

*На правах рукописи*



КОЛОШКИНА ИННА ЕВГЕНЬЕВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ  
ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗАЦИИ РЕШЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ЗАДАЧ  
ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ  
НА СТАНКАХ С ЧПУ**

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Научный руководитель: **Капитанов Алексей Вячеславович**  
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированные системы обработки информации и управления» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

Официальные оппоненты **Хисамутдинов Равиль Миргалимович**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» Набережночелнинского института (филиала) ФГАУО ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»;

**Гаврюшин Сергей Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой РК9 «Компьютерные системы автоматизации производства» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет».

Защита состоится «24» января 2025 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.332.02 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127994, г. Москва, Вадковский пер., д. 1. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», [www.stankin.ru](http://www.stankin.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.332.02, д.ф.-м.н., доцент

Елисеева Юлия Витальевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Актуальность выполненных исследований исходит из задач, повышения эффективности производства за счёт цифровизации реального сектора экономики и применения высокопроизводительных обрабатывающих технологий, нашедших свое отражение в таких программных документах, как Стратегия развития обрабатывающей промышленности РФ, Национальная программа «Цифровая экономика РФ», Национальный проект «Производительность труда», Федеральный проект «Передовые инженерные школы», Программа повышения конкурентоспособности и импортозамещения отечественных компьютерных системы для машиностроения. Подчеркнуто, что автоматизация производства в ближайшее время станет приоритетным направлением развития в России.

Одним из основных направлений автоматизации производства в машиностроении, является применение автоматизированного оборудования с программным управлением при реализации высокопроизводительных технологий обработки, что позволяет сократить количество рабочих-станочников на 25-80 % и до 50 % повысить производительность труда. Все преимущества применения оборудования с программным управлением для решения этих задач невозможны без соответствующей технологической подготовки производства, эффективная реализация которой реализуется на основе автоматизированных систем проектирования. С увеличением сложности изделий машиностроения, необходимости повышения качества проектных решений и сокращения сроков выхода на производство новых изделий, все более важным становится создание научно обоснованных эффективных средств и методов автоматизированного технологического проектирования, в т.ч. операций высокоскоростной обработки (англ. High Speed Cutting, HSM).

Анализ литературных источников и производственного опыта предприятий, где широко используются станки с ЧПУ, показывает, что при технологической подготовке производства операций высокопроизводительной обработки в недостаточной степени реализуются возможности автоматизированного проектирования в системах CAD/CAM/CAPP. При этом, в САМ-системах есть функции для комплексной подготовки технологического процесса включая автоматизированную разработку управляющих программ для станков с ЧПУ, формирования комплекта технологической документации и определение нормативов времени, а также реализацию результатов проектирования в виде цифрового двойника (англ. Digital Twin, DT) технологического процесса, который может использоваться при оценке экономической целесообразности

различных вариантов изготовления данного изделия. Вместе с тем, в рассмотренных источниках информации недостаточно сведений об определении параметров проектных задач необходимых для загрузки в систему при автоматизированном проектировании операций высокоскоростного фрезерования на станках с ЧПУ, таких как толщина слоя при послойном фрезеровании объемных конструктивных элементов, толщина стружки при рациональном управлении фрезерованием с переменным по величине припуском, величина смещения инструмента при плунжерном фрезеровании, параметры тороидального перемещения инструмента.

Таким образом, становится актуальной проблема повышения эффективности технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ, обеспечивающих сокращение времени проектирования и снижение величины трудозатрат привлечения квалифицированного персонала на единицу проектирования, повышения производительности и снижения себестоимости фрезерной обработки на станках с ЧПУ при обеспечении заданного качества поверхности, а также обеспечения программы импортозамещения и конкурентоспособности отечественного ПО.

**Степень разработанности проблемы.** Значительный вклад в решении технологических задач применительно к обработке на станках с ЧПУ внесли отечественные специалисты Батуев В.В., Бородина Н.В., Казаков А.А., Кузьмин Ю.П., Рыжов Э.В., Сергеев А.С., Суслов А.Г. Исследованиями в области проектирования технологических процессов занимались Аверченков В.И., Горанский Г. К., Грановский Г. И., Гречишников В. А., Иноземцев Г. Г., Капустин, Н.М., Маслов А. Р., Мещеряков А. И., Митрофанов В.Г., Митрофанов С.П., Павлов В.В., Родин П.Р., Самойлов В. С., Сахаров Г.Н., Серебrenицкий П.П., Смоленцев В.П., Соломенцев Ю.М., Старостин, В.Г., Цветков В. Д., Чемпинский Л.А., Ящерицын П.И. и др. Решения научных задач по программированию для станков с ЧПУ в САМ-системах излагается в работах Аносова М.С., Быкова А.В., Дьяченко Е.П., Лещенко А.И., Пайвина А.С., Рыбакова Е.Н., Схиртладзе А.Г., Турчина Д.Е., Шептунова С.А. Вопросы высокоскоростной обработки нашли отражение в работах Танг Т. Чан, Филимонова Л. Н., Болотова М. А., Дмитриева В. Н., Проничева Н. Д., Смелова В. Г., Суркова О. С. Совершенствованием расчетов экономических показателей при обработке на станках с ЧПУ занимались Ивченко Г.И., Искакова А.Ж., Итикава А., Морозов И.М., Пахомов Д.С., Побиянская А.В., Севостьянова А.А.

Проведенный аналитический обзор показал, вопрос исследования процесса проектирования высокоскоростных фрезерных операций, на станках с ЧПУ таких как 2,5-координатное послойное фрезерование объемных изделий, обеспечения рационального управления контурным фрезерованием с переменным по величине припуском и плунжерного фрезерования в системе CAD/CAM/CAPP с использованием сервиса автоматизированного проектирования для сокращения сроков технологической подготовки производства, повышения производительности и снижения себестоимости обработки при обеспечении заданного качества поверхности на сегодняшний день недостаточно изучен.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности технологической подготовки изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ, обеспечивающих сокращение времени проектирования, повышение производительности и снижение себестоимости обработки при обеспечении заданного качества обрабатываемой поверхности.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели предполагается решение следующей совокупности задач:

1. Выполнить информационно-аналитический обзор состояния вопроса эффективного использования станков с программным управлением, автоматизации технологической подготовки производства выполнения высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ, а также анализ существующих методик определения эффективности выполнения операций, нормативов времени и оценки результативности действующего производства.

2. Разработать структурную схему системы автоматизированной технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ.

3. Выявить взаимосвязи и установить зависимости между параметрами проектных задач выполнения высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ и характеристиками качества обрабатываемой поверхности.

4. Разработать математические модели, алгоритмы и программы для автоматизированных расчетов параметров проектных задач выполнения высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ, обеспечивающих заданное качество поверхности.

5. Разработать методики автоматизированного определения количественного и ценового показателей эффективности выполнения высокоскоростных операций на станках с ЧПУ, нормативов времени и норм

выработки при запуске производства новых изделий, а также оценки результативности действующего автоматизированного производства по показателям общей эффективности (ОЕЕ, Overall Equipment Efficiency).

**Объектом исследования** являются процессы автоматизации технологической подготовки производства с использованием интегрированной системы ADEM CAD/CAM/CAPP.

**Предметом исследования** являются методики, модели и алгоритмы автоматизированной технологической проектной деятельности, пути реализации новых технологических решений в САМ-системе для высокоскоростной фрезерной обработки на станках с ЧПУ.

**Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:**

1. Разработана структурная схема системы автоматизированной технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ

2. Выявлены взаимосвязи и установлены зависимости между параметрами проектных задач выполнения высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ (послойного 2,5-координатного фрезерования объемных изделий, рациональном управлении контурным фрезерованием с переменным по величине припуском и плунжерного фрезерования) и характеристиками качества обрабатываемой поверхности.

3. Разработаны математические модели, созданы алгоритмы и программы для автоматизированных расчетов параметров проектных задач для выполнения высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ, обеспечивающих заданное качество поверхности.

4. Разработаны методики автоматизированного определения количественного и ценового показателей эффективности выполнения высокоскоростных операций на станках с ЧПУ, нормативов времени и норм выработки при запуске производства новых изделий, а также оценки результативности действующего автоматизированного производства по показателям общей эффективности (ОЕЕ).

**Теоретическая значимость работы** заключается в совершенствовании теоретических основ автоматизированной технологической подготовки производства в САМ-системе, обеспечивающих сокращение времени выполнения проектных работ, гарантирующих экономическую эффективность обработки и заданные геометрические параметры качества поверхности деталей

на стадии проектирования высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ.

**Практическая значимость исследования** состоит в том, что результаты исследований выполнены на отечественных разработках в рамках программы по импортозамещению и повышению конкурентоспособности перед зарубежными проектными системами. Применение выполненных технологических разработок (рациональное управление процессом контурного фрезерования с переменным по величине припуском и плунжерного фрезерования при высокоскоростной обработке) обеспечит рост производительности обработки. Применение обработки объемных изделий послойным высокоскоростным фрезерованием, при использовании управляющих программ, выполненных по разработанной методике, может применяться в виде финишной и обеспечит заданное качество поверхности и повышение производительности. Реализация оценки результативности и корректировки планирования действующего производства по показателям общей эффективности ОЕЕ с использованием информационных возможностей устройств числового управления (УЧПУ) оборудования.

**Достоверность и обоснованность результатов исследования** подтверждается корректностью применяемого математического аппарата, результатами вычислительного и станочного экспериментов.

**Реализация и применение результатов работы.** Разработанные модели и научно-обоснованные технологические решения в области автоматизированного проектирования внедрены в практику использования системы АDEM CAD/CAM/CAPP в компании «АDEM - инжиниринг» (г. Москва), а также на предприятиях АО «Ярославский завод дизельной аппаратуры» (г. Ярославль), АО «Карачевский завод «Электродеталь» (г. Карачев, Брянская обл.), АО «Компрессор» (г. Санкт-Петербург), ПАО «Дидактические системы» (г. Москва), ООО «Миракс» (г. Москва).

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Разработанная структурная схема системы автоматизированной технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ.

2. Выявленные взаимосвязи и установленные зависимости между параметрами проектных задач выполнения высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ (послойного 2,5-координатного фрезерования объемных изделий, рациональном управлении контурным фрезерованием с переменным по величине припуском и плунжерного фрезерования) и характеристиками качества обрабатываемой поверхности.

3. Разработанные математические модели, созданные алгоритмы и программы для автоматизированных расчетов параметров проектных задач выполнения высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ, обеспечивающих заданное качество поверхности.

4. Разработанные методики определения показателей эффективности выполнения высокоскоростных операций на станках с ЧПУ, нормативов времени и норм выработки при запуске производства новых изделий, а также оценки результативности действующего автоматизированного производства по показателям общей эффективности (ОЕЕ).

**Методы исследования** основаны на использовании, теории автоматизированного проектирования, теории алгоритмов, математической статистики, методах численного и физического эксперимента, компьютерного моделирования, формализации.

**Степень достоверности и апробация выполненных исследований.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и региональных конференциях: III Международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике», г. Брянск, 2019; IV Международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике», г. Брянск, 2020; XI Региональной научно-практической конференции молодых исследователей и специалистов, г. Брянск, 2019; XII Региональной научно-практической конференции молодых исследователей и специалистов, г. Брянск, 2020; Международном профессионально-исследовательском конкурсе, г. Петрозаводск, 2020; Международной конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021 (ICMTMTE)», г. Севастополь, 2021; Всероссийской конференции «Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении», Брянск, 2021; представлен доклад о результатах исследований в ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 2021; семинар по обучению автоматизированной технологической проектной деятельности преподавателей учебных заведений, ПАО «Дидактические системы», г. Москва, 2023, доклад на образовательном интенсиве по интеграции программного комплекса ADEM-VX в учебный процесс, МГТУ им. Баумана, г. Москва, 2023; представлен доклад на кафедре Автоматизированных систем обработки информации и управления, МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, 2023; доклад на семинаре по информационным технологиям, НИТУ МИСиС, г. Москва, 2024; доклад на конференции на международной выставке Металлообработка 2024, г. Москва, 2024; доклад на XII Международной научно-

практической конференции «Современные проблемы теории машин», г. Санкт-Петербург, 2024; доклад на Международном инструментальном форуме Rosmould & 3D-TECH 2024, г. Москва, 2024.

**Публикации по теме специальности.** По теме диссертации опубликованы 24 научные публикации, 11 статей в российских научных журналах из перечня ВАК для специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (категория К2 – 10), получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 4 статьи в сборниках научных трудов, 7 учебных пособий с грифом «Рекомендовано УМО для ВО».

**Соответствие паспорту специальности.** Научная работа соответствует паспорту научной специальности 2.3.3 — «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» в пунктах 2, 8 и 9.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка и 9 таблиц, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 84 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их научная и практическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

**В первой главе** приведены сведения об эффективности применения станков с ЧПУ в отраслях машиностроения. По результатам аналитического обзора автоматизированного технологического проектирования высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ сделаны следующие выводы - эффективное использование оборудования с ЧПУ обеспечивается применением систем автоматизированной подготовки технологий и управляющих программ. Т.к. сведения о некоторых необходимых для проектирования величинах параметров высокоскоростной фрезерной обработки в технической и справочной литературе недостаточно отражены, то для разработки операций в автоматизированных системах для такого вида фрезерования требуется разработка математических зависимостей, алгоритмов и программ решения проектных задач для определения необходимых условий, обеспечивающих заданные характеристики качества поверхности. Требуется предложить структурную схему выполнения технологических разработок и показатели для объективной оценки экономической эффективности применения высокоскоростной фрезерной обработки на станках с ЧПУ.

**Вторая глава** посвящена разработке структурной схемы интегрированной автоматизированной системы управления технологической подготовкой производства и включенной в неё системы решения проектных задач разработки высокоскоростных фрезерных операций для станков с ЧПУ. За базовый элемент принимался ADEM CAD/CAM/CAPP, обеспечивающий сокращение времени проектирования, повышение производительности обработки и требуемые показатели качества поверхности (Таблица 1).

Таблица 1 - Структурная схема автоматизированного проектирования операций высокоскоростного фрезерования в системе ADEM CAD/CAM/CAPP

Разработанные автоматизированные решения проектных задач для высокоскоростного фрезерования	Система ADEM CAD/CAM/CAPP	Базы данных системы ADEM CAD/CAM/CAPP
	1. Загрузка КД на изделие	
	2. Переход в модуль CAM/CAPP	
	3. Загрузка ограничений и формирование маршрута обработки	
	4. Выбор оборудования	4.1. База данных оборудования
	5. Выбор оснастки и нормативов вспомогательного времени	5.1. База данных оснастки
		5.2. Таблица с нормативами вспомогательного времени
	6. Выбор режущего инструмента на табло диалога <b>Фрезерная</b> в закладке <b>Инструмент</b>	6.1. База данных режущего инструмента
7.1. Определение скорости резания и числа оборотов шпинделя	7. Табло диалога <b>Фрезерная</b> в закладке <b>Шпиндель/Подачи</b>	
7.2. Определение скорости подачи		
7.3. Определение величины перемещения по оси Z		
7.4. Определение оптимальной толщины стружки		
8.1. Определение мин. радиуса скругления траектории перемещения инструмента	8. Табло диалога <b>Фрезерная</b> в закладке <b>Высокоскоростная</b>	
8.2. Определение ширины трохойды		
8.3. Определение шага трохойды		
	9. Редактирование закладок в табло диалога <b>Фрезерная</b>	
	10. Формирование текста УП и моделирование движения инструмента	
	11. Определение нормативов времени на выполнении операции	11.1. База данных нормативов времени
	12. Формирование комплекта ТД и цифрового двойника технологического процесса	

Автоматизированное технологическое проектирование разработанной системы на основе решений проектных задач реализуется в технологическом модуле САМ/САРР в сервисе «САМ-Эксперт» и выполняется на основе 3D - модели изделия, загружаемого или разрабатываемого в конструкторском модуле САД (Таблица 1, пункт 1). В систему загружаются ограничения на режущий инструмент и параметры конструктивных элементов изделия (Таблица 1, пункт 3). В режиме принятия решений автоматически выполняется распознавание конструктивных элементов и формируется шаблон попережного маршрута обработки изделия по каждому конструктивному элементу (Таблица 1, пункт 3). В пунктах 4–6 (Таблица 1), через соответствующие базы данных, корректируется тип оборудования, оснастки и режущего инструмента.

При проектировании высокоскоростного фрезерования выполняется автоматизированный расчет проектных задач, перечисленных в строках структурной схемы 7.1–7.4 и 8.1–8.3 для определения параметров обработки необходимых для загрузки в систему в зависимости от требований, предъявляемых, к качеству поверхности.

Проектная задача послойного высокоскоростного фрезерования (Таблица 1, строка 7.1) предусматривает расчет толщины слоя обработки, которая в процессе обработки обеспечивается однократным перемещением инструмента по оси  $Z$  ( $h_z$ ), полученное значение заносится через окно диалога с системой в условия выполнения соответствующего перехода. Для определения требуемой величины перемещения по оси  $Z$  –  $h_z$ , в зависимости от заданной высотной характеристики неровностей в пересчете на высоту гребешка  $h_{гр}$ , выполнена компьютерная модель зоны контакта режущей кромки инструмента и обрабатываемой поверхности (Рисунок 1).

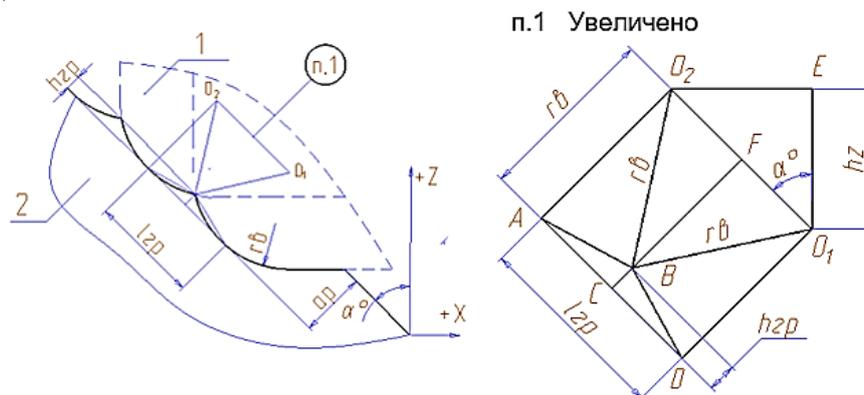


Рисунок 1- Компьютерная модель зоны контакта режущего инструмента и обрабатываемой поверхности: 1 – режущий инструмент; 2 – заготовка;  $h_z$  - шаг перемещения инструмента по оси  $Z$ , мм;  $r_0$  - радиус при вершине режущего инструмента, мм;  $\alpha^0$  - угол наклона обрабатываемой поверхности заготовки относительно оси  $Z$ , град,  $h_{гр}$  - высотное значение неровности (гребешка)

На основании анализа модели зоны контакта предложена математическая зависимость, которая отражает степень влияния параметров фрезерования - величины однократного перемещения инструмента по оси  $Z(h_z)$ , формы заготовки (угол наклона  $\alpha^\circ$ ), радиуса режущей кромки фрезы  $r_b$  на высотный параметр неровностей  $h_{гр}$  (2):

$$h_z = 2 \cdot \sqrt{h_{гр}/10^3 (2r_b - h_{гр}/10^3)} \cdot \sec \alpha^\circ \quad (1)$$

где  $h_z$  - шаг перемещения инструмента по оси  $Z$ , мм;

$r_b$  - радиус при вершине режущего инструмента, мм;

$\alpha^\circ$  - угол наклона поверхности заготовки относительно оси  $Z$ , град;

$h_{гр}$  – требуемое высотное значение неровности (гребешка) в зависимости от параметров шероховатости, мкм.

В соответствии с математической зависимостью создан алгоритм для автоматизированного расчета требуемой величины перемещения по оси  $Z - h_z$  обеспечивающей заданное качество (Рисунок 2).

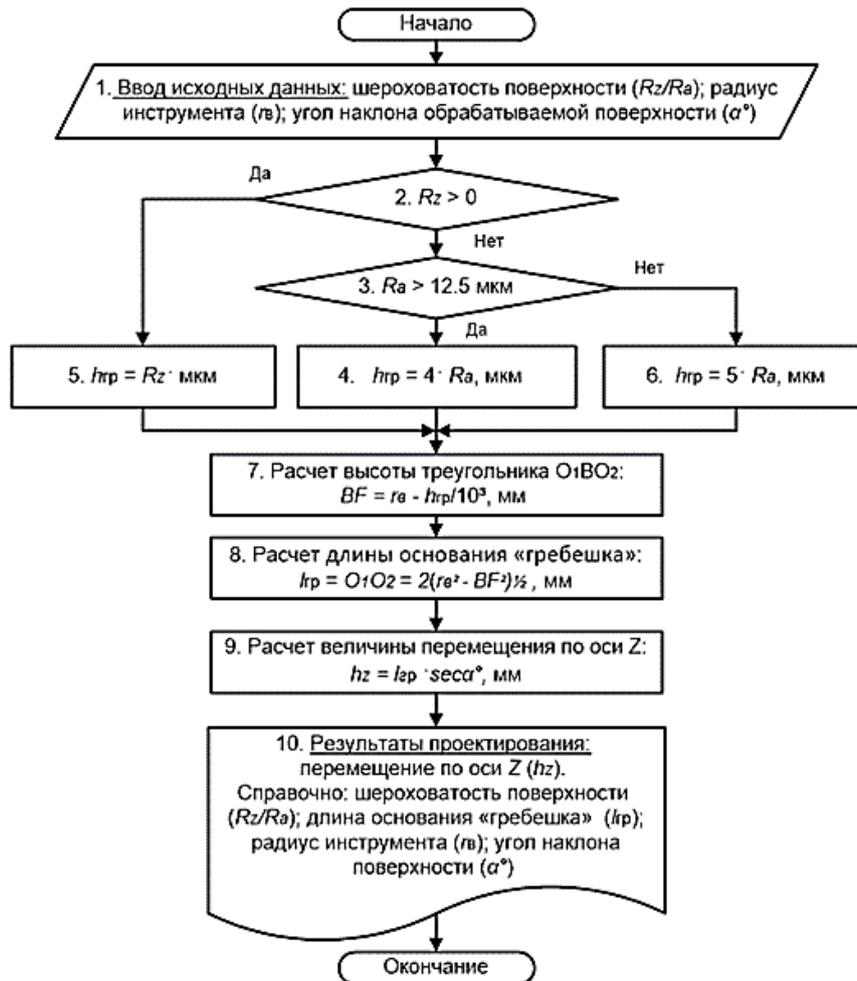


Рисунок 2 - Алгоритм расчета величины перемещения по оси  $Z - h_z$  в зависимости от заданных характеристик качества поверхности

При высокоскоростном фрезеровании с переменным по величине припуском реализуется проектная задача по расчету оптимальной толщины стружки ( $a_{max}$ ) обеспечивающий нужную шероховатость поверхности при рациональном управлении процессом обработки и заносится в условия выполнения соответствующего перехода (Таблица 1, строка 7.2). При разработке управляющей программы для станков с ЧПУ в САМ-системе есть возможность реализовать автоматическое изменение величины подачи инструмента, обеспечивающей через постоянство толщины стружки при переменной толщине снимаемого слоя. При фрезеровании участка с малым припуском, подача инструмента будет автоматически увеличиваться, при увеличении припуска автоматически снижается, что гарантируется запрограммированной постоянной величиной толщины стружки. Отдельный параметр, определяющий требуемую толщину стружки, в каталогах производителей инструмента не отражен. Для проведения анализа динамики процессов в зоне контакта инструмента и обрабатываемой поверхности разработана компьютерная модель (Рисунок 3).

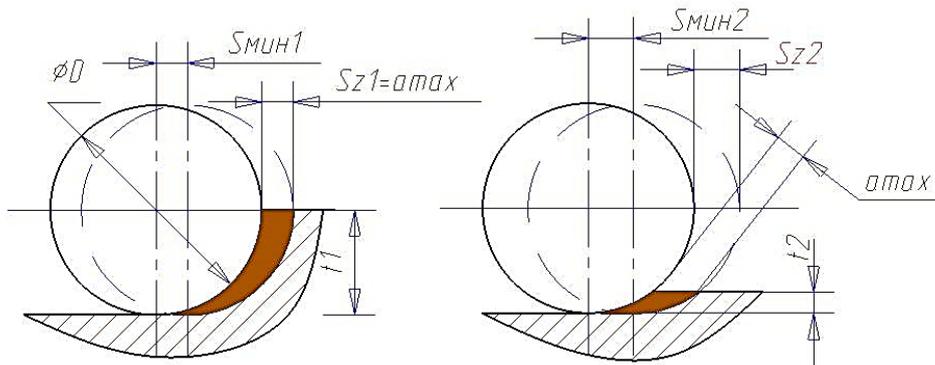


Рисунок 3 - Соотношение глубины резания  $t$  и подачи на зуб  $S_z$  при постоянной толщине стружки  $a_{max}$ ;  $D$  – диаметр фрезы;  $S_z$  – подача на зуб;  $a_{max}$  – толщина стружки;  $t_1$  и  $t_2$  – глубина резания;  $S_{мин1}$  и  $S_{мин2}$  – минутная подача

На основании анализа компьютерной модели контакта фрезы и поверхности изделия, разработана математическая зависимость для расчета этого показателя. Для расчета принимаем, что максимальное значение величины подачи на зуб  $S_z$ , определяющее максимальную высоту неровности  $h_{гр}$ , реализуется, при постоянной толщине стружки, в процессе фрезеровании минимального припуска  $t_{min}$  (2):

$$a_{max} = 2 \cdot S_z \cdot \sqrt{\frac{t_{min}}{D} - \left(\frac{t_{min}}{D}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $a_{max}$  – толщина стружки, мм;

$S_z$  – подача на один зуб фрезы, мм/зуб;

$t_{min}$  - минимальный припуск, мм.

В соответствии с математической зависимостью создан алгоритм для автоматизированного расчета требуемой величины толщины стружки  $a_{max}$  обеспечивающей заданное качество (Рисунок 4).

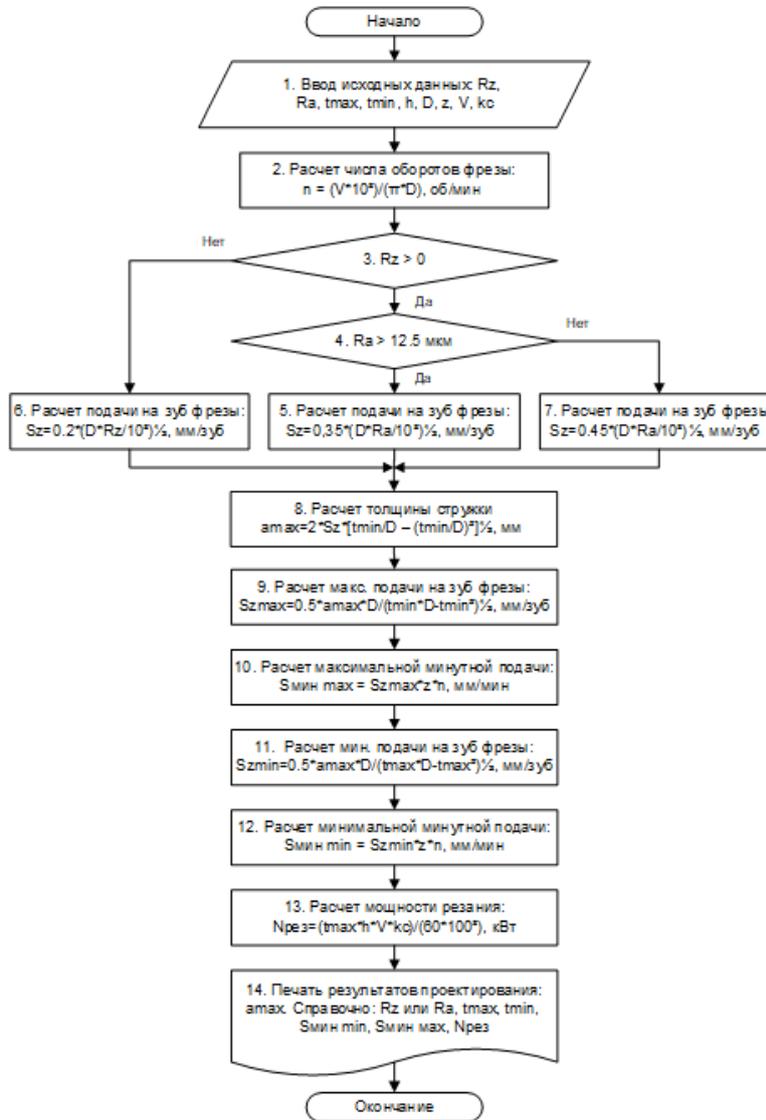


Рисунок 4 - Алгоритм определения значения толщины стружки в зависимости от заданных характеристик качества поверхности

После выполнения необходимых вычислений, определяется расчетное значение оптимальной величины толщины стружки, при которой обеспечивается заданное качество поверхности. Это значение заносится в окно диалога САМ-системы для дальнейших расчетов.

Метод плунжерного фрезерования используется при обработке на станке с ЧПУ глубоких колодцев и контуров с малым радиусом закругления внутренних углов и позволяет применять высокоскоростную обработку. В данном исследовании выполнено теоретическое обоснование проектной задачи определения геометрических параметров «гребешка» в зависимости от условий

плунжерного фрезерования. При плунжерном фрезеровании определяется величина шага перемещения фрезы по осям  $X$  или  $Y$  в зависимости от величины шероховатости и заносится в условия выполнения соответствующего перехода (Таблица, строка 7.3). Построена компьютерная модель зоны контакта режущего инструмента и обрабатываемой поверхности (Рисунок 5).

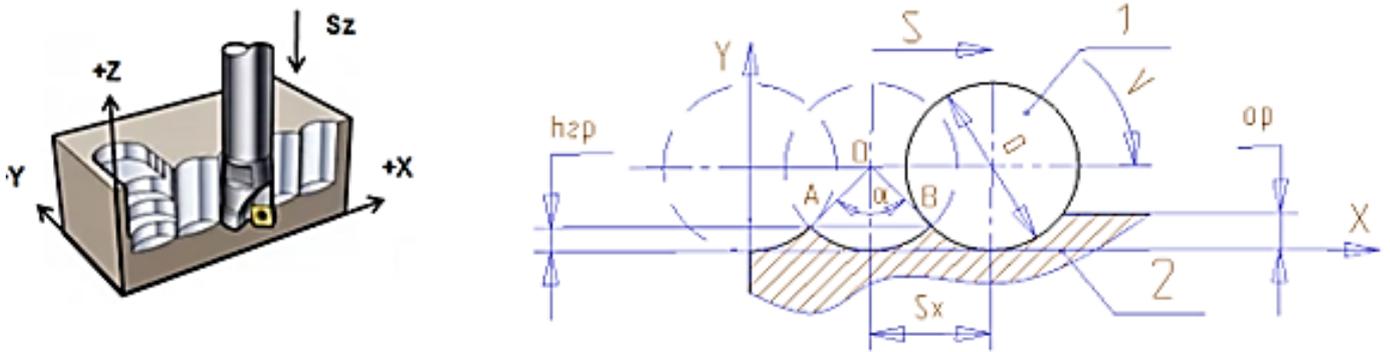


Рисунок 5 - Компьютерная модель формирования неровности при плунжерном фрезеровании: 1 – контур фрезы; 2 – обрабатываемая поверхность;  $V$  – направление вращения фрезы;  $S$  – направление подачи фрезы вдоль обрабатываемой поверхности;  $h_{gr}$  – высота «гребешка»;  $a_p$  – глубина резания;  $S_x$  – величине однократного смещения фрезы вдоль обрабатываемой поверхности;  $l_{gp}=S_x$  – длина основания «гребешка»;  $D$  – диаметр фрезы

На основании анализа компьютерной модели разработана математическая зависимость, описывающая влияние расчета величины однократного перемещения инструмента (шага) вдоль обрабатываемой поверхности  $S_{xy}$  для получения заданных характеристик качества поверхности (3).

$$S_{xy} = 2 \cdot \sqrt{h_{gr}/10^3 (D - h_{gr}/10^3)}, \quad (3)$$

где  $S_{xy}$  – величина шага перемещения фрезы в направлении оси  $X$  или  $Y$ , мм;  
 $h_{gr}$  – максимальная высота неровности, мкм;  
 $D$  – диаметр фрезы, мм.

В соответствии с математической зависимостью создан алгоритм для автоматизированного расчета требуемой величины (Рисунок 6).

При проектировании высокоскоростного фрезерования выполняются расчеты оптимального радиуса скругления траектории перемещения инструмента (Таблица, строка 8.1), шага и ширины трохойдального движения инструмента вдоль обрабатываемого контура (Таблица, строки 8.2 и 8.3).

Для комплексного расчета с учетом всех проектных задач применимых к конкретному технологическому процессу разработан единый алгоритм одновременного расчета всех перечисленных выше параметров (Рисунок 7).

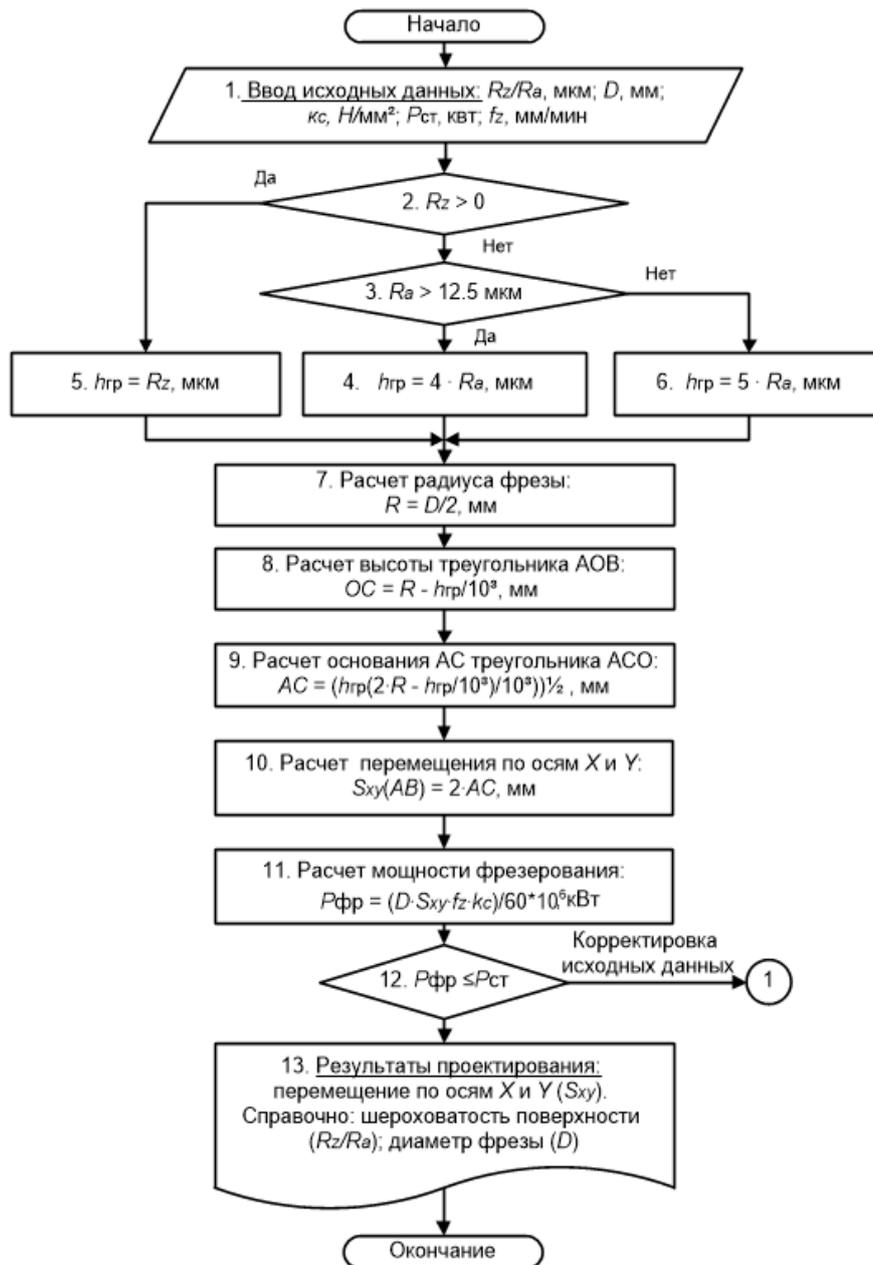


Рисунок 6 - Алгоритм определения параметров плунжерного фрезерования для обеспечения заданных параметров геометрических характеристик качества поверхности

После внесения корректив в условия выполнения переходов, в режиме выполнения действий формируется технологический процесс, рассчитывается траектория движения каждого инструмента, создаётся комплект технологической документации, включающий управляющую программу и нормы времени (Таблица 1, блоки 10-12).

Формируется цифровой двойник технологического процесса, который может быть использован при изменении процесса обработки, пересчетах

экономической целесообразности разных вариантов изготовления данного изделия без проведения натуральных испытаний.

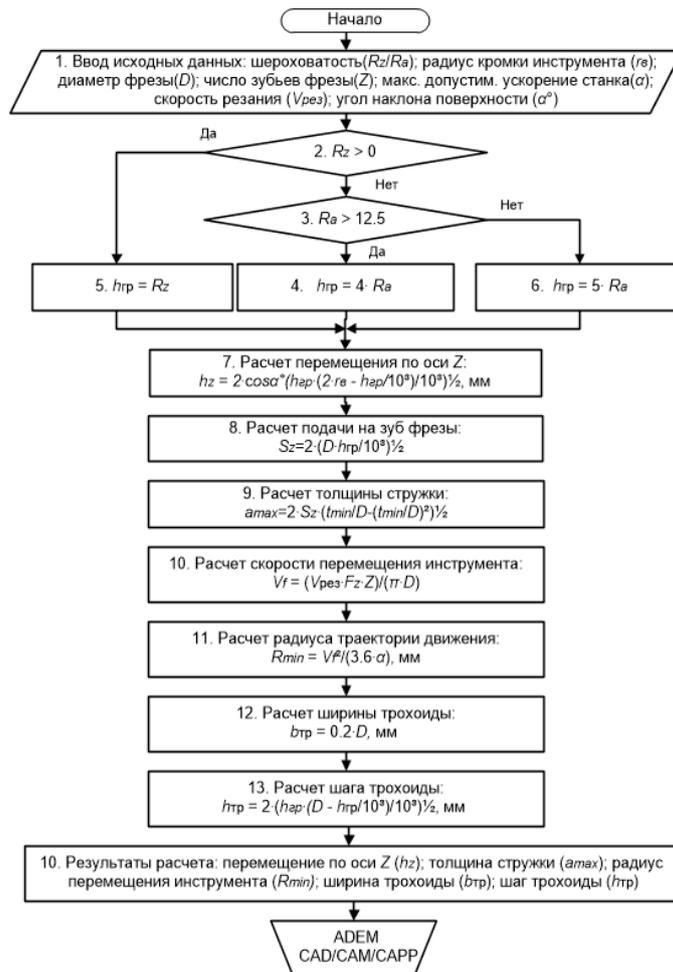


Рисунок 7 - Алгоритм комплексного определения параметров высокоскоростного фрезерования, обеспечивающих заданное качество обрабатываемой поверхности

Таким образом, результаты работы системы с решениями проектных задач автоматизированной системы расчета параметров высокоскоростного фрезерования с использованием сервиса автоматического проектирования сокращают время разработки и объединяют функции технолога, программиста и нормировщика в одном лице.

**В третьей главе** приведены разработанные программы для расчета показателей экономической эффективности применения высокоскоростной обработки - скорость съема металла (кг/мин) и затраты на изготовление 1 кг детали (руб/кг). Изложено разработанное решение реализации одного из направлений концепции «Индустрия 4.0» - «цифровой мониторинг» (автоматическое получение количественных данных об изготовлении деталей на станках с программным управлением с использованием информационных

возможностей УЧПУ, автоматический расчёт показателей эффективности производства).

Для реализации этого направления при цифровой поддержке процессов управления и обработки данных в технологических системах разработана методика расчета временных нормативов при запуске производства новых изделий на станках с ЧПУ. На основании исходных данных, считываемых с устройств программного управления оборудования, на вычислительной платформе, определяются нормативы времени и нормы выработки, а также критерии оценки эффективности установившегося производственного процесса.

На основе полученных данных определяется показатель эффективности работы подразделения или отдельно взятого сотрудника KPI (Key Perfomance Indicators). Для оценки эффективности работы производства применялся известный в международной практике показатель OEE Overall Equipment Effectiveness - Готовность x Производительность x Качество). В соответствии с мировыми стандартами этот показатель должен приближаться к 85 %.

Для автоматизации вычислений разработаны алгоритм и программа расчета показателей эффективности производства (Рисунок 8), которые были использованы при оценке эффективности выполненных разработок.

Разработанные математические зависимости, алгоритмы и программы расчета позволяют определять экономическую эффективность принятых технологических решений и проводить сравнительный анализ вариантов технологических процессов.

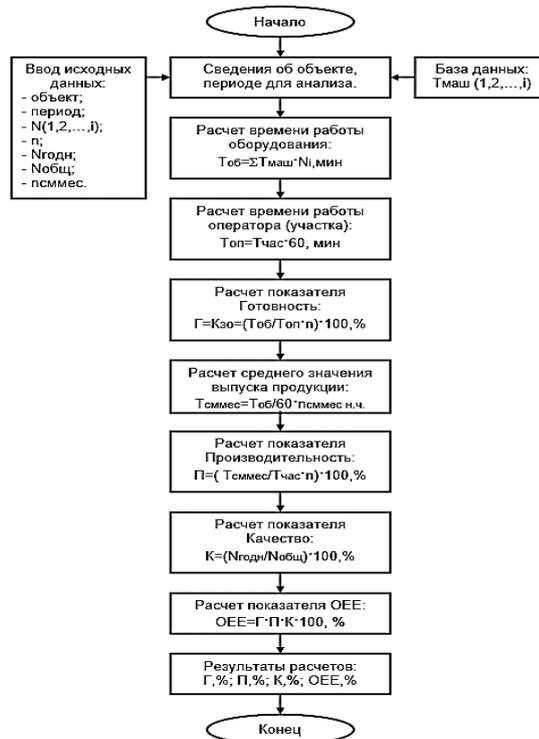


Рисунок 8 - Алгоритм расчета показателей эффективности производственной деятельности подразделений

**В четвертой главе** рассматриваются экспериментальные исследования для проведения сравнительного анализа результатов расчетных проектных решений, полученных по разработанным в Главе 2 методикам и показаний результатов натуральных экспериментов на оборудовании с ЧПУ.

Проверка методики расчета характеристик неровностей на обработанной поверхности при проектировании высокоскоростной фрезерной операции послойной обработки показала, что относительная погрешность расчетного значения высоты неровностей к определенной в процессе обработки составляет не более 9 %, а среднее значение – 6 %.

Проверка достоверности программы расчета условий контурного фрезерования изделий с переменным по величине припуском, обеспечивающих характеристики неровностей поверхности, выполнялась масштабным компьютерным плоским и объемным моделированием, которое подтвердило достоверность результатов разработанной методики. При оптимизации условий фрезерования по толщине стружки производительность обработки повышается, в данном конкретном случае повышение составило 16 %.

Из результатов экспериментальной проверки расчета параметров при плунжерном фрезеровании вертикальных поверхностей и полученных в процессе обработки на станках с ЧПУ следует, что относительная погрешность расчета по сравнению с результатами натуральных испытаний составляет не более 5 %, а средняя относительная погрешность – 3,5 %.

**В пятой главе** приведены примеры внедрения результатов исследований в проектной деятельности на производстве и в обучении.

1. Внедрение на этапе выполнения проектных работ при технологической подготовке производства в модулях CAD/CAM/CAPP системы ADEM:

- применение при автоматизированной технологической подготовке процессов высокоскоростного фрезерования на станках с ЧПУ на основе разработанных автоматизированных решений проектных задач сокращаются сроки подготовки производства;

- разработанные функциональные зависимости и программы расчета позволяют определять параметры высокоскоростного фрезерования, которые на стадии проектирования обеспечивают заданные показатели качества обрабатываемых поверхностей;

- за счёт совмещения технологом обязанностей программиста и нормировщика почти в 2,5 раза сокращается привлечение квалифицированных трудовых ресурсов, привлекаемые для выполнения проектных работ (технолог – 1 усл.пр.ед (условная проектная единица), программист – 1 усл.пр.ед., нормировщик – 0,3 усл.пр.ед.).

Автоматизация решения проектных задач параметров фрезерования в зависимости от качества поверхности при фрезеровании объемных изделий в режиме 2,5-координатной обработки на станках для плоской обработки, плунжерного фрезерования и рациональной стабилизация контурного фрезерования изделий с переменным по величине припуском включены в виде Приложения к интегрированной конструкторско-технологической компьютерной системе ADEM CAD/CAM/CAPP, разработчик ООО «АДЕМ-инжиниринг» (г. Москва).

2. При внедрении результатов исследований на АО «Карачевский завод «Электродеталь» (г. Карачев, Брянская обл.), высокоскоростным фрезерованием на станке с ЧПУ обрабатывалась деталь «Плита» (материала Сталь Х12Ф1) ГОСТ 5950-73 для пресс-формы к термопластавтомату. При проведении натурального эксперимента закладывались параметры обработки и реализовывались управляющие программы, полученные в результате анализа цифрового двойника технологического процесса. Результаты эффективности при внедрении выполненных исследований на этапе обработки деталей на станках с ЧПУ в пересчете на килограмм детали (до 10 раз) и повышением производительности в пересчете на скорость съема металла в минуту (до 15 раз) по сравнению с традиционными вариантами фрезерования. Результаты исследований внедрены предприятиях АО Ярославский завод дизельной аппаратуры (г. Ярославль), ООО «Компрессор» (г. Санкт-Петербург) и ООО «Миракс» (г. Москва).

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ**

Выполненные исследования и практическая работа позволили получить следующие выводы и результаты:

1. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по повышению эффективности автоматизированной технологической подготовки производства высокоскоростного фрезерования на станках с ЧПУ за счет применения при проектировании операций разработанных автоматизированных решений проектных задач для назначения параметров обработки, обеспечивающих заданное качество поверхности, повышение производительности и имеющей существенное значение для развития отечественных импортозамещенных АСТПП.

2. Проведенный информационно-аналитический анализ состояния вопроса эффективного использования оборудования с программным управлением, автоматизации технологической подготовки производства для станков с ЧПУ

показал наличие взаимосвязей между параметрами ряда видов высокоскоростной фрезерной обработки и характеристиками качества поверхности, проявилась необходимость разработки методик автоматизированного определения нормативов времени и оценки результативности действующего производства.

3. Разработана структурная модель системы автоматизированной технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ.

2. В рамках разработанных автоматизированных решений проектных задач выявлены взаимосвязи и установлены зависимости между параметрами выполнения высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ (послойного 2,5-координатного фрезерования объемных изделий, рациональном управлении контурным фрезерованием с переменным по величине припуском и плунжерного фрезерования) и характеристиками качества обрабатываемой поверхности.

3. Разработаны математические модели, созданные алгоритмы и программы для автоматизированных расчетов параметров проектных задач выполнения высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ, обеспечивающих заданное качество поверхности.

6. Разработаны методики определения количественного и ценового показателей эффективности выполнения высокоскоростных операций на станках с ЧПУ, нормативов времени и норм выработки при запуске производства новых изделий, а также оценки результативности действующего автоматизированного производства по показателям общей эффективности (ОЕЕ), с использованием информационных возможностей устройств числового управления (УЧПУ) оборудования.

7. Представленные разработки были выполнены в рамках действующего «Соглашения о стратегическом сотрудничестве №8103-С23 от 23.05.2023 г. между ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» и ООО «АДЕМ-инжиниринг» и обеспечили, с использованием отечественного программного обеспечения ADEM CAD/CAM/CAP, сокращение времени автоматизированного технологического проектирования и выпуска готовой продукции, предоставили возможность технологу совмещать обязанности программиста и нормировщика. Применение разработок на производстве обеспечило снижение себестоимости обработки до 38%, повышение производительности труда до 2-3 раз при высокоскоростной обработке на станках с ЧПУ.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК для специальности 2.3.3

### Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами:

1. Колошкина, И. Е. Автоматизация разработки технологической документации / И. Е. Колошкина // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2019. – № 1(173). – С. 56-61.
2. Колошкина, И. Е. Методика автоматизированной разработки технологической документации в системе CAD/CAM/CAPP / И. Е. Колошкина // Автоматизация в промышленности. – 2019. – № 9. – С. 60-62.
3. Колошкина, И. Е. Автоматизация принятия решения о возможности 2,5-координатного фрезерования объемных изделий на станках с ЧПУ для плоской обработки / И. Е. Колошкина // Автоматизация в промышленности. – 2021. – № 2. – С. 55-60.
4. Колошкина, И. Е. Оптимизация режимов контурного фрезерования при программировании для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) в САМ-системе / И. Е. Колошкина // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2021. – № 2(182). – С. 15-19.
5. Колошкина, И. Е. Автоматизация определения геометрических параметров качества поверхности при плунжерном фрезеровании на станке с ЧПУ / И. Е. Колошкина // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 9. – С. 52-54.
6. Колошкина, И. Е. Подготовка специалистов по автоматизированной разработке технологий и программ для станков с ЧПУ / И. Е. Колошкина // Автоматизация в промышленности. – 2023. – № 2. – С. 59-61.
7. Колошкина, И. Е. Автоматизированная подготовка комплекта технологической документации изготовления деталей типа «Вал» / И. Е. Колошкина // Автоматизация в промышленности. – 2023. – № 9. – С. 12-15.
8. Феофанов, А. Н. Автоматизация процессов проектирования фрезерных операций для станков с ЧПУ на основе элементов искусственного интеллекта / А. Н. Феофанов, И. Е. Колошкина // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2023. – № 4(192). – С. 51-59.
9. Колошкина, И. Е. Эффективность применения автоматизированной интеллектуальной системы для формирования технологической документации / И. Е. Колошкина, А. В. Капитанов, А. Н. Феофанов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2024. – № 1(193). – С. 50-57.
10. Колошкина, И. Е. Автоматизированное проектирование технологических процессов и управляющих программ для высокоскоростного фрезерования на станках с ЧПУ / И. Е. Колошкина, А. В. Капитанов, А. Н. Феофанов // Автоматизация в промышленности. – 2024. – № 9. – С. 7-10.
11. Колошкина, И. Е. Информационные технологии при проектировании высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ / И. Е. Колошкина, А. В. Капитанов, А. Н. Феофанов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2024. – № 3(195).

### Свидетельства о регистрации авторского права

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613882 Российская Федерация. Определение условий 2.5-кординатного фрезерования на станках с

ЧПУ в зависимости от требований к качеству обрабатываемой поверхности : № 2021612904 : заявл. 09.03.2021 : опубл. 16.03.2021 / И. Е. Колошкина.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021617381 Российская Федерация. Определение режимов контурного фрезерования изделий с переменным припуском на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) в зависимости от требований к качеству обрабатываемой поверхности : № 2021616257 : заявл. 26.04.2021 : опубл. 13.05.2021 / И. Е. Колошкина.

**Статьи в сборниках научных трудов:**

14. Колошкина, И. Е. Программирование УЧПУ HEIDENHAIN на программной станции с виртуальной клавиатурой / И. Е. Колошкина // Проблемы современной науки и образования. – 2018. – № 11(131). – С. 34-37.

15. Колошкина, И. Е. Подготовка специалистов по САПР технологического профиля применяемых в современной промышленности / И. Е. Колошкина // САПР и моделирование в современной электронике : Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции, Брянск, 22–23 октября 2020 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2020. – С. 28-31.

16. Колошкина, И. Е. Эффективность применения автоматизированной интеллектуальной системы для формирования технологической документации / И. Е. Колошкина, А. В. Капитанов, А. Н. Феофанов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2024. – № 1(193). – С. 50-57.

17. Колошкина, И. Е. Технологическое единство: технолог-программист-нормировщик-наладчик/оператор станка с ЧПУ- подготовка специалистов для машиностроения / И. Е. Колошкина, А. В. Капитанов // Современные проблемы теории машин.– 2024.–№ 17.–С. 21-26.

**Учебные пособия:**

18. Колошкина, И. Е. Компьютерная графика : Учебник и практикум / И. Е. Колошкина, В. А. Селезнев, С. А. Дмитроченко. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2022. – 233 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-12341-8.

19. Колошкина, И. Е. Инженерная графика. САД: учебник и практикум для вузов / И. Е. Колошкина, В. А. Селезнев. — Москва: Издательство Юрайт, 2023. — 220 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-10412-7.

20. Колошкина, И. Е. Основы программирования для станков с ЧПУ: учебное пособие для вузов / И. Е. Колошкина, В. А. Селезнев. — Москва: Издательство Юрайт, 2023. — 260 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-10446-2.

21. Колошкина, И. Е. Автоматизация проектирования технологической документации: учебник и практикум для вузов / И. Е. Колошкина. — Москва: Издательство Юрайт, 2023. — 371 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-14010-1.

22. Колошкина, И. Е. Основы программирования для станков с ЧПУ в САМ-системе: учебник / И. Е. Колошкина. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 260 с.: ил., табл. - ISBN 978-5-9729-0949-0.

23. Колошкина, И. Е. Автоматизация проектирования конструкторской документации для машиностроения в примерах и решениях: учебник / И.Е. Колошкина. — Москва: РУСАЙНС, 2024. — 216 с ISBN 978-5-466-07499-4.

24. Колошкина, И. Е. Автоматизированная разработка технологий и программ для станков с числовым программным управлением в примерах и решениях: учебник / И.Е. Колошкина. — Москва: РУСАЙНС, 2024. — 232 с. ISBN 978-5-466-07500-7.