

УТВЕРЖДАЮ

Зам. проректора по науке ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина», доктор физ.-мат. наук,
профессор



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» на диссертационную работу МАКАРОВСКИХ Татьяны Анатольевны «Методы и алгоритмы решения задачи маршрутизации специального вида в плоских графах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики.

Актуальность темы диссертации. Теоретические вопросы исследования специального вида маршрутов в графах привлекают в последние годы интерес многих учёных. Потребность в разработке специальных методов и алгоритмов маршрутизации в плоских графах возникает также при использовании моделей теории графов для решения целого ряда прикладных маршрутных задач. К такому классу задач относится, в частности, задача маршрутизации инструмента машин листовой резки с числовым программным управлением (ЧПУ). Эта задача решается на этапе разработки управляющих программ для машины с ЧПУ, которые задают траекторию перемещения инструмента и ряд технологических команд, определяющих параметры резки листового материала для получения из него заготовок известных форм и размеров. Необходимые данные для моделирования маршрута инструмента машины с ЧПУ определяет информация о раскройных картах, которые разрабатываются на этапе проектирования раскроя и порождают известные задачи оптимизации раскроя листового материала. Проектирование раскройных карт и генерация

управляющих программ, как правило, осуществляется пользователями отечественных и зарубежных системы автоматизированного проектирования (САПР), предназначенные для разработки управляющих программ (т.н. Computer-Aided Manufacturing, САМ-систем). При этом раскройные карты могут содержать уменьшенный по сравнению со стандартным припуск на рез между некоторыми контурами вырезаемых деталей («совмещенный рез»), что позволяет в ряде случаев сократить расход материала, длину траектории рабочего хода инструмента и число точек врезки (точек пробивки листового материала). Маршрут, покрывающий все граничные контуры вырезаемых деталей, определяет траекторию движения режущего инструмента. При этом рассматривается класс маршрутов, удовлетворяющих следующим технологическим ограничениям:

- 1) отсутствие пересечения внутренних граней любой начальной части маршрута с ребрами его оставшейся части,
- 2) отсутствие самопересечений траектории реза,
- 3) начальные вершины покрывающих цепей должны допускать врезку.

Проблема разработки эффективных алгоритмов маршрутизации в графах возникает также в других приложениях. Таким образом, разработка методов и алгоритмов нахождения маршрутов специального вида в плоских графах является **актуальной** задачей.

Цель исследования Т.А. Макаровских состояла в решении задач маршрутизации специального вида в плоских графах, при этом в качестве основной прикладной задачи рассмотрена задача формирования маршрута для графов, являющихся гомеоморфными образами раскройного плана, содержащего компоненты с использованием совмещенного реза. Соискателем были решены следующие **задачи** для достижения этой цели:

1. Определен способ представления гомеоморфного образа раскройного плана, позволяющего интерпретировать поставленные задачи маршрутизации в терминах моделей плоского графа.

2. Введены классы ОЕ-, NOE- и PPOE-маршрутов в плоских графах, удовлетворяющих некоторым наборам технологических ограничений, в том числе, вызванных особенностями листовой резки на машинах с ЧПУ.

Доказано существование OE- и NOE маршрутов в плоских графах. Доказаны необходимые и достаточные условия существования PPOE-маршрутов в плоских графах.

3. Разработаны полиномиальные алгоритмы решения задач построения маршрутов для специальных классов в плоских графах. Доказана их корректность.

4. Разработано программное обеспечение для реализации описанных алгоритмов.

5. Получены оценки числа получаемых маршрутов специального вида, удовлетворяющих некоторым типам ограничений.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Объем диссертации составляет 225 страниц, объем библиографии — 200 наименований.

Во **введении** приводится обоснование актуальности темы диссертации, выделяются и формулируются цели и задачи исследования, описывается структурно-логическая схема диссертационной работы.

Первая глава посвящена аналитическому обзору литературы, отражающему состояние проблемы применения графов в математическом моделировании, показано место решаемой в данной работе задачи относительно ранее опубликованных в научной литературе результатов, касающихся маршрутизации в графах. Показано, что некоторые задачи требуют построения маршрутов, удовлетворяющих различным ограничениям на последовательность ребер. Отмечено также, что остается открытой задача построения эйлерова цикла, удовлетворяющего заданным локальным и глобальным ограничениям в плоском графе. В известных работах, посвященных задаче построения в плоском эйлеровом графе эйлерова цикла при наличии ограничений, отсутствуют строгая формализация и доказательство результативности алгоритмов. Кроме того, известные алгоритмы имеют достаточно высокую вычислительную сложность. Рассмотрена задача построения плоской самонепересекающейся цепи, а

также отмечена потенциальная возможность построения покрытий, удовлетворяющих некоторым видам ограничений, в частности, в задачах маршрутизации в плоских графах.

Во второй главе поставлена и решена задача построения в плоском графе маршрутов, удовлетворяющих условию отсутствия пересечения внутренних граней любой его начальной части с ребрами его оставшейся части. Формально такие маршруты определены как упорядоченная последовательность ОЕ-цепей графа, образующих класс ОЕ-маршрутов. Сформулирована и доказана теорема существования ОЕ-цикла в плоском эйлеровом графе, ОЕ-маршрута с минимальным по мощности упорядоченным множеством цепей, ОЕ-маршрута с минимальным по мощности упорядоченным множеством цепей и минимальной длиной переходов между последовательными цепями. Определена оценка мощности эйлерова ОЕ-покрытия для произвольного плоского связного графа, показано, что на мощность покрытия существенное влияние оказывает наличие мостов в графе. Разработаны полиномиальные алгоритмы решения задачи построения ОЕ-маршрутов для плоского эйлерова графа.

В третьей главе показана возможность распознавания системы переходов, которая позволяет решить задачу построения совместимого пути за линейное время. Приведены алгоритмы построения совместимых эйлеровых цепей и покрытий совместимыми цепями. Показано, что алгоритмы имеют линейную сложность. Введен класс АОЕ-цепей, содержащий А-цепи с упорядоченным охватыванием. Доказано, что для существующей системы переходов, которая соответствует некоторой А-цепи, можно построить ОЕ-цепь. Разработан алгоритм поиска АОЕ-цепи в плоском 4-регулярном графе. Показано, что алгоритм решает задачу за полиномиальное время. Введен класс NOЕ-маршрутов в плоских графах. Этот класс является расширением класса АОЕ и в него входят все самонепересекающиеся ОЕ-цепи. Разработан алгоритм построения NOЕ-цепи. Его выполнение состоит в сведении исходного плоского графа к

плоскому связному 4-регулярному графу за счет расщепления вершин степени выше 4 и дальнейшего выполнения алгоритма. Определены оценки количества ОЕ-цепей для заданной системы переходов.

В четвертой главе рассмотрены вопросы применения некоторых разработанных алгоритмов в САМ-системах в рамках технологической подготовки процессов плоского раскроя для решения задачи маршрутизации в раскройных планах с совмещенным резом.

В заключении резюмируются полученные результаты, рассматриваются направления дальнейших исследований в данной области.

Обоснованность и достоверность полученных результатов, полученных в диссертационной работе, базируется на использовании апробированных научных положений, методов исследования, корректном применении математического аппарата, согласовании новых научных результатов с известными теоретическими положениями.

Научная новизна диссертационной работы заключается в решении некоторых классов задач маршрутизации в плоских графах и состоит в следующем.

1. Введен класс ОЕ-маршрутов в плоских графах. Маршруты введенного класса представляют упорядоченную последовательность реберно-непересекающихся цепей, покрывающих граф, в которой отсутствуют пересечения внутренней пройденной части маршрута с ребрами его непройденной части. Показано, что на мощность покрытия существенное влияние оказывает наличие мостов в графе. Доказано, что плоские эйлеровы графы имеют эйлеровы циклы, принадлежащие классу ОЕ.
2. Введен класс АОЕ-маршрутов в плоских графах. Маршруты введенного класса являются ОЕ-маршрутами, для которых выполнено дополнительное локальное ограничение: следующее ребро определяется заданным циклическим порядком на множестве ребер, инцидентных текущей вершине.

3. Введен класс NOE-маршрутов в плоских графах. Этот класс является расширением класса АОЕ и в него входят все маршруты, состоящие из непересекающихся ОЕ-цепей.
4. Разработаны алгоритмы нахождения в плоском графе $G=(V,E)$ маршрутов введенных классов, имеющие полиномиальную вычислительную сложность. Данные алгоритмы позволяют минимизировать длину дополнительных переходов между концевыми вершинами цепей графа $G=(V,E)$.
5. Определены оценки количества ОЕ-цепей для фиксированной системы переходов (последовательности обхода ребер).

Теоретическая значимость исследования Т. А. Макаровских заключается в расширении классов задач построения маршрутов специального вида в плоских графах и в разработке полиномиальных алгоритмов нахождения маршрутов, удовлетворяющих некоторым технологическим ограничениям, которые могут возникать в практических приложениях, в частности, при маршрутизации траектории инструмента оборудования листовой резки с ЧПУ.

Практическая значимость исследования Т.А. Макаровских состоит в том, что разработанные алгоритмы могут быть применены, в частности, в САМ-системах технологической подготовки процессов раскроя листовых материалов для некоторых видов раскройных планов. Полученные результаты позволяют формализовать ряд практических требований к маршрутизации в плоских графах, включая требования к формированию маршрутов для компонент раскройных планов, использующих совмещенный рез с целью минимизации расхода материала и сокращения затрат на этапе резки деталей.

Автореферат и текст диссертации Т.А. Макаровских характеризуются понятным стилем изложения материала, адекватным уровнем математической квалификации и оформлен в соответствии с требованиями ВАК РФ. Автореферат диссертационной работы, в основном, отражает содержание диссертационного исследования.

Содержание и полученные результаты диссертации **соответствуют п.10 паспорта специальности 05.13.17**: разработка основ математической теории языков и грамматик, теории конечных автоматов и теории графов.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Разработанные алгоритмы могут быть применены в САМ-системах технологической подготовки процессов раскроя листового материала для специальных типов раскройных планов, использующих совмещенные резы.

В качестве **замечаний к диссертации** необходимо отметить следующее.

1. В тексте диссертации отсутствует раздел (параграф), в котором были бы чётко сформулированы задачи исследования, соответствующие названию диссертационной работы. В частности, не представлен список «задач маршрутизации специального вида в плоских графах» и не описаны типы ограничений (формулировки задач разбросаны по всему тексту работы).

2. Остаётся неисследованным вопрос, в каком случае разработанные алгоритмы формируют допустимый с технологической точки зрения маршрут для практических задач маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ.

3. Утверждение о том, что «применение технологий ECP и ICP в системе технологической подготовки процессов раскроя плоских деталей предполагает» этап «абстрагирования раскройного плана до плоского графа» (стр. 170) неверно, поскольку технология ICP может использовать только непрерывную модель для описания раскройного плана.

4. Непрерывную модель описания раскройных планов (причём всегда) использует также неоднократно упоминаемая в тексте диссертации технология CCP, поэтому фраза «технологии GTSP и CCP различаются

размерами и значениями элементов матриц между контурами» (стр. 167) вызывает недоумение.

5. Неясно, на каких теоретических или практических результатах основано утверждение, что при «отсутствии совмещения резов детали должны находиться на расстоянии не менее 3D» (стр.171). Теоретически это расстояние может быть близким к 2D, но фактически задаётся значительно бóльшим, чем указанное в диссертации предельное значение.

6. Автору диссертации следовало бы отметить в тексте работы условность применяемого им термина «совмещение контуров», поскольку техника совмещенного реза только уменьшает расстояние между граничными контурами деталей, но не делает его нулевым.

Указанные замечания не снижают общей значимости диссертационной работы и требуемого научного уровня.

Заключение

Диссертационная работа Т.А. Макаровских представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным для докторских диссертаций разделом II Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 (в редакции постановлений Правительства РФ №335 от 21.04.2016 и №1168 от 01.10.2018). Соискателем расширены и формализованы классы задач построения в плоских графах маршрутов специального вида, в частности, удовлетворяющих некоторым технологическим ограничениям, возникающим при генерации управляющих программ в САМ-системах технологической подготовки процессов листового раскроя; разработаны полиномиальные алгоритмы нахождения таких маршрутов, что в совокупности можно квалифицировать как значимое научное достижение. Соискатель Т. А. Макаровских заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики.

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на расширенном заседании кафедры алгебры и фундаментальной информатики Института естественных наук и математики УрФУ, протокол № 3 от 04.03.2020.

Волков Михаил Владимирович

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

Ленина 51, г. Екатеринбург, 62000 Россия

Зав. кафедрой алгебры и фундаментальной информатики УрФУ

доктор физико-математических наук, профессор

раб. телефон +7(343) 389 9468

email: m.v.volkov@urfu.ru

Петунин Александр Александрович

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

Мира 19, г. Екатеринбург, 620002 Россия

Профессор кафедры информационных технологий и автоматизации проектирования УрФУ

доктор технических наук, доцент

раб. телефон +7(343) 375 9714

email: a.a.petunin@urfu.ru



Наименование организации, предоставившей отзыв:

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

Адрес организации: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Телефон: +7 (343) 375-45-07; 375-46-09; 375-97-78 (факс)

email: rector@urfu.ru

WWW: <https://urfu.ru>



СВЕДЕНИЯ О ЛИЦАХ, УТВЕРДИВШИХ И ПОДГОТОВИВШИХ ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Макаровских Т.А. «Методы и алгоритмы решения задачи маршрутизации специального вида в плоских графах» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики

Наименование организации	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»	
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации	
Почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты, адрес официального сайта в сети «Интернет».	620002, Уральский федеральный округ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19 +7 (343) 375-45-07; 375-46-09; 375-97-78 (факс) rector@urfu.ru https://urfu.ru	
Сведения о лице, утвердившем отзыв	ФИО	Иванов Алексей Олегович
	Ученая степень (с указанием шифра специальности)	д.ф.-м.н., 01.04.14
	Должность	Заместитель проректора по науке
Сведения о лицах, подготовивших отзыв	ФИО	Волков Михаил Владимирович
	Ученая степень (с указанием шифра специальности)	Д.ф.-м.н., 01.01.06
	Должность	Главный научный сотрудник, Лаборатория комбинаторной алгебры; заведующий кафедрой алгебры и фундаментальной информатики

	ФИО	Петунин Александр Александрович
	Ученая степень (с указанием шифра специальности)	Д.т.н., 05.13.12
	Должность	Профессор, кафедра информационных технологий и автоматизации проектирования; Ведущий научный сотрудник, Лаборатория оптимального раскрытия промышленных материалов и оптимальных маршрутных технологий

**Список основных работ сотрудников ведущей организации
по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях**

1. Баранский В.А., Сеньчонок Т.А. О пороговых графах и реализациях графических разбиений // Труды института математики и механики УрО РАН. 2017. Т. 23. № 2. С. 22-31.
2. Gusev V.V., Jungers R.M., Pribavkina E.V. Generalized primitivity of labeled digraphs// Electronic Notes in Discrete Mathematics. 2017. Т. 61. С. 549-555.
3. Баранский В.А., Надымова Т.И., Сеньчонок Т.А. Новый алгоритм порождения графических последовательностей // Сибирские электронные математические известия. 2016. Т. 13. С. 269-279.
4. Старостин Н.Д., Куреннов Д.В. Поуровневое приближение к минимальному маршруту // Пром-Инжиниринг Труды III международной научно-технической конференции. 2017. С. 325-332.
5. Ananichev D.S., Gusev V.V. Approximation of reset thresholds with greedy algorithms // Fundamenta Informaticae. 2016. Т. 145. № 3. С. 221-227.
6. Брусянин Д.А., Вихарев С.В., Сай В.М. Моделирование транспортных потоков при развитии транспортной инфраструктуры на примере строительства трамвайной линии "Академический – ВИЗ" (Екатеринбург) // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2017. № 2 (34). С. 67-78.

7. Брусянин Д., Щавзис С., Вихарев С. Классификация маршрутных схем с учетом размещения транспортно-пересадочных узлов // Логистика. 2015. № 4 (101). С. 40-47.

8. Gorbenko A., Popov V. An efficient algorithm for integrated task sequencing and path planning for robotic remote laser welding // В сборнике: AIP Conference Proceedings 2017. С. 560043.

9. Gorbenko A., Popov V. The multi-robot forest coverage for weighted terrain // Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments. 2015. Т. 7. № 6. С. 835-847.

10. Сизый С.В., Кузнецова Е.Ю., Акулова А.А. Графо-географическая модель региона и барицентрическая методика размещения предприятий утилизации автотранспортных отходов в уральском регионе // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2017. № 2 (34). С. 57-66.

11. Петунин А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А. К вопросу о маршрутизации перемещений при листовой резке деталей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Матем. моделирование и программирование. 2017. Т. 10, № 3. С. 25-39.

12. Tavaeva A., Petunin A., Ukolov S., Krotov V. A Cost Minimizing at Laser Cutting of Sheet Parts on CNC Machines // Mathematical Optimization Theory and Operations Research. MOTOR 2019. Communications in Computer and Information Science, vol 1090. Springer, Cham, pp. 422-437.

13. Chentsov A.G., Chentsov P.A., Sesekin A.N., Petunin A.A. Model of megalopolises in the tool path optimisation for cnc plate cutting machines // International Journal of Production Research. 2018. Т. 56. № 14. С. 4819-4830.

14. Петунин А.А., Ченцов А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А. Элементы динамического программирования в конструкциях локального улучшения эвристических решений задач маршрутизации с ограничениями // Автоматика и телемеханика. 2017. № 4. С. 106-125.

15. Петунин А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А. Об одной задаче маршрутизации перемещений инструмента при листовой резке деталей // Моделирование и анализ информационных систем. 2015. Т. 22. № 2. С. 278-294.

«04» марта 2020 г.

Данные верны:

Начальник отдела аттестации ИЦК



Стрехнина Т.Н.