cutting segment" and "basic cutting segment" introduced by the authors of the project;
- formalize the "dynamic constraints" in the used mathematical optimization models, if necessary, comply with the rule "sheet stiffness"; (2020-2021)
- determine the exact mathematical formulas for the objective functions of optimization tasks depending on the initial data of the problem (geometric characteristics of cutting cards, the number of cutting segments, cutting technology, features of technological equipment, material properties, etc.); (2021)
- to develop methods for the formation of "basic cutting segments" depending on the initial data of the task and taking into account compliance with the rules of "rigidity" of the sheet; (2020-2021.)
- develop techniques for reducing the path optimization problem with a fixed number of cutting segments (SCCP) to the well-known continuous and discrete optimization models with additional restrictions (TSP, the task of sequentially traversing megacities (special type GTSP), CCP (continuous-discrete model of the path optimization problem instrument), ECP, etc. (2020-2021)

In the field of development of optimization algorithms for the studied models, it is supposed:

- to develop accurate algorithms for solving the GTSP problem, taking into account the "precedence conditions" and "dynamic constraints", which provide a global optimum for an acceptable time for dimensions corresponding to the range of 30-35 contours; (2021)
- develop parallel algorithms for solving routing problems of large dimension using supercomputers. (2020)
- to develop approximate algorithms for solving the problem of optimizing the tool path for the extended CCCP (SCCP) class using a continuously discrete model and basic cutting segments containing several contours of the parts to be cut and taking into account "dynamic constraints"; (2021)
- to develop approximate algorithms for solving the problem of optimizing the tool path for all used discrete models (TSP, GTSP, CVRP, ECP) and basic cutting segments containing several contours of the parts to be cut, as well as taking into account "dynamic constraints"; (2021)
- to develop algorithms for modeling thermal fields during thermal cutting of sheet materials on CNC machines (2021);
- evaluate the computational complexity of the developed algorithms and develop ways to reduce it. (2021)
- In recent years, specialists in the field of effective approximability of difficult problems have succeeded in achieving significant successes in the design and justification of polynomial algorithms with estimates and approximation schemes for geometric statements of route problems (TSP, GTSP, VRP, etc.). However, the problems studied in the project often admit reduction to purely non-Euclidean statements of these problems. Therefore, one of the areas of research of this project will be related to the issues of effective approximability of precisely such metric statements of route problems (2021-22).

In the field of software development for solving the problems of optimizing the toolpath, it is assumed:

- develop a set of programs that ensures the formation of a cutting route that satisfies both the technological requirements of sheet cutting and the criteria for cutting time and cost of cutting for all types of CNC processing equipment used to cut curly

blanks from sheet material; (2022)

- develop software for calculating temperature fields when cutting workpieces on thermal cutting machines (2020-2021);
- to investigate the dependence of compliance with the rules of "rigidity of the sheet" on the temperature of the material in the zone of completion of the cutting of the "cutting segment"; (2022)
- Obtain formulas and generated tables of the dependence of the operating speed of CNC sheet cutting machines on the number of frames of the control program for at least 4 of the most common types of technological equipment used for cutting workpieces (2022).
- implement the previously developed algorithms for modeling thermal fields during thermal cutting of sheet materials on CNC machines in the form of a CAD subsystem;
- on the basis of the formulas obtained, develop software for the exact calculation of the objective functions of cost and cutting time
- to integrate the developed software with domestic CAD / CAM systems (T-Flex CAD, T-Flex CNC, CAD "SIRIUS" (CAD / CAM system for designing figured cutting of sheet material and preparing control programs for thermal cutting machines with CNC material, developed with the participation of the authors of the project)); (2022)
- develop software to solve the problems of optimizing the cost of cutting with an integrated criterion, including the cost of the material used and the cost of cutting processes on various technological equipment
- develop a library of test cases with its placement on the Internet and test the developed set of programs. (2022)

Expected Results:

- mathematical statements of optimization problems using the concepts "cutting segment" and "basic cutting segment" introduced by the authors of the project
- Advanced classification of routing tasks for tooling CNC sheet cutting machines
- Formalization of "dynamic constraints" in the used mathematical optimization models, if necessary, comply with the rule "sheet stiffness";
- exact mathematical formulas for the objective functions of optimization tasks depending on the initial data of the problem (geometric characteristics of cutting cards, the number of cutting segments, cutting technology, features of technological equipment, material properties, etc.);
- methods for the formation of "basic cutting segments" depending on the initial data of the task and taking into account the observance of the rules of "rigidity" of the sheet;
- techniques for reducing the path optimization problem with a fixed number of cutting segments (SCCP) to known optimization models of continuous and discrete optimization with additional restrictions (TSP, CCP, ECP, etc.)
- accurate algorithms for solving the GTSP problem, taking into account the "precedence conditions" and "dynamic constraints", providing a global optimum for an acceptable time for dimensions corresponding to the range of 30-35 figured blanks;
- parallel algorithms for solving routing problems of large dimension using supercomputers.
- approximate algorithms for solving the problem of optimizing the tool path for the extended CCP (SCCP) class using a continuously discrete model and basic cutting segments containing several contours of the parts to be cut and taking into account "dynamic constraints";
- approximate algorithms for solving the problem of optimizing the tool path for all used discrete models (TSP, GTSP, CVRP, ECP) and basic cutting segments containing several contours of the parts to be cut, as well as taking into account "dynamic constraints"; (2021)
- Algorithms for modeling thermal fields during thermal cutting of sheet materials on CNC machines;
- estimates of the computational complexity of the developed algorithms and methods for its reduction.
- effective approximate algorithms for metric statements of route problems
- a set of programs that ensures the formation of a cutting route that meets both the technological requirements of sheet cutting and the criteria for cutting time and cost of cutting for all types of CNC processing equipment used to cut curly blanks from sheet material;
- software for calculating temperature fields when cutting workpieces on thermal cutting machines;
- formulas and generated tables of the dependence of the operating speed of CNC sheet cutting machines on the number of frames of the control program
- software for solving problems of optimizing the cost of cutting with an integrated criterion, including the cost of the material used and the cost of cutting processes on various technological equipment
- integration of developed software with domestic CAD / CAM systems (T-Flex CAD, T-Flex CNC, CAD "SIRIUS"
- library of test cases
- 2 monographs on the topic of the project

4.7. Имеющийся у научного коллектива научный задел по проекту, наличие опыта совместной реализации проектов (указываются полученные ранее результаты, разработанные программы и методы)

Коллектив предлагаемого проекта имеют целый ряд принципиальных результатов, касающихся рассматриваемой проблемы. Это относится и к оригинальным постановкам задач моделирования маршрута инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ, расширяющих существующие классы решаемых задач, и к вопросам формализации этих задач с учетом технологических ограничений резки, и к разработке алгоритмов для получения точных и приближенных решений, и к вопросам исследования точности вычисления целевых функций, и к методикам создания эффективного программного обеспечения для оптимизации временных и стоимостных параметров процесса резки. На базе предложенной ещё в 2009г. руководителем проекта формализации основной оптимизационной задачи маршрутизации инструмента для машин листовой резки материала с ЧПУ в форме обобщенной задачи курьера с дополнительными ограничениями (GTSP) [1], в 2015 г. [2] был разработан алгоритм, реализующий специальную схему динамического программирования (ДП) с учетом технологического требования вложенности деталей (т.н. условий предшествования). Алгоритм обеспечивал получение точных решений за приемлемое время (на обычном персональном компьютере) для дискретного варианта задачи со стандартной техникой резки по контуру для двадцати пяти контуров, задающих геометрию границ деталей. В качестве математической модели для решения этой оптимизационной задачи была использована модель мегаполисов проф. А.Г. Ченцова. В дальнейшем при реализации этого алгоритма с процедурами распараллеливания удалось получать точное решение для размерностей в диапазоне более тридцати контуров. [3]. Следует отметить, что зарубежные исследователи для решения подобных оптимизационных задач используют только эвристические алгоритмы, реализующие известные метаэвристики. Вопросы, связанные с получением точных решений, были обобщены в фундаментальной работе [4]. Параллельно разрабатывались и алгоритмы решения задач большой размерности, использующие аппарат ДП (см., например, [5-7]. В 2015 г. руководителем проекта была предложена концепция «сегмента резки» [8], которая позволила с единых позиций существенно расширить существующую классификацию задач маршрутизации инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ (введены новые классы SCCP, а затем – GS CCP). Было показано, что для этих классов задач возможно применение модели мегаполисов. В работе [9] (вместе с П.А.Ченцовым) был формализован учёт т.н. правила жёсткости детали [10], которое относится к классу "динамических ограничений". Отметим, что "динамические ограничения" (термин, введенный участниками проекта для ограничений в маршрутных задачах, в которых условия задачи меняются в зависимости от истории построения частичного решения) порождают принципиально новый тип оптимизационных задач, который требует своего исследования. Для машин термической резки с ЧПУ динамические ограничения описаны в форме сформулированных автором проекта эвристических геометрических правил выбора точек врезки в материал и последовательности резки контуров (выше упомянутое правило «жёсткости детали» и правило «жёсткости листа») [10]. Несоблюдение этих правил приводит к существенным деформациям материала и искажениям геометрических размеров вырезаемых деталей. В работах [11,12] совместно Е.Г.Полищуком было показано, что динамические ограничения в задачах маршрутизации инструмента машин термической резки коррелируют с более высокой температурой материала в зонах завершения резки, что позволяет использовать разработанный инструментарий для моделирования тепловых полей в листе для выбора допустимых вариантов маршрута. Отметим, что совместно П.А. Ченцовым [13] был разработан эвристический алгоритм, учитывающий и правило жёсткости листа, однако пока не удалось учесть это правило в алгоритмах, основанных на методе динамического программирования. Среди работ, реализующих эвристические алгоритмы, учитывающие технологические требования листовой резки на машинах с ЧПУ и ориентированные на решение задач большой размерности, выделим [14,15]. Большое исследование практических вопросов моделирования процесса резки для лазерных (CO₂) машин с ЧПУ было проведено совместно с А.Ф.Таваевой [16-21]. В этих работах впервые исследованы вопросы точного вычисления в оптимизационных процедурах целевых функций, задаваемых величинами времени резки и стоимости резки. Была установлена зависимость фактической скорости резки от числа команд управляющей программы резки, описана методика вычисления констант, определяющих величину стоимости резки для различных марок и толщин материала, были предложены эвристические способы маршрутизации инструмента, существенно уменьшающие стоимость процесса резки.

Значительные результаты по оценке вычислительной сложности алгоритмов дискретной оптимизации были получены М.Ю. Хачае, известным специалистом в области теории и методов комбинаторной оптимизации и статистического обучения. В частности, (совместно с учениками Е.Д.Незнахиной, Ю.Ю.Огородниковым) им получены рекордные результаты в области полиномиальной аппроксимируемости в классе алгоритмов с гарантированными оценками точности для серии постановок задач оптимальной маршрутизации транспорта (VRP), коммивояжера (TSP) и их обобщений, обладающих широким спектром приложений в области конструирования высокопроизводительных

вычислительных систем и исследования операций. В том числе, - показано, что известная задача о покрытии реберно-взвешенного графа заданным числом циклов минимального суммарного веса (Min-k-SCCP) полностью наследует сложностные свойства классической задачи коммивояжера (TSP), являющейся частным случаем этой задачи при $k=1$. А именно: в общей постановке задача NP-трудна в сильном смысле и неаппроксимируема (при P не равном NP), в метрическом случае задача APX-полна, и обладает эффективными полиномиальными приближенными схемами (EPTAS) в евклидовых пространствах произвольной фиксированной размерности [22-24]; - обоснована эффективная разрешимость обобщенной задачи коммивояжера (GTSP) в классе квази- и псевдопирамидальных маршрутов; как следствие построено существенное уточнение знаменитой теоремы К. Пападимитриу (1977 г.) о труднорешаемости задачи коммивояжера на евклидовой плоскости [25-27]; - построена серия аппроксимационных схем для актуальных постановок задачи оптимальной маршрутизации при дополнительных ограничениях на грузоподъемность и временные промежутки обслуживания [28-30]. Некоторые алгоритмы оптимизации маршрута инструмента были реализованы в виде подсистемы разработанной под руководством автора проекта системы автоматизированного проектирования (САПР) "Сириус", предназначенной для автоматизации проектирования фигурного раскроя, а также для автоматизации подготовки управляющих программ для машин фигурной листовой резки машин с ЧПУ. САПР "Сириус" внедрена на целом ряде российских предприятий.

В целом, можно отметить, что екатеринбургская научная школа оптимизации маршрутных задач для технологического оборудования листовой резки с ЧПУ, включающая в себя исследователей Уральского федерального университета и Института математики и механики им. Н.Н. Красовского Уро РАН, является ведущим российским коллективом по анонсированной в проекте проблеме. Отметим также, что по целому ряду аспектов научный уровень проведенных в последние пять лет этим коллективом исследований, опережают уровень результатов ведущих зарубежных ученых, работающих в этой предметной области.

В 2019 руководителем проекта совместно с А.Г.Ченцовым и П.А.Ченцовым подготовлена монография «Оптимальная маршрутизация инструмента машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением. Математические модели и алгоритмы», которая подана на конкурс РФФИ на издание лучших научных трудов (заявка № 20-18-00017 Д).

Список литературы

1. Петунин А.А. Методологические и теоретические основы автоматизации проектирования раскроя листовых материалов на машинах с числовым программным управлением: дис. д.т.н.: 05.13.12. Екатеринбург, 2009. - 348 с.
2. Петунин, А. А., Ченцов, А. Г., & Ченцов, П. А. (2015). ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ МАРШРУТИЗАЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЛИСТОВОЙ РЕЗКЕ ДЕТАЛЕЙ. Моделирование и анализ информационных систем, 22(2(56)), 278-294.
3. Chentsov, A. G., Chentsov, P. A., Petunin, A. A., & Seseikin, A. N. (2016). Routing problems: constraints and optimality. *ifac papersonline*, 49(12), 640-644. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.756>.
4. Chentsov, A. G., Chentsov, P. A., Petunin, A. A., & Seseikin, A. N. (2018). Model of megalopolises in the tool path optimisation for CNC plate cutting machines. *International Journal of Production Research*, 56(14), 4819-4830. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1421784>
5. Petunin, A. A., Chentsov, A. A., Chentsov, A. G., & Chentsov, P. A. (2017). Elements of Dynamic Programming in Local Improvement Constructions for Heuristic Solutions of Routing Problems with Constraints. *Automation and Remote Control*, 78(4), 666-681. <https://doi.org/10.1134/S0005117917040087>
6. Petunin, A. A., Chentsov, A. G., & Chentsov, P. A. (2019). Optimizing Insertions in a Constraint Routing Problem with Complicated Cost Functions. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 58(1), 113-125. <https://doi.org/10.1134/S106423071901012X>
7. Petunin, A. A., Seseikin, A. N., Tashlykov, O. L., & Chentsov, A. G. (2017). Route optimization on the nuclear objects and in mechanical engineering. *CEUR Workshop Proceedings*, 1825, 69-79.
8. Petunin, A. A. (2015). Modeling of tool path for the CNC sheet cutting machines. В Pasheva, N. Popivanov, & G. Venkov (Ред.), 41st International Conference "Applications of Mathematics in Engineering and Economics", AMEE 2015 (Том 1690). [060002] (AIP Conference Proceedings; Том 1690). American Institute of Physics Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4936740>
9. Chentsov, P. A., & Petunin, A. A. (2016). Tool Routing Problem for CNC Plate Cutting Machines. *Ifac papersonline*, 49(12), 645-650. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.762>
10. Petunin, A. A., & Stlios, C. (2016). Optimization Models of Tool Path Problem for CNC Sheet Metal Cutting Machines. *Ifac papersonline*, 49(12), 23-28. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.544>.
11. Петунин А.А., Полищук Е.Г. Расчет тепловых полей при термической резке заготовок из листовых материалов Информационные технологии и системы. научн. изд.: труды. 5-й междунар. научн. конф. ИТиС-2016 - Челябинск: ЧелГУ, 2016. - С.142-144.
12. Petunin, A. A., Polishuk, E. G., Chentsov, A. G., Chentsov, P. A., & Ukolov, S. S. (2016). About some types of constraints in problems of routing. В Pasheva, N. Popivanov, & G. Venkov (Ред.), APPLICATIONS OF MATHEMATICS IN ENGINEERING AND

- ECONOMICS (AMEE'16) (Том 1789). [060002] (AIP Conference Proceedings; Том 1789). American Institute of Physics Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4968494>
13. Petunin, A. A., Chentsov, A. G., & Chentsov, P. A. (2017). About routing in the sheet cutting. Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software, 10(3), 25-39. <https://doi.org/10.14529/mmp170303>
 14. Chentsov, P. A., Petunin, A. A., Sesekin, A. N., Shipacheva, E. N., & Sholohov, A. E. (2015). Heuristic algorithms for solving of the tool routing problem for CNC cutting machines. В Pasheva, N. Popivanov, & G. Venkov (Ред.), 41st International Conference "Applications of Mathematics in Engineering and Economics", AMEE 2015 (Том 1690). [030004] (AIP Conference Proceedings; Том 1690). American Institute of Physics Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4936703>.
 15. Shipacheva, E. N., Petunin, A. A., & Berezin, I. M. (2017). A genetic algorithm used for solving one optimization problem. В Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2017: Proceedings of the 11th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (Том 1915). [040052] American Institute of Physics Inc.. <https://doi.org/10.1063/1.5017400>.
 16. Петунин, А. А., & Таваева, А. Ф. (2015). ОБ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ МАШИН ФИГУРНОЙ ЛИСТОВОЙ РЕЗКИ С ЧПУ ПРИ УСЛОВИИ НЕПОСТОЯНСТВА СКОРОСТИ РАБОЧЕГО ХОДА. Фундаментальные исследования, (6-1), 56-62
 17. Таваева, А. Ф., & Петунин, А. А. (2017). The cutter speed determination of CNC laser cutting machines for precise calculation of objective function of tool path problem. В 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 - Proceedings [7911618] Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911618>
 18. Таваева, А. Ф., & Петунин, А. А. (2017). НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ МАШИН ФИГУРНОЙ ЛИСТОВОЙ РЕЗКИ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, (9), 147-153. https://doi.org/10.12737/article_59a93b0b29fa13.40976330.
 19. Таваева, А. Ф., & Петунин, А. А. (2017). ВЫЧИСЛЕНИЕ СТОИМОСТИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА МАШИНАХ С ЧПУ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ЯЗЫКА УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, (12), 194-202. https://doi.org/10.12737/article_5a27cb8ff243c9.75015147
 20. Таваева, А. Ф., & Петунин, А. А. (2017). Investigation of Cutting Speed Influence on Optimality of the Tool Path Route for CNC Laser Cutting Machines. В 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings [8076452] Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076452>
 21. ТАВАЕВА, А. Ф., & Петунин, А. А. (2018). ТОЧНОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ СТОИМОСТИ РЕЗКИ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА НА МАШИНЕ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА. Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 6(4 (23)), 298-312. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2018.23.4.022>
 22. Michael Khachay and Katherine Neznakhina. Approximability of the minimum-weight k-size cycle cover problem. Journal of Global Optimization (WoS Q1, IF=1.63, Q1 SJR). 2016. Vol. 66. no. 1. p. 65-82. (<https://doi.org/10.1007/s10898-015-0391-3>)
 23. Khachay, M. Polynomial Time Approximation Scheme for the Minimum-weight k-Size Cycle Cover Problem in Euclidean space of an arbitrary fixed dimension / M.Khachay, K.Neznakhina // IFAC-PapersOnLine (Q3 SJR). 2016. Vol. 49, Issue 12 : 8th IFAC Conf. on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM 2016), Troyes, France, 28–30. June 2016. P. 6–10. (<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.541>)
 24. Mikhail Khachai. A polynomial-time approximation scheme for the Euclidean problem on a cycle cover of a graph / M.Yu. Khachai, E.D. Neznakhina // Proc. Steklov Inst. Mathematics (IF=0.7). 2015. Vol.289, suppl.1. C.111-125 (<https://doi.org/10.1134/S0081543815050107>)
 25. Khachay, M. and Neznakhina, K.: Complexity and approximability of the Euclidean generalized traveling salesman problem in grid clusters. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 2019. WoS Q3 IF=1.01, Scopus Q3 SJR (<https://doi.org/10.1007/s10472-019-09626-w>)
 26. Khachai, M., Neznakhina E. Approximation Schemes for the Generalized Traveling Salesman Problem // Proc. Steklov Inst. Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR). 2017. Vol. 299, Suppl. 1. P. 97-105. (<https://doi.org/10.1134/S0081543817090127>)
 27. Khachay, M., Neznakhina, K.: Pseudo-pyramidal tours and efficient solvability of the euclidean generalized traveling salesman problem in grid clusters // Lecture notes in Computer Science (Q2 SJR). 2019 P. 441-446 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-05348-2_38)
 28. Khachay, M. and Ogorodnikov, Yu.: Polynomial-Time Approximation Scheme for the Capacitated Vehicle Routing Problem

with Time Windows. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. 2019. Vol. 307. Suppl. 1. WoS Q3 IF=0.7, Scopus Q2 SJR

29. Khachay, M. and Ogorodnikov, Yu.: Approximation scheme for the capacitated vehicle routing problem with time windows and non-uniform demand. LNCS, 2019, Vol. 11548, P. 309-327. Scopus Q2 SJR (https://doi.org/10.1007/978-3-030-22629-9_22)

30. Khachay, M., Ogorodnikov, Y.: Efficient PTAS for the Euclidean CVRP with time windows // Lecture Notes in Computer Science (Q2 SJR). 2018. Vol. 11179. P. 318-328 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-11027-7_30)

4.8. Перечень оборудования, материалов, информационных и других ресурсов, имеющихся у научного коллектива для выполнения проекта (в том числе – описывается необходимость их использования для реализации проекта)

Имеется 10 персональных компьютеров. Все участники проекта имеют возможность проводить вычисления на суперкомпьютере УРАН в ИММ УрО РАН.

4.9. План работы на первый год выполнения проекта (в том числе указываются запланированные командировки (экспедиции) по проекту) на русском языке

1. Построение математических моделей задач маршрутизации режущего инструмента машин листовой резки с ЧПУ на основе формализации понятия «сегментной резки» при наличии различных ограничений, включающих в себя условия предшествования и так называемые «динамические ограничения».
2. Развитие метода динамического программирования для решения задач маршрутизации с выше оговоренными ограничениями. Разработка эвристических алгоритмов для задач маршрутизации высокой размерности и их тестирование на известных тестовых задачах. Построение методов и алгоритмов улучшения эвристических решений на основе фрагментов, использующих ДП в локальном варианте.
3. Сведение задачи оптимизации траектории с фиксированным числом сегментов резки к известным моделям непрерывной и дискретной оптимизации при нестандартных ограничениях.
4. Оценка вычислительной сложности разработанных алгоритмов.
5. Построение программных комплексов для решения задачи маршрутизации движения инструмента в реальном диапазоне размерностей для непрерывных моделей (ССР и SCCP). Применение к рассматриваемым задачам алгоритма с чередующимися окрестностями Н.Младеновича.
6. Исследование влияния термических характеристик на жесткость листа и их учет при формировании маршрута резки листового материала.
7. Исследование влияния условий предшествования на сложность решения маршрутных задач методом динамического программирования.
8. Разработка и реализация эволюционных стратегий для оптимизации маршрута режущего инструмента.
9. Исследование зависимости рабочей скорости машин листовой резки с ЧПУ от числа кадров управляющей программы с целью формирования корректирующих коэффициентов в целевой функции при оптимизации времени резки заготовок.
10. Подготовка и опубликование монографии "Оптимальная маршрутизация инструмента машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением. Математические модели и алгоритмы".

Планируемые командировки в 2020:

1. 21st IFAC World Congress in Berlin, Germany, July 12-17, 2020 - три участника
(на этом конгрессе участниками проекта: А.А.Петуниным и М.Ю.Хачаем совместно с проф. Хрисостомосом Стилиосом (Греция) планируется организация специальной секции по теме проекта)
2. International conference "Mathematical Optimization Theory and Operations Research" (MOTOR 2020), 6-10 июля 2020, Novosibirsk - три участника
3. International Conference "Optimization and applications" (OPTIMA); Optima -2020, октябрь, Петровац, Черногория - два участника.

на английском языке

1. Construction of mathematical models of cutting tool routing problems for the CNC sheet cutting machines based on the formalization of the concept of "segment cutting" with various constraints, including precedence conditions and the so-called "dynamic constraints".
2. Development of a dynamic programming method for solving routing problems with the above specified limitations.

- Development of heuristic algorithms for high-dimensional routing problems and their testing on well-known test problems.
- Construction of methods and algorithms for improving heuristic solutions based on fragments using DP in the local version.
- 3. Reducing the path optimization problem with a fixed number of cutting segments to known models of continuous and discrete optimization with non-standard constraints.
- 4. Evaluation of the computational complexity of the developed algorithms.
- 5. Construction of software systems for solving the problem of routing tool movement in a real range of dimensions for continuous models (CCP and SCCP). Application to the considered problems of an algorithm with alternating neighborhoods of N. Mladenovich.
- 6. The study of the influence of thermal characteristics on the rigidity of the sheet and their consideration when forming the route of cutting sheet material.
- 7. Investigation of the influence of precedence conditions on the complexity of solving routing problems using dynamic programming.
- 8. Development and implementation of evolutionary strategies to optimize the path of the cutting tool.
- 9. Investigation of the dependence of the working speed of CNC sheet cutting machines on the number of frames of the control program in order to generate correction factors in the objective function while optimizing the time for cutting blanks.
- 10. Preparation and publication of the monograph.

Planned business trips in 2020:

- 1. 21st IFAC World Congress in Berlin, Germany, July 12-17, 2020. Three members (at this Congress the project participants: A.A.Petunin and M.Yu. Khachai together with Prof. Chrysostomos Stylios (Greece) will organize a special session on the topic of the project)
- 2. International conference "Mathematical Optimization Theory and Operations Research" (MOTOR 2020), July 6-10, 2020, Novosibirsk. Three members
- 3. International Conference "Optimization and applications" (OPTIMA); Optima -2020, Petrovac, Montenegro, October. Two members

4.10. Планируемое на первый год содержание работы каждого основного исполнителя проекта (включая руководителя проекта)

Петунин А.А. :

- 1. Разработка математической формализации задач маршрутизации инструмента на основе понятий «сегментной резки» и «динамических ограничений» для класса Generalized SCCP,
- 2. Разработка приближенного алгоритма решения задачи CCP для непрерывной модели с использованием методов вычислительной геометрии и комбинаторной оптимизации (совместно с Е.Г.Полищуком, С.С.Уколовым).
- 3. Разработка методики точного вычисления целевых функций времени резки и стоимости резки для машин лазерной и плазменной резки с ЧПУ. (совместно с А.Ф.Таваевой)
- 4. Подготовка (совместно с П.А. Ченцовым) монографии "Оптимальная маршрутизация инструмента машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением. Математические модели и алгоритмы".
- 5. Подготовка к публикации 2 статей
- 5. Общее руководство проектом.

Хачай М.Ю.

- 1. Построения полиномиальных приближенных схем для задач CVRP
- 2. Построение полиномиальных приближенных схем для задач GTSP с учетом условий предшествования
- 3. Адаптация разработанных схем для использования при решении задачи маршрутизации инструмента (для случая дискретных моделей).
- 4. Подготовка к публикации 2 статей

Ченцов П. А.

- 1. Реализация метода ДП для точного решения задачи SCCP для оптимизации траектории инструмента машины с ЧПУ с учетом динамических ограничений типа "жесткость детали" и распараллеливанием вычислительной процедуры.
- 2. Интеграция разработанного программного обеспечения для решения задач CCP и SCCP с высокой точностью (для дискретных моделей) и САПР "Сириус".
- 3. Тестирование разработанного программного обеспечения на суперкомпьютере ИММ УрО РАН.
- 4. Подготовка (совместно с А.А. Петуниным) монографии "Оптимальная маршрутизация инструмента машин фигурной

листовой резки с числовым программным управлением. Математические модели и алгоритмы".

5. Подготовка к публикации 1 статьи.

4.11. Ожидаемые в конце первого года конкретные научные результаты *(форма изложения должна дать возможность провести экспертизу результатов и оценить степень выполнения заявленного в проекте плана работы)*
на русском языке

Предполагается, что к концу первого года будет осуществлена общая формализация задачи маршрутизации инструмента в форме обобщенной задачи SCCP, основанная на понятиях «сегментная резка» и учитывающая "динамические" ограничения.

Будут разработаны алгоритмы, основанные на методе динамического программирования, для решения задач маршрутизации режущего инструмента при наличии различных ограничений, включая «динамические ограничения» с получением глобального экстремума за приемлемое время для 30-35 контуров, описывающих детали.

Также будут исследоваться различные варианты сведения задачи оптимизации траектории с фиксированным числом сегментов резки к известным моделям непрерывной и дискретной оптимизации с нестандартными ограничениями (CCP и GTSP).

Для непрерывной модели CCP будут впервые разработаны приближенные алгоритмы оптимизации, а также сформулированы необходимые и достаточные условия получения локальных и глобальных экстремумов.

Будут исследоваться вопросы вычислительной сложности разрабатываемых алгоритмов. Разработанные алгоритмы будут реализованы в виде комплексов программ, формирующих маршруты резки в форме, удобном для их преобразования в конкретные управляющие программы.

Предполагается создание комплекса программ, моделирующих изменяющиеся во времени температурные поля, возникающие при термической резке для случая мультиконтурной резки. Будет исследовано влияние условий предшествования на сложность решения маршрутных задач методом динамического программирования.

Будут реализованы алгоритмы решения задачи CCP, основанные на авторских модификациях алгоритмов локального поиска, VNS, и эволюционных стратегиях.

Будут предложены новые полиномиальные приближенные алгоритмы с теоретическими оценками точности и аппроксимационные схемы для метрических постановок задач CVRP и GTSP.

Будут также получены формулы и сформированы таблицы зависимости рабочей скорости машин листовой резки с ЧПУ от числа кадров управляющей программы для нескольких типов лазерных и плазменных машин и наиболее применяемых для листовой резки марок металла.

По результатам работы будет опубликована монография "Оптимальная маршрутизация инструмента машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением. Математические модели и алгоритмы".

на английском языке

It is assumed that by the end of the first year a general formalization of the tool routing task will be carried out in the form of a generalized SCCP task, based on the concepts of "segment cutting" and taking into account "dynamic" restrictions.

Algorithms based on the dynamic programming method will be developed to solve the routing problems of the cutting tool in the presence of various constraints, including "dynamic constraints" with a global extremum for an acceptable time for 30-35 circuits describing the details.

Also, various options will be investigated for reducing the path optimization problem with a fixed number of cutting segments to well-known continuous and discrete optimization models with non-standard restrictions (CCP and GTSP).

For a continuous CCP model, approximate optimization algorithms will be developed for the first time, and the necessary and sufficient conditions for obtaining local and global extrema will be formulated.

The computational complexity of the developed algorithms will be investigated. The developed algorithms will be implemented in the form of complexes of programs that form cutting routes in a form convenient for their conversion into specific control programs.

It is supposed to create a set of programs simulating time-varying temperature fields that occur during thermal cutting for the case of multi-circuit cutting. The influence of precedence conditions on the complexity of solving routing problems by dynamic programming will be investigated.

Algorithms for solving the CCP problem based on the author's modifications of the local search algorithms, VNS, and evolutionary strategies will be implemented.

New polynomial approximate algorithms with theoretical accuracy estimates and approximation schemes for metric statements of the CVRP and GTSP problems will be proposed.

Formulas will also be obtained and tables will be generated for the dependence of the operating speed of CNC sheet cutting

machines on the number of frames of the control program for several types of laser and plasma machines and those most used for sheet cutting of metal grades.

According to the results of the work, a monograph will be published: "Optimal routing of the tool of numerically controlled curly sheet cutting machines. Mathematical models and algorithms."

4.12. Перечень планируемых к приобретению за счет гранта оборудования, материалов, информационных и других ресурсов для выполнения проекта *(в том числе – описывается необходимость их использования для реализации проекта)*

нет

4.13. Файл с дополнительной информацией 1

С графиками, фотографиями, рисунками и иной информацией о содержании проекта. Один файл в формате pdf, до 3 Мб.

Текст в файлах с дополнительной информацией должен приводиться на русском языке. Перевод на английский язык требуется в том случае, если руководитель проекта оценивает данную информацию существенной для эксперта.

4.14. Файл с дополнительной информацией 2 *(если информации, приведенной в файле 1 окажется недостаточно)*

С графиками, фотографиями, рисунками и иной информацией о содержании проекта. Один файл в формате pdf, до 3 Мб.

Подпись руководителя проекта _____/А.А. Петунин/

Форма 5. Запрашиваемое финансирование на 2020 год

5.1. Планируемые расходы по проекту

№ п.п.	Направления расходования гранта	Сумма расходов (тыс.руб.)
	ВСЕГО	6000
	Вознаграждение членов научного коллектива (с учетом страховых взносов во внебюджетные фонды, без лиц категории «вспомогательный персонал»)	4300
	Вознаграждение лиц категории «вспомогательный персонал» (с учетом страховых взносов во внебюджетные фонды)	100
1	Итого вознаграждение (с учетом страховых взносов во внебюджетные фонды)	4400
2	Оплата научно-исследовательских работ сторонних организаций, направленных на выполнение научного проекта (не более 15 процентов от суммы гранта)	350
3	Расходы на приобретение оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования (включая обучение работников, монтажные, пуско-наладочные и ремонтные***** работы) ***** Не связанные с осуществлением текущей деятельности организации.	0
4	Расходы на приобретение материалов и комплектующих для проведения научного исследования	0
5	Иные расходы для целей выполнения проекта	650
6	Накладные расходы организации (не более 10 процентов от суммы гранта)	600

5.2. Расшифровка планируемых расходов

№ п.п.	Направления расходования гранта, расшифровка
1	<p>Итого вознаграждение (с учетом страховых взносов во внебюджетные фонды) (указывается сумма вознаграждения (включая руководителя, основных исполнителей и иных исполнителей, привлекаемых к выполнению работ по проекту), включая установленные законодательством Российской Федерации гарантии, отчисления по страховым взносам на обязательное пенсионное страхование, на обязательное медицинское страхование, на обязательное социальное страхование на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством, на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний)</p> <p>4400 тыс. руб., в том числе:</p> <p>Петунин Александр Александрович - 675 тыс. руб.;</p> <p>Хачай Михаил Юрьевич - 600 тыс. руб.;</p> <p>Ченцов Павел Александрович 525 тыс. руб.;</p> <p>Березин Иван Михайлович - 350 тыс. руб.;</p> <p>Емельянова Анастасия Алексеевна - 300 тыс. руб.;</p> <p>Полищук Ефим Григорьевич - 425 тыс. руб.;</p> <p>Таваева Анастасия Фидагилевна - 350 тыс. руб.;</p> <p>Удинцева Екатерина Владимировна - 300 тыс. руб.;</p> <p>Уколов Станислав Сергеевич - 475 тыс. руб.;</p> <p>Шипачева Екатерина Николаевна - 300 тыс. руб.;</p> <p>Вспомогательный персонал - 100 тыс. руб.</p> <p>Процент оплаты участников коллектива до 39 лет составит 36,36 % от общей суммы вознаграждения</p>
2	<p>Оплата научно-исследовательских работ сторонних организаций, направленных на выполнение научного проекта</p> <p>(приводится перечень планируемых договоров (счетов) со сторонними организациями с указанием предмета и суммы каждого договора)</p>

350 тыс. руб. Оплата по Договору с ЗАО "Региональный Центр Лазерных Технологий" (Екатеринбург) на проведение опытной вырезки фигурных заготовок из листового металла на машине лазерной резки с ЧПУ.

3 Расходы на приобретение оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования

(представляется перечень планируемых к закупке оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования (в соответствии с п. 4.12 формы 4))

нет

4 Расходы на приобретение материалов и комплектующих для проведения научного исследования

(представляется расшифровка запланированных материалов и комплектующих (в соответствии с п. 4.12 формы 4))

нет

5 Иные расходы для целей выполнения проекта

(приводятся иные затраты на цели выполнения проекта, в том числе на командировки, оплату услуг связи, транспортных услуг, расходы не расшифровываются)

650 тыс. руб.

Подпись руководителя проекта _____/А.А. Петунин/

Подпись руководителя организации (уполномоченного представителя, действующего на основании доверенности или распорядительного документа), **печать** (при ее наличии) **организации.**

В случае подписания формы уполномоченным представителем организации (в т.ч. – руководителем филиала) к печатному экземпляру заявки прилагается копия распорядительного документа или доверенности, заверенная печатью организации.

_____/_____
М.П.