

Форма «Т». Титульный лист заявки в Российский научный фонд
Конкурс 2021 года «Проведение фундаментальных научных исследований и
поисковых научных исследований отдельными научными группами»

Название проекта Оптимизация траектории движения инструмента для машин листовой резки с числовым программным управлением – новые методологические подходы и алгоритмы		Номер проекта <div style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">21-11-00255</div> <div style="text-align: center;">  </div>	
		Код типа проекта: ОНК(2021)	
		Отрасль знания: 01	
		Основной код классификатора: 01-203 Дополнительные коды классификатора: 01-114 01-507	
		Код ГРНТИ 28.29.15	
Фамилия, имя, отчество (при наличии) руководителя проекта: Ченцов Александр Георгиевич		Контактные телефон и e-mail руководителя проекта: +73433753457, chentsov@imm.uran.ru	
Полное и сокращенное наименование организации, через которую должно осуществляться финансирование проекта: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики и механики им.Н.Н.Красовского Уральского отделения Российской академии наук ИММ УрО РАН			
Объем финансирования проекта в 2021 г. 6000 тыс. руб.		Год начала проекта: 2021	Год окончания проекта: 2023
Фамилии, имена, отчества (при наличии) основных исполнителей (полностью)	<div style="margin-bottom: 5px;">Петунин Александр Александрович</div> <div style="margin-bottom: 5px;">Сесекин Александр Николаевич</div> <div style="margin-bottom: 5px;">Хачай Михаил Юрьевич</div> <div style="margin-top: 5px;"><i>(руководитель проекта в данной графе не указывается)</i></div>		
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.Г. Ченцов/		Дата регистрации заявки 09.11.2020 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 расшифровки подписи, является основанием недопуска заявки к конкурсу.</small> _____/_____/		Печать (при наличии) организации	

Форма 1. Сведения о проекте

1.1. Название проекта

на русском языке

Оптимизация траектории движения инструмента для машин листовой резки с числовым программным управлением – новые методологические подходы и алгоритмы

на английском языке

Tool path optimization for CNC sheet cutting machines - new methodological approaches and algorithms

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)

Н1 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

оптимизация маршрута инструмента, машины листовой резки с ЧПУ, сегмент резки, проблема сегментной непрерывной резки (SCCP), GTSP, стоимость раскроя, условия предшествования, тепловые деформации материала, динамические ограничения, динамическое программирование, эвристические алгоритмы, сложность алгоритма, полиномиальная аппроксимация, оптимизация 2D раскроя, интегрированная задача 2D раскроя и маршрутизации (INPR)

на английском языке

tool (cutting) path optimization, CNC sheet cutting machines, cutting segment, Segment Continuous Cutting Problem (SCCP), GTSP, cutting cost, precedence conditions, material thermal deformations, dynamic constraints, dynamic programming, heuristic algorithms, algorithm complexity, polynomial approximation, 2D nesting optimization, Integrated Nesting and Routing Problem

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. В качестве основных в проекте рассматриваются оптимизационные задачи минимизации времени листовой резки на машинах с ЧПУ и стоимости резки для полученной на этапе проектирования раскроя материала раскройной карты. Проблема разработки методов, алгоритмов и соответствующего программного обеспечения, позволяющих в автоматическом режиме минимизировать временные и стоимостные параметры процесса резки заготовок из листовых материалов всё ещё остаётся актуальнейшей задачей раскройно-заготовительного производства. Эта сложная проблема связана с эффективной аппроксимируемостью экстремальных маршрутных задач специального вида. На настоящий момент участниками проекта получены обнадеживающие результаты в этой области для случая геометрических постановок. В данном проекте будет исследован вопрос эффективной аппроксимируемости обобщенной задачи коммивояжера (GTSP) с условиями предшествования. В проекте также исследуется вопрос разработки методологических основ решения интегрированной оптимизационной проблемы раскроя листового материала и маршрутизации траектории инструмента машин с числовым программным управлением (ЧПУ). До настоящего времени задачи оптимизации раскроя (Cutting & Packing) и задачи оптимизации траектории инструмента для машин с ЧПУ решались отдельно. В рамках данного проекта впервые рассматривается интегрированная задача раскроя и маршрутизации инструмента (INPR - Integrated Nesting and Routing Problem) с

суммарной целевой функцией стоимости раскроя и резки. 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 новые классы задач непрерывно-дискретной оптимизации с изменяющимися (динамическими) ограничениями, смысл которых заключается в изменении условий оптимизационной задачи в ходе построения решения и порождаемых, в данном случае, особенностями термической резки листовых материалов. Ряд таких постановок был сформулирован авторами впервые. Отдельным разделом проекта является разработка алгоритмов для решения маршрутных задач с континуальным множеством допустимых решений (Continues Cutting Problem (CCP), Segment CCP(SCCP)). Эти задачи также практически не рассматривались ранее отечественными и зарубежными исследователями из-за их сложности. В проекте приводится классификация рассматриваемых задач, описываются математические оптимизационные модели, их целевые функции и возникающие технологические ограничения, проводится математическая формализация некоторых классов задач и разрабатываются вычислительные точные и приближенные алгоритмы, а также проводится оценка их вычислительной сложности. В качестве математического аппарата для решения задач маршрутизации, описываемых дискретными моделями (Generalized Traveling Salesman Problem (GTSP), Endpoint Cutting Problem (ECP)), применяются новые эвристические алгоритмы, базирующиеся на методе ветвей и границ и специальной схеме динамического программирования, разработанной проф. А.Г. Ченцовым для решения проблемы о последовательном обходе мегаполисов. Это позволит получать точные решения для задач небольшой размерности и впервые оценивать точность решений приближенных эвристических алгоритмов для задач маршрутизации инструмента большой размерности. Основной задачей проекта при разработке подходов для решения интегрированной задачи раскроя и маршрутизации INPR является интеграция новых и существующих алгоритмов раскроя с алгоритмами маршрутизации инструмента в рамках одних оптимизационных моделей. Вышеописанные проблемы показывают необходимость разработки специальных методов решения задач 2D раскроя, отличающихся возможностью применения для них высокоэффективных методов маршрутизации инструмента машин с ЧПУ с целью оптимизации интегрированных критериев целевых функций. 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. Теоретические аспекты проекта касаются, прежде всего, формализации задач оптимизации траектории инструмента для машин листовой резки с ЧПУ на единой концептуальной основе «сегментной резки», предложенной участниками проекта, и разработки новых высокоэффективных методов их решения. 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 идет о вышеупомянутых так называемых "динамических ограничениях". Для решения задач классов CCP и SCCP с непрерывными моделями будут разработаны новые геометрические и комбинаторные алгоритмы. Будет также разработано специальное программное обеспечение для моделирования температурных полей в материале при термической резке, что позволит уменьшать тепловые деформации материала за счет выбора технологически допустимого маршрута резки. 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. Для решения основных задач будут построены оригинальные математические методы, алгоритмы и комплексы программ, включающие оптимальные и приближенные процедуры на основе специальных эвристик и метаэвристик, нестандартных вариантов динамического программирования, с учетом всей необходимой системы ограничений. Предполагается также построение методов и алгоритмов решения ранее не исследованной задачи INPR с использованием параллельных алгоритмов. 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 для исследуемых NP-полных задач,отягощенных специальными видами ограничений. Практическая цель проекта заключается в разработке соответствующего программного обеспечения для формирования маршрута резки, удовлетворяющего как технологическим требованиям листовой резки, так и выбранным оптимизационным критериям. 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 CAM систем, используемых на российском рынке для подготовки управляющих программ машин листовой резки. В целом, можно отметить, что реализация проекта позволит

добиться реальной оптимизации временных и стоимостных параметров процесса листовой резки заготовок на машинах с ЧПУ и внести существенный вклад в решение сложных (в том числе, и новых) задач исследования операций, возникающих в ряде приложений, которые связаны с разработкой и внедрением технологий Четвертой промышленной революции "Индустрия 4.0".

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 mathematical tool for solving routing problems described by discrete models (Generalized Traveling Salesman Problem (GTSP), Endpoint Cutting Problem (ECP)), new heuristic algorithms based on the branch and bound method and a special dynamic programming scheme developed by prof. A.G. Chentsov to solve the problem of sequential bypassing of megacities. This will make it possible to obtain exact solutions for problems of small dimension and for the first time estimate the accuracy of solutions of approximate heuristic algorithms for problems of routing a tool of large dimension. 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 project also is focused on the development of the theoretical and methodological ground for solving an integrated optimization problem of sheet material cutting and toolpath routing for numerical control (CNC) cutting machines, as well as the development of appropriate software to automate the design of control programs. So far, cutting optimization problems (Cutting & Packing) and tool path optimization problems for CNC machines are solved separately. Within the framework of this project, an Integrated Nesting and Routing Problem (INRP) is considered for the first time, a classification of the considered sub-problems is to be given, mathematical optimization models, their objective functions and emerging technological constraints are to be described, computational algorithms (both exact and approximate ones) are to be devised, as well as evaluating their computational complexity.

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).

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 make it possible to achieve real optimization of the time and cost parameters at cutting for the CNC sheet cutting machines and make a significant contribution to solving complex (including new) problems of researching operations that arise in a number of applications that related to the development and implementation of the Industry 4.0 strategy.

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 интегрированную задачу раскроя и маршрутизации инструмента (INRP - Integrated Nesting and Routing Problem) с суммарной целевой функцией стоимости раскроя и резки и исследовать вопросы разработки единой теоретической и методологической концепции для решения;
- формализовать "динамические ограничения" в используемых математических оптимизационных моделях в случае необходимости соблюдения эвристического 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 эвристического правила "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 концептуальную схему решения оптимизационной интегрированной задачи раскроя и маршрутизации;

- разработать приближенные алгоритмы решения задачи оптимизации траектории инструмента для расширенного класса ССР (СССР) с использованием непрерывно-дискретной модели и базовых сегментов резки, содержащих несколько контуров вырезаемых деталей и с учетом условий предшествования и "динамических ограничений", вызываемых технологическими требованиями термической листовой резки на машинах с ЧПУ;
- разработать алгоритмы решения задач ССР и СССР 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 решения оптимизационной интегрированной задачи раскроя и маршрутизации;
- разработать программное обеспечение для вычисления температурных полей при резке заготовок на машинах термической резки;
- разработать таблицы, реализующие разработанную методику точного вычисления целевых функций для различного типов технологического оборудования с ЧПУ и используемого для резки листового материала;
- 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 с открытым доступом 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 INRP (Integrated Nesting and Routing Problem) with the total objective function of the cutting cost and cutting process cost and explore the development of a unified theoretical and methodological concept for the solution;
- 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 (СССР) 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 a conceptual scheme for solving the INRP;
- 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 develop tables that implement the developed method of exact calculation of objective functions for various types of CNC technological equipment and used for cutting sheet material;
- 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 (указывается планируемое количество исполнителей в течение всего срока реализации проекта):

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

на русском языке

Ченцов Александр Георгиевич, 73 года, доктор физико-математических наук, член-корр. РАН, гл. н.с. ИММ УрО РАН,

профессор УрФУ, трудовой договор

Петунин Александр Александрович, 65 лет, доктор технических наук, профессор УрФУ, трудовой договор

Сесекин Александр Николаевич, 71 год, доктор физико-математических наук, зав. кафедрой УрФУ, трудовой договор

Хачай Михаил Юрьевич, 49 лет, доктор физико-математических наук, проф. РАН, зав. отделом ИММ УрО РАН, профессор УрФУ, трудовой договор

Березин Иван Михайлович, 34 года, кандидат технических наук, н.с. Института Машиноведения УрО РАН, с.н.с. УрФУ, трудовой договор

Ченцов Павел Александрович, 42 года, кандидат физико-математических наук, н.с. ИММ УрО РАН, м.н.с. УрФУ, трудовой договор

Григорьев Алексей Михайлович, 37 лет, зав. отделом ИММ УрО РАН, трудовой договор

Кудрявцев Андрей Владиславович, 24 года, аспирант УрФУ, трудовой договор

Таваева Анастасия Фидагилевна, 30 лет, главный специалист АО "ПО" "УОМЗ", трудовой договор

Шипачева Екатерина Николаевна, 28 лет, программист УрФУ, трудовой договор

на английском языке

Chentsov Alexander Georgievich, 73 years old, doctor of physical and mathematical sciences, corresponding member RAS, Ch. n.s. IMM UB RAS, professor of UrFU, employment contract

Petunin Alexander Alexandrovich, 65 years old, Doctor of Technical Sciences, Professor of UrFU, employment contract

Sesekin Alexander Nikolaevich, 71 years old, Doctor of Physics and Mathematics, Head of UrFU Department, employment contract

Khachai Mikhail Yurievich, 49 years old, Doctor of Physics and Mathematics, Prof. RAS, Head of Department in IMM UB RAS, Professor of Ural Federal University, employment contract

Berezin Ivan Mikhailovich, 34 years old, candidate of technical sciences, researcher Institute of Mechanical Engineering, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, senior researcher UrFU, employment contract

Chentsov Pavel Aleksandrovich, 42 years old, candidate of physical and mathematical sciences, researcher IMM UB RAS, junior researcher UrFU, employment contract

Grigoriev Alexey Mikhailovich, 37 years old, Head of Department in IMM UB RAS, employment contract

Kudryavtsev Andrey Vladislavovich, 24 years old, post-graduate student of UrFU, employment contract

Tavaeva Anastasia Fidagilevna, 30 years old, chief specialist of JSC "PO" "UOMZ", employment contract

Shipacheva Ekaterina Nikolaevna, 28 years old, Ural Federal University programmer, employment contract

Соответствие профессионального уровня членов научного коллектива задачам проекта

на русском языке

Ченцов А.Г. - член-корр. РАН, лауреат государственной премии СССР, 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", выдающийся специалист в области теории дифференциальных игр, конечно-аддитивных мер и эффективных методов для динамических маршрутных экстремальных задач. Автор известного метода программных итераций для дифференциальных игр преследования-уклонения. В области комбинаторной оптимизации наибольшую известность получили оригинальные схемы метода динамического программирования для актуальных обобщений классической задачи коммивояжера, индуцируемых рядом важных прикладных задач исследования операций.

Хачай М. Ю. - д.ф.-м.н, проф. РАН, специалист 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.

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 35 работ, индексируемых в базах данных Scopus и WoS.

Сесекин А.Н. - проф., д.ф.-м.н., специалист в области теории импульсного управления и маршрутных комбинаторных задач, в том числе, возникающих при моделировании оптимального демонтажа энергоблоков АЭС и в задачах высокоточной листовой резки металла.

А.Г.Ченцов совместно с А.Н.Сесекиным, П.А.Ченцовым и А.М.Григорьевым являются авторами ряда известных работ в области эффективного распараллеливания точных алгоритмов решения задач оптимальной маршрутизации.

Ченцов П. А. - к.ф.-м.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. 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.

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.

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.

Кудрявцев А.В. - аспирант Уральского федерального университета, высококвалифицированный математик и программист. Соавтор и основной разработчик комплекса эвристических алгоритмов PCGLNS для задачи GTSP с ограничениями предшествования. Имеет публикации по теме проекта, индексируемые в базах данных Scopus и WoS. Научный руководитель - Хачай М.Ю.

на английском языке

A.G. Chentsov - Corresponding member RAS, laureate of the USSR State Prize, laureate of the Governor of the Sverdlovsk Region 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", an outstanding specialist in the theory of differential games, finite additive measures and effective methods for dynamic routing extreme problems. The author of the well-known method of programmed iterations for differential pursuit-evasion games. In the field of combinatorial optimization, the most famous are the original schemes of the dynamic programming method for topical generalizations of the classical traveling salesman problem induced by a number of important applied problems of operations research. Over the past 5 years, he has published 62 works indexed in Scopus and WoS databases.

M. Khachay - Doctor of Physics and Mathematics, prof. of Russian Academy of Science, specialist 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.

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 35 works indexed in Scopus and WoS databases.

A.Sesekin - Prof., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, a specialist in the field of the theory of impulse control and routing combinatorial problems, including those arising in the simulation of optimal dismantling of NPP power units and in problems of high-precision sheet metal cutting.

A.G. Chentsov together with A.N. Sesekin, P.A. Chentsov and A.M. Grigoriev are the authors of a number of well-known works in the field of efficient parallelization of exact algorithms for solving optimal routing problems.

I. Berezin - Ph.D in Technical Sciences, 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.

P. A. Chentsov, PhD in Physics and Mathematics, Laureate of the Governor of the Sverdlovsk Region 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. Author of a number of methods and algorithms for solving routing problems and tasks of distributing tasks among performers. Author of several software solutions in the field of software development, an expert in the application of parallel computations and dynamic programming method for solving routing problems

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. 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.

A. V. Kudryavtsev - PhD student of the Ural Federal University, highly qualified mathematician and programmer. Co-author and the main developer of the Open Source heuristic solver PCGLNS for the precedence constrained GTSP. Has publications on the topic of the project, indexed in the Scopus and WoS databases. Scientific advisor - Khachay M.Yu.

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

2021 г. - 6000 тыс. рублей,

2022 г. - 6000 тыс. рублей,

2023 г. - 6000 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.

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.

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 в Scopus определяется по базе данных <http://www.scimagojr.com/>), данная статья учитывается как две публикации.

33 публикаций,

из них

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

Информация о научных изданиях, в которых предполагается 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)

Заявка № 20-19-00508 Страница 9 из 51

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. Umrtskogo Gos. Univ. ISSN: 2226-3594 и др.

Иные способы обнародования результатов выполнения проекта

Монографию "Обобщенная задача коммивояжера с условиями предшествования. Новые методы и алгоритмы решения" предполагается опубликовать в научном издательстве Уральского отделения Российской Академии Наук в 2022 г.

1.10. Число публикаций членов научного коллектива, опубликованных в период с 1 января 2016 года до даты подачи заявки,

334, из них

166 – 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)

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, руководитель проекта 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.Г. Ченцов/

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

Ченцов Александр Георгиевич

на английском языке фамилия и инициалы

Chentsov A.G.

WoS ResearcherID *(при наличии)*

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу www.ResearcherID.com.
<https://publons.com/researcher/AAG-7877-2019/>

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.
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=7006047064>

ORCID *(при наличии)*

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу orcid.org.
<https://orcid.org/0000-0001-6568-0703>

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

04.03.1947

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, 1978

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

Государственная Премия СССР,

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-корреспондент РАН (Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления),

American Mathematical Society (AMS),

редколлегии: Труды Института математики и механики,

Вестник Удмуртского университета, Functional Differential Equations,

Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: "Математическое моделирование и программирование"

Вестник Российских университетов. Математика. Ural Mathematical Journal.

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.

главный 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

задачи управления, задача коммивояжера, обобщённая задача курьера, условия предшествования, динамическое программирование, метод программных итераций, неподвижные точки, динамическая система, квазистратегии, динамические игры, импульсное управление

на английском языке

control problem, travelling salesman problem, generalized problem of courier, precedence constraints, dynamic programming, programmed iteration method, fixed points, dynamic system, nonanticipating strategies, dynamic games, impulse control

2.8. Область научных интересов – коды по классификатору Фонда

01-114 01-203 01-204 09-602 09-604

2.9. Перечень публикаций руководителя проекта, опубликованных в период с 1 января 2016 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 2016 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 в Scopus 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. Serkov, D. A., Chentsov, A. G. (2020). On the Construction of a Nonanticipating Selection of a Multivalued Mapping. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR), 2020. 309 (SUPPL 1), S125-S138. <https://doi.org/10.1134/S008154382004015X>
2. Chentsov, A.G. The Programmed Iteration Method in a Game Problem of Realizing Trajectories in a Function Set, Proceedings of Steklov Institute of Mathematics, (IF=0.623, Q2 SJR) 2019. 304(1), 292–308 <https://doi.org/10.1134/S008154381901022X>
3. Chentsov, A. G. To a question on the supercompactness of ultrafilter spaces, Ural Mathematical Journal, 2019. 5:1, 31–47 <https://doi.org/10.15826/umj.2019.1.004>
4. Chentsov A.G., Grigoryev A.M., Chentsov A.A. Optimization “In Windows” for Routing Problems with Constraints. Communications in Computer and Information Science, 2019. 1090. 470-485 https://doi.org/10.1007/978-3-030-33394-2_36
5. Chentsov, A. G. Bitopological Spaces of Ultrafilters and Maximal Linked Systems. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) 2019, 305(1), pp S24–S39 <https://doi.org/10.1134/S0081543819040059>
6. Chentsov, A. G. The Programmed Iteration Method in a Game Problem of Realizing Trajectories in a Function Set Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) 2019, 304(1), pp 292–308 <https://doi.org/10.1134/S008154381901022X>
7. Petunin, A. A. Chentsov, A. G., Chentsov, P. A. Optimizing Insertions in a Constraint Routing Problem with Complicated Cost Functions. Journal of Computer and Systems Sciences International 2019, 58(1), pp 113– <https://doi.org/10.1134/S106423071901012X>
8. Chentsov, A.G., Chentsov, P.A., Petunin, A.A., Seseikin, A.N.: Model of megalopolises in the tool path optimization 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>
9. Chentsov, A.G.: Programmed Iteration Method in Differential Games with a Functional Target Set. Doklady Mathematics (IF=0.534, Q2 SJR) 2018, 98(1), pp. 308-312 <https://doi.org/10.1134/S1064562418050010>
10. Chentsov, A.G., Chentsov, A.A.: A Discrete – Continuous Routing Problem with Precedence Constraints. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) 2018, 300, pp. 56-71. <https://doi.org/10.1134/S0081543818020074>

11. Pytkееv, E.G., Chentsov, A.G.: Open Ultrafilters and Separability with the Use of the Operation of Closure. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) 2017, 299, pp. 177-190.
<https://doi.org/10.1134/S0081543817090206>
12. Chentsov, A.G.: The program iteration method in a game problem of guidance, Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) 2017, 297, pp. 43-61. <https://doi.org/10.1134/S0081543817050066>
13. Chentsov, A.G.: Compactifiers in extension constructions for reachability problems with constraints of asymptotic nature. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623) 2017, 296, pp. 102-118.
<https://doi.org/10.1134/S0081543817020109>
14. Petunin, A.A., Chentsov, A.A., Chentsov, A.G., Chentsov, P.A.: Elements of dynamic programming in local improvement constructions for heuristic solutions of routing problems with constraints. Automation and Remote Control (IF=0.562, Q2 SJR) 2017, 78 (4), pp. 666-681. <https://doi.org/10.1134/S0005117917040087>
15. Chentsov, A.G., Khachai, M.Y., Khachai, D.M.: An exact algorithm with linear complexity for a problem of visiting megalopolises, Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) 2016, 295, pp. 38-46.
<https://doi.org/10.1134/S0081543816090054>
16. Chentsov, A.G., Grigoryev, A.M.: A scheme of independent calculations in a precedence constrained routing problem. Lecture Notes in Computer Science (Q2 SJR), 2016 Vol. 9869, pp. 121-135. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44914-2_10
17. Chentsov, A., Khachay, M., Khachay, D.: Linear time algorithm for Precedence Constrained Asymmetric Generalized Traveling Salesman Problem, IFAC-PapersOnLine (Q3 SJR), 2016, 49 (12), pp. 651-655.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.767>
18. Chentsov, A.G., Chentsov, P.A., Petunin, A.A., Seseкин, A.N.: Routing problems: constraints and optimality. IFAC-PapersOnLine (Q3 SJR), 2016, 49 (12), pp. 640-644. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.756>

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 18 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 в Scopus определяется по базе данных <http://www.scimagojr.com/>).

2.10. Основные научные результаты руководителя проекта за период с 1 января 2016 года (результаты должны подтверждаться сведениями из заявки, например - публикациями)
на русском языке

1. Новый нетрадиционный вариант метода динамического программирования для задач маршрутизации (обобщенной задачи коммивояжера, задачи обхода мегаполисов, курьера и т.п.) с дополнительными ограничениями различных типов, включая ограничения предшествования и специфической функцией стоимости зависящей от списка заданий, а также позволяющий оптимизировать точку старта [3-6]
2. Метод программных итераций для поиска (суб)оптимальных стратегий игроков в нелинейной дифференциальной игре сближения-уклонения в формализации Н.Н.Красовского, стесненной фазовыми ограничениями общего типа [2,7-8]
3. Методы построения корректных расширений множества достижимости для абстрактной задачи управления с ограничениями асимптотического характера, обобщающими последовательно ослабляемые импульсные и моментные ограничения [1,9]

Список литературы

1. Serkov, D. A., Chentsov, A. G. On the Construction of a Nonanticipating Selection of a Multivalued Mapping. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) , 2020. 309 (SUPPL 1), S125-S138.
<https://doi.org/10.1134/S008154382004015X>
2. Chentsov, A.G. The Programmed Iteration Method in a Game Problem of Realizing Trajectories in a Function Set, Proceedings of Steklov Institute of Mathematics, (IF=0.623, Q2 SJR) 2019. 304(1), 292–308
<https://link.springer.com/article/10.1134%2FS008154381901022X>
3. Chentsov A.A. Chentsov A.G., Seseкин A.N., Tashlykov O.L. Application of a generalized bottleneck routing problem to the task of adhering to acceptable doses of radiation during the dismantling of radiation hazardous objects // IFAC PapersOnLine (Q3 SJR)52-13 (2019) 2656–2661 Doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.608
4. Chentsov, A.G., Chentsov, P.A., Petunin, A.A., Seseкин, 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>

5. Chentsov, A.G., Chentsov, A.A.: A Discrete – Continuous Routing Problem with Precedence Constraints. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) 2018, 300, pp. 56-71. <https://doi.org/10.1134/S0081543818020074>
6. Chentsov, A.G., Khachai, M.Y., Khachai, D.M.: An exact algorithm with linear complexity for a problem of visiting megalopolises, Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) 2016, 295, pp. 38-46.
7. Chentsov, A.G.: Programmed Iteration Method in Differential Games with a Functional Target Set. Doklady Mathematics (IF=0.534, Q2 SJR) 2018, 98(1), pp. 308-312 <https://doi.org/10.1134/S1064562418050010>
8. Chentsov, A.G.: The program iteration method in a game problem of guidance, Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) 2017, 297, pp. 43-61. <https://doi.org/10.1134/S0081543817050066>
9. Chentsov, A.G.: Compactifiers in extension constructions for reachability problems with constraints of asymptotic nature. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623) 2017, 296, pp. 102-118. <https://doi.org/10.1134/S0081543817020109>

на английском языке

1. A new unconventional version of the dynamic programming method for routing problems (generalized traveling salesman problem, the problem of bypassing megalopolises, courier, etc.) with additional constraints of various types, including precedence constraints and a specific cost function depending on the list of tasks, as well as allowing to optimize the point start [3-6]
2. The method of programmed iterations for the search for (sub) optimal strategies of players in a nonlinear differential game of approach-evasion in the formalization of NN Krasovsky, constrained by general phase constraints [2,7-8]
3. Methods for constructing correct extensions of the reachable set for an abstract control problem with asymptotic constraints generalizing sequentially weakened impulse and moment constraints [1,9]

References

1. Serkov, D. A., Chentsov, A. G. On the Construction of a Nonanticipating Selection of a Multivalued Mapping. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) , 2020. 309 (SUPPL 1), S125-S138. <https://doi.org/10.1134/S008154382004015X>
2. Chentsov, A.G. The Programmed Iteration Method in a Game Problem of Realizing Trajectories in a Function Set, Proceedings of Steklov Institute of Mathematics, (IF=0.623, Q2 SJR) 2019. 304(1), 292 – 308 <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS008154381901022X>
3. Chentsov A.A. Chentsov A.G., Seseikin A.N., Tashlykov O.L. Application of a generalized bottleneck routing problem to the task of adhering to acceptable doses of radiation during the dismantling of radiation hazardous objects // IFAC PapersOnLine (Q3 SJR)52-13 (2019) 2656–2661 Doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.608
4. 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>
5. Chentsov, A.G., Chentsov, A.A.: A Discrete – Continuous Routing Problem with Precedence Constraints. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) 2018, 300, pp. 56-71. <https://doi.org/10.1134/S0081543818020074>
6. Chentsov, A.G., Khachai, M.Y., Khachai, D.M.: An exact algorithm with linear complexity for a problem of visiting megalopolises, Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) 2016, 295, pp. 38-46.
7. Chentsov, A.G.: Programmed Iteration Method in Differential Games with a Functional Target Set. Doklady Mathematics (IF=0.534, Q2 SJR) 2018, 98(1), pp. 308-312 <https://doi.org/10.1134/S1064562418050010>
8. Chentsov, A.G.: The program iteration method in a game problem of guidance, Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623, Q2 SJR) 2017, 297, pp. 43-61. <https://doi.org/10.1134/S0081543817050066>
9. Chentsov, A.G.: Compactifiers in extension constructions for reachability problems with constraints of asymptotic nature. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (IF=0.623) 2017, 296, pp. 102-118. <https://doi.org/10.1134/S0081543817020109>

2.11. Общее число публикаций за период с 1 января 2016 года, 132, из них:

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

в том числе 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 в Scopus определяется по базе данных <http://www.scimagojr.com/>).

2.12. Дополнительный список публикаций руководителя проекта с 1 января 2016 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 п. 2.9 настоящей формы.

на английском языке

1. Chentsov A.G., Chentsov A.A., Seseikin A.N. Move routing problems with non-additive cost aggregation: monograph. Moscow: URSS. 2020. 232 p. (in Russian)
2. Petunin, A.A., Chentsov, A.G., Chentsov, P.A., (2020). Optimal tool routing of CNC sheet cutting machines. Mathematical models and algorithms: monograph. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural University. 247 p. (in Russian)

2.13. Опыт выполнения научных проектов (указываются наименования фондов (организаций), их местонахождение (страна), форма участия, номера, названия проектов и сроки выполнения за последние 5 лет)

на русском языке

РНФ № 14-11-00109 "Эффективность и устойчивость алгоритмов математического программирования и анализа данных
РФФИ №15-01-07909-а "Игровое взаимодействие в задачах управления и конструкции расширений", 2015-2017 гг. Рук.
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", 2017-2019
РФФИ № 18-01-00410 "Задачи управления с элементами расширений и игровые взаимодействия", 2018-2020. Рук.
РФФИ № 19-01-00573 "Проблема точного и приближенного соблюдения ограничений в задачах управления", 2019-2021.
РФФИ № 19-01-00371 "Задачи оптимального управления в динамических системах с импульсной структурой", 2019-2021.
РФФИ № 20-08-00873 "Разработка математических моделей и алгоритмов решения прикладных оптимизационных маршрутных задач со сложными целевыми функциями и параметрами", 2020-2022.

на английском языке

Russian Science Foundation No. 14-11-00109 "Efficiency and stability of algorithms for mathematical programming and data analysis
RFBR No. 15-01-07909-a "Game interaction in problems of control and design of extensions", 2015-2017. Hands.
RFBR No. 17-08-01385 "Optimization of routes in conditions of restrictions for typical engineering tasks of tool management during sheet cutting on CNC machines and reducing the dose load of personnel at radiation hazardous facilities", 2017-2019
RFBR No. 18-01-00410 "Control problems with extension elements and game interactions", 2018-2020. Hands.
RFBR No. 19-01-00573 "The problem of exact and approximate observance of restrictions in control problems", 2019-2021.
RFBR No. 19-01-00371 "Optimal control problems in dynamic systems with impulse structure", 2019-2021.
RFBR No. 20-08-00873 "Development of mathematical models and algorithms for solving applied optimization routing problems with complex objective functions and parameters", 2020-2022.

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

Являлся исполнителем проекта № 14-11-00109, 2014-2016 гг.

Являлся исполнителем проекта № 14-11-00109 (продление), 2017-2018 гг.

2.14. Планируемое участие в научных проектах (в любом качестве) в 2021 году

Общее количество – 4, из них:

руководство – 1, участие в качестве исполнителя – 3,

а именно:

1. Данный проект (руководитель)
 2. РФФИ № 19-01-00573 "Проблема точного и приближенного соблюдения ограничений в задачах управления" (исполнитель), 2019-2021.
 3. РФФИ № 19-01-00371 "Задачи оптимального управления в динамических системах с импульсной структурой" (исполнитель), 2019-2021.
 4. РФФИ № 20-08-00873 "Разработка математических моделей и алгоритмов решения прикладных оптимизационных маршрутных задач со сложными целевыми функциями и параметрами" (исполнитель), 2020-2022.
- (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)

За последние 5 лет:

- руководство 2 докторскими и 1 кандидатской диссертациями
- руководство 2 аспирантами, чтение 2 спецкурсов в УрФУ

2.18. Почтовый адрес

620077 г. Екатеринбург, ул. Маршала Жукова, 10, к. 231.

2.19. Контактный телефон

+73433753457

2.20. Электронный адрес (E-mail)

chentsov@imm.uran.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	Ченцов Александр Георгиевич
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	620077 г. Екатеринбург, ул. Маршала Жукова, 10, к. 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 руководителя проекта _____/А.Г. Ченцов/

Дата подписания «___» _____ 2020 г.

Форма 2. Сведения об основном исполнителе проекта

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.

<https://publons.com/researcher/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.

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=56780066100>

ORCID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу orcid.org.

<https://orcid.org/0000-0003-2540-1305>

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)

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, XI International Conference Optimization and Applications (OPTIMA-2019), Петровац, Черногория, (OPTIMA-2020), Москва, Россия
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)

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, задача маршрутизации инструмента, управляющая программа, дискретная оптимизация, стоимость резки, GTSP, динамические ограничения, эвристические алгоритмы, САПР

на английском языке

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

2.8. Область научных интересов – коды по классификатору Фонда

01-114 01-203 01-507

2.9. Общее число публикаций за период с 1 января 2016 года, 68, из них:

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

2.10. Список публикаций основного исполнителя проекта с 1 января 2016 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

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, P. A. (2020). Routing in CNC cutting machines: Engineering constraints. Acta Polytechnica Hungarica (IF=0.298, Q2 SJR), 17(8), 165-177. <https://doi.org/10.12700/APH.17.8.2020.8.12>
3. Khachay M., Kudriavtsev A., Petunin A. (2020) PCGLNS: A Heuristic Solver for the Precedence Constrained Generalized Traveling Salesman Problem. In: Olenov N., Evtushenko Y., Khachay M., Malkova V. (eds) Optimization and Applications. OPTIMA 2020. Lecture Notes in Computer Science (IF=0.432, Q2 SJR), vol 12422. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62867-3_15
4. 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
5. 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
6. Petunin, A. (2019). General Model of Tool Path Problem for the CNC Sheet Cutting Machines. IFAC-PapersOnline (IF=0.332, Q3 SJR), 52(13), 2662-2667. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.609>
7. Petunin, A. A., Polishchuk, E. G., & Ukolov, S. S. (2019). On the new Algorithm for Solving Continuous Cutting Problem. IFAC-PapersOnline (IF=0.332, Q3 SJR) , 52(13), 2320-2325. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.552>
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 (IF=0.261, Q3 SJR), 10(3), 25-39. <https://doi.org/10.14529/mmp170303>
9. 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. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33394-2_33
10. 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>

11. 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
12. 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
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

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»).

2.11. Опыт выполнения научных проектов (указываются наименования фондов (организаций), их местонахождение (страна), 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 гранта РФФИ № 20-08-00873 "Разработка математических моделей и алгоритмов решения прикладных оптимизационных маршрутных задач со сложными целевыми функциями и параметрами". Срок реализации проекта : 2020-2022.
3. Участник (исполнитель) гранта РФФИ № 16-01-00649 А "Проблема соблюдения ограничений в задачах оптимизации и управления". Срок реализации проекта: 2016-2018.
4. Участник (исполнитель) гранта РФФИ № 19-01-00573 "Проблема точного и приближенного соблюдения ограничений в задачах управления". Срок реализации проекта: 2019-2021.
5. Руководитель госбюджетной темы №Н977.426.039/17 «Задачи оптимального раскроя и оптимальной маршрутизации» (2017-2018).
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.
7. Руководитель НИОКТР на сумму 56 млн. руб. 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

на английском языке

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. Head of the RFBR grant No. 20-08-00873 "Development of mathematical models and algorithms for solving applied optimization routing problems with complex objective functions and parameters" The project implementation period: 2020-2022.

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. The project implementation period: 2014-2020.
7. 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 amount - 56 million rubles. The project implementation period: 2016-2018.

2.12. Планируемое участие в научных проектах (в любом качестве) в 2021 году

Общее количество – 3, из них:

руководство – 1, участие в качестве исполнителя – 2,

а именно:

1. Грант РФФИ № 20-08-00873 "Разработка математических моделей и алгоритмов решения прикладных оптимизационных маршрутных задач со сложными целевыми функциями и параметрами" (руководитель). Срок реализации проекта : 2020-2022.
2. Грант РФФИ № 19-01-00573 "Проблема точного и приближенного соблюдения ограничений в задачах управления" (исполнитель). Срок реализации проекта: 2019-2021.
3. Данный грант (исполнитель)

(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, 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 (промышленность) по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника». Разработал Программу Кандидатского экзамена по специальной дисциплине по направлению 09.06.01. Председатель диссертационного совета УрФУ 05.09.24 (технические науки) по специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (промышленность)». Научный руководитель 2 аспирантов, успешно защитивших 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.

2.15. В 2019 или в 2020 годах участвовал в качестве руководителя проекта, финансируемого Фондом, или исполнителя проекта, финансируемого Фондом, в следующих проектах (при наличии):

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

+79126158982, a.a.petunin@urfu.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	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 исполнителя проекта _____/А.А. Петунин/

Дата подписания «___» _____ 2020 г.

Форма 2. Сведения об основном исполнителе проекта

2.1. Фамилия, имя, отчество (при наличии)

на русском языке

Сесекин Александр Николаевич

на английском языке фамилия и инициалы

Sesekin A.

WoS ResearcherID (при наличии)

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

<https://publons.com/researcher/O-3451-2017/>

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.

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6507952117>

ORCID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу orcid.org.

<https://orcid.org/0000-0002-1339-9044>

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

25.01.1949

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, 1998

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 международного общества физиков и специалистов по управлению IPACS с 2007 года.

Награжден грамотой министерства образования РФ.

Председатель Уральского отделения научно-методического совета по математике Министерства образования РФ

Член диссертационного совета Д004.006.01 в Институте математики и механики УрО РАН

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

заведующий кафедрой, 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

Импульсное управление, динамические системы, дискретная оптимизация, маршрутизация перемещений

на английском языке

Impulse control, dynamic systems, discrete optimization, routing problem

2.8. Область научных интересов – коды по классификатору Фонда

01-112 01-203 01-204

2.9. Общее число публикаций за период с 1 января 2016 года, 70, из них:

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

2.10. Список публикаций основного исполнителя проекта с 1 января 2016 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

1. Seseikin, A.N., Zhelonkina, N.I. (2020). On the Stability of Tubes of Discontinuous Solutions of Bilinear Systems with Delay. // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика, 31, 96-110. (Indexed by WoS, SCOPUS) <https://doi.org/10.26516/1997-7670.2020.31.96>.
2. Chentsov, A.G., Chentsov, A.A., Seseikin, A.N. (2020). On one routing problem with non-additive cost aggregation. // Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software, 13(1), 64-80. (Indexed by WoS, SCOPUS) <https://doi.org/10.14529/mmp200105>
3. Dolgii Yu.F., Seseikin A.N. Optimal pulse stabilization of autonomous linearsystems of differential equations with aftereffect. // Proceedings of 2020 15th International Conference on Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference) (STAB), Moscow, Russia, 2020, IEEE Xplore, 2020, pp. 1-3. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (Indexed by SCOPUS) <https://doi.org/10.1109/STAB49150.2020.9140479>
4. Chentsov A.A., Chentsov A.G., Seseikin A.N., Tashlykov O.L. Application of a generalized bottleneck routing problem to the task of adhering to acceptable doses of radiation during the dismantling of radiation hazardous objects // IFAC PapersOnLine 52-13 (2019) 2656–2661 (Indexed by WoS, SCOPUS) Doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.608
5. Dolgii Yu.F., Seseikin A.N., Chupin I.A. Impulse control of the manipulation robot // Ural Mathematical Journal. (2019) Vol. 5. No. 2, P. 13-20. (Indexed by SCOPUS) DOI: 10.15826/umj.2019.2.002
6. Dolgii Yu.F., Seseikin A.N., Tashlykov O.L., Tran K.T. Sequential optimal control of the nuclear fuel reload mechanism // AIP. Conference Proceeding. 2172, 070015 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5133551>. (Indexed by WoS, SCOPUS)
7. Seseikin A.N., Shlyakhov A.S. On the Stability of Discontinuous Solutions of Bilinear Systems With Impulse Action, Constant and Linear Delays // AIP. Conference Proceeding. 2172, 030009 (2019); (Indexed by WoS, SCOPUS) <https://doi.org/10.1063/1.5133498>.
8. Chentsov A.G., Chentsov P.A., Petunin A.A., Seseikin A.N. Model of megalopolises in the tool path optimization for CNC plate cutting machines // International Journal of Production Research, 2018. Vol. 56, Issue 14. pp. 4819-4830. (Indexed by WoS, SCOPUS, JCR(2018)= 3.199) doi.org/10.1080/00207543.2017.1421784.
9. Zhelonkina N.I., Seseikin A.N. On Stability of Linear Systems with Impulsive Action at the Matrix // Journal of Mathematical Sciences, 2018. V. 230, No 5, P. 673-676. (Indexed by SCOPUS) doi:10.1007/s10958-018-3767-3.
10. Seseikin A.N., Zhelonkina N.I. On the Stability of Discontinuous Solutions of Nonlinear Systems with Impulse Action and Delay // Proceedings of 2018 14th International Conference “Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems” (Pyatnitskiy's Conference), STAB 2018; IEEE Xplore. pp. 1-3. (Indexed by SCOPUS) DOI: 10.1109/STAB.2018.8408399
11. Kartak V.M., Marchenko A.A., Petunin A.A., Seseikin A.N., Fabarisova A.I. Optimal and heuristic algorithms of planning of low-rise residential buildings// AIP. Conference Proceeding. 1895. (2017) pp. 110002 1-5. (Indexed by WoS, SCOPUS) doi: 10.1063/1.5007408 (<http://dx.doi.org/10.1063/1.5007408>)
12. Seseikin A.N., Zhelonkina N.I. Tubes of discontinuous solutions of dynamical systems and their stability // AIP. Conference Proceeding. 1895. (2017) pp. 050011 1-7. (Indexed by WoS, SCOPUS) doi: 10.1063/1.5007383 (<http://dx.doi.org/10.1063/1.5007383>)
13. Marchenko A., Seseikin A. Optimization planning of low-rise residential buildings// IEEE Conferences Publications. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 - Proceedings pp. 1-4. IEEE Xplore 24 April 2017, Article number 7911600. (Indexed by WoS, SCOPUS) doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911600.
14. Chentsov A.G., Chentsov P.A., Petunin A.A., Seseikin A.N. Routing problems: constraints and optimality. // IFAC – PaperOnLine 49-12 (2016) 640-644. (Indexed by WoS, SCOPUS) DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.756
15. Seseikin A.N., Zhelonkina N.I. Impulse-sliding regimes in systems with delay // Ural Mathematical Journal, Vol.2, No.2,

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»).

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

Проект РФФИ 16-01-00505 Вырожденные задачи оптимального управления и их приложения к динамическим системам с импульсной структурой (2016-2018), руководитель.

Проект РФФИ 18-01-00410 Задачи управления с элементами расширений и игровые взаимодействия (2018-2020), исполнитель.

Проект РФФИ 19-01-00373 Задачи оптимального управления в динамических системах с импульсной структурой (2019-2021), руководитель.

Проект РФФИ 19-01-00573 Проблема точного и приближенного соблюдения ограничений в задачах управления (2019-2021), исполнитель

Проект РФФИ № 20-08-00873 Разработка математических моделей и алгоритмов решения прикладных оптимизационных маршрутных задач со сложными целевыми функциями и параметрами (2020-2022), исполнитель

на английском языке

RFBR project 16-01-00505 Degenerate optimal control problems and their applications to dynamical systems with an impulse structure (2016-2018), supervisor.

RFBR project 18-01-00410 Management tasks with extension elements and game interactions (2018-2020), contractor.

RFBR project 19-01-00373 Tasks of optimal control in dynamic systems with a pulse structure (2019-2021), supervisor.

RFBR project 19-01-00573 The problem of accurate and approximate compliance with restrictions in management tasks (2019-2021), contractor

RFBR No. 20-08-00873 Development of mathematical models and algorithms for solving applied optimization routing problems with complex objective functions and parameters, (2020-2022), contractor

2.12. Планируемое участие в научных проектах (в любом качестве) в 2021 году

Общее количество – 4, из них:

руководство – 1, участие в качестве исполнителя – 3,

а именно:

Данный проект - исполнитель

Проект РФФИ 19-01-00373 Задачи оптимального управления в динамических системах с импульсной структурой (2019-2021), руководитель.

Проект РФФИ 19-01-00573 Проблема точного и приближенного соблюдения ограничений в задачах управления (2019-2021), исполнитель

Проект РФФИ № 20-08-00873 Разработка математических моделей и алгоритмов решения прикладных оптимизационных маршрутных задач со сложными целевыми функциями и параметрами (2020-2022), исполнитель

(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, адъюнктами, интернами, ординаторами, разработке и чтении новых образовательных курсов в российских и зарубежных вузах)*

Осуществляется руководство аспирантами по специальностям 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, 01.01.02 - дифференциальные уравнения, динамические системы и теория оптимального управления.

Разработаны и читаются курсы: Методы оптимизации, Дифференциальные уравнения, Теория устойчивости. Дискретная оптимизация.

2.15. В 2019 или в 2020 годах участвовал в качестве руководителя проекта, финансируемого Фондом, или исполнителя проекта, финансируемого Фондом, в следующих проектах (при наличии):

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

+79221401515, a.n.sesekin@urfu.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	Сесекин Александр Николаевич
Данные документа, удостоверяющего личность*** (серия, номер, сведения о дате и органе выдачи)	<div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px;"></div> <p style="color: red; font-size: small;">Внимание! Данное поле заполняется вручную в печатном экземпляре заявки. Заполнение обязательно!</p>
Адрес проживания	620014 Екатеринбург, ул. Шейнкмана 90 - 165
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 _____/А.Н. Сесекин/

Дата подписания «___» _____ 2020 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.

<https://publons.com/researcher/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.

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=6507117765>

ORCID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу orcid.org.

<https://orcid.org/0000-0003-3555-0080>

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 2016 года, 98, из них:

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

2.10. Список публикаций основного исполнителя проекта с 1 января 2016 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

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. 2020, Vol. 88 P. 53-69 (<https://doi.org/10.1007/s10472-019-09626-w>)
5. Forghani, M. Convolutional Neural Network-Based Approach to in Silico Non-Anticipating Prediction of Antigenic Distance for Influenza Virus / M.Forghani, M.Khachay // Viruses. 2020. Vol.12, iss.9, art. no. 1019. 20 p. (IF=3.816, Q2 WoS, Q1 SJR) (<https://doi.org/10.3390/v12091019>)
6. Khachai, M., Dubinin 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>)
7. 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>)
8. 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.
9. Khachay, M., Ogorodnikov, Y.: Polynomial-Time Approximation Scheme for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows. Proc. Steklov Inst. Mathematics (IF= 0.467, Q4 WoS, Q3 SJR). 2019. Vol.307, suppl.1. C.51-63 (<https://doi.org/10.1134/S0081543819070058>)
10. 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)
11. 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)
12. 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)
13. 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)
14. Khachay, M. An Extension of the Das and Mathieu QPTAS to the Case of Polylog Capacity Constrained CVRP in Metric Spaces of a Fixed Doubling Dimension / M.Khachay, Yu.Ogorodnikov, D.Khachay // Lecture Notes in Computer Science (Q2 SJR) . 2020. Vol. 12095. P. 49-68. DOI: 10.1007/978-3-030-49988-4_4
15. Khachay, M. Kudriavtsev, A. and Petunin A. PCGLNS: A Heuristic Solver for the Precedence Constrained Generalized Traveling Salesman Problem. Lecture Notes in Computer Science (Q2 SJR). 2020. Vol. 12422. P. 196-208, https://doi.org/10.1007/978-3-030-62867-3_15

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»).

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

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 аппроксимируемости 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.)

на английском языке

2.12. Планируемое участие в научных проектах (в любом качестве) в 2021 году

Общее количество – 2, из них:

руководство – 1, участие в качестве исполнителя – 1,

а именно:

РФФИ - грант № 19-07-01243 - руководитель

данный проект - исполнитель

(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 -
40 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, адъюнктами, интернами, ординаторами, 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 4 аспирантами, чтение лекционных курсов в УрФУ и ОмГТУ:
"Нелинейное программирование", "Распознавание образов и анализ данных", "Дополнительные главы распознавания образов"

2.15. В 2019 или в 2020 годах участвовал в качестве руководителя проекта, финансируемого Фондом, или исполнителя проекта, финансируемого Фондом, в следующих проектах (при наличии):

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 style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; height: 15px;"></div> <p style="color: red; font-size: small;">Внимание! Данное поле заполняется вручную в печатном экземпляре заявки. Заполнение обязательно!</p>
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 «___» _____ 2020 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 бюджетное учреждение науки Институт математики и механики им.Н.Н.Красовского Уральского отделения Российской академии наук

3.2. Сокращенное наименование

ИММ УрО РАН

3.3. Наименование на английском языке

N.N.Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

3.4. Организационно-правовая форма (указывается по ОКОПФ)

Федеральные государственные бюджетные 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

6660008166, 667001001, 1026604965177, 65701000

3.8. Адрес

620990, г. Екатеринбург, ул.Софьи Ковалевской, д.16

3.9. Фактический адрес

620108, г. Екатеринбург, ул.Софьи Ковалевской, д.16

3.10. Субъект Российской Федерации

Свердловская обл

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

Врио директора, Лукоянов Николай Юрьевич

3.12. Контактный телефон

+73433748332

3.13. Электронный адрес (E-mail)

dir-info@imm.uran.ru, Nikolai.Antonov@imm.uran.ru, domracheva@imm.uran.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;
Лица, не являющиеся налоговыми резидентами Российской Федерации, могут осуществлять работы по Проекту на безвозмездной основе (за исключением руководителя проекта).
- 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 траектории инструмента при резке 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 Cutting Path Problem 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 в рамках разработки и внедрения инновационных технологий Четвертой промышленной революции "Индустрия 4.0" 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 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.

Проблема разработки методов, алгоритмов и соответствующего программного обеспечения, позволяющих в автоматическом режиме минимизировать временные и стоимостные параметры процесса резки заготовок из листовых материалов является актуальнейшей задачей раскройно-заготовительного производства. Её сложность связана с проблемой эффективной аппроксимируемости экстремальных маршрутных задач, возникающих при маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ. Другая проблема связана с отсутствием математических моделей и алгоритмов, позволяющих с единых теоретических позиций эффективно решать разные классы оптимизационных маршрутных задач, отягощенных сложными ограничениями. На настоящий момент участниками проекта получены обнадеживающие результаты в этой области. В данном проекте будут проведена формализация задач оптимизации траектории инструмента для машин листовой резки с ЧПУ на единой концептуальной основе «сегментной резки», предложенной участниками проекта, разработаны новые высокоэффективных методов их решения, исследованы вопросы аппроксимируемости различных типов экстремальных задач, в частности, обобщенной задачи коммивояжера (GTSP) с условиями предшествования. В проекте также исследуется вопрос разработки методологических основ решения интегрированной оптимизационной проблемы раскроя листового материала и маршрутизации траектории инструмента машин с числовым программным управлением (ЧПУ). До настоящего времени задачи оптимизации раскроя (Cutting & Packing) и задачи оптимизации траектории инструмента для машин с ЧПУ решались отдельно. В рамках данного проекта впервые рассматривается интегрированная задача раскроя и маршрутизации инструмента (INRP - Integrated Nesting and Routing Problem) с суммарной целевой функцией стоимости раскроя и резки. 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, смысл которых заключается в изменении условий оптимизационной задачи в ходе построения решения и порождаемых, в данном случае, особенностями термической резки листовых материалов. По существу можно говорить о новом типе экстремальных маршрутных задач, которые ранее не были исследованы специалистами в области теории исследования операций.

В настоящее время для оптимизации временных и стоимостных характеристик процесса листовой резки на машинах с ЧПУ применяются, в основном, интерактивные методы, не гарантирующие получения оптимального (или близкого к нему по функционалу) 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.

В рамках проекта будут рассмотрены все известные на сегодняшний день классы задач маршрутной оптимизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ:

1. Задача непрерывной резки (в англоязычной литературе CCP, Continuous Cutting Problem). Детали вырезаются последовательно, переход от текущей детали к следующей осуществляется только после окончательной вырезки текущей детали, т.е. используется стандартная резка «по замкнутому» контуру. Режущий инструмент может врезаться в контур в любой точке по периметру детали, т.е. количество возможных точек врезки и выключения инструмента бесконечно;
2. Обобщенная задача коммивояжера (в англоязычной литературе GTSP, Generalized Traveling Salesman Problem). Детали вырезаются последовательно. Переход от одного контура к другому осуществляется только после окончательной вырезки текущего контура. Точки врезки и выключения инструмента фиксированы, для каждого контура выбирается одна точка врезки и выключения инструмента из дискретного множества допустимых точек;
3. Задача резки с фиксированными точками врезки (в англоязычной литературе ECP, EndPoint Cutting Problem). Точки врезки и выключения режущего инструмента заранее заданы. В этой задаче предусмотрена техника частичной резки контуров. При этом режущий инструмент переходит к вырезке другого контура и вернется позже для завершения резки оставшихся не вырезанных участков контура;
4. Задача непрерывной резки по сегментам с фиксированным числом базовых сегментов резки (в англоязычной литературе SCCP, Segment Continuous Cutting Problem)
5. Обобщенная проблема непрерывной резки сегментов (GSCCP): Задача непрерывной резки по сегментам (SCCP), но набор сегментов не фиксируется, а представляет собой конечное множество различных наборов сегментов.
6. Задача с возможностью прерывания процесса резки (в англоязычной литературе ICP, Intermittent Cutting Problem). Данная задача представляет собой общий случай задачи маршрутизации Cutting Path Problem, в которой контур может быть вырезан частично и точки врезки заранее не заданы, т.е. режущий инструмент может врезаться и выходить из контура в любой точке;
7. Интегрированная задача раскроя и маршрутизации инструмента (INRP - Integrated Nesting and Routing Problem) с суммарной целевой функцией стоимости раскроя и резки

Исследуемые прикладные задачи, как отмечалось выше, 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. Бесспорным представляется то, что при решении этой практической проблемы требуются согласованные усилия математиков, инженеров и программистов. Именно такой подход и реализуется в проекте. Задача является комплексной, а её исследование приведёт к установлению новых существенных 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. Improvement of design processes and technological preparation of modern cutting and stockpiling production in the framework of the development and implementation of innovative technologies of the Fourth Industrial Revolution "Industry 4.0" 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. The main tasks of the project are the tasks of minimizing the time of sheet cutting on CNC machines and the cost of cutting for the cutting card obtained at the design stage of cutting the material. The problem of developing methods, algorithms and appropriate software that automatically minimize the time and cost parameters of the process of cutting blanks from sheet materials is the most urgent task of cutting blank production. Another difficult problem is related to the efficient approximability of extreme routing problems. To date, the project participants have obtained encouraging results in this area for the case of geometric formulations. In this project, the question of approximability of the generalized traveling salesman problem (GTSP) with precedence conditions will be investigated. The project also investigates the development of methodological foundations for solving the integrated optimization problem of cutting sheet material and routing the tool path of machines with numerical control (CNC). Until now, cutting & packing optimization and tool path optimization problems have been solved separately for CNC machines. Within the framework of this project, the Integrated Nesting and Routing Problem (INRP) with the total objective function of the cutting cost and the cutting process cost is considered for the first time. The project participants plan to investigate the development of a unified theoretical and methodological concept for solving routing problems of this kind, including the development of mathematical models and optimization algorithms, as well as methods of meeting the necessary cutting technological requirements when modeling the tool route. For the first time, the project will allow solving some classes of continuous-discrete optimization problems with changing (dynamic) constraints generated by the features of thermal cutting of sheet materials.

Currently, to optimize the time and cost characteristics of the cutting process, mainly interactive methods are used that do not guarantee an optimal (or even close sub-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.

Within the framework of the project, all currently known classes of the tool path problem for CNC sheet cutting machines will be considered:

1. Continuous Cutting Problem (CCP): each closed contour (that bounds a part) is cut out entirely by one movement of the torch, but cutting can start from any point (and finishes at the same point).
2. Generalized Traveling Salesman Problem (GTSP): cutting can start only at one of the predefined points on the contour, the contour must be cut entirely.
3. Endpoint Cutting Problem (ECP): cutting can start only at one of the predefined points on the contour, and the contour can be cut in several approaches, in parts.
4. Segment Continuous Cutting Problem (SCCP): the notion of a cutting segment is introduced, which is a generalization of a contour; it can be either a part of a contour or a combination of several contours or their parts. Each segment is cut out entirely, thus CCP C SCCP.
5. Generalized Segment Continuous Cutting Problem (GSCCP): segment cutting (SCCP), but the selection of segments is not fixed in advance, but is subject to optimization
6. Intermittent Cutting Problem (ICP): the most general cutting problem described in the literature, when contours can be cut in parts, in several approaches, and cutting can begin at any point in the contour.
7. Integrated Nesting and Routing Problem (INRP) with the total objective function of the cutting cost and the cutting process cost

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 (Cutting) 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 математическая постановка задачи оптимизации траектории инструмента для машин фигурной листовой резки на основе обобщенной модели задачи SCCP
- Общая формальная постановка интегрированной оптимизационной задачи раскроя и маршрутизации инструмента (INRP - Integrated Nesting and Routing Problem) с суммарной целевой функцией стоимости раскроя и резки.
- Разработка общей схемы и приближенного алгоритма для решения задачи INRP.
- Разработка точных алгоритма решения задачи для модели GTSP с условиями предшествования и динамическим ограничением "жесткости листа" на основе методов ветвей и границ и ДП.
- Формализация «динамических» ограничений типа «Правило жесткости листа» для задач классов CCP, GTSP, ECP и SCCP
- Разработка методики формирования «сегментов резки» и «базовых сегментов резки» для формирования исходных данных задач SCCP и GSCCP с использованием специальных техник резки (мульти-контурной и мульти-сегментной)
- Разработка приближенных алгоритмов и эффективных эвристик с возможностью оценки точности для вышеупомянутых задач больших размерностей (дискретная модель, свыше 40 контуров) на основе метода ветвей и границ
- 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 для наиболее распространенных лазерных машин с ЧПУ и марок материала в наиболее применяемом диапазоне толщин.
- Разработка алгоритмов и программного обеспечения расчета температурных полей при термической резке
- Разработка программного обеспечения для определения точек врезки, удовлетворяющих эвристическому 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 T-Flex и САПР "Сириус".

Таким образом, масштаб и комплексность решаемых задач 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 the cutting processes are naturally used.

The main objectives of the project include:

- General mathematical formalization of the tool path optimization problem for a sheet cutting machine based on the generalized model of the SCCP problem
 - General mathematical formalization of the Integrated Nesting and Routing Problem (INRP) with the total objective function of the cutting cost and the cutting process cost
 - Development of a general scheme and an approximate algorithm for solving the INRP problem.
 - Development of an exact algorithm for solving the problem for the GTSP model with precedence conditions and dynamic constraint of the "sheet stiffness" based on the methods of branches and boundaries and DP.
 - Formalization of "dynamic" constraints of the type "sheet hardness rule" for CCP, GTSP, ECP и SCCP
 - 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 efficient approximate algorithms and heuristics 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 T-Flex and CAM "Sirius".
- Thus, the scale and complexity of the task allow 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.

Впервые исследуется интегрированная оптимизационная задача раскроя и маршрутизации инструмента (INRP -

Integrated Nesting and Routing Problem) с суммарной целевой функцией стоимости раскроя и резки. Кроме того, специальные способы решения дискретной модели в форме задачи о последовательном обходе мегаполисов на основе обоснованной авторами заявки специальной схемы динамического программирования позволят 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 достижения 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.

For the first time, the Integrated Nesting and Routing Problem (INRP) with the total objective function of the cutting cost and the cutting process cost is investigated.

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 topic 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.

Вместе с тем в сочетании с интерактивными методами проектирования они обеспечивают рациональные и технологически допустимые варианты траекторий инструмента машины с ЧПУ. Следует подчеркнуть, что алгоритмы, реализованные в коммерческом программном обеспечении, не описываются 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]. Авторы использовали простую модель, эквивалентную классической задаче коммивояжера. 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 пока не могут быть реализованы на машинах листовой резки с ЧПУ. Выделим также первые работы, проведенные в Перми[9-10].

Из зарубежных конкурентов следует особо 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 и разработкой алгоритмов для двух классов задач с дискретными моделями: GTSP и ECP. Ряд исследователей из Китая, Гонконга, Японии и др. стран также периодически публикуют свои результаты (см., например, [14-21]). Однако они, как правило, касаются разработки отдельных алгоритмов только для одного из вышеприведенных в п.4.2. классов задач рассматриваемой проблемы маршрутизации инструмента, при этом часто не учитывают важные технологические ограничения листовой резки на машинах с ЧПУ. В частности, учет термических деформаций заготовок и искажение их геометрических размеров не являются предметом большинства исследований, что делает эти работы в достаточной степени академическими и не в полной мере приемлемыми для практики. Вместе с тем, эти работы вносят свой вклад в теорию и практику экстремальных задач маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ.

В целом, ещё раз можно отметить, что за рамками современных исследований отечественных и зарубежных коллег, в основном, остаются следующие принципиальные моменты:

1. Разработка алгоритмов, обеспечивающих получение глобального оптимума оптимизационной задачи маршрутизации инструмента.
2. Учет тепловых искажений заготовок при термической резке материала на машине с ЧПУ.
3. Разработка комплексного подхода к решению оптимизационных задач всех вышеперечисленных классов для различного технологического оборудования листовой фигурной резки с ЧПУ
5. Разработка подходов к решению интегрированной оптимизационной задачи раскроя и маршрутизации инструмента с суммарной целевой функцией стоимости раскроя и резки.
6. Разработка алгоритмов решения задач нескольких классов с применением специальных техник резки и ориентированных на минимизацию стоимости процесса резки, а не на минимизацию холостого хода инструмента.
7. Разработка алгоритмов, позволяющих эффективно решать задачи с непрерывными моделями (CCP, SCCP), для которых точки врезки в материал могут выбираться из континуальных множеств на плоскости.
8. Разработка оценок вычислительной сложности и точности разрабатываемых алгоритмов для практических задач маршрутизации инструмента с дополнительными ограничениями.

Применение эффективных классических метаэвристических алгоритмов дискретной оптимизации (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. [22-30]. Таким образом, необходимость в создании новых оптимизационных постановок задач, алгоритмов и программного обеспечения представляется доминантой развития методов решения исследуемой оптимизационной проблемы и задач проекта.

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., Panyukov, A.V. Software for constructing a-chains with ordered enclosing for a plane connected 4-regular graph (2019) IFAC-PapersOnLine, 52 (13), pp. 2650-2655. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.607
7. Makarovskikh, T.A., Panyukov, A.V., Savitskiy, E.A. Mathematical models and routing algorithms for economical cutting tool paths (2018) International Journal of Production Research, 56 (3), pp. 1171-1188. DOI: 10.1080/00207543.2017.1401746
8. Makarovskikh, T., Panyukov, A., Savitskiy, E. Software development for cutting tool routing problems (2019) Procedia Manufacturing, 29, pp. 567-574. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.123
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. Faizrakhmanov, 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 Research 53(6), 1761-1776 (2015). <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.959268>
14. Kandasamy, V.A., Udhayakumar, S. Effective location of micro joints and generation of tool path using heuristic and genetic approach for cutting sheet metal parts (2020) International Journal of Material Forming, 13 (2), pp. 317-329. DOI: 10.1007/s12289-019-01488-1
15. Li, J., Zhu, H., Zhang, T., He, L., Guan, Y., Zhang, H. Automatic generation of auxiliary cutting paths based on sheet material semantic information (2020) International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106 (9-10), pp. 3787-3797. DOI: 10.1007/s00170-019-04768-x
16. Vicencio K, Davis B, Gentilini I (2014) Multi-goal path planning based on the generalized traveling salesman problem with neighborhoods. IROS 2014:2985–299
17. Helsgaun, K., 2014. Solving the Equality Generalized Traveling Salesman Problem Using the Lin-Kernighan-Helsgaun Algorithm. Tech. Rep. December 2013, Roskilde University, Roskilde.
18. Ezzat, A. A bare-bones ant colony optimization algorithm that performs competitively on the sequential ordering problem /A. Ezzat, A.M. Abdelbar, D.C. Wunsch// Memetic computing. – 2014. – Vol.6, Issue 1. – P. 19-29.
19. Jing, Y. An optimized algorithm of numerical cutting-path control in garment manufacturing /Y. Jing, C. Zhige// Advanced Materials Research. – 2013. – Vol.796. – P. 454-457.
20. Yun, Y. Hybrid genetic algorithm approach for precedence-constrained sequencing problem /Y. Yun, H. Chung, C. Moon// Computers and Industrial Engineering. – 2013. – Vol. 65. – P. 137-147.
21. Vijay Anand, K., Ramesh Babu, A. Heuristic and genetic approach for nesting of two-dimensional rectangular shaped parts with common cutting edge concept for laser cutting and profile blanking processes (2015) Computers and Industrial Engineering, 80, pp. 111-124. DOI: 10.1016/j.cie.2014.11.018
22. 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.
23. 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.
24. Panteleev A.V. Metaheuristic algorithms for searching global extremum. - M: MAIPrint, 2009. - 159 p.
25. An Efficient Hybrid Colony System for Traveling Salesman Problem (Mohammad Reihaneh, Daniel Karapetyan), Algorithmic Operations Research 7, 22–29, 2012.
26. Daniel Karapetyan, Gregory Gutin, European Journal of Operational Research 219, 234–251, 2012. 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.
27. Lin-Kernighan heuristic adaptations for the generalized traveling salesman problem (Daniel Karapetyan, Gregory Gutin), European Journal of Operational Research 208, 221–232, 2011.
28. Gendreau, M., Potvin, J.Y.: Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science 272, Springer International Publishing, 3rd edn. (2019)
29. Ghilas, V., Demir, E., Van Woensel, T.: An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows and scheduled lines. Comput. Oper. Res. 72(C), 12–30 (Aug 2016). <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.01.018>
30. Helsgaun, K.: Solving the equality Generalized Traveling Salesman Problem using the Lin-Kernighan-Helsgaun algorithm. Mathematical Programming Computation pp. 1–19 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12532-015-0080-8>

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. A number of researchers from China, Hong Kong, Japan and other countries also publish their results periodically [14–21]. 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. At the same time, these works contribute to the theory and practice of considered problems of tool routing for CNC sheet cutting machines.

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. Development of algorithms to efficiently solve problems with continuous models (CCP, SCCP).
5. Development of approaches to solving the integrated optimization nesting and routing problem with the total objective function of the f cutting cost and cutting process cost.
6. Development of algorithms focused on minimizing the cost of the cutting process, and not on minimizing tool idle moving.
7. Development of algorithms that effectively solve problems with continuous models (CCP, SCCP), for which the pierce points of the material can be selected from continuous sets on the plane.
8. Development of estimates of the computational complexity and accuracy of the developed algorithms.

The use of efficient classical meta-heuristic discrete optimization algorithms (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. [22–30]. 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., Panyukov, A.V. Software for constructing a-chains with ordered enclosing for a plane connected 4-regular graph (2019) IFAC-PapersOnLine, 52 (13), pp. 2650-2655. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.607
7. Makarovskikh, T.A., Panyukov, A.V., Savitskiy, E.A. Mathematical models and routing algorithms for economical cutting tool paths (2018) International Journal of Production Research, 56 (3), pp. 1171-1188. DOI: 10.1080/00207543.2017.1401746
8. Makarovskikh, T., Panyukov, A., Savitskiy, E. Software development for cutting tool routing problems (2019) Procedia Manufacturing, 29, pp. 567-574. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.123
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 Research 53(6), 1761-1776 (2015). <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.959268>
14. Kandasamy, V.A., Udhayakumar, S. Effective location of micro joints and generation of tool path using heuristic and genetic approach for cutting sheet metal parts (2020) International Journal of Material Forming, 13 (2), pp. 317-329. DOI: 10.1007/s12289-019-01488-1
15. Li, J., Zhu, H., Zhang, T., He, L., Guan, Y., Zhang, H. Automatic generation of auxiliary cutting paths based on sheet material semantic information (2020) International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106 (9-10), pp. 3787-3797. DOI: 10.1007/s00170-019-04768-x
16. Vicencio K, Davis B, Gentilini I (2014) Multi-goal path planning based on the generalized traveling salesman problem with neighborhoods. IROS 2014:2985-299
17. Helsgaun, K., 2014. Solving the Equality Generalized Traveling Salesman Problem Using the Lin-Kernighan-Helsgaun Algorithm. Tech. Rep. December 2013, Roskilde University, Roskilde.
18. Ezzat, A. A bare-bones ant colony optimization algorithm that performs competitively on the sequential ordering problem /A. Ezzat, A.M. Abdelbar, D.C. Wunsch// Memetic computing. - 2014. - Vol.6, Issue 1. - P. 19-29.
19. Jing, Y. An optimized algorithm of numerical cutting-path control in garment manufacturing /Y. Jing, C. Zhige// Advanced Materials Research. - 2013. - Vol.796. - P. 454-457.
20. Yun, Y. Hybrid genetic algorithm approach for precedence-constrained sequencing problem /Y. Yun, H. Chung, C. Moon// Computers and Industrial Engineering. - 2013. - Vol. 65. - P. 137-147.
21. Vijay Anand, K., Ramesh Babu, A. Heuristic and genetic approach for nesting of two-dimensional rectangular shaped parts with common cutting edge concept for laser cutting and profile blanking processes (2015) Computers and Industrial Engineering, 80, pp. 111-124. DOI: 10.1016/j.cie.2014.11.018
22. 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.
23. 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.
24. Panteleev A.V. Metaheuristic algorithms for searching global extremum. - M: MAIPrint, 2009. - 159 p.
25. An Efficient Hybrid Colony System for Traveling Salesman Problem (Mohammad Reihaneh, Daniel Karapetyan), Algorithmic Operations Research 7, 22-29, 2012.
26. Daniel Karapetyan, Gregory Gutin, European Journal of Operational Research 219, 234-251, 2012. 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.
27. Lin-Kernighan heuristic adaptations for the generalized traveling salesman problem (Daniel Karapetyan, Gregory Gutin), European Journal of Operational Research 208, 221–232, 2011.
28. Gendreau, M., Potvin, J.Y.: Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science 272, Springer International Publishing, 3rd edn. (2019)
29. Ghilas, V., Demir, E., Van Woensel, T.: An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows and scheduled lines. Comput. Oper. Res. 72(C), 12-30 (Aug 2016).
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.01.018>
30. Helsgaun, K.: Solving the equality Generalized Traveling Salesman Problem using the Lin-Kernighan-Helsgaun algorithm. Mathematical Programming Computation pp. 1-19 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12532-015-0080-8>

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 tool (cutting) path problem 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.
- схемы решения новой оптимизационной задачи интегрированной оптимизационной задачи раскроя и маршрутизации инструмента с суммарной целевой функцией стоимости раскроя и резки.

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, базирующихся на методе ветвей и границ. Это позволит впервые получать оценки точности полученных решений и впервые обеспечит получение точных решений для многих задач из различных классов, приведенных в п.4.2. 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) наряду с методом ветвей и границ будут использованы также метаэвристики, адаптированные под условия задачи. Среди них выделим метод переменных окрестностей (VNS, Н.Младенович) и эволюционные стратегии. 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) для представления любой задачи в форме задачи GSCCP с последующим сведением к задачам классов CCP и GTSP.

Помимо этого предполагается разработать и методы решения непрерывно-дискретных задач CCP и SSCP, 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. Для этих целей будут использованы методы геометрической оптимизации и комбинаторные алгоритмы.

План работ на 2021 г. приведён в п.4.9. В 2022-2023гг. предполагается выполнить следующие работы.

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

- обобщить существующие математические постановки задачи оптимизации Cutting Path Problem и INRP расширить их классификацию с использованием введенного авторами проекта понятия "сегмент резки" и "базовый сегмент резки"; (2022 г.)
- формализовать "динамические ограничения" в используемых математических оптимизационных моделях в случае необходимости с одновременным соблюдением правил "жесткости детали" и "жёсткости листа"; (2022 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.) для технологического оборудования плазменной и газовой резки и расширенной номенклатуры марок материала в диапазоне толщин от 1 до 40мм; (2023 г.)
- разработать методы формирования "базовых сегментов резки" в зависимости от исходных данных задачи и с учетом соблюдения правил "жесткости" листа; (2022г..)
- 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. (2022 г.)

В области разработки оптимизационных алгоритмов для исследуемых моделей предполагается:

- разработать точные алгоритмы решения задач GTSP и дискретных вариантов задач SCCP и GSCCP с учетом "условий предшествования" и "динамических ограничений", обеспечивающие получения глобального оптимума за приемлемое время для размерностей, соответствующим диапазону 30-40 базовых сегментов резки; (2022 г.)
- разработать параллельные алгоритмы для решения маршрутных задач большой размерности с использованием суперкомпьютеров.(2022)
- 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"; (2023 г.)
- разработать приближенные алгоритмы решения задачи оптимизации траектории инструмента для всех используемых дискретных моделей (TSP, GTSP, ECP и ICP) и базовых сегментов резки, содержащих несколько контуров вырезаемых деталей, а также с учетом "динамических ограничений"; (2023г.)
- разработать алгоритмы и программы моделирования тепловых полей при термической резке листовых материалов на машинах с ЧПУ для лазерной, плазменной и газовой технологии резки (2022 г.);
- оценить вычислительную сложность разработанных алгоритмов и разработать способы её уменьшения. (2022 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 (2023 гг.), в частности, заданные в пространствах фиксированной размерности удвоения.

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; (2023 г.)
- разработать программное обеспечение для вычисления температурных полей при резке заготовок на машинах термической резки с визуализацией и интеграцией в оптимизационных процедурах (2022);
- исследовать зависимость соблюдения правил "жёсткости листа" от температуры материала в зоне завершения резки "сегмента резки"; (2023г.)
- 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).

- на основании полученных формул разработать программное обеспечение для точного расчета целевых функций стоимости и времени резки (2022)
- реализовать разработанные ранее алгоритмы моделирования тепловых полей при термической резке листовых материалов на машинах с ЧПУ в виде подсистемы САПР (2023).;
- 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)); (2023г.)
- 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. (2023г.)

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";
- алгоритмы и программы 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 для оценки эффективности разрабатываемых алгоритмов.
- 1 монография по теме проекта

на английском языке

CNC should be:

- original concept of segment cutting;
- adapted mathematical models;
- specialized efficient algorithms for continuous and discrete optimization
- methods of reducing thermal deformations of the material.
- schemes for solving a new optimization problem for an integrated optimization problem for cutting and routing a tool with a total objective function of the cost of cutting and cutting.

As an approach to solving routing 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 the widely understood DP (I mean the application of the DP method in problems complicated by constraints of various types, which will require expanding the very ideology of this method) and new special heuristic methods based on the branch and bound method. This will allow for the first time to obtain estimates of the accuracy of the solutions obtained and, for the first time, will provide exact solutions for many problems from various classes given in Section 4.2. This approach will require the construction of non-standard extensions of the original problems themselves; in particular, in some cases it will be necessary to transform the system of restrictions. So, the precedence conditions, which are a typical type of restrictions in routing problems and determine the requirements for the route "in general", are transformed in DP constructions (this approach was proposed by the project participants) to some rules for deleting (tasks from the list). These rules already generate constraints on the current displacements, which fit well into the DP-based scheme, which makes it possible to guarantee an optimal solution for larger dimensions than was previously possible. Along with the "global" DP, it is proposed to use local variants - optimizing inserts, implemented in an iterative mode.

To find the optimal sequence of traversing cutting segments in the case of large dimensions (more than 40 segments), along with the branch and bound method, metaheuristics adapted to the conditions of the problem will also be used. Among them, we single out the method of variable neighborhoods (N. Mladenovich) and evolutionary strategies. All of these algorithms also need to take into account special types of constraints.

At the top level of the hierarchy, the main approach to the formation of cutting segments will be to actively use non-standard cutting techniques (multi-contour and multi-segment cutting) to represent any task in the form of a GSCCP task, followed by reduction to tasks of the CCP and GTSP classes.

In addition, it is planned to develop methods for solving continuous-discrete problems CCP and SCCP, in which the insertion points for cutting out cutting segments are selected from continuous sets associated with geometric contours describing the geometry of the cut blanks, and the processing sequence is from a discrete set of permutations. For these purposes, methods of geometric optimization and combinatorial algorithms will be used.

The work plan for 2021 is given in clause 4.9. In 2022-2023. it is supposed to perform the following work.

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

- to generalize the existing mathematical formulations of the optimization problem for the Cutting Path Problem and INRP to expand their classification using the concepts of "cutting segment" and "basic cutting segment" introduced by the authors of the project; (2022)
- to formalize "dynamic constraints" in the used mathematical optimization models, if necessary, with simultaneous observance of the rules of "part stiffness" and "sheet stiffness"; (2022)
- to determine the exact mathematical formulas for the target functions of optimization problems 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.) for technological equipment for plasma and gas cutting and an expanded range of brands material in the range of thicknesses from 1 to 40mm; (2023)
- to develop methods of forming "basic cutting segments" depending on the initial data of the problem and taking into account the observance of the rules of "rigidity" of the sheet; (2022)
- develop methods of reducing the problem of trajectory optimization with a fixed number of cutting segments (SCCP) to the known optimization models of continuous and discrete optimization with additional constraints (TSP, the problem of sequential traversal of megacities (special type GTSP), CCP (continuous-discrete model of the trajectory optimization problem) instrument), ECP and others (2022)

In the development of optimization algorithms for the models under study, it is assumed:

- to develop precise algorithms for solving GTSP problems and discrete variants of SCCP and GSCCP problems, taking into account the "precedence conditions" and "dynamic constraints", ensuring the receipt of the global optimum in a reasonable time for dimensions corresponding to the range of 30-40 basic cutting segments; (2022)
- to develop parallel algorithms for solving high-dimensional routing problems using supercomputers. (2022)
- to develop approximate algorithms for solving the problem of optimizing the tool path for the extended class of SSP (SCCP) using a continuous-discrete model and basic cutting segments containing several outlines of cut parts and taking into account "dynamic constraints"; (2023)
- to develop approximate algorithms for solving the problem of optimizing the tool path for all used discrete models (TSP, GTSP, ECP and ICP) and basic cutting segments containing several contours of cut parts, as well as taking into account "dynamic constraints"; (2023)
- to develop algorithms and programs for modeling thermal fields during thermal cutting of sheet materials on CNC machines for laser, plasma and gas cutting technology (2022);
- to evaluate the computational complexity of the developed algorithms and develop ways to reduce it. (2022)
- in recent years, specialists in the field of effective approximability of intractable problems have succeeded in designing and justifying polynomial algorithms with estimates and approximation schemes for geometric formulations of routing problems (TSP, GTSP, VRP, etc.). However, the tasks studied in the project often admit to be reduced to a purely non-Euclidean formulation of these tasks. Therefore, one of the research areas of this project will be related to the issues of effective approximability of just such metric formulations of route problems (2023), especially, given in metric spaces of a fixed doubling dimension.

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

- to develop 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 cutting cost for all types of CNC technological equipment used for cutting shaped blanks from sheet material; (2023)
- to develop software for calculating temperature fields when cutting blanks on thermal cutting machines with visualization and integration in optimization procedures (2022);
- to investigate the dependence of compliance with the rules of "sheet stiffness" on the temperature of the material in the cutting completion zone of the "cutting segment"; (2023)
- Obtain formulas and generated tables for 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 blanks (2022).
- based on the obtained formulas, develop software for the accurate calculation of the target functions of cost and cutting time (2022)
- to 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 (2023);
- to integrate the developed software with domestic CAD / CAM systems (T-Flex CAD, T-Flex CNC, CAD "SIRIUS" (CAD / CAM system for designing true shape cutting of sheet material and preparing control programs for thermal cutting machines with CNC, developed with the participation of the authors of the project)); (2023)
- to develop software for solving 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
- to develop a library of test examples with its placement on the Internet and to test the developed complex of programs. (2023)

Planned results:

- mathematical formulation of optimization problems using the concepts "cutting segment" and "basic cutting segment" introduced by the authors of the project
- Extended classification of tool routing tasks for CNC sheet cutting machines
- Formalization of "dynamic constraints" in the used mathematical optimization models, if it is necessary to comply with the rule of "sheet stiffness";
- exact mathematical formulas for the target functions of optimization problems 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 of forming "basic cutting segments" depending on the initial data of the problem and taking into account the observance of the rules of "rigidity" of the sheet;
- techniques for reducing the problem of path optimization with a fixed number of cutting segments (SCCP) to known

optimization models of continuous and discrete optimization with additional constraints (TSP, CCP, ECP, etc.)

- Exact algorithms for solving the GTSP problem, taking into account the "precedence conditions" and "dynamic constraints", providing a global optimum for a reasonable time for dimensions corresponding to the range of 30-35 shaped workpieces;
- parallel algorithms for solving high-dimensional routing problems using supercomputers.
- approximate algorithms for solving the problem of optimizing the tool path for the extended class of SSP (SCCP) using a continuous-discrete model and basic cutting segments containing several contours of cut parts 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 outlines of cut parts, as well as taking into account "dynamic constraints";
- algorithms and programs for modeling thermal fields during thermal cutting of sheet materials on CNC machines;
- evaluating the computational complexity of the developed algorithms and ways to reduce it.
- efficient approximate algorithms for metric formulations of routing problems
- a set of programs that provides 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 technological equipment used for cutting shaped blanks from sheet material;
- software for calculating temperature fields when cutting blanks on thermal cutting machines;
- formulas and generated tables of the dependence of the operating speed of sheet cutting machines with CNC 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 used material and the cost of cutting processes on various technological equipment
- integration of the developed software with domestic CAD / CAM systems (T-Flex CAD, T-Flex CNC, CAD "SIRIUS"
- a library of sample instances for evaluating the effectiveness of the developed algorithms.
- 1 monograph 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. участником проекта А.А.Петуниным 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 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. А.А. Петуниным была предложена концепция «сегмента резки» [8], которая позволила расширить существующую классификацию задач маршрутизации инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ (был введен новый класс SCCP, а затем – GSCCP). Было показано, что для этих классов задач возможно применение модели мегаполисов. В работе [9] (вместе с П.А.Ченцовым) для задачи GTSP был формализован учёт т.н. правила жёсткости детали [10], которое относится к классу "динамических ограничений". 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] 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 инструментальный 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. Хачаем, известным специалистом в области теории и методов комбинаторной оптимизации и статистического обучения. В частности, (совместно с учениками) 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]. В последние годы, совместно с Ю.Ю.Огородниковым и Д.М.Хачаем им получены прорывные результаты в области эффективной аппроксимируемости задачи об оптимальной маршрутизации транспорта (VRP). В том числе впервые обоснована аппроксимируемость CVRP в метрических пространствах фиксированной размерности удвоения в классе квазиполиномиальных приближенных схем [28-29], разработана серия эффективных аппроксимационных схем для постановок задачи с дополнительными ограничениями на грузоподъемность и временные промежутки обслуживания и неоднородным потребительским спросом [30-32].

Некоторые алгоритмы оптимизации маршрута инструмента были реализованы в виде подсистемы разработанной под руководством одного из участников 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, включающаяся 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.

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. *fac papers online*, 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 optimization 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., 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.
8. Petunin, A. A. (2015). Modeling of tool path for the CNC sheet cutting machines. B 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 papers online*, 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 papers online*, 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. B 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. B 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. Tavaeva, A. F., & Petunin, A. A. (2017). The cutter speed determination of CNC laser cutting machines for a precise calculation of the objective function of the 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. Tavaeva, A. F., & Petunin, A. A. (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. Efficient Approximation of the Capacitated Vehicle Routing Problem in a Metric Space of an Arbitrary Fixed Doubling Dimension // Doklady Mathematics. 2020. Vol.102, no.1. P.324-329 (<https://doi.org/10.1134/S106456242004008>) (WoS, Scopus Q2 SJR)
29. Khachay, M. An Extension of the Das and Mathieu QPTAS to the Case of Polylog Capacity Constrained CVRP in Metric Spaces of a Fixed Doubling Dimension / M.Khachay, Yu. Ogorodnikov, D.Khachay // Lecture Notes in Computer Science (Q2 SJR). 2020. Vol. 12095. P. 49-68. DOI: 10.1007/978-3-030-49988-4_4
30. 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)
31. 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. (https://doi.org/10.1007/978-3-030-22629-9_22) Scopus (Q2 SJR)
32. Khachay, M., Ogorodnikov, Y.: Efficient PTAS for the Euclidean CVRP with time windows // Lecture Notes in Computer Science. 2018. Vol. 11179. P. 318-328 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-11027-7_30), Scopus (Q2 SJR)

4.8. Перечень оборудования, материалов, информационных и других ресурсов, имеющих 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))

на русском языке

1. Математическая формализация задач маршрутизации инструмента на основе понятий «сегментной резки» и «динамических ограничений» для класса Generalized SCCP
2. Математическая формализация интегрированной задачи 2D раскроя и маршрутизации (INPR)
3. Разработка библиотеки тестовых примеров CPPLib с открытым доступом для оценки эффективности алгоритмов решения задачи маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ.
4. Разработка эвристического солвера на основе метода ветвей и границ, адаптированного для решения задачи GTSP с учетом условий предшествования
5. Исследование эффективности разработанных эвристик для решения задач маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ на примерах из библиотеки тестов CPPLib
6. Разработка методики точного вычисления целевых функций времени резки и стоимости резки для машин лазерной и плазменной резки с ЧПУ.

7. Построение полиномиальных приближенных схем для задач GTSP с учетом условий предшествования
8. Адаптация разработанных схем для использования при решении задачи маршрутизации инструмента (для случая дискретных моделей).
9. Сведение задачи оптимизации с фиксированным числом сегментов (SCCP) к известным моделям оптимизации с ограничениями, зависящими от списка заданий.
10. Разработка эвристических алгоритмов для задач сегментной резки с ограничениями (на основе эволюционных стратегий).
11. Разработка приближенного алгоритма решения для непрерывных моделей задач CCP и SCCP с использованием методов вычислительной геометрии и комбинаторной оптимизации
12. Разработка метода ДП для точного решения задачи SCCP(дискретный вариант) при оптимизации траектории инструмента машины с ЧПУ с учетом динамических ограничений типа "жесткость детали".
13. Разработка варианта метода ДП при наличии условий предшествования для задачи GTSP и в случае зависимости функции стоимости от списка невыполненных заданий (ограничение типа «жесткость листа»).
14. Разработка алгоритма на основе метода ДП для решения задачи GTSP с условиями предшествования и оптимизацией точки старта.
15. Разработка алгоритмов распараллеливания вычислительной процедуры при решении задачи GTSP.
16. Разработка расчетной модели и программы для вычисления температурных полей при лазерной резке листового материала на машинах с ЧПУ,
17. Исследование влияния условий предшествования на вычислительную сложность решения маршрутных задач.
18. 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.

Планируемые командировки в 2020:

1. International conference "Mathematical Optimization Theory and Operations Research" (MOTOR 2020), июль 2021, Иркутск - три участника
2. International Conference "Optimization and applications" (OPTIMA); Optima -2021, октябрь, Петровац, Черногория - два участника.
3. International Conference on Combinatorial Optimization (COCOА), декабрь -2021, Китай - два участника

на английском языке

1. Mathematical formalization of tool routing problems based on the concepts of "segment cutting" and "dynamic constraints" for the Generalized SCCP class
2. Mathematical formalization of the integrated problem of 2D cutting and routing (INPR)
3. Development of a library of test cases CPPLib with open access to evaluate the efficiency of algorithms for solving the problem of routing a tool in CNC sheet cutting machines.
4. Development of a heuristic solver based on the branch and bound method, adapted for solving the GTSP problem, taking into account the precedence conditions
5. Investigation of the effectiveness of the developed heuristics for solving the problems of tool routing in CNC sheet cutting machines using examples from the CPPLib test library
6. Development of a methodology for accurate calculation of target functions of cutting time and cost of cutting for laser and plasma cutting machines with CNC.
7. Construction of polynomial approximation schemes for GTSP problems taking into account precedence conditions
8. Adaptation of the developed schemes for use in solving the problem of tool routing (for the case of discrete models).
9. Reduction of the optimization problem with a fixed number of segments (SCCP) to known optimization models with constraints depending on the list of tasks.
10. Development of heuristic algorithms for constrained segment cutting tasks (based on evolutionary strategies).
11. Development of an approximate solution algorithm for continuous models of CCP and SCCP problems using computational geometry and combinatorial optimization methods
12. Development of the DP method for the exact solution of the SCCP problem (discrete version) when optimizing the tool path of a CNC machine, taking into account dynamic constraints such as "part stiffness".
13. Development of a variant of the DP method in the presence of precedence conditions for the GTSP problem and in the case of the dependence of the cost function on the list of outstanding tasks (constraint of the "sheet stiffness" type).
14. Development of an algorithm based on the DP method for solving the GTSP problem with precedence conditions and optimization of the starting point.

15. Development of algorithms for parallelizing the computational procedure when solving the GTSP problem.
16. Development of a computational model for calculating temperature fields during laser cutting of sheet material on CNC machines,
17. Investigation of the influence of precedence conditions on the computational complexity of solving routing problems.
18. Investigation of the dependence of the operating speed of CNC sheet cutting machines on the number of frames of the control program in order to form correction coefficients in the objective function when optimizing the cutting time of workpieces.

Planned business trips in 2020:

1. International conference "Mathematical Optimization Theory and Operations Research" (MOTOR 2020), July 2021, Irkutsk - three participants
2. International Conference "Optimization and applications" (OPTIMA); Optima -2021, October, Petrovac, Montenegro - two participants.
3. International Conference on Combinatorial Optimization (COCOА), December -2021, China - two participants

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

Ченцов А.Г.

1. Разработка метода ДП для точного решения задачи SCCP (дискретный вариант) при оптимизации траектории инструмента машины с ЧПУ с учетом динамических ограничений типа "жесткость детали".
2. Разработка варианта метода ДП при наличии условий предшествования для задачи GTSP и в случае зависимости функции стоимости от списка невыполненных заданий (ограничение типа «жесткость листа»).
3. Решение задачи GTSP с условиями предшествования и оптимизацией точки старта.
4. Разработка алгоритмов распараллеливания вычислительной процедуры при решении задачи GTSP методом ДП.
5. Общее руководство проектом.
6. Подготовка к опубликованию 2 статей

Петунин А.А. :

1. Математическая формализация задач маршрутизации инструмента на основе понятий «сегментной резки» и «динамических ограничений» для класса Generalized SCCP
2. Математическая формализация интегрированной задачи 2D раскроя и маршрутизации (INPR)
3. Разработка библиотеки тестовых примеров CPPLib для оценки эффективности алгоритмов решения задачи маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ.
4. Разработка методики точного вычисления целевых функций времени резки и стоимости резки для машин лазерной и плазменной резки с ЧПУ. (совместно с А.Ф.Таваевой)
5. Подготовка к публикации 2 статей

Хачай М.Ю.

1. Построение полиномиальных приближенных схем для задач GTSP с учетом условий предшествования
2. Адаптация разработанных схем для использования при решении задачи маршрутизации инструмента (для случая дискретных моделей).
3. Разработка эвристического солвера на основе метода ветвей и границ, адаптированного для решения задачи GTSP с учетом условий предшествования (совместно с А.Кудрявцевым)
4. Исследование эффективности разработанных эвристик на примерах из библиотеки тестов CPPLib (совместно с А.Кудрявцевым и П.А.Ченцовым).
5. Подготовка к публикации 2 статей

Сесекин А.Н.

1. Сведение задачи оптимизации с фиксированным числом сегментов (SCCP) к известным моделям оптимизации с ограничениями, зависящими от списка заданий.
2. Разработка эвристических алгоритмов для задач сегментной резки с ограничениями (на основе эволюционных стратегий).
3. Разработка приближенного алгоритма решения для непрерывных моделей задач CCP и SCCP с использованием методов вычислительной геометрии и комбинаторной оптимизации
4. 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 (GSSP), основанная на понятиях «сегментная резка» и «базовый сегмент резки» 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 SCCP 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 на основе метода ветвей и границ с теоретическими оценками точности и аппроксимационные схемы для метрических постановок задач CVRP и GTSP. Для оценки эффективности разработанных алгоритмов впервые будет создана и размещена в Интернете библиотека с открытым доступом CPPLib.

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.

Будет проведена математическая формализация интегрированной задачи 2D раскроя и маршрутизации (INPR).

на английском языке

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

Algorithms based on the dynamic programming method will be developed to solve cutting tool routing problems with various constraints, including "dynamic constraints" with obtaining a global extremum in a reasonable time for 30-35 contours describing parts.

We will also explore various options for reducing the path optimization problem with a fixed number of cutting segments to the known continuous and discrete optimization models with non-standard constraints (CCP and GTSP).

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

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

It is proposed to create a set of programs that simulate time-varying temperature fields that arise during thermal cutting for the case of multicontour cutting. The influence of precedence conditions on the complexity of solving routing problems by the method of dynamic programming will be investigated.

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

New polynomial approximation algorithms based on the branch-and-bound method with theoretical estimates of accuracy and approximation schemes for metric formulations of CVRP and GTSP problems will be proposed.

Formulas will also be obtained and tables 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 the most commonly used metal grades for sheet cutting will be generated.

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)

В связи с необходимостью дистанционного режима работы по проекту, участия в конференциях в онлайн-формате и обеспечения мобильности участников проекта планируется приобрести 4 ноутбука с мультимедийными аксессуарами со следующими характеристиками.

1. Ноутбук

- дисплей с диагональю в диапазоне не менее 17 дюймов;
- разрешение дисплея не менее 1920x1080;
- Процессор Intel Core i5 не ниже восьмого поколения;
- базовая частота процессора – не менее 1,6 GHz;
- максимальная частота – не менее 3,9 GHz;
- количество ядер – не менее 4;
- количество потоков – не менее 8;
- кэш-память не менее 6 Mb;
- встроенное графическое ядро;
- расчетная мощность - не более 15 Вт.
- оперативная память - не менее 8 ГБ;
- Тип видеокарты: дискретная, дискретная и встроенная;
- SSD накопитель объемом не менее 256 Гб;
- Встроенный микрофон и веб-камера;
- Предустановленная Операционная система семейства Microsoft Windows

2. Привод DVD+/-RW -встроенный или внешний

Скорость чтения:

- Скорость чтения CD не менее 24x
- Скорость чтения DVD не менее 8x
- Скорость записи
- Скорость записи CD-R не менее 24x
- Скорость записи CD-RW не менее 24x
- Скорость записи DVD-R не менее 8x
- Скорость записи DVD+R не менее 8x
- Скорость записи DVD-RW не менее 6x
- Скорость записи DVD+RW не менее 8x

3. Мышь лазерная

- интерфейс подключения к ПК – USB;
- технология – лазерная;
- разрешение сенсора не менее 1000 dpi;
- количество кнопок (не считая колеса прокрутки) – не менее 2;
- длина кабеля не менее 1,8 м.

4. Веб-камера

- интерфейс подключения – не младше спецификации USB2.0;
- разрешение матрицы не менее 1920x1080;
- наличие микрофона

5. Стерео гарнитура проводная

- Тип наушников накладные с оголовьем
- Частота воспроизведения наушников не менее 20 - 20000 Гц
- Проводной микрофон
- Частотный диапазон микрофона не менее 100 - 16000 Гц
- Интерфейс подключения к ПК – USB или 2 TRS3.5
- Длина кабеля не менее 1,8м Шт 4

6. Сумка для переноски ноутбука

Сумка для переноски ноутбука с подходящим под диагональ ноутбука размером

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.Г. Ченцов/

Форма 5. Запрашиваемое финансирование на 2021 год

5.1. Планируемые расходы по проекту

№ п.п.	Направления расходования средств гранта	Сумма расходов (тыс.руб.)
	ВСЕГО	6000
	Вознаграждение членов научного коллектива (с учетом страховых взносов во внебюджетные фонды, без лиц категории «вспомогательный персонал»)	4600
	Вознаграждение лиц категории «вспомогательный персонал» (с учетом страховых взносов во внебюджетные фонды)	0
1	Итого вознаграждение (с учетом страховых взносов во внебюджетные фонды)	4600
2	Оплата научно-исследовательских работ сторонних организаций, направленных на выполнение научного проекта (не более 15 процентов от суммы гранта)	0
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.	300
4	Расходы на приобретение материалов и комплектующих для проведения научного исследования	0
5	Иные расходы для целей выполнения проекта	500
6	Накладные расходы организации (не более 10 процентов от суммы гранта)	600

5.2. Расшифровка планируемых расходов

№ п.п.	Направления расходования средств 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>4600</p> <p>Ченцов Александр Георгиевич - 800 тыс.руб. Петунин Александр Александрович - 650 тыс.руб. Сесекин Александр Николаевич - 650 тыс.руб. Хачай Михаил Юрьевич - 650 тыс.руб. Березин Иван Михайлович - 350 тыс.руб. Ченцов Павел Александрович - 450 тыс.руб. Григорьев Алексей Михайлович - 300 тыс.руб. Кудрявцев Андрей Владиславович - 250 тыс.руб. Таваева Анастасия Фидагилевна - 250 тыс.руб. Шипачева Екатерина Николаевна - 250 тыс.руб.</p>
2	<p>Оплата научно-исследовательских работ сторонних организаций, направленных на выполнение научного проекта (приводится перечень планируемых договоров (счетов) со сторонними организациями с указанием предмета и суммы каждого договора)</p> <p>0</p>
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))

300

Ноутбук с аксессуарами - 4 шт.

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))

0

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)

500

Подпись руководителя проекта _____/А.Г. Ченцов/

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.