**Файзрахманов Р.А., Мурзакаев Р.Т., Приступов В.С., Поляков А.Н.**

**Оптимизация энергопотребления режущего инструмента станка с ЧПУ при наличии трудно формализуемых ограничений**

**Аннотация**

Энергопотребление режущего инструмента станка с ЧПУво многом определяется его маршрутом и зависит от длины холостых и рабочих перемещений, а также количеством точек врезки. Как правило, для его снижения необходимо минимизировать все эти параметры, нополученные при этом маршруты не всегда технологически допустимы, что может привести к появлению бракованных изделий и поломке оборудования. В статье рассмотрено автоматическое формирование технологически допустимого маршрута с минимальным энергопотреблением. Задача формирования маршрута разделена на два этапа: выбор порядка обработки деталей и выбор точек врезки (входа/выхода) инструмента. Выбор последовательности резки основывается на правилах обнаружения полостей материала (карманов), образованных контурами деталей, путем использования геометрических центроидов и выпуклых оболочек контуров резки. Выбор точек врезки осуществляется одной из нескольких реализаций алгоритма интервального перебора в зависимости от количества раскраиваемых деталей. Рассмотрены ограничения при резке и приведены примеры образования карманов. Ограничения представлены в виде стека правил, формализующих спорные ситуации при резке. Критерием оптимизации является минимум общего времени резки. Применение метода штрафных функций позволило отбросить решения, приводящее к образованию карманов. Приведена общая схема алгоритма и рассмотрен пример его работы.

**Ключевые слова**: маршрутизация, режущий инструмент, технологические ограничения, раскрой материала, ЧПУ, *ITAS Nesting*.

**Fayzrakhmanov R.A., Murzakaev R.T., Pristupov V.S., Polyakov A.N.**

**The power consumption optimization of the cutting tool route of the CNC machine by using hard-to-formalize constraints.**

**Abstract**

The cutting tool power consumption of the CNC machine is largely determined by its route and depends on the idle and working movement length, and also on the count of insertion points. Usually to reduce it, it is necessary to minimize all three parameters, but the resulting routes are not always technologically possible that could lead to defective products and damage of equipment. In this article the automatic generation of a technologically correct route is shown, which usually prevails over the traditional tasks of minimizing the idle and working run of the cutting tool. The routing task is divided into two stages: selecting the sequence of cut processing and selecting the insertion points on details. The choice of the sequence is based on the rules for detecting the pockets of material by using geometric centroids and convex shells of the cutting contours. The choice of insertion points is carried out by using one of several realizations of interval search algorithm, depending on the count of cutting contours. Constraints in cutting and examples of pockets creation are considered. Constraints are presented as a stack of rules that formalize controversial situations of cutting. The criterion is the minimization of the total cutting time. The application of the method of penalty functions allowed to discard the solutions leading to the formation of pockets. The general scheme of the algorithm is given and an example of its working is shown.

**Keywords**: routing, cutting tool, technological constraints, material cutting, CNC, ITAS Nesting.

**Введение**. Решение задачи маршрутизации режущего инструмента (РИ) является одним из ключевых этапов процесса раскроя листового материала [1]. Оптимизация данного процесса позволяет снизить стоимость и энергопотребление изготовления деталей.

Задачу маршрутизации РИ по карте раскроя можно представить в виде задачи коммивояжера с ограничениями: для построения решения имеются множества потенциальных точек входа инструмента (врезки) вида , из которых может быть выбрана только одна точка на каждый контур резки (замкнутый геометрический объект, состоящий из набора дуг и отрезков) [2, 3, 4].

Получение оптимального маршрута РИ в общем случае невозможно из-за необходимости проверки большого количества вариантов, нелинейно растущего по факториальной зависимости от количества контуров резки:

,

где - общее количество вариантов решений;

- общее количество контуров резки на карте раскроя;

- количество потенциальных точек врезки на -том контуре.

Существует множество реализаций эвристических алгоритмов для получения решений, близких к оптимальным, по следующим критериям [3]:

* минимизация холостых перемещений РИ по карте раскроя;
* минимизация рабочих перемещений РИ – достигается за счет применения различных технологий резки;
* минимизация общего времени резки – комбинированное использование двух предыдущих критериев;
* максимизация качества маршрута РИ – достигается путем учета трудно формулируемых ситуаций, приводящих к браку изделия или к аварийным ситуациям на производстве.

На данный момент успешно решается задача маршрутизации с применением первых трех критериев [5]. Однако, при таком подходе в ряде случаев невозможно построить маршрут РИ, не полагаясь на опыт специалиста, поскольку близкие к оптимальным решения могут быть технологически недопустимы.

Кроме того, с каждым новым поколением станки становятся все более совершенными, что делает стандартные критерии менее актуальными. Критерии качества составляют целую группу и не могут быть однозначно формализованы, однако, они снижают влияние человеческого фактора на процесс раскроя.

Цель данной статьи – решение задачи маршрутизации с применением трудно формализуемых ограничений, позволяющее сократить энергопотребление станка.

**Ограничения задачи маршрутизации**. Независимо от карты раскроя при формировании маршрута РИ должны строго учитываться следующие ограничения:

1. Условие предшествования обработки контуров резки (рисунок 1а) – в первую очередь должна производиться резка контуров с наибольшим уровнем вложенности.
2. Расчет резки должен производиться с компенсацией, равной половине ширины резки, т.е. по эквидистанте контура (рисунок 1б).
3. Расчет начала врезки и выхода РИ при обработке контура должен производиться на некотором расстоянии, зависящем от типа РИ и толщины обрабатываемой заготовки (рисунок 1в).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Статьи\Электротехника 2017.1\1а.png | C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Статьи\Электротехника 2017.1\1бчб.png | C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Статьи\Электротехника 2017.1\1вчб.png |
| а | б | в |

Рисунок 1. Технологические ограничения при решении задачи

а – уровни вложенности контуров

б – резка с учетом компенсации

в – резка с учетом подхода/отхода к контуру

Перечисленные ограничения не имеют исключений, а последствия их нарушения однозначны и обоснованы [4], однако, существуют ситуации, которые при определенных условиях могут привести к ошибочному результату. Например, «запирание» деталей в карманах материала, образованными обработкой контуров невыпуклой формы (рисунок 2а, детали 4 и 5 после обработки детали 3) или простой последовательной резкой нескольких простых контуров (рисунок 2б, деталь 9).

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Статьи\Электротехника 2017.1\2а.png | C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Статьи\Электротехника 2017.1\2б.png |
| а | б |

Рисунок 2. Примеры образования карманов материала

а – детали 4 и 5 в кармане детали 9

б – деталь 9 в кармане после обработки остальных деталей

При определенных условиях (толщина материала, геометрия контура, площадь кармана, тип РИ и т.д.) обработка такого кармана приведет к браку заготовки или самого РИ.

Однозначная формализация подобных случаев является нетривиальной задачей. На практике их контроль осуществляется оператором станка, что требует продолжительного времени при проверке крупных карт раскроя с несколькими сотнями деталей.

**Алгоритм формирования маршрута РИ**. Решение задачи маршрутизации делится на два этапа:

1. Формирование последовательности обхода контуров резки станком.
2. Выбор точек врезки на контурах по построенной последовательности.

Разделение на этапы позволяет сократить объем вычислений за счет отбрасывания множества заведомо худших вариантов. Такой подход также позволяет использовать различные алгоритмы поиска решений на каждом из этапов.

В качестве ограничений выступает стек правил, формализующий набор потенциально опасных ситуаций при резке. Критерием задачи является минимизация общего времени резки в пределах множества допустимых решений, отобранных стеком.

Стек правил может формироваться динамически в зависимости от типа РИ и конкретных приоритетов при выполнении заказа на раскрой. Рассмотрим построение стека на примере следующих ограничений и правил:

1. Если при обработке контура существует такой не вырезанный контур , , что контур располагается внутри контура , то контур не может быть следующим пунктом маршрута (условие предшествования, рисунок 1а).
2. Если при обработке контура , существует такой не вырезанный контур , , что геометрический центроид контура располагается внутри выпуклой оболочки контура , то контур не может быть следующим пунктом маршрута РИ (рисунок 3а).
3. Введем обозначение , где - индекс контура резки; – максимальная ордината -го контура; – минимальная ордината -го контура. Проведем через центроид -го контура прямую параллельную оси ординат. Отложим от центроида вдоль проведенной прямой расстояние (вверх и вниз). Получим отрезок , середина которого совпадает с центроидом. Тогда, если существует пересечение проекций и , на ось ординат и абсцисса -го центроида меньше абсциссы -го, то контур не может быть следующим пунктом маршрута (рисунок 3б).

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Статьи\Электротехника 2017.1\3а.png | C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Статьи\Электротехника 2017.1\3б.png |
| а | б |

Рисунок 3. Иллюстрация правил обхода контуров резки

а – определение карманов через выпуклые оболочки

б – определение карманов по пути движения инструмента

Стек правил позволяет определить, является ли контур допустимым для резки на данном шаге. Если обработка контура приведет к образованию кармана материала, то такой контур откладывается до следующей проверки.

Среди допустимых контуров выбирается лучший на основании минимизации общего времени резки. Минимум суммы длинны холостого хода РИ до точки возможной врезки и штрафа, пропорционального абсциссе возможной точки врезки, позволяет отбросить часть решений, которые могут привести к образованию карманов.

Второй этап решения задачи заключается в интервальном переборе точек врезки контуров в рамках фиксированной последовательности обработки одним из нескольких способов:

1. Полный перебор вариантов – подходит для карт раскроя размером до 8 контуров резки (рисунок 4а).
2. Интервальный пошаговый перебор – подходит для карт раскроя размером до 30-40 контуров и размером интервала не более 5 (рисунок 4б).
3. Интервальный последовательный перебор – подходит для карт раскроя размером до 70-100 контуров и размером интервала не более 6 (рисунок 4в).
4. Интервальный случайный перебор – подходит для карт раскроя размером более 100 контуров и размером интервала по 5 (рисунок 4г).

|  |
| --- |
| C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Диссерт\ПереборА.png |
| а |
| C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Статьи\Электротехника 2017.1\4а.png |
| б |
| C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Статьи\Электротехника 2017.1\4б.png |
| в |
| C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Диссерт\ПереборГ.png |
| г |

Рисунок 4. Демонстрация вариантов интервального перебора

а – полный перебор

б – перебор интервалов с шагом 1

в – перебор интервалов с шагом по размеру интервала

г – случайный интервальный перебор

Обобщенная схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 5.

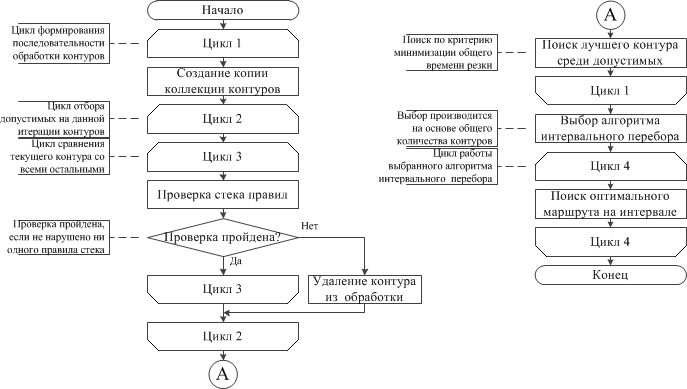


Рисунок 5. Схема алгоритма маршрутизации РИ

Для получения решения предложенным алгоритмом необходимо проверить конечное количество маршрутов РИ, которое можно рассчитать по следующей формуле:

,

где - общее количество вариантов решений;

- общее количество контуров резки на карте раскроя;

- количество потенциальных точек врезки на -том контуре;

– количество интервалов полного перебора.

**Экспериментальная проверка**. В качестве исходных данных для тестирования алгоритма маршрутизации использованы карты раскроя, сформированные в системе *ITAS Nesting* [6].

Простая карта раскроя (рисунок 6а) из 12 деталей (48 контуров) не имеет «лишних» холостых переходов РИ и не содержит деталей, «запертых» в кармане на момент резки. На сложной карте раскроя (рисунок 6б) из 11 деталей (13 контуров разных размеров, формы и уровней вложенности) маршрут также является технологически верным согласно предложенному в данной работе стеку правил, т.е. не содержит деталей в карманах материала на момент резки.

|  |
| --- |
| C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Статьи\Электротехника 2017.1\6а.png |
| а |
| C:\Users\Gidrolisk\Desktop\Статьи\Электротехника 2017.1\6бчб.png |
| б |

Рисунок 6. Тестирование алгоритма маршрутизации РИ

а – простая карта раскроя

б – сложная карта раскроя

**Заключение**. Таким образом, предложенный алгоритм позволяет снизить энергопотребление режущего инструмента станка с ЧПУ и сформировать технологически правильный маршрут при резке листового материала. Алгоритм учитывает технологические ограничения и предотвращает образование карманов с деталями в следствии использования стека правил, формализующего неоднозначные ситуации при резке, учет которых позволяет снизить человеческий фактор в процессе построения маршрута на картах раскроя с множеством деталей сложной формы.

**Список литературы**

1. Файзрахманов Р.А., Мурзакаев Р.Т., Шилов В.С., Мезенцев А.С. Решение задачи ортогональной упаковки листовых материалов методами линейного раскроя. // Вестник ПНИПУ, Информационные технологии. 2014. № 10. С. 29-41.
2. Верхотуров М.А. Задача нерегулярного раскроя фигурных заготовок: оптимизация размещения и пути режущего инструмента // Вестник УГАТУ «Управление, вычислительная техника и информатика». 2007. Т. 9 №2 (20). С. 106-118.
3. Файзрахманов Р.А., Мурзакаев Р.Т., Бурылов А.В., Приступов В.С. минимизация общего времени резки с учетом технологий резки для станков с ЧПУ // Электротехника, 2016, № 11. C. 7-12.
4. Файзрахманов Р.А., Мурзакаев Р.Т., Бурылов А.В., Шилов В.С. Формирование энергоэкономичного маршрута режущего инструмента станков гидроабразивной и лазерной резки с ЧПУ // Электротехника. 2015. № 11. С. 32-36.
5. Петунин А.А., Ченцов А.Г., Ченцов А.П. К вопросу о маршрутизации движения инструмента в машинах листовой резки с числовым программным управлением. // Научно-технические ведомости СПБГПУ. Сер: Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. - № 2 (169). С. 103-110.
6. Мурзакаев Р.Т., Шилов В.С., Брюханова А.А. Программный комплекс фигурного раскроя материала ITAS NESTING // Вестник ПНИПУ, Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2015. № 13. С. 15-25.

ФИО: **Файзрахманов** Рустам Абубакирович

Место работы: Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Должность: заведующий кафедрой Информационных технологий и автоматизированных систем

Ученое звание: профессор

Степень: д-р экон. наук

Тема диссертации: Моделирование и управление материальными потоками пространственно распределенной производственной системы

Год защиты диссертации: 2002

Название вуза и факультета, год окончания: Пермский политехнический институт, электротехнический факультет, 1979

Контактный телефон: +7 (342) 2-391-354

Электронный адрес: fayzrakhmanov@gmail.com

Почтовый адрес: 614990, г. Пермь, ул. проф. Поздеева, 7

ФИО: **Мурзакаев** Рустам Талгатович

Место работы: Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Должность: доцент кафедры информационных технологий и автоматизированных систем

Ученое звание: доцент

Степень: к.т.н.

Тема диссертации: Исследование деформирования плит методом муара при проникании ударника

Год защиты диссертации: 1993

Название вуза и факультета, год окончания: Пермский государственный университет, механико-математический факультет, 1983

Контактный телефон: 8-902-831-96-29

Электронный адрес: rustmur@gmail.com

Почтовый адрес: 614077 г. Пермь, ул. Крупской, 93-75

ФИО: **Приступов** Виталий Сергеевич

Место работы: Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Должность: студент магистратуры

Название вуза и факультета, год окончания: Пермский национальный исследовательский университет, электротехнический факультет, 2015 год (бакалавриат)

Контактный телефон: 8-908-27-34-356

Электронный адрес: aerolisk@gmail.com

Почтовый адрес: 614022, г. Пермь, ул. Левченко 21-12.

ФИО: **Поляков** Анатолий Николаевич

Место работы: Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Должность: студент магистратуры

Название вуза и факультета, год окончания: Пермский национальный исследовательский университет, электротехнический факультет, 2016 год (бакалавриат)

Контактный телефон: 8-912-78-83-723

Электронный адрес: squarepants\_07@mail.ru

Почтовый адрес: 614077, г. Пермь, ул. Бульвар Гагарина 93/1-58.