

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

*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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Капитанов Алексей Вячеславович

Москва 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>7</b>
<b>Глава 1 Аналитический обзор применения станков с ЧПУ, высокоскоростного фрезерования, автоматизированных систем технологического проектирования и методик оценки эффективности реализации технологических процессов.....</b>	<b>17</b>
1.1 Постановка задачи по эффективному применению станков с программным управлением в машиностроении.....	17
1.2 Общие сведения о высокоскоростной обработке на станках с ЧПУ .....	22
1.3 Аналитический обзор автоматизированных систем для подготовки технологий и программ для станков с ЧПУ .....	23
1.4 Обзор методик определения нормативов времени и норм выработки, оценки эффективности действующего производства, оснащенного станками с ЧПУ.....	30
1.5 Выводы по Главе 1 .....	32
<b>Глава 2 Разработка модели и алгоритмов автоматизированного проектирования операций высокоскоростного фрезерования на станках с ЧПУ на основе решения проектных задач в системе CAD/CAM/CAPP.....</b>	<b>33</b>
2.1 Разработка структурной схемы и алгоритма автоматизированного проектирования операций высокоскоростного фрезерования на основе системы CAD/CAM/CAPP.....	33
2.2 Разработка автоматизированных проектных решения для технологического проектирования операций высокоскоростного фрезерования в САМ-системе ....	37
2.2.1 Реализация автоматизированной проектной задачи определения условий обеспечения геометрических параметров качества поверхности при послойном высокоскоростном фрезеровании .....	39

2.2.2 Реализация автоматизированной проектной задачи определения условий обеспечения геометрических параметров качества поверхности при высокоскоростном фрезеровании с переменным по величине припуском .....	45
2.2.3 Реализации автоматизированной проектной задачи определения условий обеспечения геометрических параметров качества поверхности при плунжерном высокоскоростном фрезерования .....	51
2.2.4 Реализации автоматизированной проектной задачи определения траектории движения инструмента при высокоскоростном фрезеровании .....	56
2.3 Получение цифрового двойника технологического процесса высокоскоростного фрезерования на станке с ЧПУ .....	60
2.4 Выводы по Главе 2 .....	62
<b>Глава 3 Реализация направлений концепции «Индустрия 4.0». Определение показателей эффективности действующего автоматизированного производства.....</b>	<b>64</b>
3.1. Методика расчета экономической эффективности применения операций высокоскоростного фрезерования .....	66
3.2 Автоматизация определения экономически обоснованных нормативов времени и норм выработки при запуске новых изделий с использованием информационных возможностей устройств числового управления (УЧПУ) оборудования .....	67
3.3 Автоматизация оценки результативности действующего производства по показателям общей эффективности ОЕЕ (Overall Equipment Efficiency) с использованием информационных возможностей устройств числового управления (УЧПУ) оборудования .....	75
3.4 Выводы по Главе 3 .....	80
<b>Глава 4 Экспериментальная проверка автоматизированного определения параметров высокоскоростного фрезерования на основе решения проектных задач.....</b>	<b>82</b>

4.1	Определение параметров обработки при послойном высокоскоростном фрезеровании, обеспечивающих заданное качество поверхности .....	82
4.2	Исследование динамики высокоскоростного фрезерования при рациональном управлении процессом обработки с переменным по величине припуском .....	90
4.3	Определение геометрических параметров качества поверхности в зависимости от условий высокоскоростного плунжерного фрезерования .....	93
4.4	Анализ эффективности применения результатов исследований при изготовлении детали «Плита» .....	100
4.4.1	Сравнительный анализ эффективности применения традиционного и высокоскоростного фрезерования .....	105
4.4.2	Сравнительный анализ эффективности применения результатов исследований при традиционном фрезеровании .....	106
4.5	Выводы по Главе 4 .....	109
<b>Глава 5</b>	<b>Применение результатов исследований в технологической проектной деятельности, на производстве и при подготовке специалистов...</b>	<b>111</b>
5.1.	Применение результатов исследований на этапе выполнения технологических проектных работ .....	111
5.2	Результаты эффективности при внедрении выполненных исследований на этапе обработки деталей на станках с ЧПУ .....	117
5.3	Применение результатов исследований при подготовке специалистов технологического профиля для работы в разработанной автоматизированной проектной системе .....	120
5.4	Выводы по Главе 5 .....	121
	<b>Заключение .....</b>	<b>123</b>
	<b>Принятые сокращения и обозначения .....</b>	<b>126</b>
	<b>Список литературы .....</b>	<b>129</b>

Приложение А Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и программа по определению условий 2.5-координатного фрезерования на станках с ЧПУ .....	141
Приложение Б Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и программа по определению режимов контурного фрезерования на станках с ЧПУ.....	143
Приложение В Программа расчёта режимов плунжерного фрезерования на станках с ЧПУ в зависимости от требований к качеству обрабатываемой поверхности .....	145
Приложение Г Программа расчёта показателей общей эффективности эксплуатации оборудования с программным управлением (Overall Equipment Effectiveness) .....	146
Приложение Д Комплект технологической документации на обработку детали «Плита» высокоскоростным фрезерованием .....	147
Приложение Е Фрагменты управляющих программ для обработки высокоскоростным фрезерованием детали «Плита» .....	153
Приложение Ж Цифровой двойник технологического процесса высокоскоростной обработки детали «Плита» на станке с ЧПУ.....	154
Приложение З Справка об использовании результатов диссертационного исследования от ООО «АДЕМ-инжиниринг».....	155
Приложение И Акт об использовании результатов диссертационного исследования от АО «Компрессор».....	156
Приложение К Акт об использовании результатов диссертационного исследования от ООО «Миракс».....	157
Приложение Л Акт об использовании результатов диссертационного исследования от АО «Ярославский завод дизельной аппаратуры».....	158
Приложение М Справка об использовании в учебном процессе результатов диссертационной работы от ООО «ДиСиС».....	159

<b>Приложение Н Справка об использовании в учебном процессе результатов диссертационной работы от ФГБОУ ВО Брянский государственный университет им. ак. И. Г. Петровского.....</b>	<b>160</b>
<b>Приложение О Справка об использовании разработанных и изданных учебных пособий в образовательных учебных заведениях .....</b>	<b>161</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Актуальность выполненных исследований исходит из задач, повышения эффективности производства за счёт цифровизации реального сектора экономики изложенных в программных документах Российской Федерации - Стратегии развития обрабатывающей промышленности РФ, Национальной программе «Цифровая экономика РФ», Национальном проекте «Производительность труда», Федеральном проекте «Передовые инженерные школы», программы по импортозамещению западных компьютерных систем для машиностроения на отечественные разработки [43; 44; 49; 60]. Основные задачи, изложенные в этих документах, на решение которых направлены результаты диссертационного исследования:

- автоматизация производства в ближайшее время станет одним из приоритетных направлений развития в России;

- создание в обрабатывающей промышленности высокопроизводительных секторов, развивающихся на основе современных технологий, обеспеченных квалифицированными кадрами [60];

- повышение эффективности производства за счёт цифровизации реального сектора экономики, увеличение количества предприятий, участвующих в программе по поддержке автоматизации и использования цифровых технологий [45];

- обеспечение темпов роста производительности труда на не сырьевых отраслях экономики до 5% к каждому предыдущему году [43];

- решение кадровой проблемы, снижающей эффективность производства, устранение профессионально-квалификационного дисбаланса - несоответствия компетенций квалификационным требованиям [60];

- разработка научных основ автоматизации технологической подготовки производства (АСТПП) [49];

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 [24]. 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) [9].

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 [8; 9; 23; 52; 55]. 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 [15]. 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 [32; 35].

Таким образом, становится актуальной проблема повышения эффективности технологической подготовки изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ, обеспечивающих сокращения времени проектирования и снижения 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 темы.** Проведено ознакомление с работами, посвященными автоматизации технологической подготовки производства, технологии машиностроения, теории разработки информационных автоматизированных систем. Значительный вклад в решении задач по теории резания 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., Шачнев С.И. Исследованиями в области проектирования технологических процессов занимались Аверченков В.И., Горанский Г. К., Горбунов Б.И., 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., Серебренецкий П.П., Смоленцев В.П., Соломенцев Ю.М., Старостин В.Г., Цветков В. Д., Чемпинский Л.А., Юликов М.И., Ящерицын П.И. и др. Поиском решения научных задач по программированию для станков с ЧПУ в САМ-системах Аносов М.С., Быков А.В., Дьяченко Е.П., Лещенко А.И., Пайвин А.С., Рыбаков Е.Н., Схиртладзе А.Г., Турчин Д.Е. и других и основывается на применении современных методов и технологий обработки знаний в сочетании с достижениями теории автоматического управления. 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 (High Speed Milling, HSM), 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 [33; 35].

**Целью диссертационной работы** является повышения 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.

**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 количественного и ценового показателей 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 (послойного 2,5-координатного фрезерования объемных изделий, рациональном управлении контурным фрезерованием с переменным по величине припуском и плунжерного фрезерования) и характеристиками качества обрабатываемой поверхности.

4. Разработать математические модели, создать 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 (OEE, 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.

**Методы исследования** основаны на использовании положений и методов теории алгоритмов, теории автоматизированного проектирования, теории резания и математической статистики.

**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.

3. 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.

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

5. 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** состоит в совершенствовании теоретических основ автоматизированной технологической подготовки производства в САМ-системе с использованием элементов искусственного интеллекта, обеспечивающих сокращение времени выполнения проектных работ, гарантирующих экономическую эффективность обработки и заданные геометрические параметры качества поверхности деталей на стадии проектирования высокоскоростных фрезерных работ на станках с ЧПУ.

**Практическая значимость полученных результатов исследования.**

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.

**Апробация работы.** 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.

Результаты научно-квалификационной работы были поддержаны следующими научными программами и договорами:

2016 г. Хоздоговорная научно-техническая работа «Разработка комплекта научно-методических материалов интерактивного образовательного контента для обучения операторов и наладчиков станков с ЧПУ для АО «Карачевского завода «Электродеталь» (г. Карачев, Брянская обл., Россия).

2017 г. Хоздоговорная научно-техническая работа «Исследование и разработка мероприятий по повышению эффективности производственных процессов и качества продукции АО «Карачевского завода «Электродеталь» (г. Карачев, Брянская обл., Россия).

Разработанные модели и научно-обоснованные технологические решения в области автоматизированного проектирования внедрены в практику использования системы ADEM CAD/CAM/CAPP в компании «ADEM - 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» (Пермский край).

**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 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).

**Публикации по теме специальности.** По теме диссертации опубликованы 26 научных публикаций, 10 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, 6 статей в сборниках научных трудов, 7 учебных пособий с грифом «Рекомендовано УМО для ВО».

**Соответствие паспорту специальности.** Научная работа соответствует формуле 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.



# **ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ СТАНКОВ С ЧПУ, ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ, МЕТОДИК ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Приведены сведения об эффективности применения станков с ЧПУ в отраслях машиностроения. Выполнен аналитический обзор технологических направлений применения оборудования с программным управлением и отраслей, использующих технологию фрезерной обработки, типовых обрабатываемых изделий. Приводятся основные сведения по реализации концепции «Индустрия 4.0»: технологическая подготовка производства - автоматизация технологической подготовки производства изделий с помощью интегрированных конструкторско-технологических компьютерных систем, даются основные понятия, определяются объект, задачи и методы проектирования. Проведён анализ эффективных технологических решений, применяемых для высокоскоростной фрезерной обработки на станках с ЧПУ. Выполнен обзор методик определения нормативов времени и норм выработки при запуске производства новых изделий, оценки эффективности действующего производства, оснащенного станками с ЧПУ.

## **1.1 Постановка задачи по эффективному применению станков с программным управлением в машиностроении**

В соответствии с директивами правительства автоматизация производства в ближайшее время станет одним из приоритетных направлений развития в России [43; 44; 49; 60]. Ведущим направлением решения этой задачи в области металлообработки - применение оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ или CNC – computer numeric control), которое обеспечивает очень высокую гибкость производства, возможность быстро перестроиться на

новый вид изделия. Кроме того, значительно снижаются риски для качества выпускаемой продукции, связанные с деятельностью человека – оператора. Использование станков с ЧПУ позволяет сократить количество рабочих на 25 - 80 %, заменив от трёх до восьми обычных станков, уменьшить сроки подготовки производства на 50 - 70 %, повысить производительность труда до 50 %, а точность изготовления детали — в 2 - 3 раза, снизив количество доводочных операций в 4 - 8 раз [77].

Станки с ЧПУ быстро окупаются, сокращая операционные расходы и уменьшая влияние на производство человеческого фактора. Они не требуют постоянного присутствия оператора, что позволяет одному сотруднику обслуживать десятки станков, уменьшая количество необходимого персонала и расходы на оплату труда. Уменьшение доли ручного труда также повышает безопасность производства, снижая вероятность травмирования человека [24; 42].

Главные преимущества станков с ЧПУ — скорость и точность работы, непрерывный режим 24/7, стабильность качества результата, недоступная человеку. ЧПУ-станки предлагают высокую эксплуатационную гибкость. Станок с ЧПУ может выполнять разные программы для производства отличающихся друг от друга продуктов, не требуя при этом значительной переоснастки. Это дает станкам с ЧПУ большое преимущество перед другими методами производства, так как позволяет изменять роль станка на линии за несколько минут [24].

Значительным преимуществом станков с ЧПУ является простота интеграции в системы «умного» производства «Индустрии 4.0», а также их высокая эффективность, позволяющая значительно снизить издержки на единицу выпуска. Но, с другой стороны, такое оборудование является весьма дорогостоящим. Любой простой ведет к существенным убыткам, поэтому, использование современного цифрового станочного парка, требует высококвалифицированного планирования производства, разработки эффективных технологий и управляющих программ, своевременного обслуживания и ремонта [57].

Наибольший эффект от применения оборудования с программным управлением проявляется при фрезерной обработке корпусных деталей за счет

обеспечения высокой точности и комплексности технологических решений обработки на одном оборудовании и за один установ. Все преимущества применения оборудования с программным управлением невозможны без соответствующей технологической подготовки производства, эффективная реализация которой выполняется с помощью автоматизированных систем проектирования. Актуальными являются исследования по повышению эффективности выполнения фрезерных операций на стадии автоматизированного проектирования технологий и программ для станков с ЧПУ [6; 42].

Отрасли промышленности, где применяются технологии фрезерной обработки корпусных деталей на станках с ЧПУ.

**Аэрокосмическая промышленность** [24]. Некоторые виды оборудования в аэрокосмической отрасли, в которых используется фрезерные технология ЧПУ, включают в себя - аэродинамические профили, титановые обшивки, детали шасси, коллекторы, корпуса редуктора. Вид детали аэродинамического профиля, при изготовлении которого использован весь спектр вариантов фрезерной обработки, в т.ч. – рациональное фрезерование поверхностей с переменным припуском, плунжерное фрезерование глубоких колодцев, показан на Рисунке 1.1.

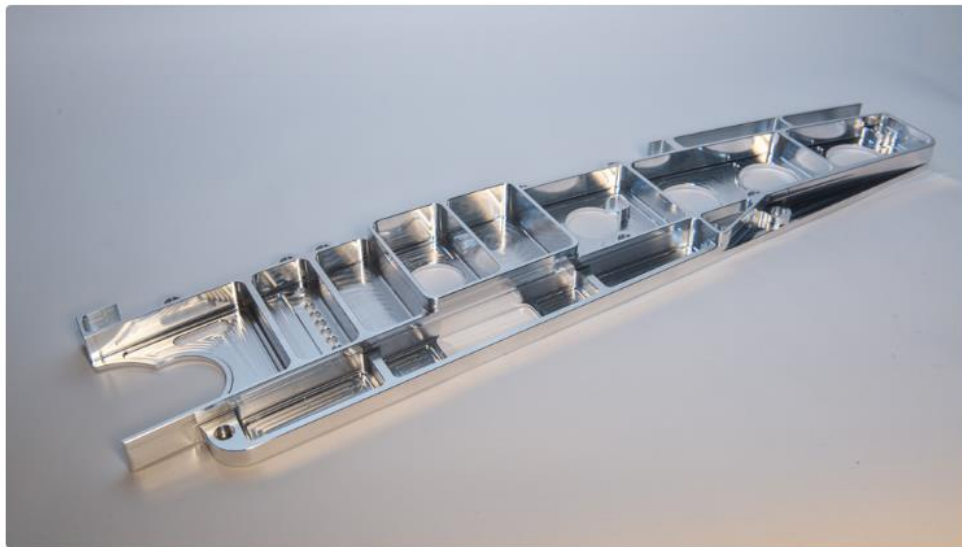


Рисунок 1.1 - Элемент аэродинамического профиля самолета после фрезерной обработки на станке с ЧПУ

**Автомобильная промышленность [24].** Автомобильная промышленность является одним из крупнейших секторов для фрезерной обработки с ЧПУ. Обработка с ЧПУ предлагает свои преимущества на каждом этапе процесса производства автомобилей, от исследований и разработок до крупносерийного производства. некоторые из автомобильных компонентов, в которых используется фрезерная обработка на станках с ЧПУ - коробки передач, детали двигателя, блоки цилиндров, панели приборной панели, коробки передач.

**Морская индустрия [24].** Фрезерные операции на станках с ЧПУ позволяют создавать почти все детали конструкции подводных лодок. Они варьируются от корпуса, который считается скелетом лодки, до внутренней отделки. Список изделий, в изготовлении которых реализуются фрезерная программа с ЧПУ производятся для морской промышленности - палубные конструкции, корпусные конструкции, ребра жесткости.

**Военная и оборонная промышленность [24].** Сферы применения фрезерной обработки на станках с ЧПУ от сложных индивидуальных конструкций корпусов оружия до внутренних компонентов ракеты. Изделия, которые изготавливаются фрезерных станках с ЧПУ - соединители, рамы сидений для наземного и воздушного транспорта, компоненты ракет, компоненты вертолетов, компоненты для подъема боеприпасов.

**Робототехника и автоматизация [24].** Фрезерная обработка на станках с ЧПУ предоставляет методы для создания любых типов деталей, которые служат этой цели. Изделия, которые изготавливаются фрезерных станках с ЧПУ - роботизированные руки, концевые эффекторы, приспособления, оснастка.

В последнее время регулярно поднимается вопрос замены обрабатывающих операций на использование аддитивных технологий при изготовлении металлических корпусных изделий сложной формы. В автомобилестроении, авиакосмической промышленности и других отраслях, где требуется высокая точность изготовления таких деталей, невозможно обеспечить допустимые погрешности, используя только 3D-печать. С другой стороны, преимущество

3D-печати в подобных случаях – возможность снизить массу и улучшить эргономику деталей. Современное станкостроение пошло по пути сочетания в одном устройстве аддитивных технологий и фрезерных методов обработки, тем самым сильно расширило возможности для его применения. Станочный комплекс включает встроенный лазер для аддитивного производства и полноценный 5-осевой фрезерный станок. Это гибридное решение сочетает в себе гибкость лазерного наплавления с точностью фрезерования таким образом, что готовые детали изготавливаются с максимальной точностью. Такая технология является самым экономичным способом обработки габаритных изделий с большой величиной припуска [67]. К такому виду оборудования относится промышленный 3D принтер LASERTEC 65 3D hybrid, производитель DMG MORI (Германия) [78]. Машина автоматически переходит от лазерного наплавления к эффективной фрезерной обработке участков, которые сложно обрабатывать на готовых изделиях. К преимуществу использования такого способа обработки относится:

- технология является самым экономичным способом обработки габаритных изделий с большой величиной припуска;
- комплексная обработка обеспечивает высокое качество обрабатываемой поверхности;
- автоматическая функция перехода от лазерной обработки к функциям фрезерования;
- толщина стенок обрабатываемого изделия: от 0,1 мм до 5 мм.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что использование фрезерных технологий актуально даже в таком варианте и существует необходимость в дальнейших исследованиях эффективности этого процесса механической обработки на станках с ЧПУ.

## 1.2 Общие сведения о высокоскоростной обработке на станках с ЧПУ

Высокоскоростная обработка — это процесс удаление металла резанием, в котором особое внимание уделяется высоким скоростям обработки и подачи для повышения производительности и улучшения качества поверхности. Отличительные особенности высокоскоростной обработки - высокая скорость резания, высокая температура в зоне образования стружки приводящая к размягчению материала детали и уменьшению сил резания, что даёт возможность инструменту двигаться с большой рабочей подачей [8]. Теоретическим обоснованием высокоскоростной обработки являются так называемые кривые Соломона, которые показывают снижение сил резания в некотором диапазоне скоростей. Но наиболее важным фактором здесь является перераспределение тепла в зоне резания. При небольших сечениях среза в данном диапазоне скоростей основная масса тепла концентрируется в стружке, не успевая переходить в заготовку [8].

Высокоскоростная обработка (High Speed Machining, HSM) в последние годы стала одним из самых быстроразвивающихся направлений в механообработке. Связано это, в первую очередь, с ее высокой производительностью. Второй важной особенностью HSM является высокая чистота обработанной поверхности, что позволяет в ряде случаев отказаться от финишного шлифования и электроэрозионной обработки.

Высокоскоростная обработка используется для механообработки следующих деталей: пресс-формы для литья металлов, штампы, пресс-формы для литья пластмасс также подходят для HSM обработки из-за своих небольших размеров, что делает экономически выгодным выполнить все операции обработки за одну установку детали [12; 22].

Применение высокоскоростной обработки в качестве финишных операций выдвигает требования к обеспечению заданной шероховатости поверхности [11; 23]. С точки зрения движения фрезы, самым главным требованием к

высокоскоростному фрезерованию является обеспечение плавной, без резких изменений направления, траектории движения инструмента. Траектория такого вида призвана обеспечить постоянное сечение стружки и постоянную нагрузку на фрезу. Учитывая особые требования к траектории перемещения инструмента при выполнении операций высокоскоростного фрезерования реализация этого вида обработки выполняется на станках с ЧПУ [9]. Особенности автоматизированного проектирования управляющих программ для высокоскоростной обработки учтены в отечественной разработке - интегрированной конструкторско-технологической системе ADEM CAD/CAM/CAPP [19]. Но для их реализации требуется дополнительный расчет параметров применительно к конкретной ситуации – учет шероховатости обрабатываемой поверхности, перепад толщины снимаемого слоя, компенсируемый обеспечением постоянством оптимальной толщины стружки при обработке, минимальный радиус скругления траектории перемещения инструмента, величины шага и ширины трохойдальной обработки. На основании анализа источников информации [6; 8; 9; 19; 22; 23; 52; 65; 75] выяснилось, что рекомендации по определению конкретных значений этих величин в литературе освещены недостаточно.

### **1.3 Аналитический обзор автоматизированных систем для подготовки технологий и программ для станков с ЧПУ**

Эффективное использование оборудования с ЧПУ предъявляет высокие требования к технологической подготовке производства, реализация такого подхода обеспечивается применением систем для автоматизированной подготовки технологий и управляющих программ [18]. Целями автоматизации технологического проектирования являются:

- сокращение сроков обеспечения технологической готовности производства;
- повышение качества технологической документации;

- сокращение трудоемкости технологической подготовки производства изготовления изделия;

- экономия человеческих ресурсов при выполнении проектных работ, за счет объединения на одном рабочем месте процедур разработки технологических процессов, подготовки управляющих программ для оборудования с ЧПУ и нормирования операций [10; 13; 55].

В целом, алгоритм автоматизированной технологической подготовки производства изделия на основе разработанной ранее конструкторской документации, состоит из следующих этапов:

- составление технологического маршрута изготовления изделия;
- разработка объемной модели изделия и корректировка конструкторской документации под изображение технологических эскизов;
- подбор из баз данных необходимых оборудования, приспособлений, режущего и мерительного инструмента;
- разработка управляющих программ для станков с ЧПУ и реализация сервисов системы, обеспечивающих повышение производительности обработки [16];
- нормирование операций обработки [50];
- подготовка и генерация технологической документации [25].

Эффективность реализации автоматизации ТПП определяет выбор автоматизированной системы проектирования, определяющими критериями которой, при выборе САПР системы для российских предприятий, как правило, являются:

- российская разработка;
- возможность пробной эксплуатации продукта;
- постоянная техническая поддержка разработчиками конечных пользователей не только на стадии внедрения;
- адаптация к конкретным условиям производства;
- соответствие требованиям ЕСКД и ЕСТД;
- надежное сетевое развертывание и поддержка;



- комплексный подход к решению задач - от формирования облика изделия до подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ, включая полный комплект конструкторской и технологической документации [20].

Целесообразно для предприятий, реализующих компьютерный документооборот, использование интегрированных конструкторско-технологических компьютерных систем, объединяющих в едином программном пространстве конструкторскую и технологическую составляющие, а также средства разработки управляющих программ для оборудования с устройством с числовым программным управлением (УЧПУ).

В соответствии с программой импортозамещения среди отечественных автоматизированных систем, используемых в металлообработке, применяются комплексы разработанных компаниями АСКОН, ADEM, Техтран, T-FLEX, SprutCAM и др. [1; 3; 69; 70; 71] анализ характеристик отечественного программного обеспечения для машиностроения представлен в Таблице 1.1.

Исходя из данных, приведенных в таблице, достаточно полно отвечает этим требованиям отечественное программное обеспечение ADEM (Automated Design Engineering Manufacturing). Российская интегрированная ADEM CAD/CAM/CAPP — система, предназначенная для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП). ADEM представляет единый продукт, включающий в себя инструментарий для проектантов и конструкторов (CAD), технологов и нормировщиков (CAPP), программистов ЧПУ (CAM). Он содержит нескольких различных предметно-ориентированных САПР под единой логикой управления и на единой информационной базе [1; 20].

Аналог функциональности подобного продукта можно составить только из нескольких профессиональных систем, но при этом вряд ли можно добиться той синхронизации и глубокого взаимодействия, которую обеспечивает глубоко интегрированная CAD/CAM/CAPP система ADEM. [1; 20]. Технологическая часть единого информационного пространства предприятия включает модули — CAD, CAM, CAPP и GPP, что и обеспечивает программный комплекс ADEM.

Таблица 1.1 - Анализ характеристик отечественного программного обеспечения для машиностроения (по данным открытых источников)  
[1; 3; 69; 70; 71]

№	Характеристика ПО	АСКОН	ADEM	T-FLEX	SprutCAM	ТЕХТРАН
1	2	3	4	5	6	7
	Регистрация в общероссийском реестре	•	•	•	•	•
Единое программное пространство	Конструкторский модуль CAD		•			
	Технологический модуль CAPP		•			
	Модуль разработки УП для ЧПУ CAM		•			
	Модуль разработки постпроцессоров GPP		•			
	Модуль организации производства PDM		•			
	Программа трехмерного моделирования CAD	•		•	•	•
	Программа авт. разработки технологических процессов, CAPP	•		•		
	Программа авт. разработки управляющих программ ЧПУ, CAM			•	•	•
	Программа авт. разработки постпроцессоров для ЧПУ, GPP				•	
	Программа управления инженерными данными, PDM	•				
	Совместимость с другими отечеств. ПО		Компас 3D			
	Лицензионная версия для учебных заведений	•	•	•		
	Свободно распространяемая версия	Только для CAD	ADEM 9.0st CAD/ CAM/ CAPP	Только для CAD	Только на 30 дней	
	Учебные пособия для высшего образования	Инструкция	Линейка учебных пособий для ВО	Инструкция к CAD		Инструкция

Аналог функциональности подобного продукта можно составить только из нескольких профессиональных систем, но при этом вряд ли можно добиться той синхронизации и глубокого взаимодействия, которую обеспечивает глубоко интегрированная CAD/CAM/CAPP система ADEM. [1; 20]. Технологическая часть единого информационного пространства предприятия включает модули — CAD, CAM, CAPP и GPP, что и обеспечивает программный комплекс ADEM.

В модуле CAD:

- возможность выполнять 2D и 3D моделирование любой сложности;
- обеспечить несколько уровней параметризации;
- оформление и выпуск КД в полном соответствии с требованиями ЕСКД;
- ассоциативная связь объемной модели и чертежных видов;
- автоматизация пересчета и простановки размеров от указанной точки привязки;
- возможность в полной мере разрабатывать технологические эскизы;
- экспорт и импорт из любых CAD систем, в том числе прямое чтение из SolidWorks и Компас.

В модуле CAPP:

- проектирование единичных, групповых и типовых технологических процессов;
- получение информации из конструкторских документов (чертеж, 3D- модель);
- проектирование маршрута (диалоговое или автоматическое);
- оснащение проектируемого технологического процесса оборудованием, инструментом, приспособлением и др.;
- расчет основных режимов обработки;
- материальное и трудовое нормирование;
- формирование полного комплекта технологической документации в соответствии с требованиями ЕСТД;

- единое технологическое пространство, одновременно содержащее информацию об операциях, выполняемых на универсальном оборудовании и станках с ЧПУ;
- единая информационная база данных с нормативно-справочной информацией по операциям, переходам, оборудованию, оснастке, материалам с возможностью дополнения;
- автоматическое формирование элементов ТП на основе геометрической информации;
- автоматические сервисы по подбору средств измерения, формирования карты контроля, обработке отверстий, канавок и др.;
- автоматическое нормирование объектов ТП для любого типа производства, определение норм времени — основного, вспомогательного, подготовительно-заключительного, штучного в автоматическом режиме по общемашиностроительным нормативам;
- автоматический расчет режимов резания с учетом паспортных данных станка, геометрии обрабатываемого элемента, обрабатываемого материала и заготовки, геометрии и вида режущего инструмента, схемы крепления и др.

В модуле САМ:

- выбор стратегий обработки, в т.ч. высокоскоростной;
- учет 3D заготовки;
- подготовка управляющих программ по объемным моделям детали и заготовки поэлементно, автоматизация комплексного программирования в среде САМ Эксперт;
- выбор способа похода и врезания инструмента в материал;
- моделирование обработки, в том числе со снятием материала и симуляцией кинематики оборудования;
- контроль размеров модели в процессе моделирования обработки;
- расчет времени работы каждого инструмента и подсчет общего машинного времени с учетом всех перемещений инструмента с занесением в технологические карты;

- добавление в маршрут обработки на оборудовании с ЧПУ информации, необходимой для оформления выходных документов (установочные переходы, переходы технического контроля, технические требования, примечания, приспособления и т. д.);

- реализация программирования 2.5-координатного фрезерования при обработке объемных деталей на станках с ЧПУ для плоского фрезерования;

- обеспечения стабилизации усилий при высокоскоростном фрезеровании и производительности контурного фрезерования заготовок с переменным припуском за счет постоянства толщины стружки;

- разработка и оформление технологического процесса по переходам в соответствии с требованиями ЕСТД параллельно с разработкой управляющей программы [17];

- формирование цифрового двойника технологического процесса с полной информацией о форме детали и заготовки, оборудовании, приспособлении, сведений по переходам - режущем инструменте, режимах обработки, схемах подвода/отвода и траектории движения инструмента, которые можно варьировать в процессе анализа [11; 12; 53].

В модуле GPP — открытый инструментарий для создания постпроцессоров [1].

Освоение технологического проектирования с использованием системы ADEM позволяет в короткие сроки подготовить специалиста для решения достаточно сложных технологических задач в рамках подготовки производства, так как проектирование происходит в режиме диалога, с подсказками по возникающим проблемным ситуациям.

Модуль PDM обеспечивает структурированное хранение любых документов и управление данными изделия. Кроме того, электронный архив системы ADEM PDM позволяет вносить комментарии к документу и вести журнал работы с документом. В архиве реализован контекстный поиск, поиск документов по свойствам, вписанным в учетную карточку документа, а также по времени создания

и иным атрибутам. Реализован механизм управления статусом документа, который обеспечивает поддержку коллективной работы над проектом.

Анализ проектных технологических возможностей системы ADEM показал, что в модуле САМ возможно использование автоматического проектирования в сервисе САМ Эксперт таких как - принятие решений в автоматическом режиме (распознавание конструктивных элементов изделия, формирование маршрута обработки) и выполнение действий в автоматическом режиме (расчет траектории движения инструмента, формирование комплекта технологической документации) [7].

#### **1.4 Обзор методик определения нормативов времени и норм выработки, оценки эффективности действующего производства, оснащенного станками с ЧПУ**

Автоматизация получения исходных данных и выполнения расчетов при технологической подготовке производства многократно повышает эффективность и качество решения проектных технологических задач. Составляющей частью технологической подготовки производства является определение нормативов времени и норм выработки. В процессе установившегося производства необходима оперативная информация об эффективности выполнения заданий различными категориями исполнителей и структурными подразделениями в целях принятия управленческих решений. При эксплуатации оборудования с программным управлением предоставляется возможность реализации автоматизированного сбора необходимой информации и расчета показателей. Концепция «Индустрия 4.0», определяется как средство повышения эффективности обрабатывающей промышленности через интеграцию цифровых систем в процессы производства [66]. Автоматизированная технологическая подготовка производства является основой функционирования цифрового предприятия. В этом ключе концепция «Индустрия 4.0» предусматривает ряд направлений, одно из них «цифровой

мониторинг» (автоматическое получение количественных данных об изготовлении деталей на станках с программным управлением с использованием информационных возможностей УЧПУ, автоматический расчёт показателей эффективности производства).

Актуальность выполнения проведенных исследований обусловлена ростом масштабов работ по интенсификации и компьютеризации технологического производства, комплексной автоматизации и интегрированного управления сетью технологических процессов. Автоматизация получения исходных данных и расчетов при технологической подготовке производства многократно повышает эффективность и качество решения проектных технологических задач [60]. Составляющей частью ТПП при запуске производства новых изделий является определение нормативов времени и норм выработки. В процессе установившегося производства необходимы способы оперативного анализа эффективности выполнения производственных заданий различными категориями исполнителей и структурными подразделениями для принятия управленческих решений. Для выполнения расчетов норм времени и норм выработки при изготовлении каждой детали в процессе работы производится непосредственное наблюдение и фиксирование наблюдателем ряда показателей – времени работы оборудования при изготовлении каждой детали; числа деталей, выполненных за определенный отрезок времени; времени проведения наблюдений с последующими расчетами. Подготовка данных и выполнение расчетов связаны со значительными затратами времени, привлечением для решения этих задач квалифицированного персонала [44]. В целях повышения эффективности оперативного управления при эксплуатации оборудования с программным управлением предоставляется возможность реализации автоматизированного сбора необходимой информации и последующего расчета нормативов времени и норм выработки [43]. Необходимо разработать методику экспресс-анализа, основанного на информационных возможностях устройств ЧПУ (УЧПУ), сокращающую время подготовки таких данных и не требующую привлечения для выполнения этих функций дополнительных человеческих ресурсов. Для оперативной оценки эффективности

работы оборудования предоставляется возможность применить показатели, реализуемые с учетом информационных возможностей УЧПУ [64]. Также требует уточнения показатель, позволяющий оперативно производить сравнительный анализ работы операторов станков с ЧПУ, работающих в различных условиях.

### **1.5 Выводы по Главе 1**

1. Из программных документов Российской Федерации - автоматизация производства в ближайшее время станет одним из приоритетных направлений развития в России. Один из путей автоматизация производства - использование автоматизированного оборудования с программным управлением. Наибольший эффект проявляется при высокоскоростной фрезерной обработке корпусных деталей за счет обеспечения высокой точности и комплексности технологических решений обработки на одном оборудовании и за один установ.

2. Эффективное использование оборудования с ЧПУ предъявляет высокие требования к технологической подготовке производства, реализация такого подхода обеспечивается применением систем для автоматизированной подготовки технологий и управляющих программ. Что существенно сокращает время подготовки производства и обеспечивает высокое качество проектных работ.

3. Т.к. сведения о необходимых для проектирования величинах параметров высокоскоростной фрезерной обработки в технической и справочной литературе не достаточны, то для разработки операций в автоматизированных системах для такого вида фрезерования требуется подготовка алгоритмов и программ расчета необходимых параметров обработки, обеспечивающих заданные характеристики качества поверхности.

4. Для практической реализации подготовки технологий и программ высокоскоростного фрезерования на станках с ЧПУ с применением систем автоматизированного проектирования требуется разработка структурной схемы выполнения проектных действий.



## **ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ЗАДАЧ В СИСТЕМЕ CAD/CAM/CAPP**

### **2.1 Разработка структурной схемы автоматизированного проектирования операций высокоскоростного фрезерования в системе CAD/CAM/CAPP**

Автоматизированное проектирование операций механической обработки на станках с ЧПУ выполняется в компьютерных интегрированных конструкторско-технологических системах. В качестве базы для автоматизированной разработки технологий и управляющих программ для высокоскоростного фрезерования на станках с ЧПУ использована интегрированная конструкторско-технологическая система ADEM CAD/CAM/CAPP (обоснование выбора в Разделе 1.3, Глава 1) [77]. В технологический модуль этой системы включен сервис проектирования высокоскоростной обработки для реализации которого требуются дополнительные данные, которые можно получить расчетным путем исходя из требований к качеству обрабатываемой поверхности. Для подготовки таких данных автором разработаны автоматизированные решения проектных задач, по результатам которых рассчитанные значения заносятся через окно диалога в систему для дальнейшего проектирования в автоматическом режиме [24]. Структурная схема последовательности действий при автоматизированном технологическом проектировании представлен в Таблице 2.1, содержание и действия по каждому из элементов системы рассмотрен далее. Автоматизированное технологическое проектирование разработанной системы на основе решений проектных задач реализуется в технологическом модуле CAM/CAPP в сервисе САМ-Эксперт и выполняется на основе 3D-модели изделия, загружаемого или разрабатываемого в конструкторском модуле CAD (Таблица 2.1, пункт1).

Таблица 2.1 – 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 конструкторской документации на изделие 2. Переход в модуль CAM/CAPP - CAM- Эксперт 3. Загрузка ограничений и формирование маршрута ТП 4. Выбор оборудования 5. Выбор оснастки и нормативов вспомогательного времени 6. Выбор режущего инструмента на табло диалога <b>Фрезерная</b> в закладке <b>Инструмент</b>	4.1. База данных оборудования 5.1. База данных оснастки 5.2. Таблица с нормативами вспомогательного времени 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 на 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	

В режиме принятия решений, по 3D-модели изделия система выполняет распознавание конструктивных элементов и составляет перечень ограничений, значения которых необходимы для дальнейшего проектирования. Через окно диалога в систему загружаются ограничения на режущий инструмент (МАХ Диаметр фрезы и МАХ Диаметр сверла) и параметры конструктивных элементов изделия (Стенка МАХ Высота, Стенка MIN Угол и Радиус МАХ). На основе этих данных формируется шаблон попереходного маршрута обработки изделия по каждому конструктивному элементу изделия (Таблица 2.1, пункт 3).

В пунктах 4 – 6 (Таблица 2.1), при необходимости, через соответствующие базы данных, корректируется тип оборудования, устройство числового программного управления станком, постпроцессор для перевода текста управляющей программы из формата CLDATA в формат УЧПУ станка (Таблица 2.1, пункт 4, строка 4.1), оснастки (Таблица 2.1, пункт 5, строка 5.1) и режущего инструмента (Таблица 2.1, пункт 6, строка 6.1).

При проектировании высокоскоростного фрезерования выполняется автоматизированный расчет проектных задач, перечисленных в пункте 7 строках 7.1 – 7.4 структурной схемы для определения параметров обработки необходимых для загрузки в систему в зависимости от требований к качеству поверхности для дальнейшего проектирования. На этом этапе должны определяться величины - шаг по оси Z при послойном фрезеровании, толщина стружки при обработке с переменным по величине припуском, величина смещения инструмента при плунжерном фрезеровании

В пункте 8 строках 8.1 - 8.3 выполняются расчеты по определению параметров трохoidalного движения инструмента вдоль обрабатываемого контура - оптимального радиуса скругления траектории перемещения инструмента (Таблица 2.1, строка 8.1), шага и ширины трохоиды (Таблица 2.1, строки 8.2 и 8.3). Для получения данных необходимых для дальнейшего проектирования технологического процесса требуется проведение исследований, разработка математических зависимостей, алгоритмов и программ расчета параметров

обработки, обеспечивающих заданные параметры качества поверхности (Раздел 2.2).

После внесения корректив по результатам расчетов проектных задач в пункте 7 строках 7.1 – 7.4 и пункте 8 строках 8.1 - 8.3 структурной схемы в условия выполнения соответствующих переходов, в автоматическом режиме выполнения действий, формируется технологический процесс, рассчитывается траектория движения инструмента по каждому переходу, создаётся комплект технологической документации, включающий управляющую программу и нормы времени, которые определяются по базе нормативов времени (Таблица 2.1, пункт 11, строки 11.1). Определяется время обработки по программе  $T_{осн}$ , вспомогательное время  $T_{всп}$ , время штучное  $T_{шт}$  и штучно-калькуляционное  $T_{шк}$ .

Разрабатывается содержание контрольной операция, определяются параметры, подлежащие измерениям, по базе данных выполняется подбор средств измерения, производится расчет вспомогательного времени на выполнение измерений.

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 (Таблица 2.1, пункт 12).

На основе проведенного анализа структурной схемы автоматизированного проектирования операций высокоскоростного фрезерования в системе ADEM CAD/CAM/CAPP разработан алгоритм последовательности выполнения действий при разработке технологического процесса механической обработки (Рисунок 2.1). Содержание каждого этапа проектирования отражено в блоках алгоритма. На основе сведений о конструктивных элементах изделия, полученных в результате распознавания загруженной в систему 3D-модели, выполняется технологическое проектирование и расчет траектории движения каждого инструмента для разработки управляющей программы для станка с ЧПУ. Формируется комплект документации технологического процесса, включающего управляющую программу и нормативы времени.

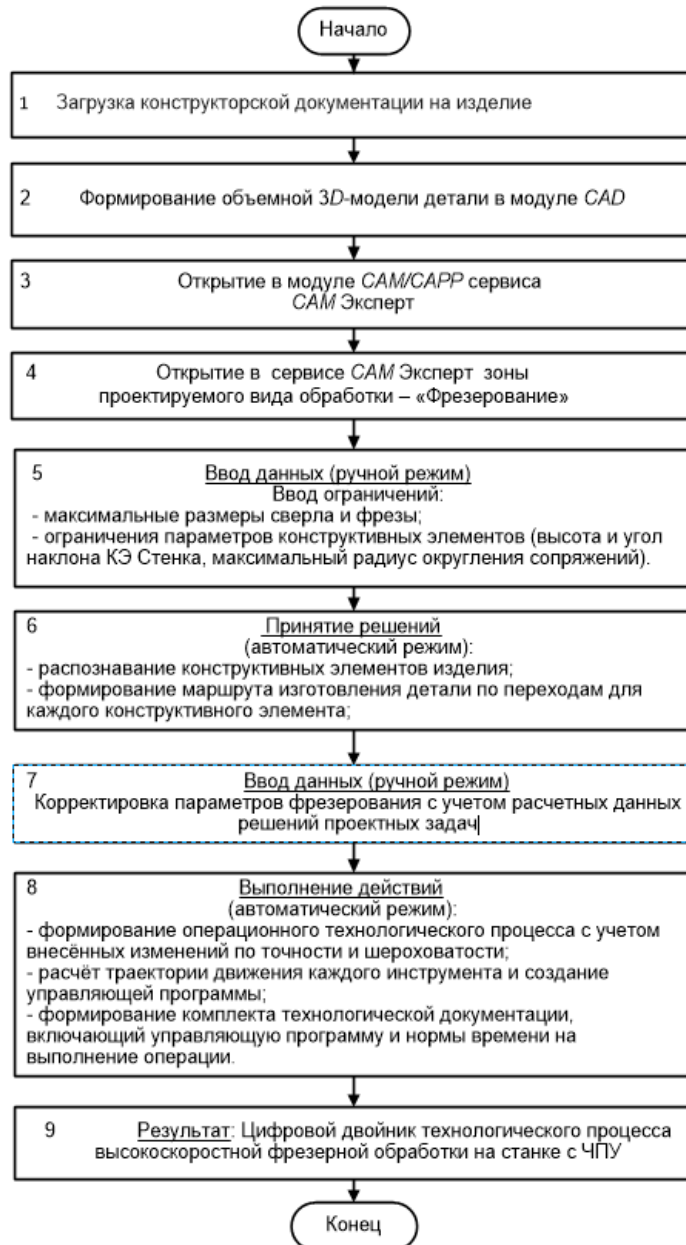


Рисунок 2.1 – Алгоритм автоматизированного проектирования технологических процессов выполнения фрезерных операций на станках с ЧПУ в системе CAD/CAM/CAPP

## 2.2 Разработка автоматизированных проектных решения для технологического проектирования операций высокоскоростного фрезерования в САМ-системе

Для автоматизированного проектирования технологий и управляющих программ для высокоскоростной фрезерной обработки требуются дополнительная

информация по определению условий обеспечения качества поверхности при 2.5-координатном послойном фрезеровании объемных изделий [28], фрезеровании поверхностей с переменным по величине припуском [30] и плунжерным фрезерованием [31], результаты которых загружаются в систему при разработке технологического процесса обработки.

Исследования решения этих задач для обеспечения автоматизированного технологического проектирования проводились в следующем порядке: 1) была выдвинута гипотеза об использовании автоматизированного проектирования высокоскоростных фрезерных операций для станков с ЧПУ в САМ-системе; 2) проведен патентный поиск, который показал, что эти вопросы не получили должного обоснования в научной литературе; 3) рассмотрен вопрос разработки структурной схемы автоматизированного проектирования высокоскоростного фрезерования в системе ADEM CAD/CAM/CAPP и выявление проектных задач, требующих дополнительных исследований; 4) для выявленных проектных задач с целью определения взаимосвязей параметров обработки и характеристиками качества поверхности, выполнено компьютерное моделирование зон контакта инструмента с деталью для таких видов фрезерования на станках с ЧПУ как послойная обработка объемных изделий, контурная обработка с переменным припуском и плунжерное фрезерование; 5) проанализированы компьютерные модели и формализованы процессы взаимовлияния параметров обработки на характеристики качества обрабатываемой поверхности в виде математических зависимостей; 6) разработаны решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ для расчета математических зависимостей влияния параметров обработки на характеристики качества обработанной поверхности для дальнейшего включения в систему автоматического проектирования.

В результате обобщения предшествующих исследований по различным источникам информации, анализа компьютерной модели зоны контакта инструмента и обрабатываемой поверхности, информации о конструктивных элементах изделия и способах их обработки за основу для автоматизированного

проектирования высокоскоростных операций на станках с ЧПУ был принят функционал, в общем виде отражающий зависимость характеристик качества обработанной поверхности от параметров высокоскоростной фрезерной обработки [4; 8; 21; 23]:

$$Ra(Rz) = f(D, r_s, Z, \alpha, F, a_{max}, h_z, V, k_c), \quad (1)$$

где  $Ra(Rz)$  – характеристики шероховатости, мкм;

$D$  – диаметр фрезы, мм;

$r_s$  – радиус скругления режущей кромки, мм;

$Z$  – число зубьев фрезы, шт;

$\alpha$  – угол наклона обрабатываемой поверхности, град;

$F$  – подача на зуб, мм;

$a_{max}$  – толщина стружки, мм;

$h_z$  – величина подачи по оси  $Z$ , мм;

$V$  – скорость резания, м/мин;

$k_c$  – коэффициент обрабатываемости материала.

### **2.2.1 Реализация автоматизированной проектной задачи определения условий обеспечения геометрических параметров качества поверхности при послойном высокоскоростном фрезеровании**

При высокоскоростной обработке достигается высокий уровень шероховатости обработанной поверхности, что позволяет в ряде случаев отказаться от финишного шлифования. Высокоскоростная обработка предусматривает малые сечения среза, снимаемые с высокой скоростью. Проблема использования такого варианта фрезерной обработки осложняется отсутствием описания геометрических параметров получаемой шероховатости и методики расчета геометрии неровностей поверхности в зависимости от вида заготовки и условий фрезерования, отсутствием рекомендаций по использованию этих сведений при подготовке специалистов.

Для обеспечения заданной шероховатости обрабатываемых вертикальных плоскостей при послойном высокоскоростном фрезеровании необходимо задать определенную величину однократного перемещения инструмента по оси  $Z$ , в результате которой на обрабатываемой поверхности формируется «гребешок», численное значение которого позволяет рассчитать параметры шероховатости [17]. Для определения геометрических параметров «гребешка» рассматривались результаты компьютерного моделирования зоны контакта режущей кромки инструмента с симметричным контуром и обрабатываемой поверхностью на Рисунке 2.2, при фрезеровании сборной фрезой с прямоугольной неперетачиваемой твердосплавной пластиной (НТП) с радиусом при вершине, форма которого образуется контуром режущей части фрезы.

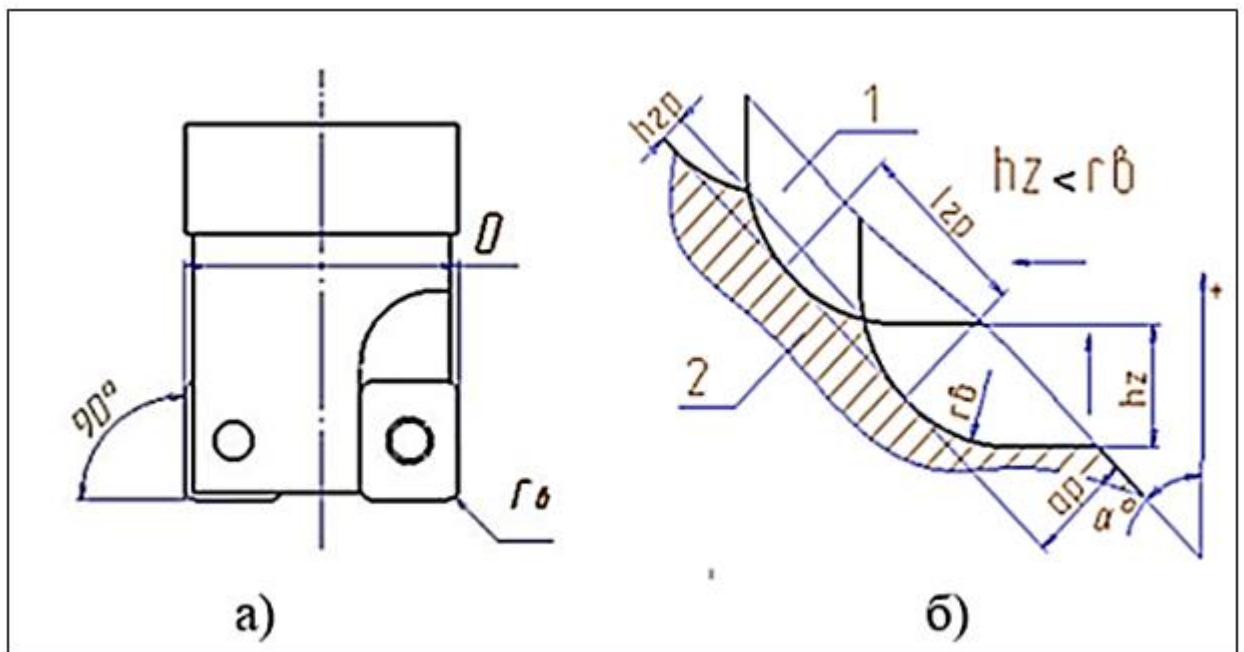


Рисунок 2.2 - Концевая фреза, оснащенная НТП (а) и компьютерная модель зоны контакта фрезы и обрабатываемой поверхности при послойном 2.5 координатном фрезеровании наклонной плоскости (б): 1 – режущий инструмент; 2 – заготовка

Форма неровностей на поверхности объемного изделия в направлении оси  $Z$ , после фрезерования, представляет собой остаточные следы перемещения фрезы и состоит из цепи неровностей («гребешков») [49].



Форма «гребешка» определяется контуром режущей части фрезы, величиной шага перемещения по оси  $Z$  и углом наклона объёмной поверхности от вертикали. При этом высота гребешка для дальнейших расчетов численно равна  $h_{гр} = R_z$  или  $h_{гр} = 4 \cdot R_a$  при  $R_a \geq 12,5$  мкм и  $h_{гр} = 5 \cdot R_a$  при  $R_a \leq 12,5$  мкм [23], что позволяет через величину высоты гребешка прогнозировать получение заданной чертежом шероховатости поверхности.

Вид и условные обозначения параметров факторов, формирующих контур «гребешка», изображенного на компьютерной модели зоны контакта режущего инструмента и обрабатываемой поверхности на Рисунке 2.2 перечислены ниже:

$h_{гр}$  - высота «гребешка», мм;

$l_{гр}$  – длина основания «гребешка», мм;

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

$H$  - высота обрабатываемой поверхности заготовки, мм;

$A_p$  – глубина резания, мм;

$n_z$  - количество проходов по оси  $Z$ , раз;

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

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

$r_{сф}$  - радиус сферы у фрезы со сферическим концом или круглой пластины, мм.

При назначении условий чистового фрезерования приходится решать задачу по определению величины однократного перемещения фрезы  $h_z$  в зависимости от требований к качеству поверхности  $R_z$  или  $R_a$ , обозначенном на чертеже детали. Сведения об определении величины перемещения по оси  $Z$  в зависимости от требований к качеству поверхности с учетом наклона обрабатываемой поверхности от вертикали в учебной литературе не достаточны. Исходными данными для расчета являются – угол наклона обрабатываемой поверхности  $\alpha^\circ$ , радиус при вершине НТП и требуемые параметры качества поверхности  $R_z$  или  $R_a$ .

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, определена расчетная схема, по которой в дальнейшем разрабатывается математическая зависимость (см. Рисунок 2.3).

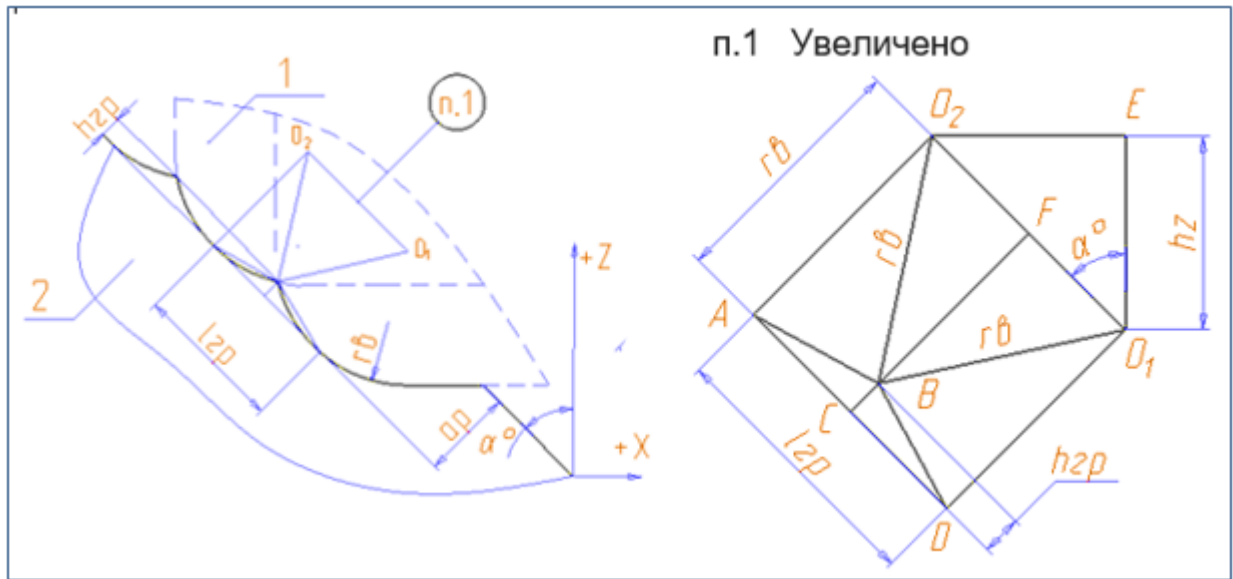


Рисунок 2.3 - Компьютерная модель зоны контакта режущего инструмента и обрабатываемой поверхности: 1 – режущий инструмент; 2 – заготовка;  $h_z$  - шаг перемещения инструмента по оси  $Z$ , мм;  $r_v$  - радиус при вершине режущего инструмента, мм;  $\alpha^\circ$  - угол наклона обрабатываемой поверхности заготовки относительно оси  $Z$ , град,  $h_{гр}$  – высотное значение неровности (гребешка), мкм

На основании анализа модели зоны контакта, исходя из конфигурации расчетной схемы, разработана 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  $r_v$  на высотный параметр неровностей  $h_{гр}$  и описывается формулой (2):

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

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;

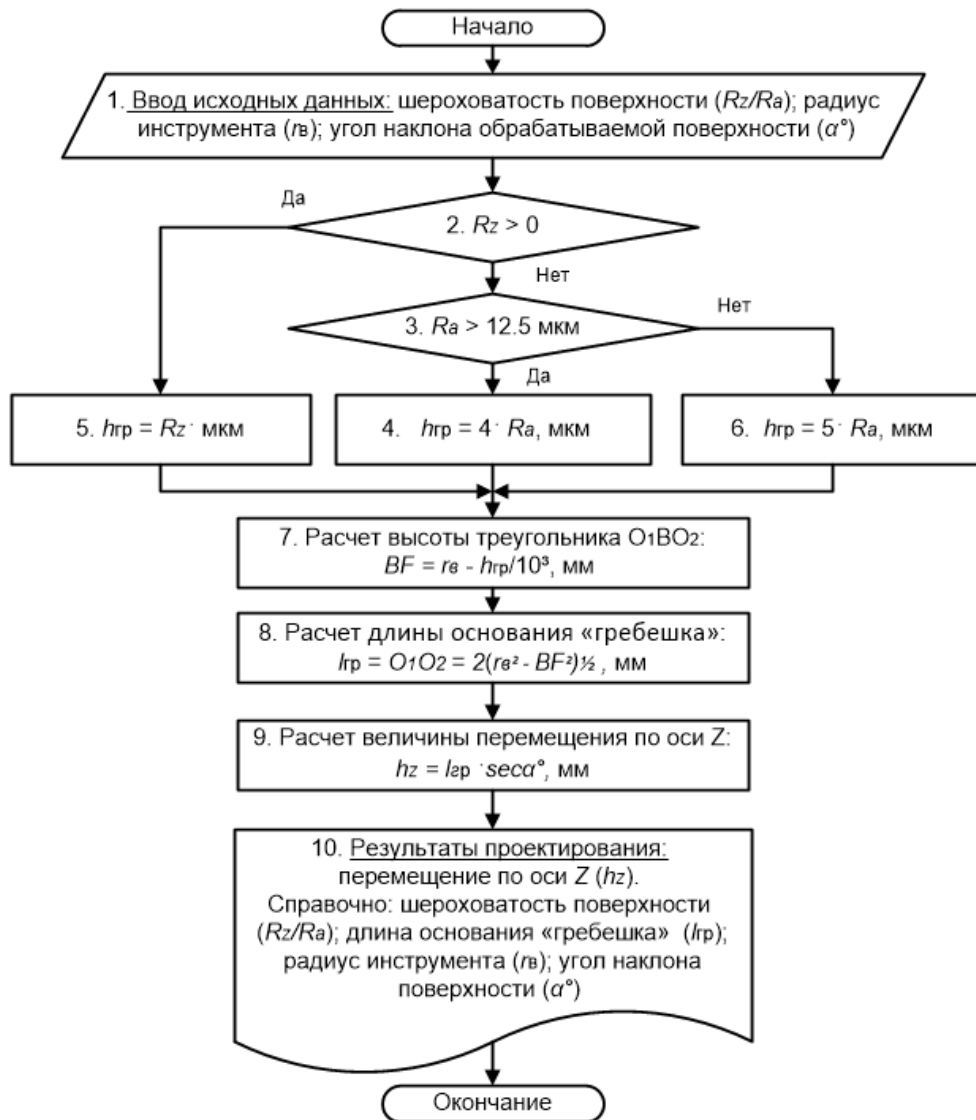
$h_{гр}$  – требуемое высотное значение неровности (гребешка) в зависимости от параметров шероховатости;

$$h_{гр} = \begin{cases} R_z, & \text{при задании параметра } R_z; \\ 4 \cdot R_a, & \text{при задании } R_a \text{ и } R_a > 12,5 \text{ мкм}; \\ 5 \cdot R_a, & \text{при задании } R_a \text{ и } R_a < 12,5 \text{ мкм} \end{cases} \quad (3)$$

Для автоматизации расчетов параметров неровностей на поверхности изделия, в зависимости от условий высокоскоростного послойного фрезерования разработан алгоритм реализации математической модели. Алгоритм решения такой задачи показан на Рисунке 2.4.

Исходными данными для расчета (блок данных 1) являются – угол наклона обрабатываемой поверхности  $\alpha^\circ$ , радиус режущей части фрезы  $r_b$  или  $r_{сф}$  и требуемые параметры качества поверхности  $R_z$  или  $R_a$ , сопоставимые с высотой «гребешка» в пропорциях, указанных выше. В блоке принятия решений 2, в зависимости вида исходной информации о высоте неровности, определяется дальнейший порядок расчета. При значении высоты неровности, обозначенной через  $R_z$ , расчет продолжается через блок процесса 4. Если параметры неровностей обозначены через  $R_a$ , то расчет для величины  $R_a \geq 12,5$  мкм выполняется через блок процесса 5, а для величины  $R_a < 12,5$  мкм через блок процесса 6.

Дальнейшее вычисление условий фрезерования, обеспечивающих заданное качество поверхности, выполняется в блоках процесса 7 - 9. В блоке процесса 7 определяется высота треугольника  $O_1BO_2$  (Рисунок 2.3). В блоке процесса 8 производится расчет длины основания «гребешка»  $l_{гр}$  (Рисунок 2.3). В блоке процесса 9, на основании ранее выполненных расчетов, определяется требуемое значение величины перемещения по оси Z, обеспечивающее заданную чертежом шероховатость поверхности. В блоке данных 10 формируются результаты расчета -  $h_z$  величина перемещения по оси Z, которая заносится в окно диалога САМ-системы и получаемые параметры шероховатости поверхности после фрезерования.



△

Рисунок 2.4 - Алгоритм расчета величины перемещения по оси Z –  $h_z$  при послойном высокоскоростном фрезеровании в зависимости от заданных характеристик качества поверхности

В соответствии с алгоритмом на Рисунке 2.4, разработана программа для расчета параметров качества поверхности в зависимости от условий фрезерования – величины перемещения по оси Z и угла наклона поверхности  $\alpha^\circ$  (Приложение А) [52]. Экспериментальная проверка подтвердила соответствие расчетных данных полученным в результате обработки на станке с ЧПУ (Глава 4).

Разработанное решение этой проектной задачи применимо при проектировании операций традиционного 2,5-координатного фрезерования объемных изделий на станках ЧПУ, в т.ч. на 2-координатных станках.

### **2.2.2 Реализация автоматизированной проектной задачи определения условий обеспечения геометрических параметров качества поверхности при высокоскоростном фрезеровании с переменным по величине припуском**

Наиболее эффективным механизмом стабилизации усилий и обеспечении виброустойчивости при высокоскоростном фрезеровании является постоянная толщина стружки и её обеспечение программой при изменении толщины снимаемого слоя. С помощью этого параметра можно описать процесс обработки при любых значениях снимаемого припуска. Отдельный параметр, определяющий толщину стружки, в каталогах производителей инструмента отсутствует, а т.к. высокоскоростное фрезерование используется в качестве финишных операций требуется предложить методику расчета этого параметра в зависимости от заданных характеристик шероховатости обрабатываемой поверхности. При разработке управляющей программы в САМ-системе есть возможность программировать величину подачи, обеспечивающую постоянство толщины стружки при переменной толщине снимаемого слоя [2; 16]. Значение оптимального значения толщины стружки, при программировании в САМ-системе, заносится в диалоговое табло (см. Рисунок 2.5).

Определим эффективность процесса постоянства стружки при контурном фрезеровании с переменным припуском - одним из показателей этого процесса является подача на зуб фрезы  $S_z$ , значение которой, через скорость резания, число оборотов и число зубьев фрезы пересчитывается в минутную скорость подачи в мм/мин, что и вносится в управляющую программу.

При переменной толщине снимаемого слоя, при постоянной линейной подаче, изменяется толщина стружки  $a_{max}$ . Обеспечив постоянное и оптимальное значение толщины стружки, можно стабилизировать силовые нагрузки при обработке, а также при малых съемах металла можно увеличить линейную подачу в 1,5-2 раза. Компьютерное моделирование зоны контакта режущего инструмента и обрабатываемой поверхности показано на Рисунке 2.5.

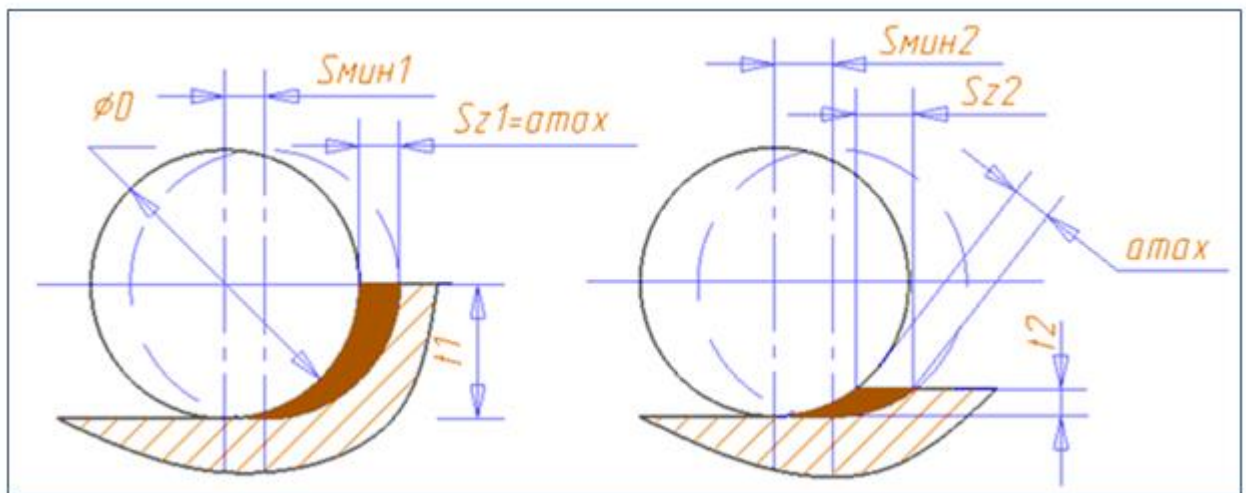


Рисунок 2.5 – Компьютерное моделирование зоны контакта режущего инструмента и обрабатываемой поверхности демонстрирует соотношение глубины резания  $t$  и подачи на зуб  $S_z$  при постоянной толщине стружки  $a_{max}$ ;

$D$  – 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

Модель демонстрирует характер изменения величины линейной подачи при фрезерной обработке с переменным припуском при постоянной толщине срезаемой стружки. При уменьшении съема металла, при постоянном значении  $a_{max}$ , можно увеличить значение линейной подачи [4].

На основании анализа расчетной схемы (Рисунок 2.5) разработана математическая модель зависимости влияния факторов на эти показатели по формулам (3) и (4):

$$S_z = 0.5 \cdot a_{max} \cdot D / \sqrt{t \cdot D - t^2}, \text{ мм/зуб} \quad (3)$$

$$a_{max} = 2 \cdot S_z \sqrt{\frac{t}{D} - \left(\frac{t}{D}\right)^2}, \text{ мм} \quad (4)$$

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

$a_{max}$  – толщина стружки, мм;

$D$  – диаметр фрезы, мм;

$t$  – глубина резания, мм.

Проведем сравнительные расчеты значения линейной подачи при съеме слоя разной толщины в 2 и 4 мм. Исходные данные – диаметр фрезы  $D = 20$  мм, оптимальное значение толщины стружки  $a_{max} = 0,04$  мм, число зубьев фрезы  $z = 5$ , скорость резания  $V = 750$  м/мин. Результаты расчетов приведены в Таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Расчет величины линейной подачи в зависимости от величины припуска при высокоскоростном фрезеровании с переменным припуском

Расчет числа оборотов $n = V \cdot 10^3 / (\pi \cdot D) = 750 \cdot 10^3 / (3,14 \cdot 20) = 11942$ об/мин	
Оптимальное значение толщины стружки $a_{max} = 0,04$ мм	
Припуск $t_1 = 4$ мм	Припуск $t_2 = 2$ мм
Величина подачи на зуб фрезы $S_z = 0,5 \cdot a_{max} \cdot D / \sqrt{t \cdot D - t^2}$ , мм/зуб	
$S_z = 0,5 \cdot 0,04 \cdot 20 / \sqrt{4 \cdot 20 - 4^2} = 0,050$ мм/зуб	$S_z = 0,5 \cdot 0,04 \cdot 20 / \sqrt{2 \cdot 20 - 2^2} = 0,066$ мм/зуб
Расчет минутной подачи $S_{мин} = S_z \times z \times N$ , мм/мин	
$S_{мин1} = 0,05 \cdot 5 \cdot 11942 = 2,98$ м/мин	$S_{мин2} = 0,066 \cdot 5 \cdot 1273 = 3,94$ м/мин
Увеличение скорости линейной подачи, при уменьшении съема слоя, составляет 132 %	

Приведенный расчет показывает, что использование этого сервиса, при программировании в САМ-системе, позволяет существенно повысить

производительность контурного фрезерования заготовок с переменным припуском. Для практической реализации такого расчета необходимо разработать методику выбора оптимального значения толщины стружки в зависимости от требований к качеству обрабатываемой поверхности. При назначении оптимального значения толщины стружки, при максимальной производительности, необходимо исходить из обеспечения качества поверхности и состояние изделия (жесткость, легкодеформируемые материалы при закреплении детали), а также возможности оборудования (мощность, максимальные и минимальные значения минутной подачи), параметры фрезы (диаметр, количество зубьев) и установленной скорости резания. Эти сведения являются исходными данными для дальнейшего расчета.

Основными параметрами, описывающими «гребешок» являются: высота -  $h_{гр}$ , длина основания равная -  $S_z$  (Рисунок 2.5). Для получения оптимального значения  $a_{max}$ , гарантирующего получения заданной шероховатости во всем диапазоне изменения  $S_z$  для расчета принимаем, что максимальное значение  $S_z$  определяющее максимальную высоту неровности  $h_{гр}$  реализуется, при постоянной толщине стружки, в процессе фрезерования минимального припуска.

В расчете толщины стружки используем значение  $t_{min}$ , в результате получим формулу (5):

$$a_{max} = 2 \cdot S_z \cdot \sqrt{\frac{t_{min}}{D} - \left(\frac{t_{min}}{D}\right)^2}, \quad (5)$$

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

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

$t_{min}$  - минимальный припуск, мм.

При фрезеровании максимального припуска при вычисленной постоянной толщине стружки, величина  $S_z$  будет минимальной, что гарантирует высотные значения шероховатости и на этом участке в пределах требований чертежа.

Для автоматизации расчета значения толщины стружки, при высокоскоростном фрезеровании с переменным припуском с обеспечением



шероховатости поверхности по показателю  $R_a/R_z$ , разработан алгоритм (Рисунок 2.6) [30].

Исходными данными для расчета являются (Блок данных 1, Рисунок 2.6) - показатели шероховатости обрабатываемого контура  $R_z$  или  $R_a$ , величины припуска  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$ , высота фрезеруемого контура  $h$ , параметры фрезы - диаметр  $D$  и число зубьев  $z$ , скорость резания  $V$ , удельная сила резания для обрабатываемого материала  $k_s$ .

В блоках принятия решения 3 и 4 определяется порядок расчета в зависимости от вида требуемого качества поверхности. В блоках процессов 5 – 7 выполняется расчет подачи на зуб в зависимости от высотных параметров неровностей на обработанной поверхности.

Расчет оптимальной толщины стружки производится в блоке расчета 8, один из критериев - минимальное значение припуска, т.к. в этом случае величина подачи инструмента будет максимальной при обеспечении требуемых параметров качества поверхности. При обработке участков с максимальным припуском величина подачи будет уменьшаться, что гарантирует получение высотных параметров неровностей в пределах, заданных чертежом.

Для получения полной информации о процессе контурного фрезерования изделий с переменным припуском выполняются расчеты максимальной и минимальной минутной подачи в блоках расчета 9 – 12, а также мощности резания необходимой для реализации этой операции (Блок расчета 13, Рисунок 2.6). На печать выводится расчетное значение оптимальной величины толщины стружки, при которой обеспечивается заданное качество поверхности. А также справочные материалы, характеризующие процесс фрезерования – показатели шероховатости поверхности, минимальное и максимальное значения припусков, диапазон изменения подач и мощность потребная на резание.

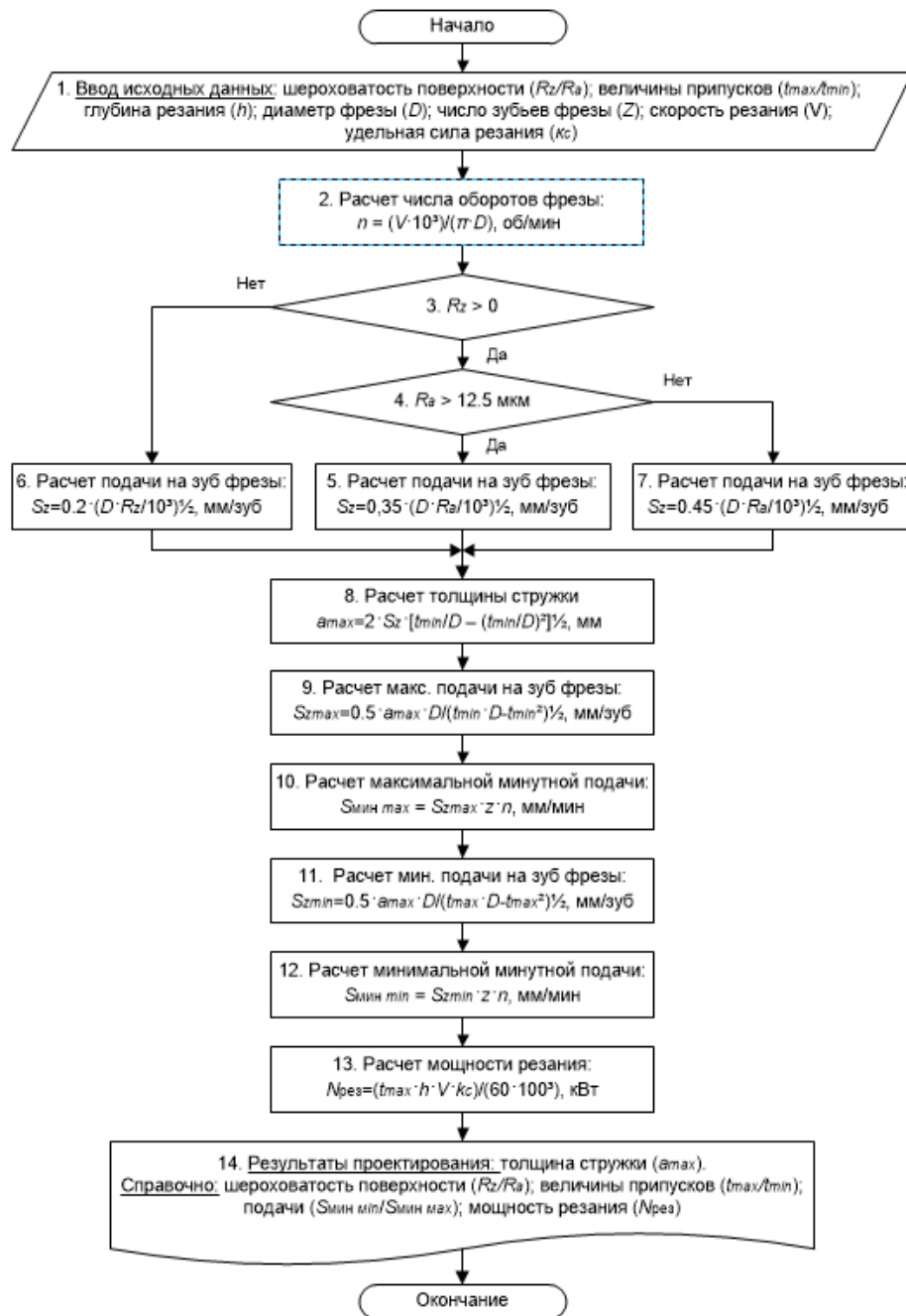


Рисунок 2.6 - Алгоритм определения значения толщины стружки в зависимости от заданных характеристик качества поверхности

В соответствии с алгоритмом на Рисунке 2.6 разработана в СУБД Microsoft Office Excel программа расчёта режимов контурного фрезерования в зависимости от требований к качеству обрабатываемой поверхности. На разработанную компьютерную программу получено «Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ» (Приложение Б) [59].

Проверка достоверности программы расчета условий контурного фрезерования изделий с переменным припуском обеспечивающих параметры неровностей поверхности, выполнялась масштабным компьютерным плоским и объемным моделированием и подтвердила результаты разработанной методики (Глава 4).

Разработанное решение применимо при проектировании операций традиционного контурного фрезерования поверхностей с переменным по величине припуском на станках ЧПУ.

### **2.2.3 Реализации автоматизированной проектной задачи определения условий обеспечения геометрических параметров качества поверхности при плунжерном высокоскоростном фрезерования**

Метод высокоскоростного плунжерного фрезерования применяется при обработке на станке с ЧПУ колодцев, контуров или объемных поверхностей и заключается в челночном вертикальном движении концевой фрезы в обрабатываемый материал по оси Z. Используется при вылете инструмента больше чем 4·D фрезы, при обработке деталей малой жесткости и при обработке углов колодцев с малым радиусом скругления. При программировании плунжерного фрезерования в САМ-системе, за счет задания величины дискретного перемещения по осям X и Y, при известных параметрах режущего инструмента, появляется возможность разрабатывать управляющие программы, обеспечивающие заданные высотные геометрические параметры качества обрабатываемой поверхности, формируемые в виде «гребешка». Проблема использования такого варианта высокоскоростной фрезерной обработки осложняется отсутствием рекомендаций по управлению геометрическими параметрами качества поверхности в зависимости от параметров режущего инструмента и условий фрезерования [62].

Для решения сформулированной проблемы требуется определить влияние условий фрезерования, вида режущего инструмента на формируемые высотные геометрические параметры неровностей на обработанной поверхности в виде «гребешка». Необходимо разработать математические зависимости, отражающие степень влияния условий фрезерования и диаметра фрезы на параметры неровностей на обрабатываемой поверхности. Разработать алгоритмы автоматизированного расчета условий фрезерования в зависимости от требований к качеству поверхности, предложить методологию проектирования такой операции.

При плунжерном фрезеровании контуров обработка осуществляется не периферийной, а торцевой частью инструмента, что даёт определённые преимущества, так как при этом преобладают не радиальные, а осевые силы резания. Это заметно снижает уровень вибрации системы, потребляемую мощность и шум, повышает стойкость инструмента. Суть метода заключается в том, что инструмент совершает вертикальные перемещения от плоскости привязки конструктивного элемента до поверхности (дна) с плавным отходом в свободную зону и переходом на следующий сегмент (Рисунок 2.23) [31].

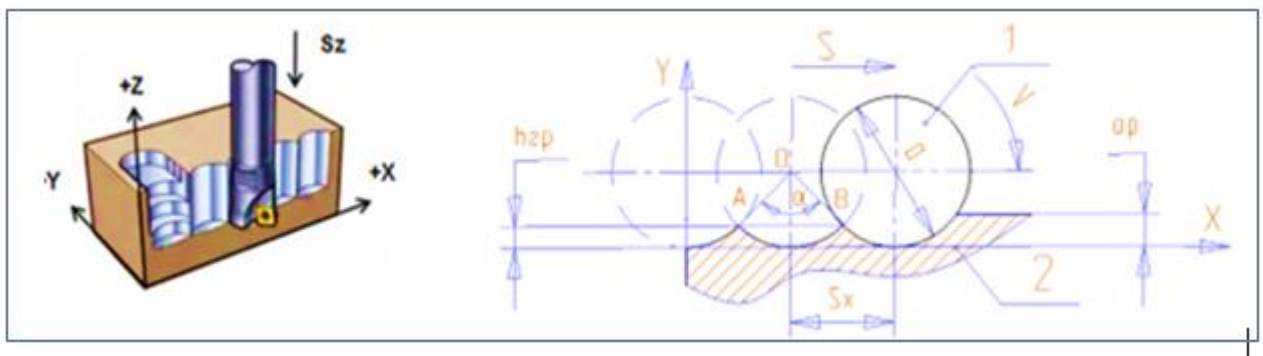


Рисунок 2.7 - Компьютерная модель формирования неровности при плунжерном фрезеровании: 1 – контур фрезы; 2 – обрабатываемая поверхность;  $V$  – направление вращения фрезы;  $S$  – направление подачи фрезы вдоль обрабатываемой поверхности;  $h_{гр}$  – высота «гребешка»;  $a_p$  – глубина резания;  $S_x$  – величине однократного смещения фрезы вдоль обрабатываемой поверхности;

$$l_{гр} = S_x - \text{длина основания «гребешка»}; D - \text{диаметр фрезы}$$

Схема формирования неровности на обработанной поверхности при плунжерном фрезеровании показана на Рисунке 2.8. Величина перехода при финишной обработке рассчитывается исходя из параметров инструмента и заданной высотной величины «гребешка». Этот вид обработки эффективно применяется при фрезеровании тонкостенных изделий, глубоких карманов и полостей, при ограниченности станка по мощности и крутящему моменту.

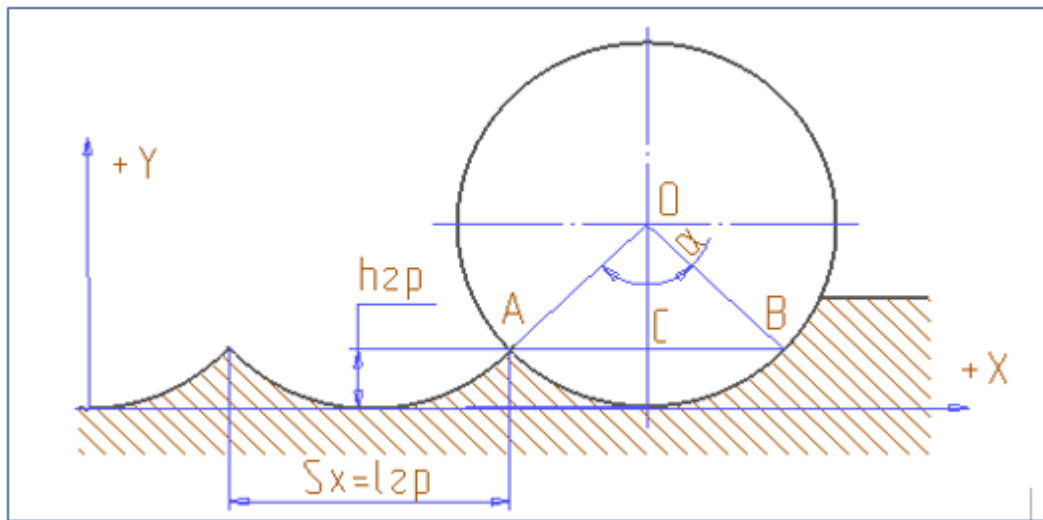


Рисунок 2.8 - Компьютерное моделирование определения геометрических параметров поверхности при плунжерном фрезеровании:  $h_{гр}$  - максимальная высота неровности;  $S_x$  - величина однократного перемещения фрезы в направлении оси  $X$ ;  $l_{гр}$  - длина основания «гребешка»

При назначении условий высокоскоростного финишного плунжерного фрезерования, при доработке углов с малым радиусом скругления или обработки нежестких деталей необходимо решать задачу по определению необходимой величины однократного перемещения фрезы  $S_{xy}$  вдоль осей  $X$  или  $Y$  в зависимости от требований к качеству поверхности  $R_z$  или  $R_a$ , обозначенном на чертеже детали. Сведений об определении величины однократного перемещения по осям  $X$  или  $Y$  в зависимости от требований к качеству поверхности в открытых источниках недостаточно.

Исходными данными для расчета являются – диаметр инструмента и требуемые параметры качества поверхности  $R_z$  или  $R_a$ . При этом высота гребешка для дальнейших расчетов численно равна  $h_{гр} = R_z$  или  $h_{гр} = 4 \cdot R_a$  при  $R_a \geq 12,5$  мкм и  $h_{гр} = 5 \cdot R_a$  при  $R_a \leq 12,5$  мкм [49].

Величина однократного перемещения  $S_{xy}$  вдоль осей  $X$  или  $Y$ , при известном диаметре фрезы  $D$ , для обеспечения геометрических параметров поверхности, обозначенных на чертеже, рассчитывается по формуле (6):

$$S_{xy} = 2 \cdot \sqrt{h_{гр}/10^3 (D - h_{гр}/10^3)}, \quad (6)$$

где  $S_{xy}$  - величина шага перемещения фрезы в направлении оси  $X$  или  $Y$ , мм;

$h_{гр}$  - максимальная высота неровности, мкм;

$D$  – диаметр фрезы, мм;

Для выполнения расчётов разработан алгоритм определения величины перемещения  $S_{xy}$  по осям  $X$  или  $Y$  в зависимости от требований к качеству поверхности (Рисунок 2.9).

Для проверочного расчета по потребляемой мощности резания и сравнения с возможностями станка используются данные – величина подачи по оси  $Z$  –  $f_z$  в мм/об, мощность станка  $P_{ст}$  в кВт и удельная сила резания для данного металла  $k_s$  в Н/мм<sup>2</sup> (блок 1, Рисунок 2.9).

В блоках принятия решений 2 и 3 (Рисунок 2.9), в зависимости вида исходной информации о высоте неровности, определяется дальнейший порядок расчета. При значении высоты неровности, обозначенной через  $R_z$ , расчет продолжается через блок процесса 4.

Если параметры неровностей обозначены через  $R_a$ , то расчет для величины  $R_a \geq 12,5$  мкм выполняется через блок процесса 5, а для величины  $R_a < 12,5$  мкм через блок процесса 6. Дальнейшее вычисление условий фрезерования, обеспечивающих заданное качество поверхности, выполняется в блоках процесса 7-11 (Рисунок 2.9). Т.к. для дальнейших расчётов используется численное значение радиуса фрезы  $R$ , выполняется расчёт этой величины в блоке 7 (Рисунок 2.9).

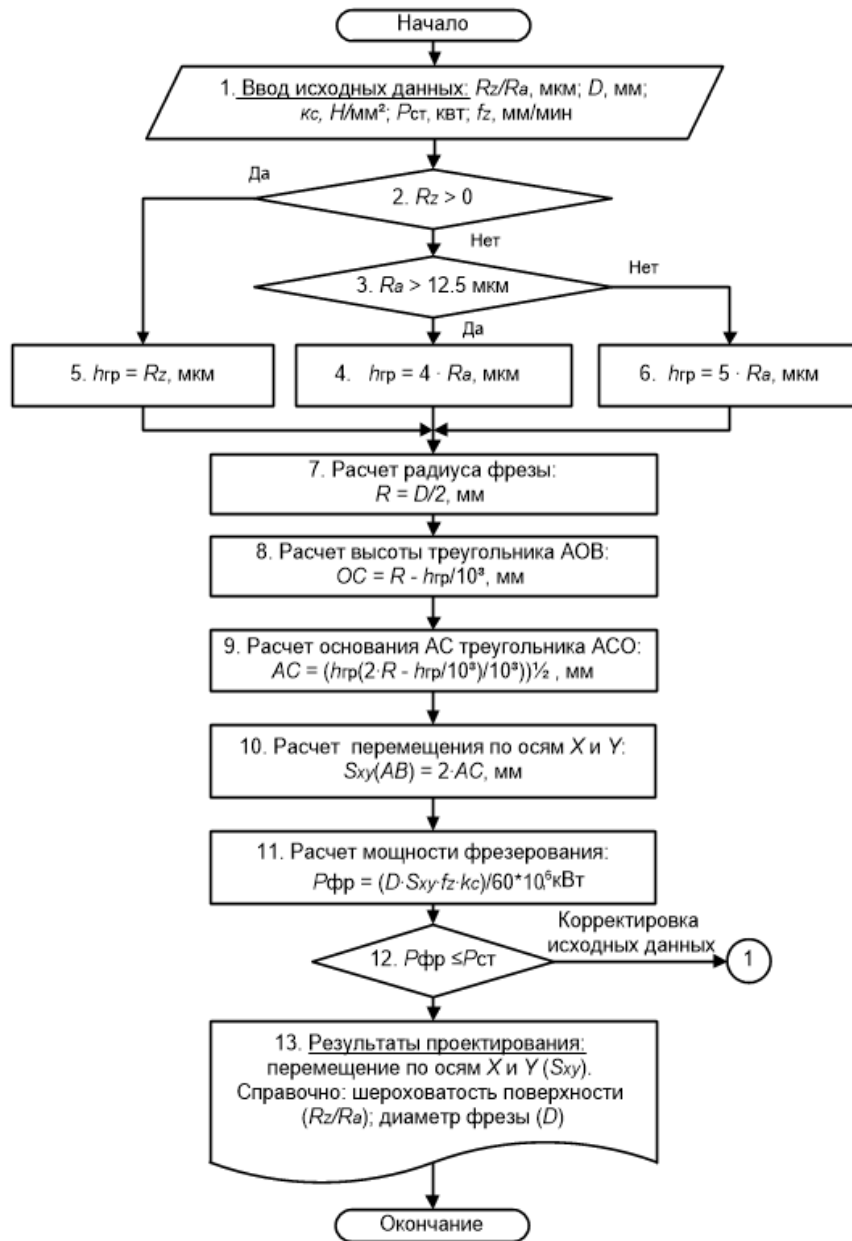


Рисунок 2.9 - Алгоритм реализации математической модели определения условий плунжерного фрезерования для обеспечения заданных параметров геометрических параметров качества поверхности

Расчёт высоты  $OC$  треугольника  $AOB$  выполняется в блоке 8 (см. Рисунок 2.9). В блоке 9 выполняется расчёт основания  $AC$  треугольника  $ACO$  (см. Рисунок 2.8). Расчёт необходимого значения величины однократного перемещения  $S_{xy}$  в мм по осям  $X$  или  $Y$  для обеспечения заданных параметров качества выполняется в блоке процесса 10.

В блоке 11 (Рисунок 2.9) выполняется расчёт значения потребляемой мощности на резание  $P_{фр}$  в кВт, а в блоке 12 выполняется сравнительный анализ потребляемой мощности на резание  $P_{фр}$  и фактической мощностью станка  $P_{ст}$ , при превышении потребляемой мощности на резание над фактической мощностью станка, выполняется корректировка исходных данных в блоке 1 (Рисунок 2.9) в сторону уменьшения. При выполнении условий, отраженных в блоке 12 в блоке 13 формируются результат расчёта – величина перемещения по осям  $S_{xy}$ . Это значение через окно диалога заносится в систему для выполнения дальнейших расчетов.

В соответствии с алгоритмом на Рисунке 2.9, разработана программа расчета зависимости высоты «гребешка» от условий фрезерования – диаметра фрезы и величины перемещения по осям X и Y (Приложение В) [31].

#### **2.2.4 Реализации автоматизированной проектной задачи определения траектории движения инструмента при высокоскоростном фрезеровании**

При высокоскоростной обработке необходимо обеспечить снижение динамических нагрузок во время резкой смены направления движения инструмента, максимально возможное исключение углов на траектории реализацией алгоритма сглаживания (Рисунок 2.10). Одно из требований, предъявляемых к системам моделирования, возможность легкого и надежного моделирования радиусов скругления [19].

Минимально возможный радиус поворота траектории инструмента, исходя из предельных значений ускорения, обеспечиваемых приводами станка. Скорость перемещения оси инструмента (минутная подача)  $V_f$ , м/мин, равна (7):

$$V_f = (V_{рез} \cdot f_z \cdot Z) / (\pi \cdot D), \quad (7)$$

где  $V_f$ - скорость перемещения оси инструмента (минутная подача), м/мин;

$V_{рез}$  - скорость резания (окружная скорость), м/мин;

$f_z$  - подача на зуб, мм;



$Z$  - число зубьев;

$D$  - диаметр фрезы, мм.

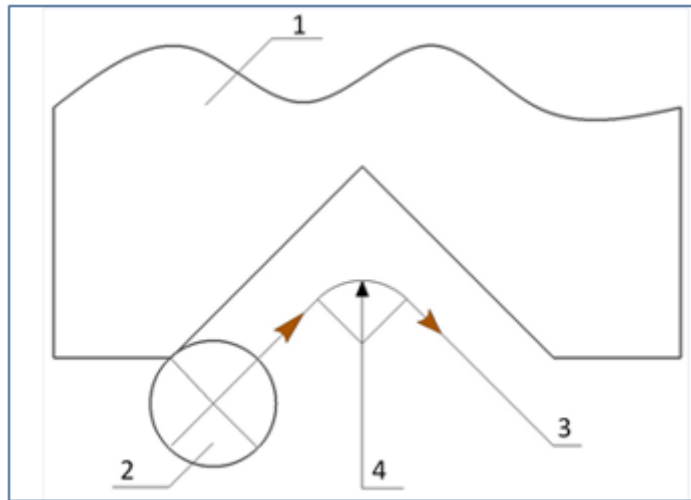


Рисунок 2.10 - Минимально возможный радиус на траектории движения инструмента (вид по направлению оси Z): 1- деталь; 2 – фреза; 3 – траектория движения инструмента; 4 – радиус скругления траектории  $R_{min}$

Минимально возможный радиус  $R_{min}$ , мм, с учетом этих параметров при программировании траектории движения инструмента равен (8):

$$R_{min} = V_f^2 / (3,6 \cdot \alpha), \quad (8)$$

где  $R_{min}$  - минимально возможный радиус на траектории движения инструмента, мм;

$V_f$  - скорость перемещения оси инструмента (минутная подача), м/мин;

$\alpha$  – макс. допустимое ускорение, обеспечиваемое приводами станка (для труднообрабатываемых материалов коэффициент 0,006, а для легкообрабатываемых – 0,008),  $m/s^2$ .

Для снижения динамических нагрузок и равномерной нагрузки на инструмент при высокоскоростной обработке используются спиральные стратегии обработки в виде трохоидального кругового фрезерования с одновременным линейным перемещением. При трохоидальном движении инструмента сводится к минимуму нагрев заготовки и фрезы, т.к. криволинейные траектории минимизируют дугу зацепления.

К преимуществам этого метода следует отнести снижение вибраций, высокую скорость и точность обработки [75]. Параметры характеризующими траекторию трохоидального фрезерования – ширина и шаг (см. Рисунок 2.11).

Величина шага трохойды (Рисунок 2.11), при известном диаметре фрезы  $D$ , для обеспечения геометрических параметров шероховатости поверхности, обозначенных на чертеже, рассчитывается по формуле (10):

$$h_{тр} = 2 \cdot \sqrt{h_{гр}/10^3 (D - h_{гр}/10^3)}, \quad (10)$$

где  $h_{тр}$  - величина шага трохойды, мм;

$D$  – диаметр фрезы, мм;

$h_{гр}$  – требуемое высотное значение неровности (гребешка) в зависимости от параметров шероховатости, определяется расчетом по формуле (3), мкм.

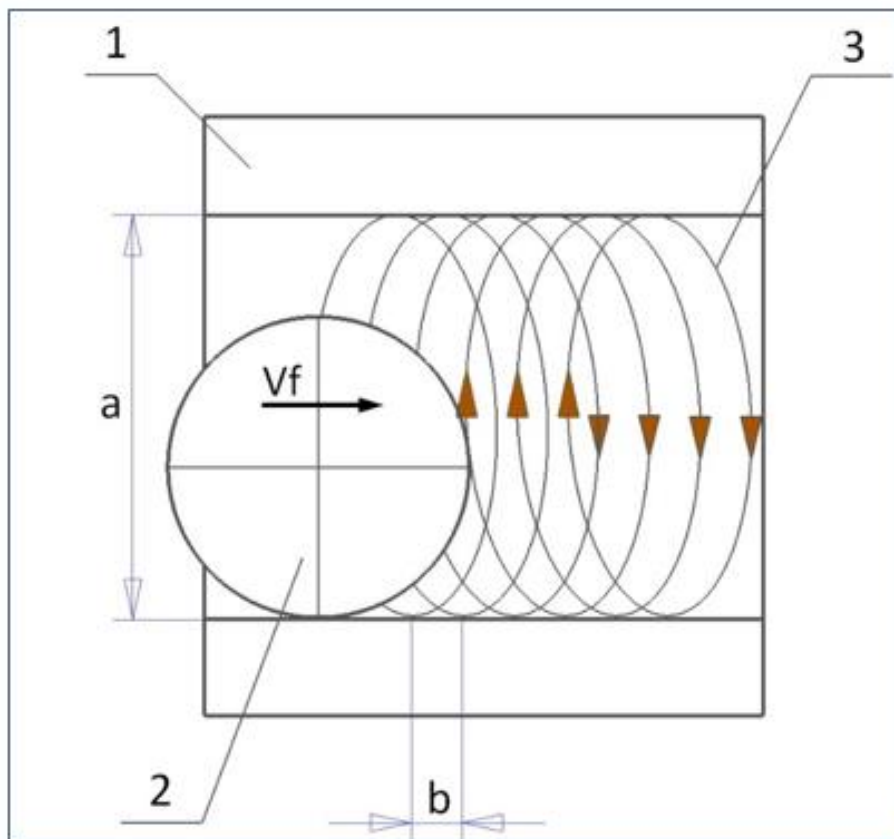


Рисунок 2.11 - Параметры трохоидального движения инструмента (вид по направлению оси  $Z$ ): 1 – деталь; 2 – фреза; 3 – траектория движения инструмента по трохойде;  $a$  – ширина трохойды;  $b$  – шаг трохойды;  $V_f$  – направление подачи

Расчетные значения шага и ширины трохойды заносятся в табло диалога **Фрезеровать** в закладке **Высокоскоростная** при проектировании операции.

Для комплексного расчета с учетом содержания решений проектных задач применимых к конкретному технологическому процессу разработан единый алгоритм определения всех перечисленных выше параметров (Рисунок 2.12). Результаты выполненных вычислений проектных задач, исходя из исходных данных, через окна диалога заносятся в систему для дальнейшего проектирования.

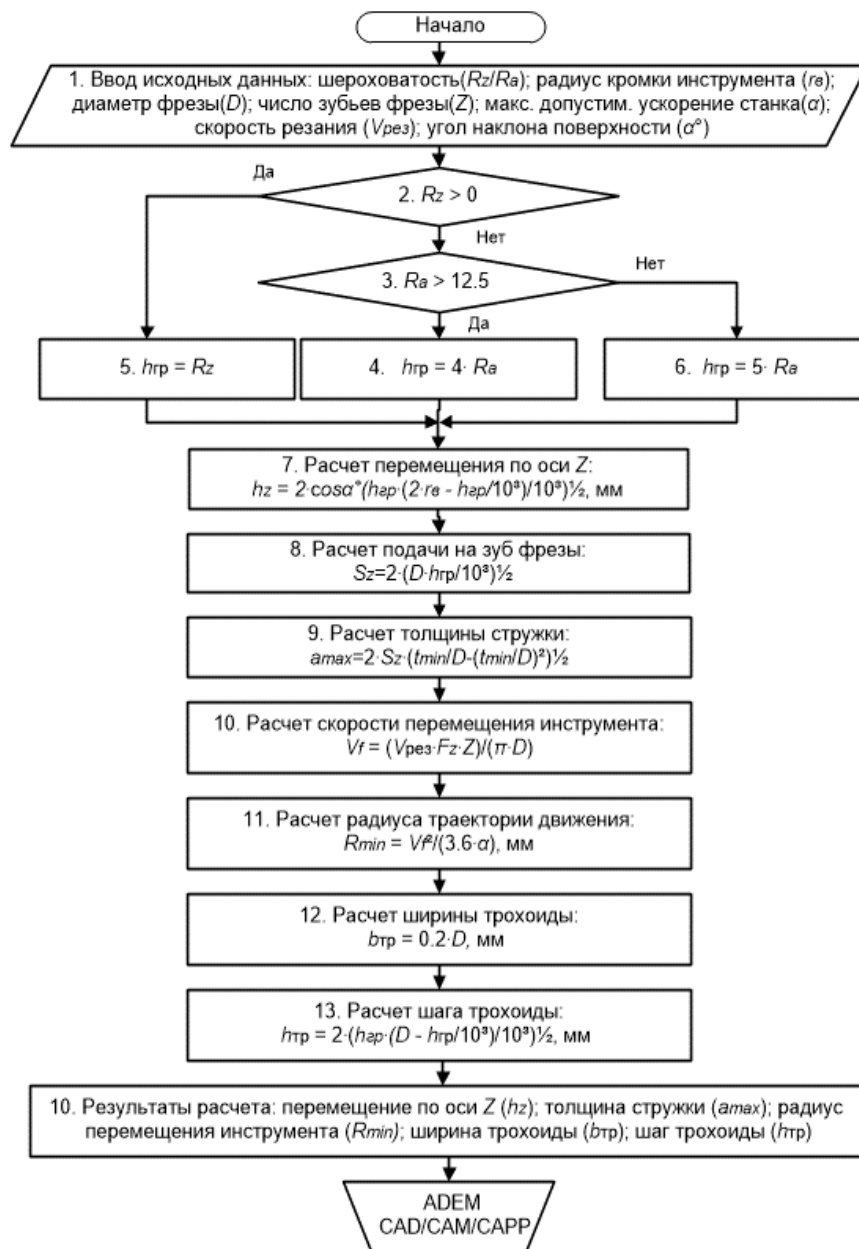


Рисунок 2.12 – Алгоритм комплексного решения проектных задач при автоматизированном проектировании высокоскоростной фрезерной обработки на станках с ЧПУ

## 2.3 Получение цифрового двойника технологического процесса высокоскоростного фрезерования на станке с ЧПУ

В результате автоматических действий системы на выходе формируется цифровой двойник технологического процесса (англ. Digital Twin, DT) высокоскоростного фрезерования [11; 12; 53]. Цифровой двойник представляет собой файл в системе ADEM в формате \*.adm с полной информацией о разработанном технологическом процессе (Рисунок 2.13).

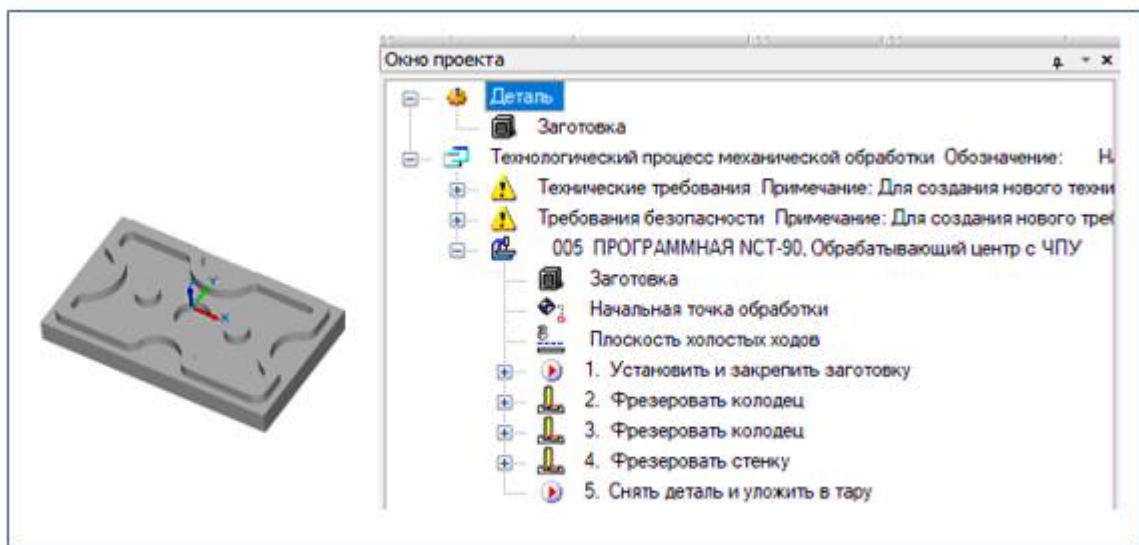


Рисунок 2.13 - Цифровой двойник технологического процесса фрезерной обработки

При работе с этим файлом разработчик может виртуально исследовать эффективность выполненного проекта меняя в программе условия обработки через окна диалога (Рисунок 2.14). В блоке 2, в модуле CAD, при необходимости, можно изменять форму обрабатываемой детали [76]. В блоке 4 заносятся общие сведения о технологическом процессе. В блоке 5 корректируется модель оборудования. В блоке 6 выполняется подбор приспособления. В блоках основных переходов 7 и далее, можно изменять вид инструмента, заносятся данные полученные в результате расчета по разработанным авторами программ по подбору режимов резания, траектории перемещения инструмента.

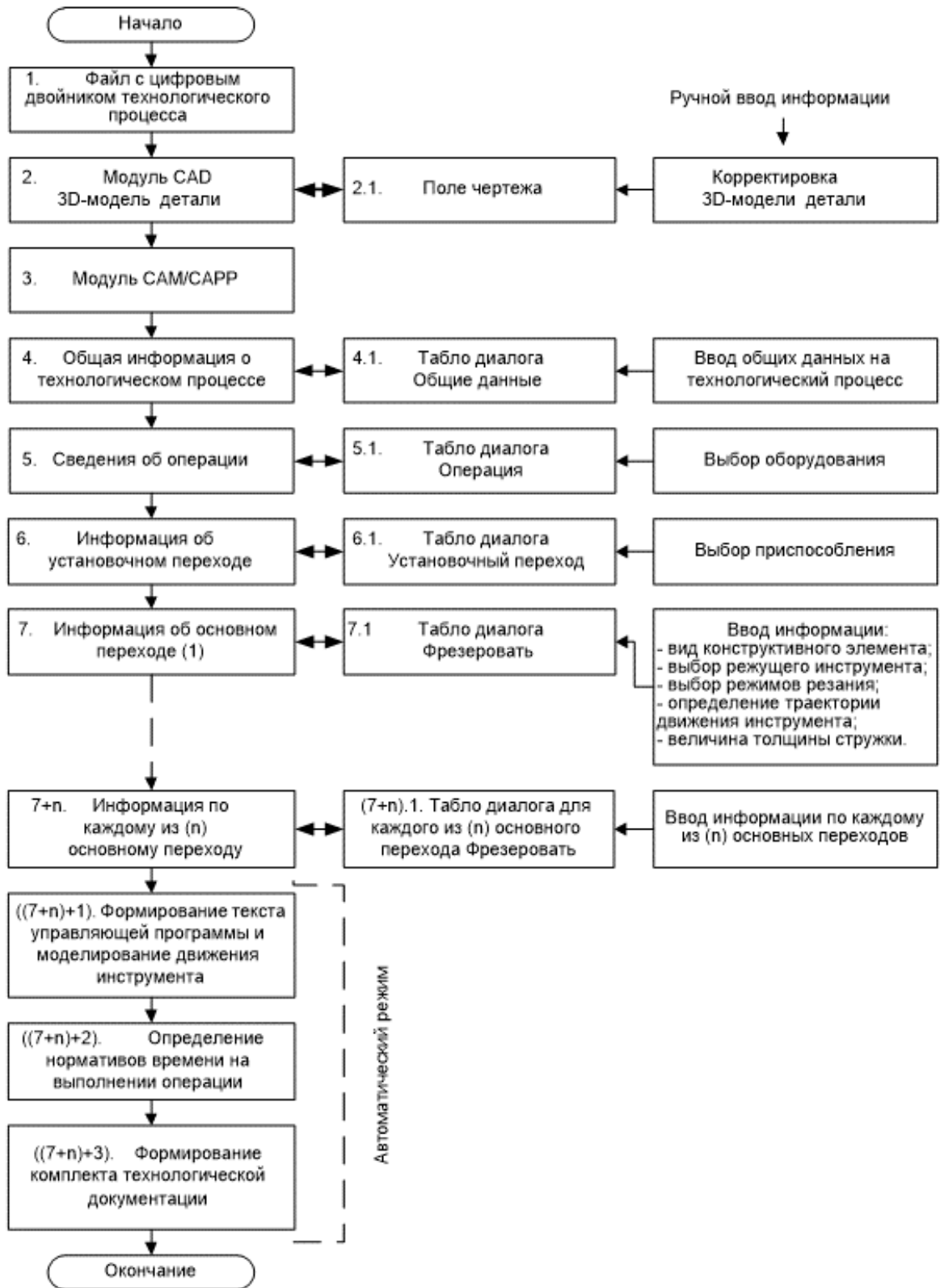


Рисунок 2.14 - Алгоритм создания прототипа технологического процесса с помощью цифрового двойника

Моделирование процесса обработки на экране позволяет предусмотреть вероятные случаи аварийных ситуаций. Эти действия автоматически отражаются в тексте управляющей программы, нормативах времени, технологической документации и экономических показателях разработки. Такой подход позволяет уже на стадии технологического проектирования, без дорогостоящего натурального эксперимента, оценивать различные варианты процесса обработки [54]. Пример отображения цифрового двойника технологического процесса высокоскоростной обработки детали «Плита» приведен в Приложении Ж.

## 2.4 Выводы по Главе 2

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.

3. Выявлены взаимосвязи и установлены зависимости между параметрами решений 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.

4. 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.

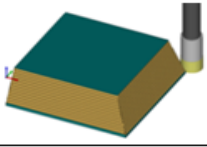
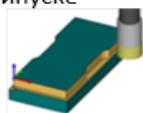
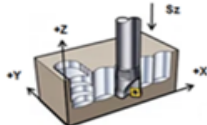
5. Рассмотрены возможности создания цифрового двойника технологического процесса высокоскоростного фрезерования на станке с ЧПУ и оценка эффективности разрабатываемых вариантов обработки, позволяющих уже на

стадии проектирования без дорогостоящего натурального эксперимента, оценивать различные варианты процесса обработки.

6. Результаты работы системы с автоматизированными решениями проектных задач определения параметров высокоскоростного фрезерования сокращают время разработки и объединяют функции технолога, программиста и нормировщика в одном лице [38].

Результаты исследований – функционалы и зависимости по каждому виду проектных задач обеспечения качества поверхности при фрезеровании приведены в Таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Вид функционала и зависимостей проектных задач для расчета необходимых параметров при автоматизированном проектировании высокоскоростных фрезерных операций для обеспечения заданного качества поверхности

Вид фрезерования	Функционал	Функция
2.5-координатное фрезерование объемных изделий на станках с ЧПУ для плоского фрезерования 	$Ra(Rz) = f(\text{форма режущей части инструмента; форма обрабатываемой поверхности; шаг перемещения инструмента по оси Z})$	Для получения заданных параметров шероховатости поверхности на изделии $Ra(Rz)$ : $hz = 2 \cdot \cos^2 \alpha (h_{гр} (2 \cdot r_b - h_{гр}/10^3)/10^3)^{1/2}$ , где $hz$ – шаг подачи инструмента по оси Z, мм; $r_b$ – радиус режущей кромки инструмента, мм; $\alpha^\circ$ – угол наклона обрабатываемой поверхности заготовки относительно оси Z, град. $h_{гр}$ – высотное значение неровности (гребешка) в зависимости от параметров шероховатости. $\begin{cases} h_{гр} = R_z, \text{ при задании параметра } R_z; \\ 4 \cdot R_a, \text{ при задании } R_a \text{ и } R_a > 12,5 \text{ мкм}; \\ 5 \cdot R_a, \text{ при задании } R_a \text{ и } R_a < 12,5 \text{ мкм} \end{cases}$
Контурное фрезерование при переменном по величине припуске 	$Ra(Rz) = f(\text{величины припуска; высота контура; параметры фрезы; скорость резания; удельная сила резания})$	Для получения заданных параметров шероховатости поверхности на изделии $Ra(Rz)$ : $a_{max} = 4 \cdot \sqrt{D \cdot h_{гр}/10^3} \cdot \sqrt{\frac{t_{min}}{D} - \left(\frac{t_{min}}{D}\right)^2}$ , где $a_{max}$ – толщина стружки, мм; $D$ – диаметр фрезы, мм; $h_{гр}$ – максимальная высота неровности, мкм; $t_{min}$ – минимальный припуск, мм.
Плунжерное фрезерование 	$Ra(Rz) = f(\text{диаметр фрезы; подача по осям X и Y})$	Для получения заданных параметров шероховатости поверхности на изделии $Ra(Rz)$ : $S_{xy} = 2 \cdot (h_{гр} \cdot (D - h_{гр}/10^3)/10^3)^{1/2}$ , где $S_{xy}$ – величина однократного перемещения инструмента вдоль обрабатываемой поверхности по осям X и Y, мм; $D$ – диаметр фрезы, мм; $h_{гр}$ – максимальная высота неровности, мкм.

### **ГЛАВА 3 РЕАЛИЗАЦИЯ НАПРАВЛЕНИЙ КОНЦЕПЦИИ «ИНДУСТРИЯ 4.0». ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Актуальность выполнения проведенных исследований обусловлена ростом масштабов работ по интенсификации и компьютеризации технологического производства, комплексной автоматизации и интегрированного управления сетью технологических процессов. Автоматизация получения исходных данных и расчетов при технологической подготовке производства (ТПП) многократно повышает эффективность и качество решения проектных технологических задач [60]. Составляющей частью ТПП при запуске производства новых изделий является определение нормативов времени и норм выработки. В процессе установившегося производства необходимы способы оперативного анализа эффективности выполнения производственных заданий различными категориями исполнителей и структурными подразделениями для принятия управленческих решений. Для выполнения расчетов норм времени и норм выработки при изготовлении каждой детали в процессе работы производится непосредственное наблюдение и фиксирование наблюдателем ряда показателей – времени работы оборудования при изготовлении каждой детали; числа деталей, выполненных за определенный отрезок времени; времени проведения наблюдений с последующими расчетами. Подготовка данных и выполнение расчетов связаны со значительными затратами времени, привлечением для решения этих задач квалифицированного персонала [44]. В целях повышения эффективности оперативного управления при эксплуатации оборудования с программным управлением предоставляется возможность реализации автоматизированного сбора необходимой информации и последующего расчета нормативов времени и норм выработки [43; 49]. Необходимо разработать методику экспресс-анализа, основанного на информационных возможностях устройств ЧПУ (УЧПУ),



сокращающую время подготовки таких данных и не требующую привлечения для выполнения этих функций дополнительных человеческих ресурсов. Для оперативной оценки эффективности работы оборудования предоставляется возможность применить показатели, реализуемые с учетом информационных возможностей УЧПУ [64]. Также требует уточнения показатель, позволяющий оперативно производить сравнительный анализ работы операторов станков с ЧПУ, работающих в различных условиях.

Концепция «Индустрия 4.0», определяется как средство повышения эффективности обрабатывающей промышленности через интеграцию цифровых систем в процессы производства. Автоматизированная технологическая подготовка производства является основой функционирования цифрового предприятия. В этом ключе концепция «Индустрия 4.0» предусматривает ряд направлений, успешно реализуемых с помощью системы ADEM CAD/CAM/CAPP которые рассматривается в этой главе:

- направление «планирование производства» (управление производственными заданиями, планирование производства);
- направление «конструкторская подготовка производства» (компьютерный инжиниринг-автоматическое изображение чертежных видов по 3D-модели, автоматическая простановка размеров);
- направление «технологическая подготовка производства» (автоматизированная разработка технологических процессов изготовления деталей на универсальном оборудовании по типовым шаблонам, автоматическая разработка технологического процесса изготовления деталей на станках с ЧПУ в модуле САМ Эксперт, автоматическое получение комплекта технологической документации по заполненной маршрутной карте);
- направление «цифровой мониторинг» (автоматическое получение количественных данных об изготовлении деталей на станках с программным управлением с использованием информационных возможностей УЧПУ, автоматический расчёт показателей эффективности производства).

### 3.1 Методика расчета экономической эффективности применения операций высокоскоростного фрезерования

Эффективности реализации операций высокоскоростной обработки в ряде источников оценивается по производительности выполнения операций<sup>1</sup>, что не всегда позволяет сопоставить результаты обработки изделий различной конфигурации и затрудняет определение ценовых показателей. Для расчета экономической эффективности высокоскоростного фрезерования предложена методика, когда используются виды затрат на станко-час при выполнении операций – стоимость реновации станка (РС, руб), расходы на режущий инструмент (РИ, руб), зарплата станочника (ЗС, руб), сервис (СС, руб), инжиниринг (ИНЖ, руб), цеховые расходы (ЦР, руб). Эти затраты могут достигать 6 – 8 тысяч рублей в час. Для полных расчетов понадобятся показатели, характеризующие процесс обработки – масса заготовки (МЗ, кг), масса детали (МД, кг), время обработки по программе ( $T_{\text{маш}}$ , мин) [35].

**Определение количественного показателя.** В качестве количественного показателя, характеризующего выполнение высокоскоростной операции, предложена масса удаленного металла в единицу времени, для расчета этого показателя разработана формула (8) [32]:

$$KUM = (MЗ - MД) / T_{\text{маш}}, \quad (1)$$

где  $KUM$  - масса удаленного металла в единицу времени, кг/мин;

$MЗ$  – масса заготовки, кг;

$MД$  – масса детали, кг;

$T_{\text{маш}}$  – время обработки по программе, мин.

**Определение ценового показателя.** В качестве ценового показателя экономической эффективности выполнения высокоскоростной обработки на станке с ЧПУ предложена сумма совокупных затрат на выполнение операции,

---

<sup>1</sup> Селиванов А.Н., Насад Т.Г. Расчет экономической эффективности обработки валов методом высокоскоростного фрезоточения. Вестник СГТУ. 2011. №2 (56). Выпуск 2. С. 134 -138

выраженная в стоимости одного килограмма изготовленной детали (СИД, руб/кг), для расчета этого показателя разработана формула (2) [32]:

$$СИД = ((РС + РИ + ЗС + СС + ИНЖ + ЦР) \cdot (T_{маш}/60))/МД, \quad (2)$$

где СИД – стоимость килограмма изготовленной детали, руб/кг;

РС - стоимость реновации станка, руб/час;

РИ – расходы на режущий инструмент, руб/час;

ЗС – зарплата станочника, руб/час;

СС – сервис, руб/час;

ИНЖ – инжиниринг, руб/час;

ЦР - цеховые расходы, руб/час;

$T_{маш}$  – время обработки по программе, мин

МД – масса детали, кг.

### **3.2 Автоматизация определения экономически обоснованных нормативов времени и норм выработки при запуске новых изделий с использованием информационных возможностей устройств числового управления (УЧПУ) оборудования**

В этом разделе рассматривается работа в одном из направлений Концепции «Индустрия 4.0» «цифровой мониторинг», который предусматривает автоматическое получение количественных данных об изготовлении деталей при запуске новых изделий на станках с программным управлением с использованием информационных возможностей УЧПУ. Составляющей частью ТПП, при запуске производства новых изделий, является определение нормативов времени и норм выработки.

Для выполнения расчетов норм времени и норм выработки, при изготовлении каждой детали в процессе работы производится непосредственное наблюдение и фиксирование наблюдателем ряда показателей – время работы оборудования при изготовлении каждой детали, число деталей, выполненных за определенный

отрезок времени, время проведения наблюдений с последующими расчетами. Подготовка данных и выполнение расчетов связаны со значительными затратами времени, привлечением для решения этих задач квалифицированного персонала [63; 64]. С целью повышения эффективности оперативного управления, при эксплуатации оборудования с программным управлением, предоставляется возможность реализации автоматизированного сбора необходимой информации и последующего расчета нормативов времени и норм выработки [65; 66]. Разработана методика экспресс-анализа, основанного на информационных возможностях устройств ЧПУ (УЧПУ), сокращающая время подготовки таких данных, а участие квалифицированного персонала сводится к минимуму [27]. Для оперативной оценки эффективности работы оборудования разработаны показатели, реализуемые с учетом информационных возможностей УЧПУ. Уточнен показатель, позволяющий оперативно производить сравнительный анализ работы операторов станков с ЧПУ, работающих в различных условиях. В рабочих программах по учебным дисциплинам эти вопросы не рассматриваются, требуется оформить эти разработки в виде, доступном для освоения студентами

В процессе исследования использованы способы получения сведений об эксплуатации оборудования непосредственно с устройств программного управления с последующей обработкой полученной информации на предложенной авторами вычислительной платформе. Для выполнения расчетов и последующего анализа, фиксируется информация, отражающаяся на экране монитора УЧПУ перечисленная ниже [61]:

- время работы по программе ( $T_{пр}$ ) – определяется по показаниям на мониторе УЧПУ в минутах при изготовлении детали по программе;
- показания счетчика на начало наблюдений ( $N1$ ) – определяется по показаниям значений в штуках на мониторе УЧПУ;
- показания счетчика на конец наблюдений ( $N2$ ) – определяется по показаниям значений в штуках на мониторе УЧПУ;
- время на начало наблюдений ( $T1_{час}$ ,  $T1_{мин}$ ) – фиксируется в часах и минутах;

- время на конец наблюдений ( $T2_{\text{час}}$ ,  $T2_{\text{мин}}$ ) – фиксируется в часах и минутах;
- время остановок оборудования на устранение неполадок ( $T3_{\text{час}}$ ,  $T3_{\text{мин}}$ ) - фиксируется в часах и минутах.

Все перечисленные значения используются для последующего расчета показателей и анализа.

Количество изготовленных деталей  $N$  в штуках за период наблюдений определяется по формуле (3):

$$N = N2 - N1, \quad (3)$$

где  $N1$  – показания счетчика на мониторе УЧПУ на начало наблюдений, шт;

$N2$  - показания счетчика на мониторе УЧПУ на конец наблюдений, шт.

Время наблюдения ( $T_{\text{набл}}$ ) в минутах определяется по формуле (4):

$$T_{\text{набл}} = (T2_{\text{час}} \cdot 60 + T2_{\text{мин}}) - [(T1_{\text{час}} \cdot 60 + T1_{\text{мин}}) + (T3_{\text{час}} \cdot 60 + T3_{\text{мин}})], \quad (4)$$

где  $T1_{\text{час}}$  и  $T1_{\text{мин}}$  - время на начало наблюдений в часах и минутах;

$T2_{\text{час}}$  и  $T2_{\text{мин}}$  - время на конец наблюдений в часах и минутах;

$T3_{\text{час}}$  и  $T3_{\text{мин}}$  - время остановок оборудования на устранение неполадок в часах и минутах.

Обработка результатов выполнялась методами математической статистики, оценка результативности производства производилась по показателям общей эффективности оборудования ОЕЕ (Overall Equipment Efficiency).

Для автоматизации производства, интеллектуальной поддержки процессов управления и обработки данных в технологических системах управления разработана методика расчета нормативов и показателей при изготовлении изделий на станках с ЧПУ. На основании исходных данных, считываемых с устройств программного управления оборудования, на вычислительной платформе определяются нормативы времени и нормы выработки при запуске производства новых изделий, а также критерии оценки эффективности установившегося производственного процесса (Рисунок 3.1).

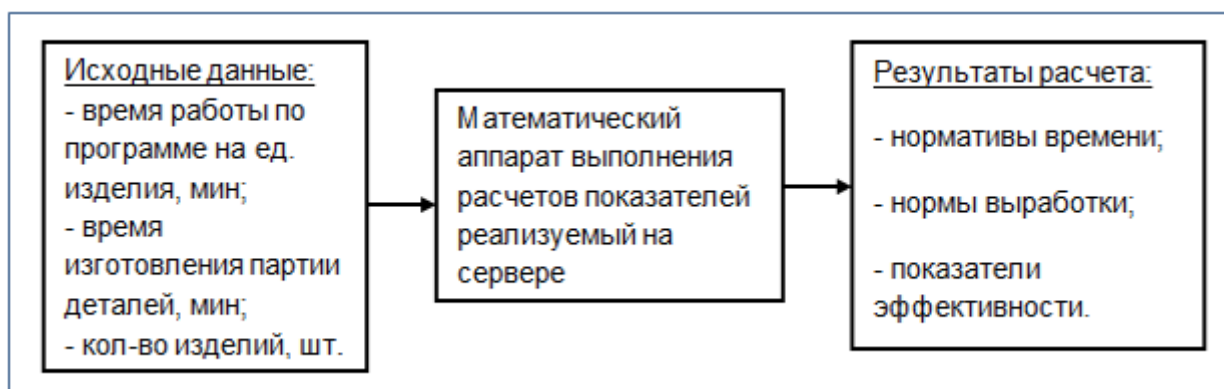


Рисунок 3.1 - Схема реализации исследований по определению показателей производства изделий на оборудовании с ЧПУ

Вычислительная платформа представляет последовательную цепь математических выражений определения показателей, на основе исходных данных получаемых с УЧПУ.

Машинное время ( $T_{\text{маш}}$ ) – для станков с ЧПУ отработка полного цикла по программе, определяется по показаниям на мониторе УЧПУ в целых и десятичных значениях минут ( $T_{\text{пр}}$ ) (см. формулу (5)):

$$T_{\text{маш}} = T_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{маш}}$  - машинное время, мин;

$T_{\text{пр}}$  - время работы по программе, мин.

Штучное время ( $T_{\text{шт}}$ ) – время, затрачиваемое непосредственно на изготовление (обработку) единицы продукции и включает в себя время машинное  $T_{\text{маш}}$ , вспомогательное время  $T_{\text{всп}}$ , время обслуживания  $T_{\text{обсл}}$ , время перерывов и личные надобности  $T_{\text{пер}}$ .

Теоретически норму штучного времени можно рассчитать по формуле (6):

$$T_{\text{шт}} = T_{\text{маш}} + T_{\text{всп}} + T_{\text{обсл}} + T_{\text{пер}}, \quad (6)$$

где  $T_{\text{шт}}$  - штучное время, мин;

$T_{\text{всп}}$  - вспомогательное время, мин;

$T_{\text{обсл}}$  - время обслуживания, мин;

$T_{\text{пер}}$  - время перерывов и личные надобности, мин.

Значения показателей формулы (4) выбирается из нормативов. В нашем случае значение нормы штучного времени определяется экспериментально, как соотношение времени наблюдения к количеству деталей, изготовленных за этот период по формуле (7):

$$T_{шт} = T_{набл} / N, \quad (7)$$

где  $T_{шт}$  - штучное время, мин;

$T_{набл}$  – время наблюдения (мин), определяется по Формуле 4;

$N$  - количество изготовленных деталей одного наименования (шт) за время наблюдений, определяется по формуле (3).

Т.к. значения штучного времени ( $T_{шт}$ ) при мониторинге в разные дни и у разных операторов станков с ЧПУ могут различаться по величине, то среднее значение штучного времени ( $T_{шт}$ ) изготовления детали определяем методом математической статистики по результатам выборки и принимаем его как математическое ожидание случайных величин времени  $T_{шт}$  зарегистрированных в ходе мониторинга [80].

Математическое ожидание  $M[T_{шт}]$  находим по формуле (8):

$$M [T_{шт}] = \sum x_i \cdot p_i, \quad (\text{мин}), \quad (8)$$

где  $M[T_{шт}]$  - математическое ожидание, мин;

$x_i$  – значения замеров  $T_{шт}$ , (мин);

$p_i$  - вероятностью случайного события  $T_{шт}$ .

Вероятность  $p_i$  случайного события  $T_{шт}$  определяется по формуле (9):

$$p_i [T_{шт}] = m/n, \quad (9)$$

где  $p_i [T_{шт}]$  - вероятность случайного события;

$m$  - число благоприятствующих событию исходов;

$n$  - число всех элементарных равновозможных исходов в испытании.

Дисперсию находим по формуле (10):

$$D[T_{шт}] = \sum (x_i^2 \cdot p_i) - M[T_{шт}]^2, \quad (10)$$

Среднее квадратическое отклонение  $\sigma(x)$  определяем по формуле (11):

$$\sigma(T_{шт}) = \sqrt{D[T_{шт}]}. \quad (11)$$

Коэффициент вариации определяется по формуле (12):

$$v = \sigma(x) / M [T_{шт}]. \quad (12)$$

Если при расчетах  $v \leq 30\%$ , то совокупность считается однородной, а вариация слабой. Полученное математическое ожидание значения  $T_{шт}$  принимается для дальнейших расчетов.

Для планирования выпуска изделий определяются нормы выработки в единицу времени. Норма выработки изготовления деталей в одну смену ( $N_{см}$  шт/смену) длительностью в 8 часов на одном станке определяется по формуле (13):

$$N_{см} = 480 / T_{шт}, \quad (13)$$

где  $N_{см}$  - норма выработки изготовления деталей в одну смену, шт/смену;

480 – время в мин в смене длительностью в 8 часов;

$T_{шт}$  – время изготовления одной детали в мин.

Норма выработки изготовления деталей в час ( $N_{час}$  шт/час) на одном станке определяется по формуле (14):

$$N_{час} = 60 / T_{шт}, \quad (14)$$

где  $N_{час}$  - норма выработки изготовления деталей в час, шт/час;

60 – время, мин;

$T_{шт}$  – время изготовления одной детали, мин.

Штучно-калькуляционное время ( $T_{шк}$ ) - полное штучное время на изготовление единицы изделия (с учетом затрат подготовительно-заключительного времени ( $T_{пз}$ ) на партию деталей  $N$ ) определяется по формуле (15):

$$T_{шк} = T_{шт} + T_{пз} / N, \quad (15)$$

где  $T_{шк}$  - штучно-калькуляционное время, мин;

$T_{шт}$  - время изготовления одной детали, мин;

$T_{пз}$  - подготовительно-заключительного времени на партию деталей, устанавливается по нормативам или определяется наблюдением, мин;

$N$  – число деталей в партии в шт. при серийном производстве.



Для автоматизированного расчета норм времени, норм выработки и показателей эффективности производства разработан алгоритм и программа определения этих значений (Рисунок 3.3).

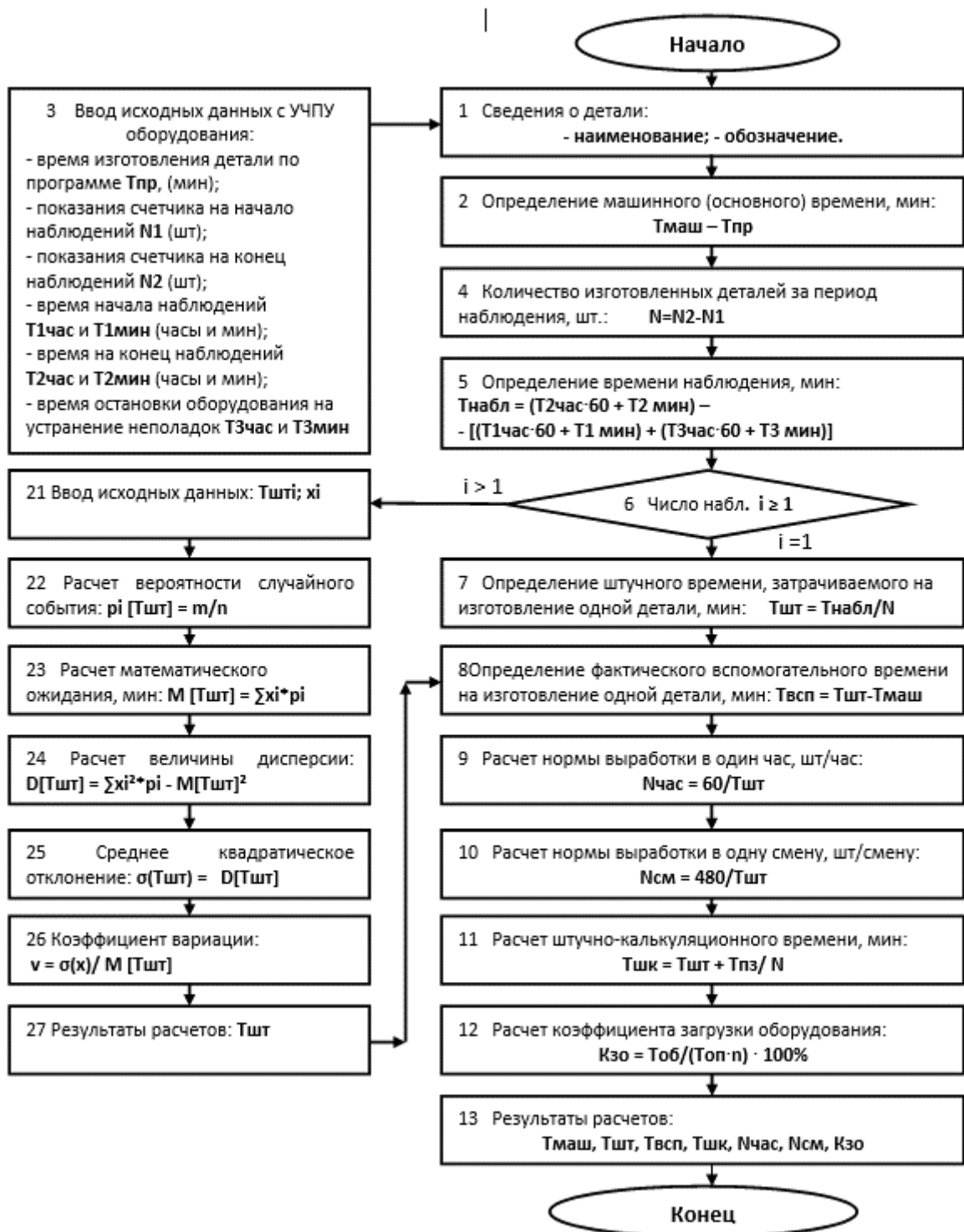


Рисунок 3.3 - Алгоритм расчета норм времени, норм выработки и показателей эффективности производства

Сравнительный анализ трудозатрат привлечения квалифицированного персонала для определения нормативов времени и норм выработки для различных методов выполнения исследований при изготовлении изделий на оборудовании с ЧПУ и выводы об эффективности предложенных решений приведен в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Сравнительный анализ вариантов трудозатрат при определении нормативов времени и норм выработки в процессе изготовления изделий на оборудовании с ЧПУ

Материальная база и вид исследований	Подготовка исходных данных на ПК	Получение информации для расчета	Регистрация результатов наблюдения	Ввод данных и расчет нормативов	Трудозатраты, %Тперс
1	2	3	4	5	6
УЧПУ низкого уровня. Ручной режим замеров	В ручном режиме  5% Тперс	Непосредственное наблюдение за выполнением работ 82%Тперс	Фиксирование в листе наблюдений  8% Тперс	Ручной ввод на ПК и расчет нормативов по программе 5%Тперс	100%
УЧПУ среднего уровня, локальная сеть отсутствует. Автоматизированный режим замеров.	С использованием баз данных  2% Тперс	Информация отражается на мониторе УЧПУ после выполнения цикла работ  0%Тперс	Фиксирование в листе наблюдений с монитора УЧПУ  8% Тперс	Ручной ввод на ПК и расчет нормативов по программе 5%Тперс	15%
УЧПУ высокого уровня, локальная сеть. Автоматизированные режим замеров и передача данных.	С использованием баз данных  2% Тперс	Информация отражается на мониторе УЧПУ после выполнения цикла работ  0%Тперс	Автоматизированное фиксирование результатов наблюдений  0%Тперс	Автоматизированный перенос данных на вычислит. платформу ПК. Расчет нормативов. 1%Тперс	3%

При изготовлении изделий на станках с ЧПУ оператор обслуживает несколько станков, и расчет его заработной платы выполняется с учетом коэффициента многостаночного обслуживания ( $K_m$ ) по формуле (16):

$$Z_{ом} = \Sigma(T_{штк} \cdot Ni)/60 \cdot K_m \cdot Ч_{ст}, \quad (16)$$

где  $Z_{ом}$  – зарплата оператора, руб;

$T_{штк}$  - штучно-калькуляционное время на единицу изделия, мин;

$N$  – число изделий одного наименования, шт;

$Ч_{ст}$  – часовая тарифная ставка, установленная для операторов в зависимости от разряда работ на предприятии, руб/час;

$K_m$  - коэффициента многостаночного обслуживания, определяется по Таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Значения коэффициента многостаночного обслуживания  $K_m$

$K_m$	1	0,65	0,48	0,39	0.35
Число обслуживаемых станков, $n$	1	2	3	4	5

### **3.3 Автоматизация оценки результативности действующего производства по показателям общей эффективности ОЕЕ (Overall Equipment Efficiency) с использованием информационных возможностей устройств числового управления (УЧПУ) оборудования**

В процессе установившегося производства необходимы способы оперативного анализа эффективности выполнения производственных заданий различными категориями исполнителей и структурными подразделениями для принятия управленческих решений [50; 66]. Эти вопросы, с позиции автоматизации выполнения этих операций, в учебной литературе не рассматриваются и рекомендации по их применению на производстве отсутствуют.

Для оценки работы автоматизированного производства применялся известный в международной практике показатель общей эффективности *OEE* (*Overall Equipment Effectiveness*):

$$OEE = \text{Готовность} \times \text{Производительность} \times \text{Качество} \times 100, \quad (17)$$

где Готовность – Фактическое время работы оборудования/Плановое время работы оборудования;

*Производительность* – Текущая выработка/Запланированная выработка;

*Качество* - Количество качественных изделий/Общее количество изделий.

Для оценки эффективности работы производственного участка станков с ЧПУ и каждого оператора за исследуемый период в категории *Готовность* (по показателю OEE), а также для сопоставления результатов используем показатель *Коэффициент загрузки оборудования* ( $K_{зо}$ ), как соотношение времени работы оборудования по изготовлению деталей (сумма  $T_{маш}$  изготовленным деталям за исследуемый период) и времени работы оператора за исследуемый период [26]. *Коэффициент загрузки оборудования*, применительно для оборудования, с ЧПУ определяется по формуле (18):

$$K_{зо} = (T_{об}/T_{оп} \cdot n) \cdot 100\%, \quad (18)$$

где  $K_{зо}$  - коэффициент загрузки оборудования;

$T_{об}$  - время работы  $n$  единиц оборудования определяемое по количеству изготовленных деталей за исследуемый период, равное сумме произведений количества деталей одного наименования на  $T_{маш}$  этой детали, все значения суммируются (мин), определяется по формуле (19);

$T_{оп}$  - время работы оператора (участка) за исследуемый период времени –  $T_{час} \cdot 60$  (мин);

$n$  – количество одновременно обслуживаемых станков оператором, шт.

Время работы всех единиц оборудования  $T_{об}$  за исследуемый период (смена, декада, месяц и т.п.) определяется как сумма произведений машинного времени, на количество каждой изготовленной детали за этот период по формуле (19):

$$T_{об} = \sum T_{маш i} \cdot N_i \text{ (мин)}, \quad (19)$$

где  $T_{маш\ i}$  – время работы станка по программе при изготовлении одной  $i$ -ой детали, мин;

$N_i$  – число деталей  $i$ -го наименования, изготовленных за исследуемый период времени, шт.

Операторы станков с ЧПУ в течение месяца работают различное количество смен и сравнение эффективности их работы по показателям объемов изготовленной продукции за месяц некорректно. Для объективной сравнительной оценки эффективности работы операторов станков с ЧПУ в категории *Производительность* (по показателю ОЕЕ) предлагается оценивать по показателю *Среднемесячное значение объема выпуска продукции за условную смену в нормо-часах*, производимой операторами станков с ЧПУ ( $T_{см\ ср}$ ). Этот показатель определяется по формуле (20):

$$T_{см\ ср} = \sum T_{шт\ i} \cdot N_i / 60 \cdot n_{см\ мес} \text{ (нормо-часов)}, \quad (20)$$

где  $T_{шт\ i}$  – время штучное на изготовление  $i$ -ой детали в мин;

$N_i$  – количество  $i$ -ых деталей, изготовленных за месяц (шт);

$n_{см\ мес}$  – количество смен, отработанных в течение месяца.

Для определения показателя *Производительность* (по показателю ОЕЕ) полученное значение объема выпуска продукции в нормо-часах в пересчете на один станок сопоставляется с фондом времени за одну смену (см. формулу (21)):

$$\text{Производительность} = (T_{см\ ср} / T_{оп} \cdot n) \cdot 100 (\%), \quad (21)$$

где  $T_{оп}$  - время работы оператора за одну смену (час);

$n$  – количество одновременно обслуживаемых станков оператором, шт.

В соответствии с мировыми стандартами этот показатель должен приближаться к 95% [50].

Расчет критерия *Качество* определяется соотношением количества годных изготовленных изделий к общему количеству изделий, выпущенных за этот период, выполняется по формуле (22):

$$\text{Качество} = (N_{годн} / N_{общ}) \cdot 100 (\%), \quad (22)$$

где  $N_{годн}$  - количества годных изготовленных изделий, шт;

$N_{общ}$  - общее количество изделий выпущенных за исследуемый период, шт.

В соответствии с мировыми стандартами этот показатель должен приближаться к 99%, что в итоге даёт для общего показателя ОЕЕ значение примерно 85% [50]. Алгоритм расчета показателей эффективности производства приведен на Рисунке 3.4.

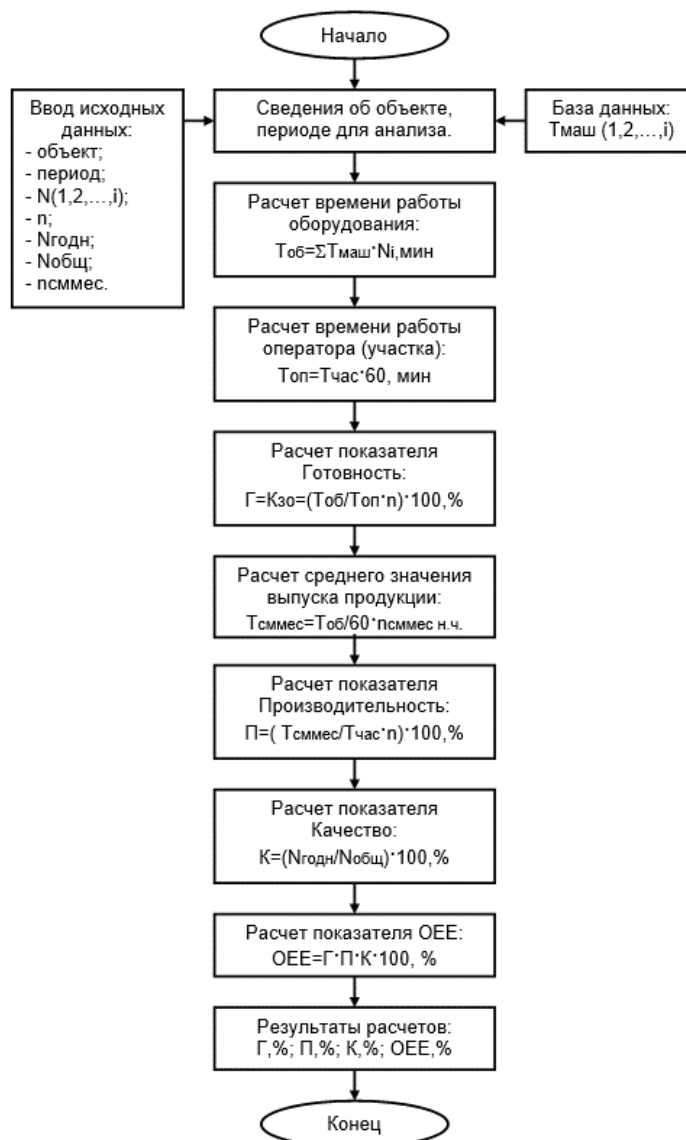


Рисунок 3.4 - Алгоритм расчета показателей общей эффективности ОЕЕ (Overall Equipment Effectiveness) производственной деятельности подразделений

Программа расчета показателей общей эффективности ОЕЕ по алгоритму на Рисунке 3.5 разработана в СУБД Microsoft Office Excel (Приложение Г), на Рисунке 3.5 показано сканированное изображение реализации расчета в программе.

1	Оператор	Изделие	Кол-во ст.	Кол-во см	Т маш, ми	Кол-во из	Кол-во го	Время ост	Время ра	Время ра	Кзо = Готс	Обем прс	Производ	Качество	OEE, проценты
2	Иванов	Плита	3	24	81	356	350	30	10800	28836	89	6.675	89	98.31461	77.875

Оператор:	Иванов
Изделие:	Плита
Кол-во станков в шт:	3
Кол-во смен псммес, шт:	24
Т маш, мин:	81
Кол-во изд. Нобщ, шт:	356
Кол-во годных изделий Нгодн, шт:	350
Время остановок Тост, мин:	30
Время работы оператора Топ, мин:	10800
Время работы оборудования Тоб, мин:	28836
Кзо = Готовность:	89
Обем продукции за смену на ед. оборуд. Тсмср, норма-час:	6.675
Производительность П, проценты:	89
Качество К, проценты:	98.31461
OEE, проценты:	77.875

Рисунок 3.5 – Реализация программы расчета показателей общей эффективности OEE производственной деятельности оператора

По полученным данным, на автоматизированном рабочем месте, оснащённом персональным компьютером, на вычислительной платформе, после ручного ввода информации, выполняются необходимые вычисления нормативов для дальнейшего использования в экономических расчетах.

При имеющейся на предприятии локальной сети, но отсутствии технической возможности считывать информацию непосредственно с УЧПУ станка, оборудование укомплектовывается терминалами (например, система мониторинга «Диспетчер», производитель «Станкосервис», г. Смоленск) получающими информацию о состоянии станка и передающими сведения на сервер для дальнейшего анализа и расчета [64].

Современные ЧПУ высокого уровня (например, HEIDENHAIN и др.) позволяют передавать информацию о функционировании оборудования напрямую через локальную сеть на центральный сервер для дальнейшего анализа и расчета [63]. Управляющая программа и сменное задание может

передаваться от диспетчера через сервер и локальную сеть прямо на УЧПУ станка. Такая схема движения информации приведена на Рисунке 3.6.

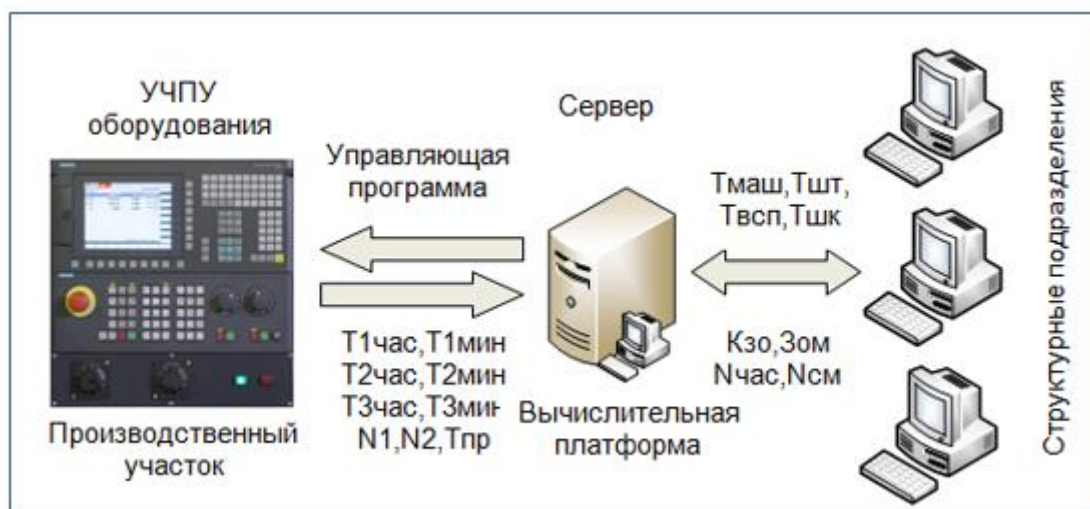


Рисунок 3.6 - Логистика движения информации при выполнении расчетов нормативов времени и норм выработки, показателей эффективности ОЕЕ.

### 3.4 Выводы по Главе 3

1. Для расчета экономической эффективности высокоскоростного фрезерования и проведения сравнительного анализа разработаны количественный и ценовой показатели результативности обработки.

2. В результате исследования разработана и апробирована методика автоматизации организации производства, поддержки процессов управления и обработки данных позволяющая оперативно, в автоматическом режиме, выполнять при запуске новых изделий расчеты фактических нормативов времени и норм выработки при механической обработке на станках с ЧПУ.

3. Внедрение проведенных исследований позволяет сократить трудозатраты привлечения квалифицированного персонала от 10 до 30 раз и сокращает время технологической подготовки производства на 43% (Таблица 3.2 и Приложение 3)



4. Уточненный показатель *Коэффициент загрузки оборудования* позволяет выполнять сравнительный анализ эффективности работы участка станков с ЧПУ за учитываемый период времени. Уточненный, применительно к оборудованию с ЧПУ, показатель *Среднемесячное значение объема выпуска продукции за условную смену в нормо-часах* позволяет выполнять анализ эффективности работы каждого оператора за учитываемый период времени.

5. Для оценки эффективности установившегося производства предложен способ оперативного анализа эффективности выполнения производственных заданий различными категориями исполнителей и структурными подразделениями [50; 66]. Для оценки работы автоматизированного производства применяется известный в международной практике показатель общей эффективности ОЕЕ (Overall Equipment Effectiveness).

6. Опыт практического использования результатов исследования показал, что данный подход способствует повышению эффективности процесса подготовки производства, а также предоставляет информацию для оценки процесса изготовления изделий на станках с ЧПУ и принятия управленческих решений по организации труда в производственном подразделении.

## **ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ЗАДАЧ**

Экспериментальная проверка оценки результатов теоретических разработок по каждой из разработанных проектных задач, выполненных в Разделе 2.2 в Главе 2, проводилась в виртуальной форме по разработанным программам и сравнивалась с результатами реального выполнения операций высокоскоростного фрезерования на оборудовании с ЧПУ. По итогам экспериментов проводилось сопоставление результатов для определения результативности выполненных теоретических разработок.

### **4.1 Определение параметров обработки при послойном высокоскоростном фрезеровании обеспечивающих заданное качество поверхности**

Параметры при послойном высокоскоростном фрезеровании определялись для различных условий обработки – угла наклона вертикальных поверхностей  $\alpha^\circ$ , радиуса режущей кромки инструмента  $r_b$  (для фрезы с НТП) или радиуса сферической фрезы  $r_{sf}$ , шероховатости поверхности  $R_a/R_z$  (высоты гребешка  $h_{gr}$ ), определяются по программам для автоматизированного расчета одного из фрагментов решения проектных задач, описание которого приведено в Разделе 2.2.1 в Главе 2. Основным лимитирующим критерием этого расчета является получение определяемой чертежом шероховатости поверхности  $R_a/R_z$  (через высоту гребешка  $h_{gr}$ ). Неизвестным параметром, который необходимо определить является величина перемещения по оси Z (толщина слоя)  $h_z$ . Результаты расчета

зависимости высоты «гребешка» от условий фрезерования приведены на Рисунке 4.1.

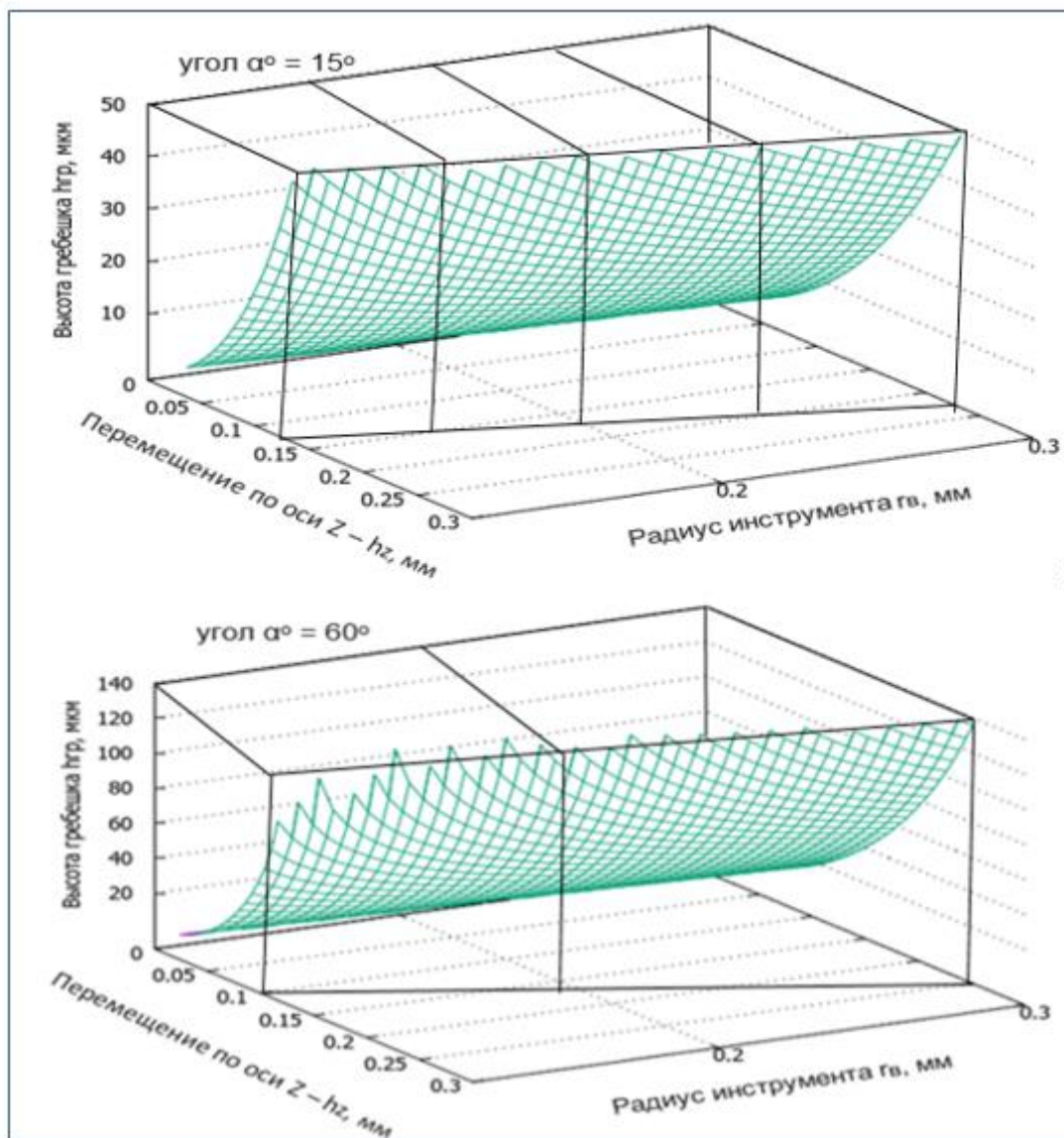


Рисунок 4.1 - Графическая реализация математической модели определения параметров «гребешка» при обработке фрезой с НТП с радиусом при вершине, ограниченными радиусными контурами режущей части фрезы

При обработке концевой фрезой со сферической рабочей частью, в соответствии с алгоритмом на Рисунке 2.4 (Глава 2), в графической форме реализована математическая модель зависимости высоты «гребешка» от условий фрезерования – величины перемещения по оси  $Z$  и угла наклона поверхности, результаты расчетов приведены на Рисунке 4.2.

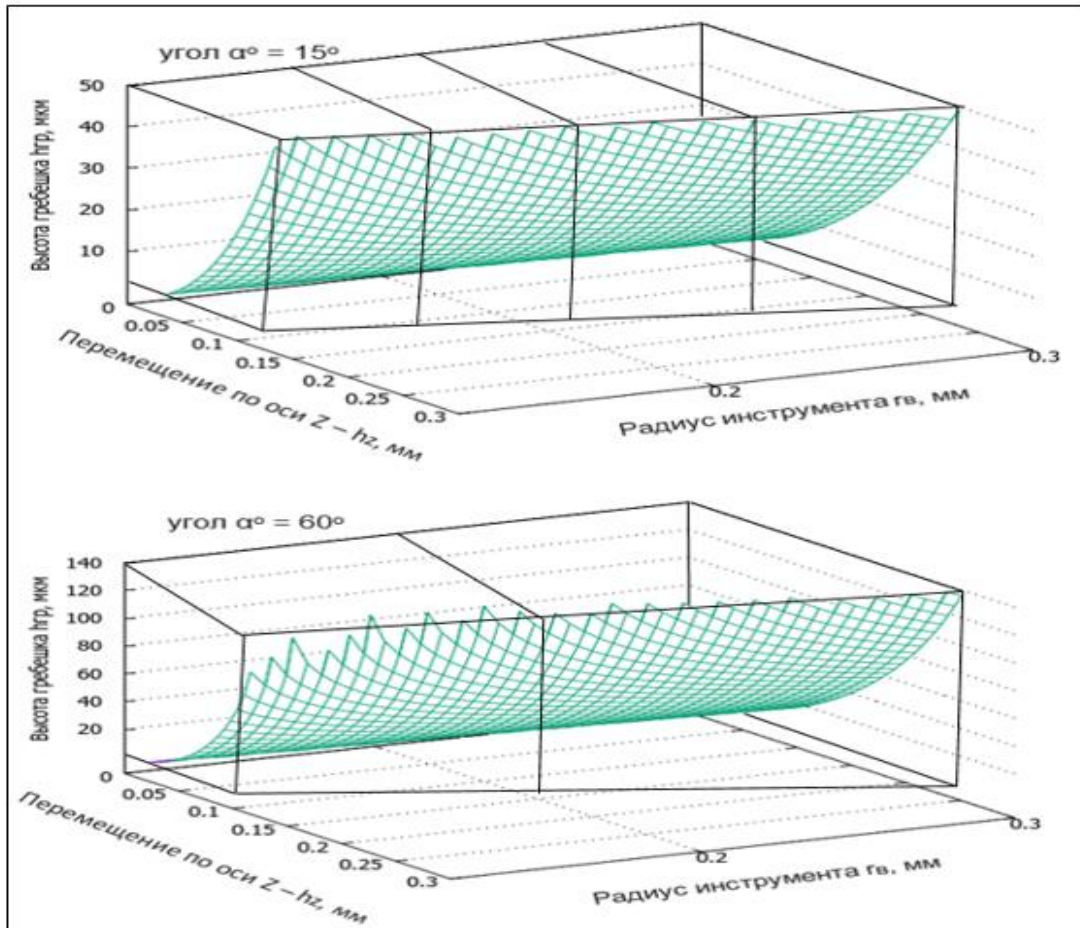


Рисунок 4.2 - Графическая реализация математической модели зависимости параметров «гребешка» с радиусными образующими от величины перемещения по оси Z, угла наклона объемной поверхности и размера радиусной или сферической рабочей частью фрезы

Результаты расчета влияния условий обработки на высотные параметры «гребешка» послойном фрезеровании фрезой с НТП прямоугольной формы с радиусом при вершине приведены во всем диапазоне изменения величины перемещения по оси Z приведены на Рисунке 4.3 Для заданных условий обработки в изменении высотных параметров «гребешка» выделены три зоны, характеризующиеся высотой и формой:

- 1-ая зона – при  $h_z \leq r_w$  для угла наклона  $\alpha^\circ < 45^\circ$  форма «гребешка» симметрична и ограничена радиусным контуром, работа в этой зоне

характеризуется минимальными высотными параметрами и рекомендуется для финишной обработки;

- 2-ая зона – при  $r_B < h_z \leq r_B/\operatorname{tg}\alpha^\circ$  для угла наклона  $\alpha^\circ < 45^\circ$  форма микронеровности асимметрична и ограничена с одной стороны радиусным контуром и прямолинейным участком с другой стороны, работа в этой зоне присуща полуступенчатой обработке;

- 3-я зона – при  $h_z > r_B/\operatorname{tg}\alpha^\circ$  для угла наклона  $\alpha^\circ < 45^\circ$  форма микронеровности ограничена образующей с радиусным и прямолинейным участками, работа в этой зоне характерна для предварительной обработки.

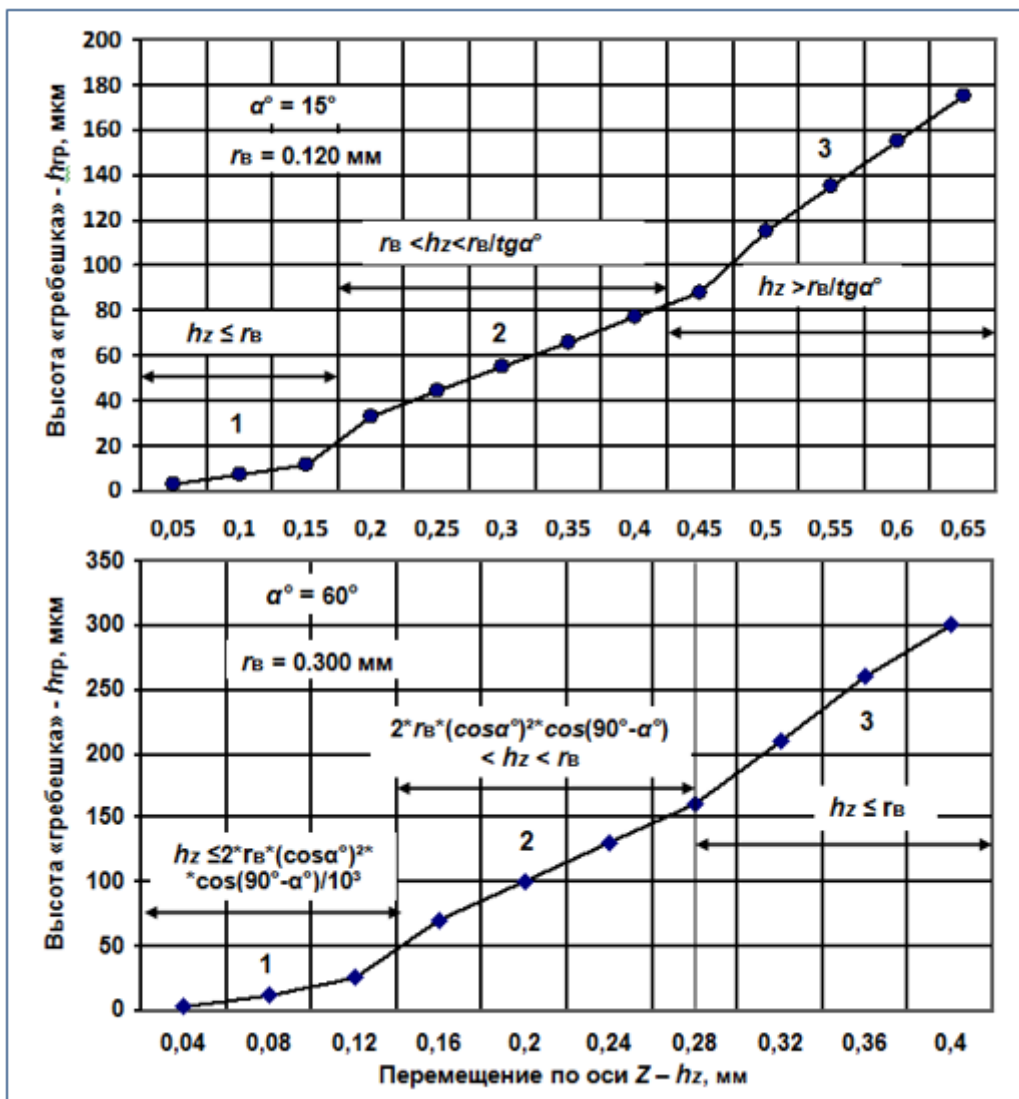
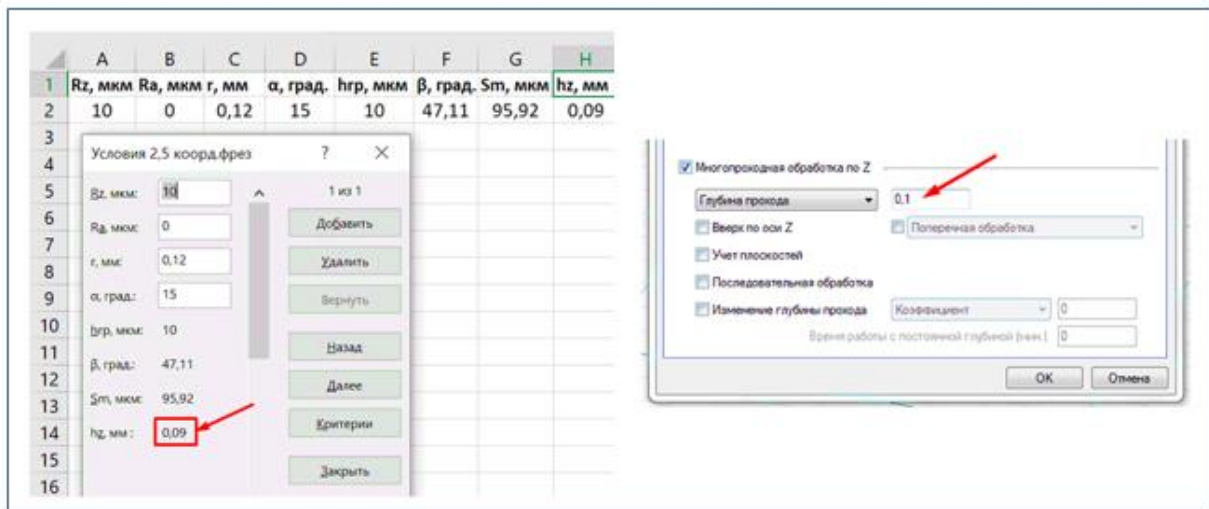


Рисунок 4.3 - Графическая реализация математической модели зависимости параметров «гребешка» от условий послойного фрезерования фрезой с НТП прямоугольной формы с радиусом при вершине

Для программирования послойного фрезерования в модуле САМ-системы ADEM реализовано несколько схем обработки [56]. В управляющей программе для обработки объемной модели, геометрические параметры «гребешка», определяются величиной шага по оси Z, а также радиусом при вершине режущей пластины и углом наклона обрабатываемой поверхности. Величина шага по оси Z, в зависимости от требований к поверхности, определяется по предложенным зависимостям. Шаг задаётся программированием послойной обработки по оси Z, которая заносится в диалоговое окно модуля САМ (см. Рисунок 4.4).



а)

б)

Рисунок 4.4 – Программа расчета глубины прохода (а) и диалоговое окно в САМ-системе (б), в которое заносится величина дискретного перемещения по оси Z

Результаты расчетов, представленные в виде графиков на Рисунке 4.5, позволяют делать предварительный прогноз о параметрах «гребешка» при послойном фрезеровании фрезой с НТП прямоугольной формы с радиусом при вершине режущей кромки в указанных условиях:  $\alpha^\circ$  - 15°; гв – 0,120, 0,200, 0,300 мм. На графике стрелками показано, что при величине lz равной 0,09 мм, при фрезеровании фрезой с НТП с радиусом при вершине режущей кромки гв равным 0,120 мм, высота «гребешка» hгр равняется 10 мкм.

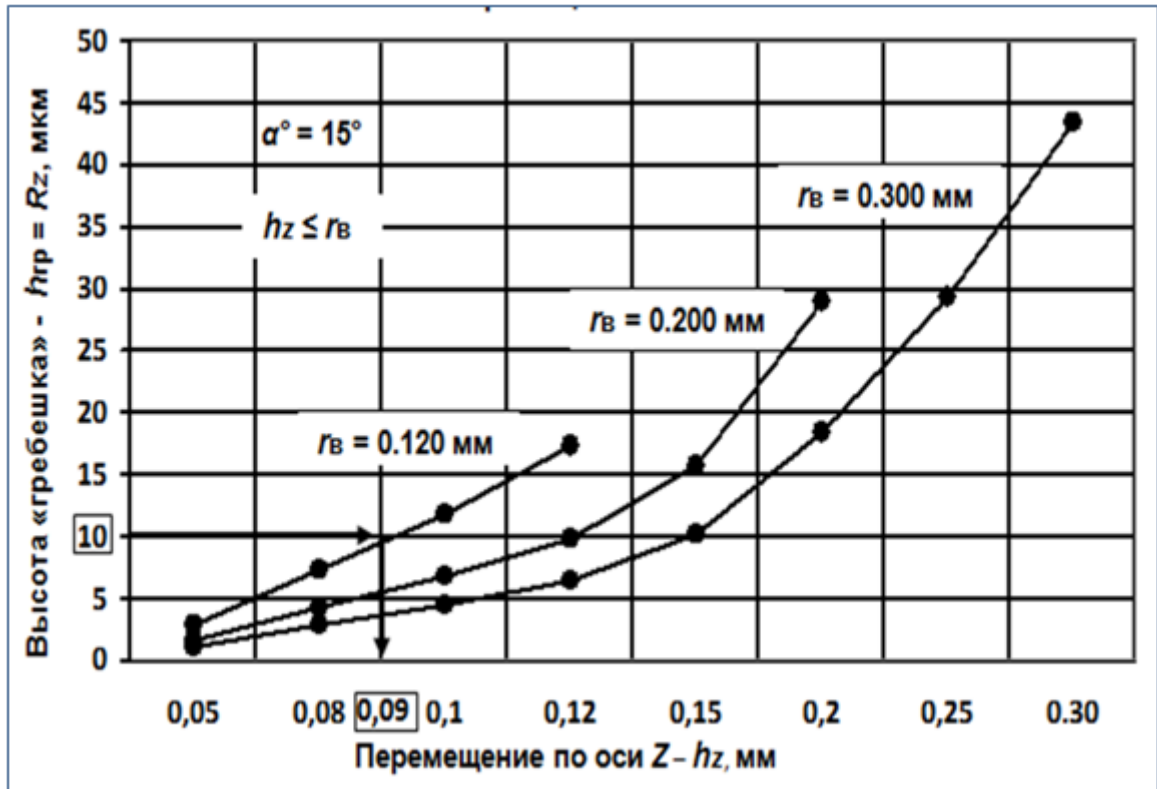


Рисунок 4.5 - Графическая реализация математических моделей зависимости высоты «гребешка» от условий послойного фрезерования фрезами с НТП прямоугольной формы с радиусом при вершине:  $\alpha^\circ$ -  $15^\circ$ ;  $r_{в}$  – 0,120, 0,200, 0,300 мм

Анализ влияния величины перемещения по оси Z на высотные параметры «гребешка» для фрез с радиусной или сферической формами режущей кромки приведен на Рисунке 4.6. Графики построены для значений:  $\alpha^\circ$ -  $15^\circ$ ;  $r_{сф}$  – 4, 5 и 6 мм. На графике стрелками показано, что для получения высоты «гребешка»  $h_{гр}$  равным 20 мкм, величина перемещения  $h_z$  по оси Z, при угле наклона обрабатываемой поверхности  $\alpha^\circ$ -  $15^\circ$  и радиусе режущей кромки фрезы  $r_{сф}$ , равняется 0,75 мм.

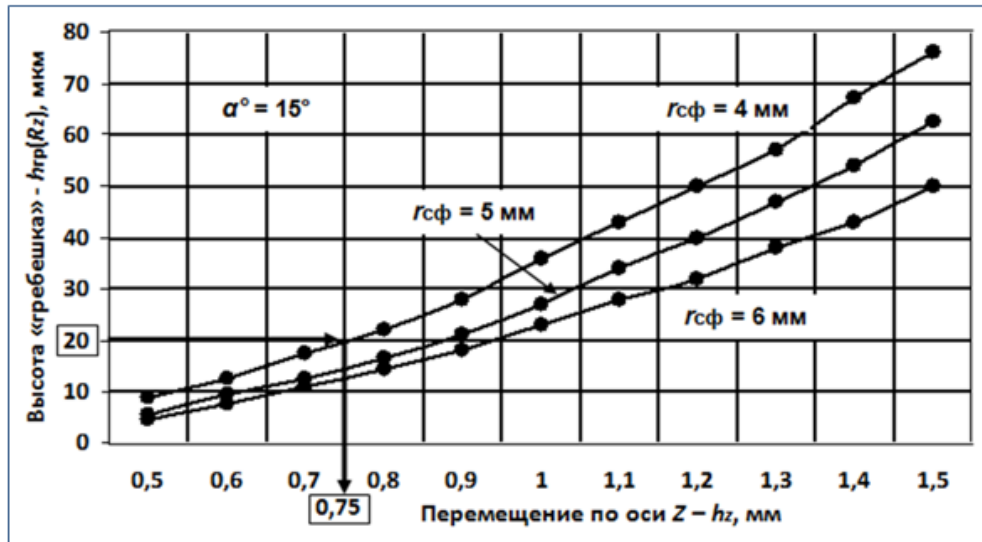


Рисунок 4.6 - Графическая реализация математических моделей зависимости высоты «гребешка» от условий 2,5-координатного высокоскоростного фрезерования фрезами со сферическими формами режущей части:  $\alpha^\circ - 15^\circ$ ;  $r_{сф} - 4, 5$  и  $6$  мм

На основе выполненных результатов для виртуальных исследований процесса послойного фрезерования объемного изделия выполнено объемное компьютерное моделирование реализации этой операции, результаты моделирования на Рисунке 4.7.



а)

б)

в)

Рисунок 4.7 - Компьютерное моделирование процесса послойного высокоскоростного фрезерования объемного изделия: а – траектория перемещения инструмента; б - моделирование процесса фрезерования; в - готовое изделие



Экспериментальная проверка методики расчета параметров неровностей на обработанной поверхности при послойном фрезеровании объемных изделий в зависимости от параметров обработки проводилась на вертикальном консольно-фрезерном станке 6ДМ12Ф3 с ЧПУ.

Для проведения экспериментальных исследований использована фреза концевая с механическим креплением двух четырехгранных неперетачиваемых твердосплавных пластин марки P10 с главным углом в плане  $90^\circ$  и с радиусами при вершине 0,120, 0,20 и 0,30 мм, фреза концевая с механическим креплением двух круглых пластин с радиусами 4, 5 и 6 мм.

Рассматривалось скоростное послойное фрезерование наклонных поверхностей, расположенных под углом  $15^\circ$  на образцах из стали 45 по ГОСТ 1050-88 размером 40X40X60 мм. Фрезерование выполнялось при скорости резания  $V=925$  м/мин и подаче 10 м/мин. Дискретность перемещений по оси Z равнялась 0,005 мм. В Таблице 4.1 приведены результаты экспериментальной проверки расчета параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  в зависимости от условий обработки.

Таблица 4.1 - Экспериментальная проверка расчета параметров шероховатости

№ п/п	Угол наклона поверхности, град	Радиус скругления реж. кромки, мм	Перемещение по оси Z, мм	Шероховатость расчетная, мкм	Шероховатость измеренная, мкм		Относительная погрешность, %
					Мат. ожидание, мкм	Дисперсия, мкм	
Фреза с четырехгранной НТП с радиусом скругления режущей кромки							
1	15°	0,12	0,09	$R_a = 2.93$	2.74	0.090	6,48
2		0,20	0,12	$R_a = 2.47$	2.67	0.040	7.49
3		0,30	0,15	$R_a = 2.55$	2.66	0.010	4,13
Фреза с круглой НТП							
1	15°	4	0,75	$R_z = 22$	23.10	3,68	4.76
2		5	0,9	$R_z = 21$	22,93	3,61	8,41
3		6	1,0	$R_z = 23$	24.11	4,95	4,60

Определение шероховатости выполнялось профилометром модификации ИШП-110 предназначенным для измерений параметров шероховатости плоских, наклонных и наружных поверхностей изделий, измеряющих 4 параметра шероховатости поверхности:  $R_a$ ;  $R_z$ ;  $R_q$  и  $R_t$ . Результаты выборки проведенных замеров обрабатывались методом математической статистики, определялось математическое ожидание величины  $R_a$  или  $R_z$  и дисперсия этого значения, выполнялся расчет относительной ошибки, расчетной и измеренной величин.

Из результатов экспериментальной проверки расчета параметров шероховатости зависимости от условий обработки, приведенных в Таблице 4.1 следует, что относительная погрешность расчета составляет не более 9%, а средняя относительная погрешность – 5,97% [28]. Из этого следует, что выполненные методики определения условий при послойной высокоскоростной обработке для обеспечения заданных параметров качества поверхности позволяют на стадии автоматизированного проектирования с определенной степенью вероятности обеспечивать соответствие обработанной поверхности требованию чертежа.

#### **4.2 Исследование динамики высокоскоростного фрезерования при рациональном управлении процессом обработки с переменным по величине припуском**

Для проведения сравнительных расчетов показателей эффективности применения метода рационального управления процессом высокоскоростного фрезерования изделий с переменным по величине припуском, оценивалась контурная обработка прямолинейного участка заготовки высотой 40 мм и длиной 600 мм при съеме слоя разной толщины в два мм (длина участка 300 мм) и четыре мм (длина участка 300 мм). Исходные данные – оптимальное значение толщины стружки  $a_{max} = 0,04$  мм, диаметр фрезы  $D = 20$  мм, число

зубьев фрезы  $z = 5$ , скорость резания  $V = 800$  м/мин. Величина минутной подачи без оптимизации ориентирована на съем максимального припуска и постоянная на протяжении всего процесса фрезерования, для данных условий обработки она равняется  $S_{\text{мин}} = 3$  м/мин. При оптимизации условий фрезерования по постоянной толщине стружки минутная подача будет автоматически изменяться от  $S_{\text{мин}} = 3$  м/мин, при толщине снимаемого слоя 4 мм, до  $S_{\text{мин}} = 450$  мм/мин при толщине снимаемого слоя 2 мм. Результаты расчетов приведены на Рисунках 4.8 и 4.9.

Из графика на Рисунке 4.8 следует, что при оптимизации условий фрезерования по толщине стружки производительность обработки повышается, в данном конкретном случае повышение составит 16%.

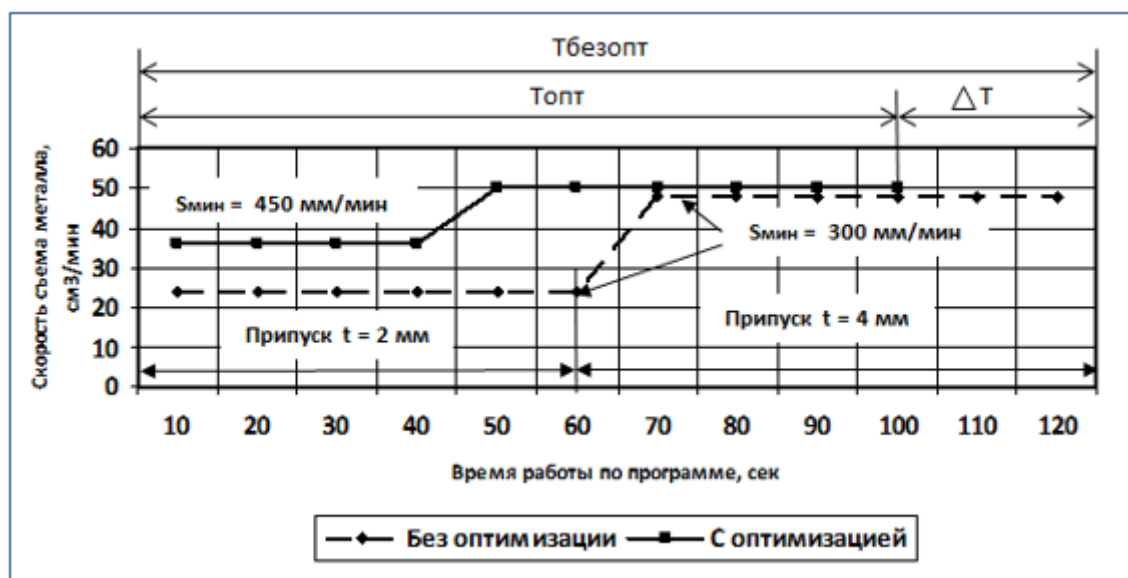


Рисунок 4.8 - Сравнительные графики производительности обработки при контурном фрезеровании с переменным припуском без оптимизации и с оптимизацией по толщине стружки

Из графика на Рисунке 4.9 следует, что при оптимизации условий фрезерования по толщине стружки улучшаются условия обработки, выравнивается мощность на протяжении всего цикла фрезерования, снижается уровень ударной нагрузки на режущий инструмент и кинематику станка за счет изменения величины подачи в зависимости от толщины снимаемого слоя.

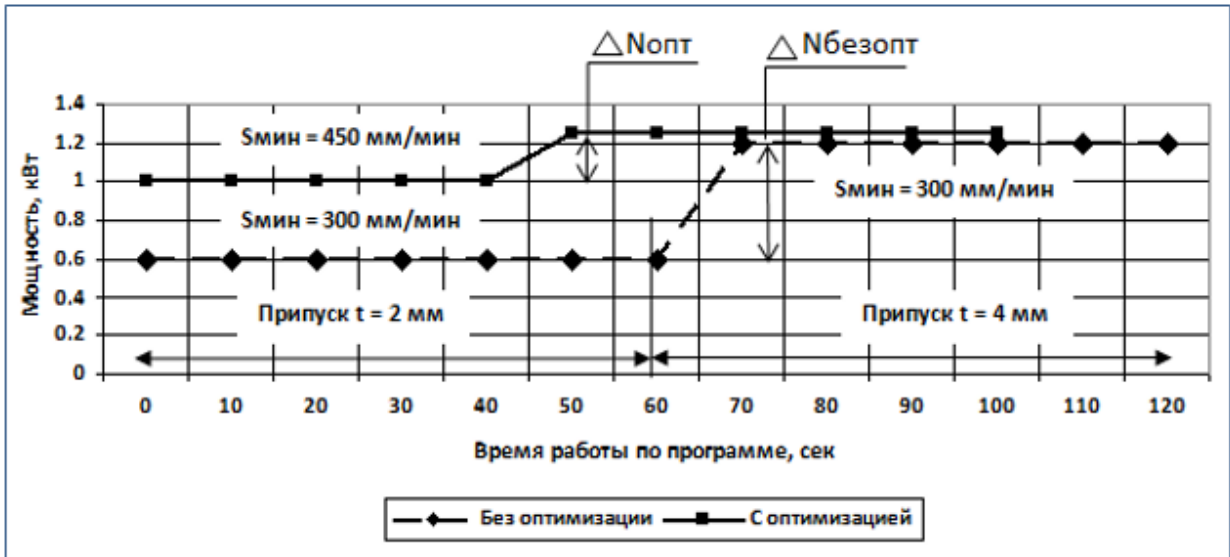


Рисунок 4.9 - Сравнительные графики изменения мощности при контурном фрезеровании с переменным припуском без оптимизации и с оптимизацией по толщине стружки

Расчетное значение толщины стружки для обеспечения заданных параметров шероховатости заносится в диалоговое табло системы (Рисунок 4.10, б).

Определение режимов

Вz, мкм:	20
Ra, мкм:	0,1
lmax, мм:	4
tmin, мм:	2
b, мм:	5
D, мм:	20
z, зуб:	3
v, м/мин:	80
Kc, н/мм2:	1500
n, об/мин:	1274
Sz, мм/зуб:	0,13
amax, мкм:	0,076
Sz max, мм/зуб:	0,13
Sмин max, мм/мин:	483
Sz tп, мм/зуб:	0,09
Sмин max, мм/мин:	363
През, кВт:	0,04

1 из 1

Добавить

Удалить

Вернуть

Назад

Далее

Критерии

Заккрыть

а)

Оптимизация основной подачи

Оптимальное значение толщины стружки: 0,076

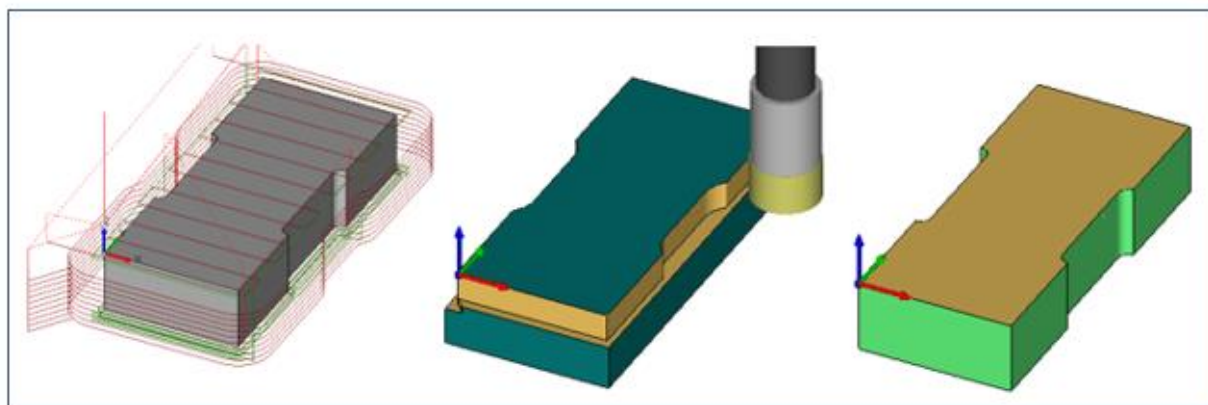
Диапазон толщин стружки: 0,076 - 0,056

OK Отмена

б)

Рисунок 4.10 Результаты расчета оптимального значения толщины стружки (а) и диалоговое окно в САМ-системе (б), в которое заносится величина расчетного значения толщины стружки

На основе выполненных результатов для виртуальных исследований процесса контурного фрезерования деталей с переменным по величине припуском выполнено компьютерное моделирование реализации этой операции, результаты моделирования на Рисунке 4.11.



а)

б)

в)

Рисунок 4.11 - Компьютерное моделирование процесса контурного фрезерования с переменным по величине припуском: а – траектория перемещения инструмента; б - моделирование процесса фрезерования; в - готовое изделие

### **4.3 Определение геометрических параметров качества поверхности в зависимости от условий высокоскоростного плунжерного фрезерования**

В соответствии с алгоритмом на Рисунке 2.9 по программе расчета выполнена графическая реализация математической модели зависимости высоты «гребешка» от условий фрезерования – величины однократного перемещения  $S_{xy}$  по осям  $X$  или  $Y$  и диаметра фрезы  $D$ , результаты расчетов приведены на Рисунке 4.12.

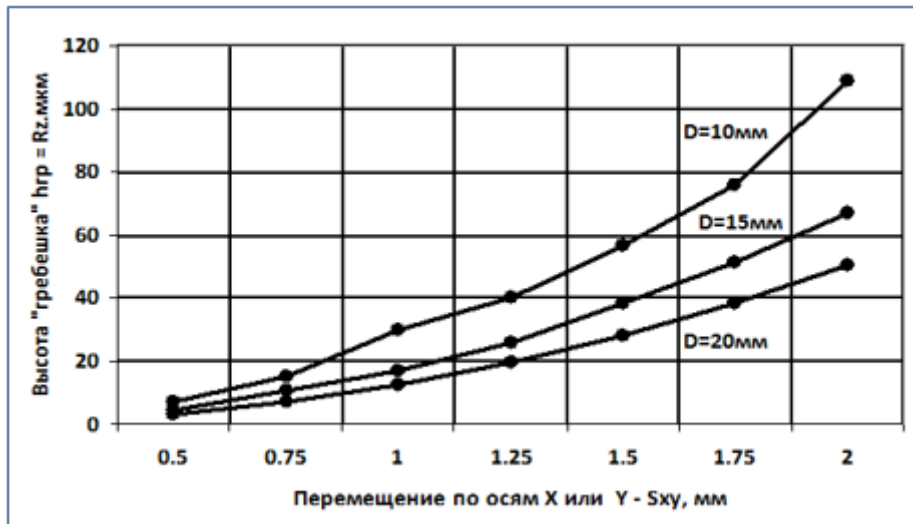


Рисунок 4.12 - Графическая реализация математической модели зависимости высоты «гребешка» от условий плунжерного фрезерования концевыми фрезами диаметрами  $D10$ ,  $D15$  и  $D20$  мм

В соответствии с алгоритмом на Рисунке 2.9 (Глава2) разработана в СУБД Microsoft Office Excel программа расчёта режимов плунжерного фрезерования в зависимости от требований к качеству обрабатываемой поверхности (см. Приложение В) [62]. Реализация программы приведена на Рисунке 4.13.

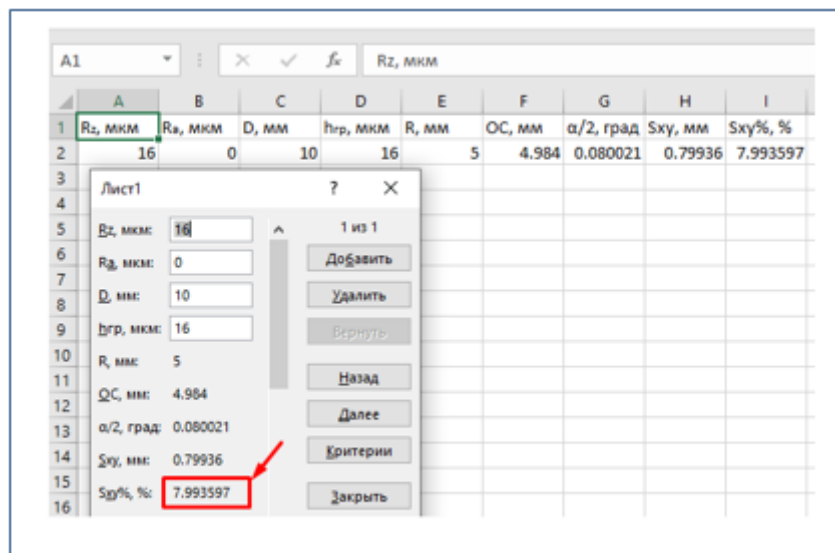


Рисунок 4.13 – Реализация программы расчёта режимов плунжерного фрезерования в зависимости от требований к качеству обрабатываемой поверхности

Расчетное значение шага плунжерного фрезерования в % от диаметра фрезы на Рисунке 4.13 – 7,99 или в мм – 0,799 для обеспечения заданных параметров шероховатости заносится в диалоговое табло системы (Рисунок 4.14).

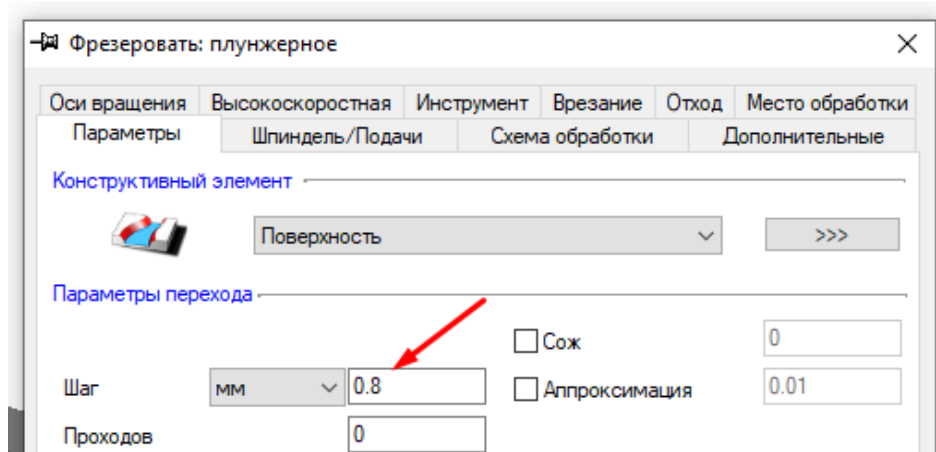


Рисунок 4.14 – Окно диалога для установки параметров плунжерного фрезерования

Виртуальное определение высотных параметров неровностей после плунжерного фрезерования компьютерным моделированием выполнялось в модуле САД программы ADEM версия 9.1. Порядок выполнения измерений состоит из трех этапов (см. Рисунок 4.15).

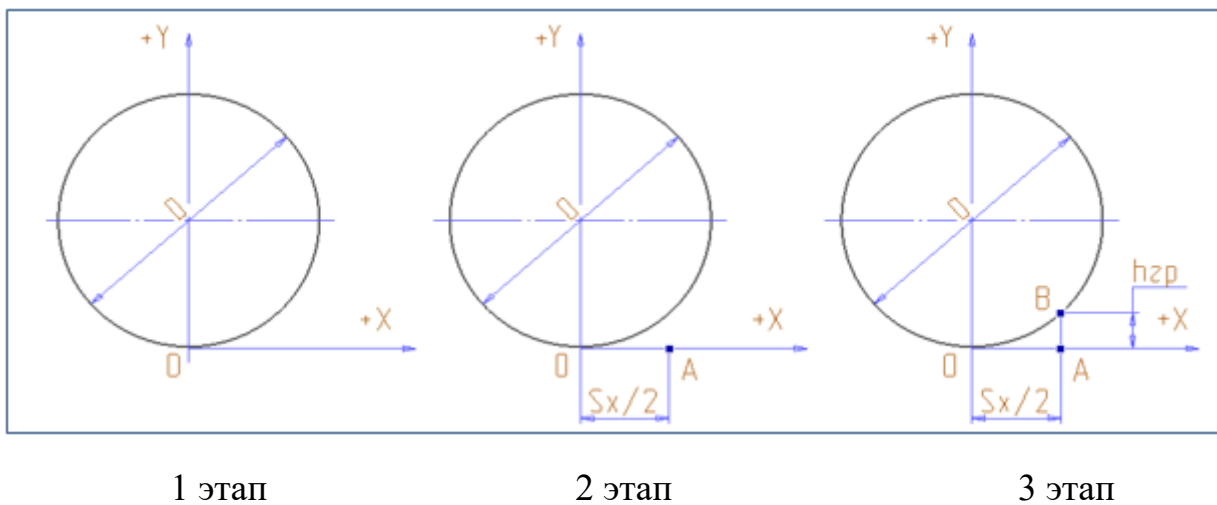


Рисунок 4.15 - Этапы виртуального определения высотных параметров неровностей компьютерным моделированием

На первом этапе выполняется построение окружности с осями симметрии с диаметром равным диаметру фрезы и осей координат  $X$  и  $Y$  с началом в точке  $O$  касания окружности с горизонтальной осью координат  $+X$ .

На втором этапе откладывается отрезок от точки  $O$ , в направлении оси координат  $+X$ , равный половине величины однократного перемещения инструмента  $S_x$  при последующем вертикальном рабочем движении фрезы по оси  $Z$  –  $OA$ .

На третьем этапе, из точки  $A$  восстанавливается перпендикуляр до пересечения с окружностью (точка  $B$ ). Размер отрезка  $AB$  в мм соответствует высоте гребешка  $h_{гр}$  на поверхности, обработанной плунжерным фрезерованием инструментом диаметром  $D$  в мм при величине однократного смещения равным  $S_x$  в мм.

При малых размерах исходных величин построение искомым изображений выполняется в масштабе увеличения, при последующем перерасчете численного значения величины  $h_{гр}$  в масштабе  $M$  1:1.

На основе выполненных результатов для виртуальных исследований процесса плунжерного фрезерования деталей выполнено компьютерное моделирование реализации этой операции, результаты моделирования на Рисунке 4.16.

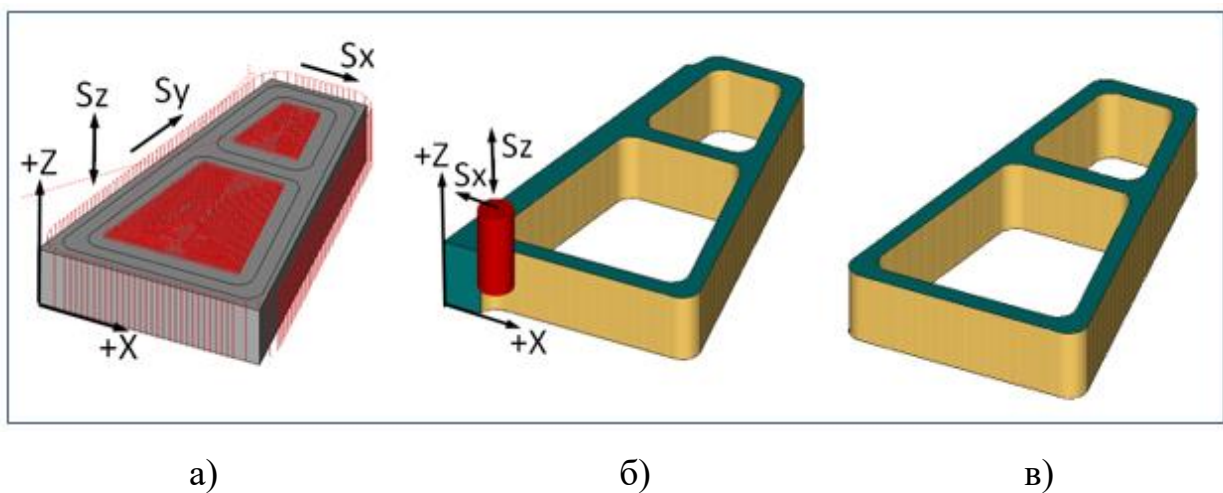


Рисунок 4.16 - Компьютерное моделирование процесса высокоскоростного плунжерного фрезерования: а – траектория перемещения инструмента; б - моделирование процесса фрезерования; в - готовое изделие



Для проверки эффективности применения плунжерного фрезерования по сравнению с другими видами обработки проведено расчетное сопоставление двух видов фрезерования конструктивного элемента «Окно» - контурное фрезерование и плунжерное фрезерование (Рисунок 4.17). Материал заготовки – Сталь 20 ГОСТ 1050-88, заготовка 100X50X40 мм, окно сквозное – 15X80 мм, радиус скругления - 5 мм, режущий инструмент – фреза концевая диаметром 8 мм T15K30.

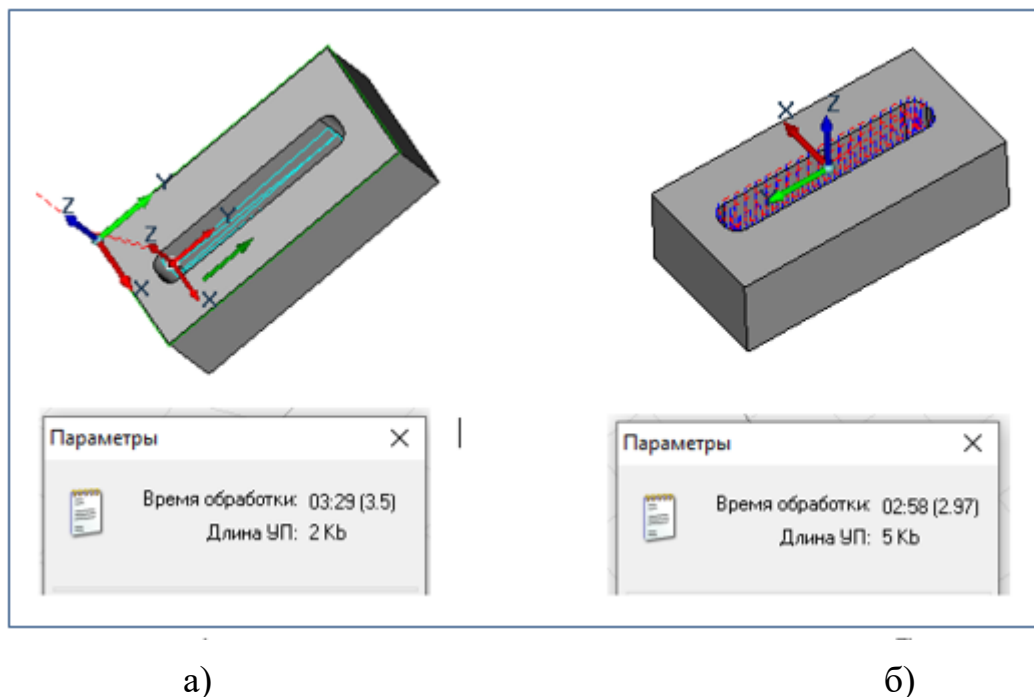


Рисунок 4.17 – Траектории перемещения фрезы и расчетные параметры обработки: а - контурное фрезерование; б - плунжерное фрезерование

Проектирование операций выполнялось в программе ADEM в модуле САМ/САРР с помощью сервиса САМ Эксперт. Оценивалась величина скорости съема материала при двух вариантах выполнения черновой операции по фрезерованию колодца. Все расчеты выполнялись на основании созданных 3D-моделей изделия. Система выполнила распознавание конструктивного элемента «Окно», произвела расчет траектории перемещения фрезы при контурном фрезеровании по эквидистанте, а при плунжерном – челночные

движения в вертикальной плоскости, разработала управляющую программу для каждого варианта и определила время обработки (см. Рисунок 4.17).

При фрезеровании по эквидистанте воздействие радиальных нагрузок на инструмент приводит к изгибу фрезы при большом вылете, что ограничивают величину подачи вдоль осей X и Y (300 мм/мин). При плунжерном фрезеровании основная нагрузка на инструмент – осевая, что позволяет увеличивать подачу (до 600 мм/мин), результаты исследований в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Сравнительный анализ эффективности выполнения контурного и плунжерного фрезерования

Показатели	Контурное фрезерование	Плунжерное фрезерование
Оборудование с ЧПУ	Обрабатывающий центр с ЧПУ, 3-х координатный	Фрезерный с ЧПУ для плоского фрезерования
Траектория перемещения инструмента	Эквидистанта в контуре КЭ	Челночные перемещения фрезы по оси Z, вдоль контура КЭ
Время обработки по программе, мин	3.29	2.58
Стоимость обработки, руб	$3.29 \times 24.16 = 79.50$	$2.28 \times 14.16 = 36.55$
<b>Экономичность использования плунжерного фрезерования на данной операции составила 40%</b>		
Скорость съема материала, см <sup>3</sup> /мин	14.58	18,6
<b>При плунжерном фрезеровании производительность обработки выше чем при контурном на 27%, при всех прочих равных условиях</b>		

Экспериментальные исследования по определению влияния условий плунжерного фрезерования на геометрические параметры неровностей проводились на вертикальном консольно-фрезерном станке с ЧПУ 6ДМ12Ф3, использованы фрезы концевые диаметрами 10, 15 и 20 мм. Рассматривалось фрезерование стенок высотой соответственно 40, 60 и 80 мм на образцах из стали 45 по ГОСТ 1050-88. Фрезерование выполнялось при скорости резания  $V = 120$  м/мин и вертикальной подаче  $f_z = 0,10$  мм/об.

Определение шероховатости выполнялось профилометром модификации ИШП-110 предназначенным для измерений параметров шероховатости плоских, наклонных и наружных поверхностей изделий, измеряющих 4 параметра шероховатости поверхности:  $R_a$ ;  $R_z$ ;  $R_q$  и  $R_t$ . Результаты выборки проведенных замеров обрабатывались методом математической статистики, определялось математическое ожидание величины  $R_a$  или  $R_z$  и дисперсия этого значения, выполнялся расчет относительной ошибки, расчетной и измеренной величин. В Таблице 4.3 приведены результаты экспериментальной проверки расчета параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  в зависимости от условий обработки.

Таблица 4.3 - Экспериментальная проверка расчетных значений параметров шероховатости

№ п\п	Диаметр фрезы $D$ , мм	Перемещение по оси $X$ , мм	Шероховатость $R_a$ расчетная, мкм	Шероховатость $R_a$ измеренная, мкм		Относительная ошибка, %
				Мат. ожидание, мкм	Дисперсия, мкм	
1	10	0,75	$R_a = 3,75$	3.70	0.085	3,06
2	15	0,75	$R_a = 2.62$	2.69	0.030	2,87
3	20	0,75	$R_a = 1,77$	1.86	0.010	4,38

Анализ соответствия теоретических результатов практическим данным, полученным в результате экспериментальной проверки параметров шероховатости при плунжерном фрезеровании вертикальных поверхностей на станках с ЧПУ в зависимости от условий обработки, приведенных в Таблице 3.4 следует, что относительная погрешность расчета составляет не более 5%, а средняя относительная погрешность – 3,43% [31].

#### **4.4 Анализ эффективности применения результатов исследований при изготовлении детали «Плита»**

Для конкретизации проведения исследований принята за базовую – комплексная деталь на основе изделия «Плита» пресс-формы для изготовления деталей из пластика на термопластавтоматах. Анализ рынка изделий из пластмасс показал, что около половины российского импорта приходилось на страны, которые ввели санкции. Без импортозамещения в производстве изделий из пластика могут привести к потерям до 14% ВВП [1]. У российского производства пластика есть существенный потенциал для развития, т.к. реализуются инициативы, направленные на адаптацию к санкционным условиям. Усилия по импортозамещению требуют создания дополнительных мощностей, особенно в части развития малотоннажной продукции, к которым относятся комплектующие для беспилотных летательных аппаратов (рост объема производства этих изделий для потребностей министерства обороны значительно возрастает), которых в конструкции более 60% (данные из открытых источников от КБ «Спектр», г. Новосибирск). В соответствии национальным проектом «Беспилотные авиационные системы» в России к 2030 году планируют производить более 32 тыс. беспилотных авиасистем (БАС). Объем финансирования этого нацпроекта до 2030 года составит почти 700 млрд руб.: в 2024-м — 46,4 млрд руб., в 2025-м — 117 млрд руб. и по 149 млрд руб. в 2025 и 2026 годах.

Большинство изделий из пластика для этого вида изделий изготавливается на термопластавтоматах в пресс-формах, изготавливаемых для каждого вида продукции. Отсюда растет потребность в значительных количествах приспособлений для производства изделий из пластика для комплектации этих конструкций Основными конструктивными элементами для таких пресс-форм являются плиты (Рисунок 4.18).

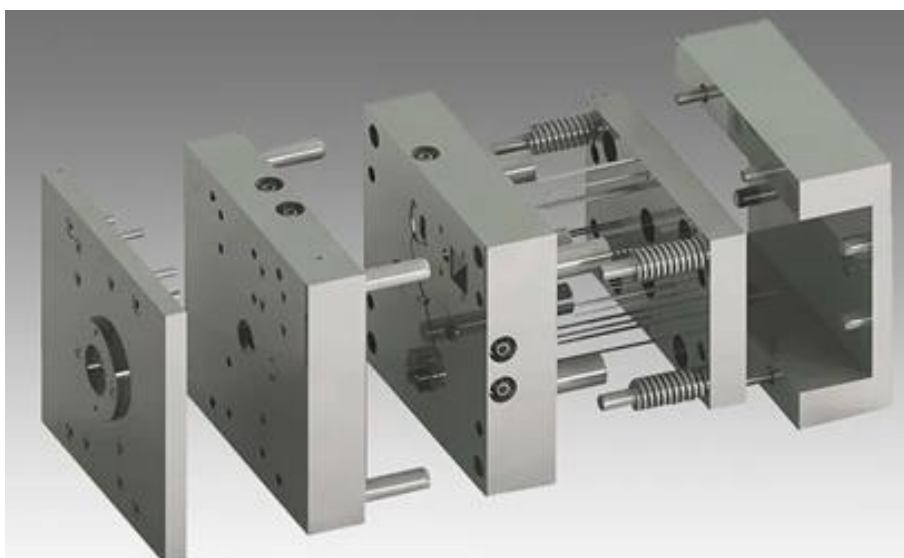


Рисунок 4.18 - Конструкция пресс-формы для термопластавтомата

Эти изделия являются довольно сложной формы, с полостями различной конфигурации и высокой точности. В производстве этот вид продукции имеет большую номенклатуру, но выпускается малыми партиями, что предопределяет экономичность их изготовление на быстро перенастраиваемом оборудовании с программным управлением. Т.к. по конфигурации и значительной массе эти изделия имеют высокую виброустойчивость, что способствует применению высокоскоростной фрезерной обработки. Анализ видов конструктивных элементов, из которых состоит типовая деталь и способы получения таких поверхностей фрезерованием приведен на Рисунке 4.19. К числу видов фрезерных работ требующих дополнительных исследований по обеспечению повышения производительности и качества поверхности при обработке деталей этого класса, а также других изделий сходной конфигурации следует отнести - 2.5-координатное послойное фрезерование объемных изделий [50], рациональное управление контурным фрезерованием с поверхностями с переменным по величине припуском [59] и плунжерного фрезерования [62].

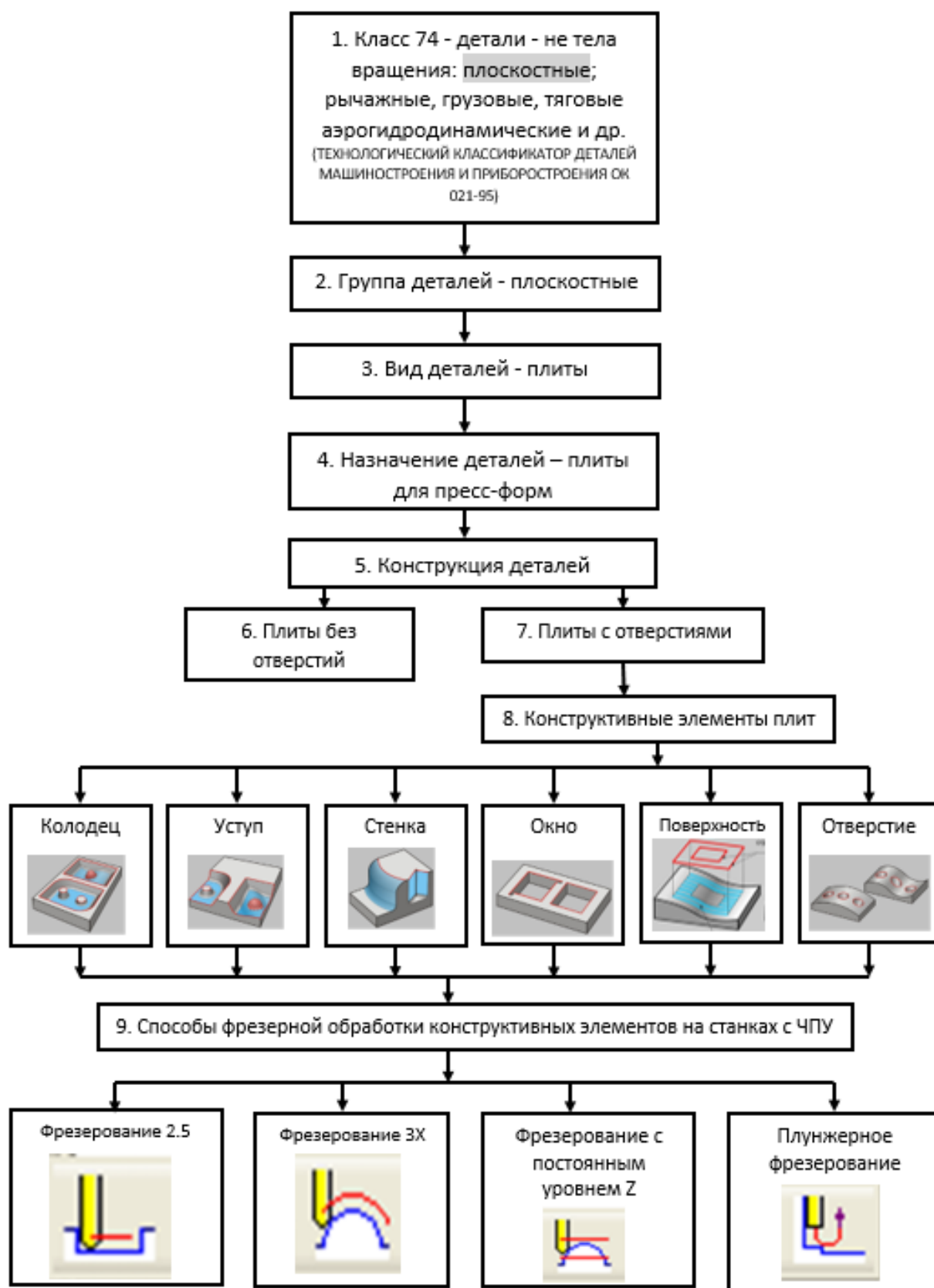


Рисунок 4.19 - Анализ конструктивных элементов класса деталей «Плиты» для пресс-форм и способов получения поверхностей

Эффективность применения разработанных технологических решений при выполнении фрезерных операций на станках с ЧПУ определялась на основе разработок, выполненных во второй главе на примере обработки детали «Плита» пресс-формы для термопластавтомата из горячекатаного проката материал Сталь Х12ВМ ГОСТ 5950-73 (см. Рисунок 4.20). Объемные модели заготовки и детали приведены на Рисунке 4.21

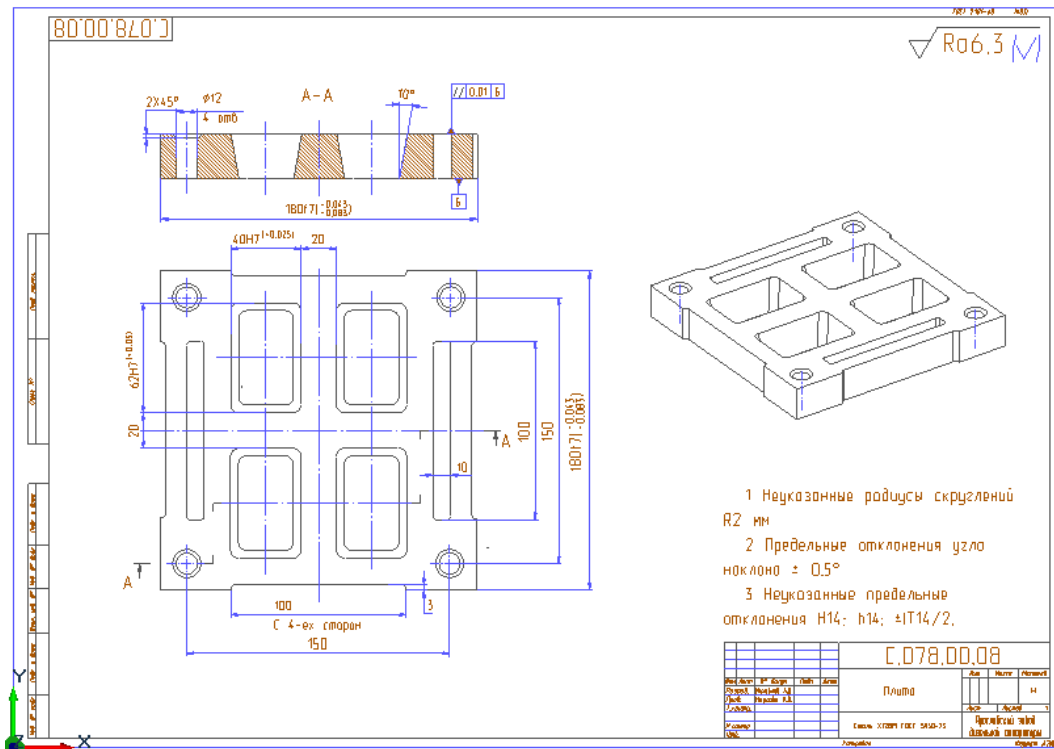
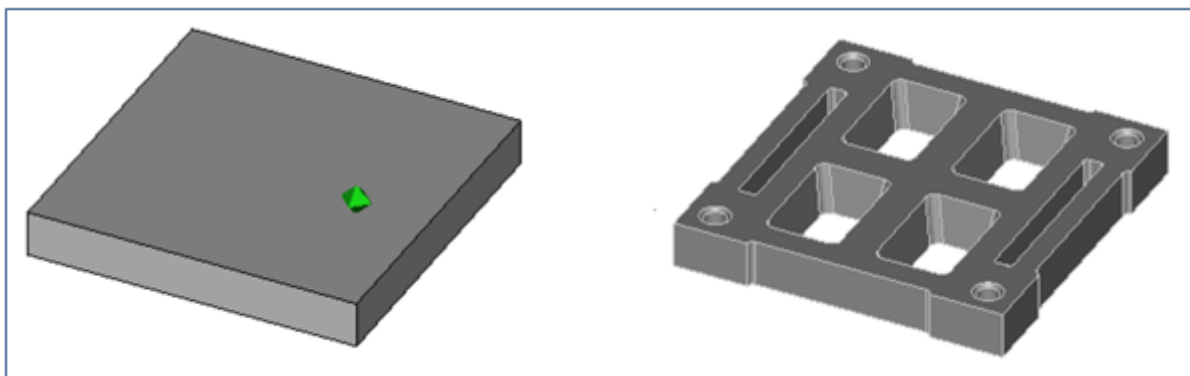


Рисунок 4.20 – Чертеж детали «Плита»



а)

б)

Рисунок 4.21 – 3D-модели заготовки и детали «Плита»

а – заготовка, масса 50.54 кг; б – деталь, масса 32.27 кг

Алгоритм процесса автоматизированного проектирования обработки детали «Плита» с использованием разработанных решений проектных задач (назначения параметров фрезерования на станках с ЧПУ) на основе программы ADEM CAD/CAM/CAPP показана на Рисунке 4.22.

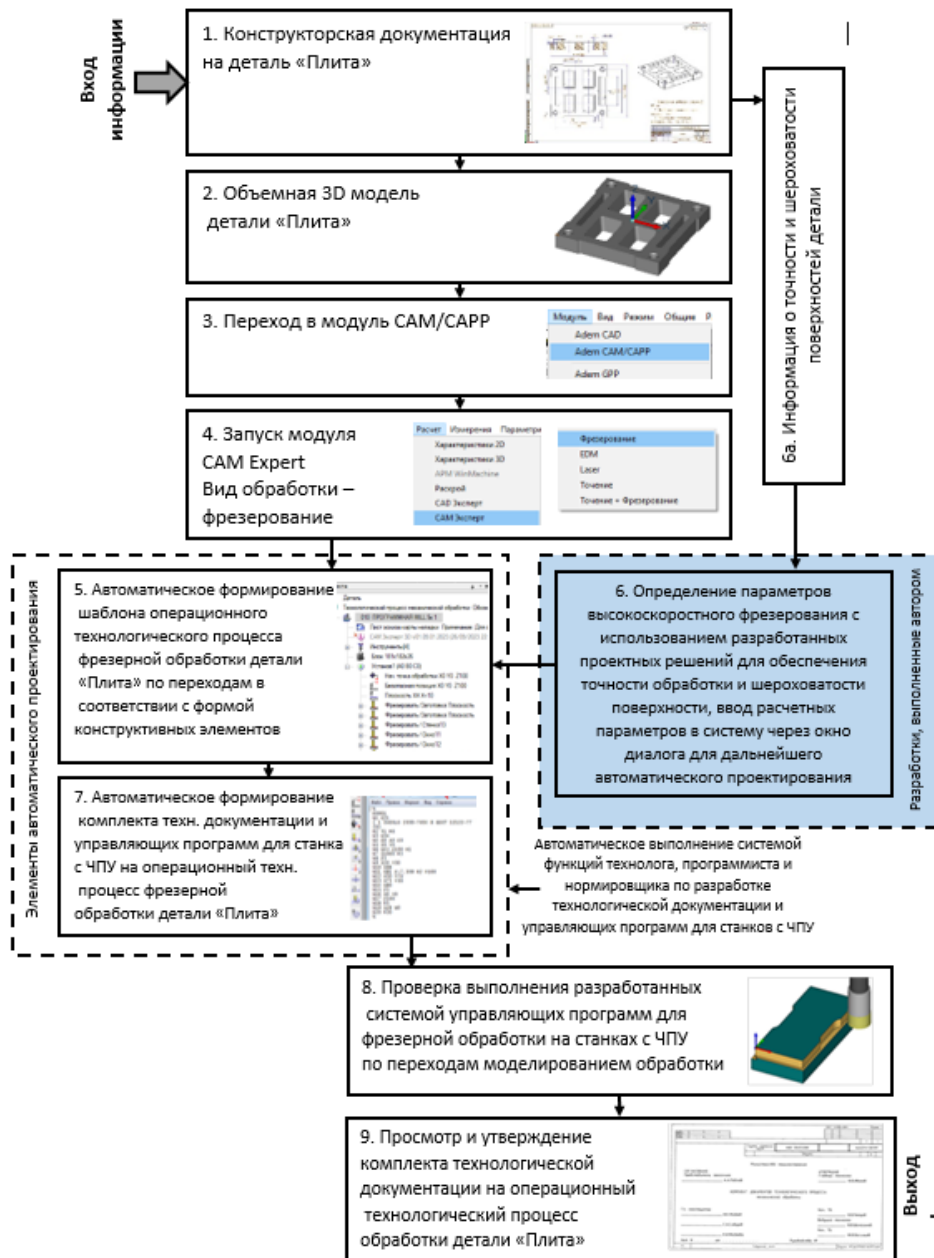


Рисунок 4.22 – Алгоритм схемы движения информации в автоматизированной системе с решениями проектных задач для высокоскоростного фрезерования при разработке технологической документации на изготовление детали «Плита»



#### **4.4.1 Сравнительный анализ эффективности применения традиционного и высокоскоростного фрезерования**

В рамках разработанного цифрового двойника технологического процесса виртуально анализировались два варианта обработки – традиционное фрезерование и высокоскоростная обработка, оценивалась эффективность каждого из них по количественному и ценовому показателям [68; 73]. При проведении натурного эксперимента закладывались параметры обработки и реализовывались управляющие программы, полученные в результате анализа цифрового двойника технологического процесса. Сформированный системой комплект технологической документации приведен в Приложении Д, фрагменты управляющих программ, разработанных системой приведены в Приложении Е (в каждой управляющей программе более 1000 кадров). Структура цифрового двойника разработанного технологического процесса обработки детали приведена в Приложении Ж.

Результаты сравнительного анализа затрат и производительности при разных технологиях фрезерной обработки детали «Плита» на станках с ЧПУ, выполненный по материалам исследований, приведенных в Главе 2 отражены Таблице 4.4. Расчеты выполнялись по методикам оценки эффективности выполнения высокоскоростных операций, изложенных в Главе 3.

Повышенные расходы на более производительное оборудование и режущий инструмент для высокоскоростной обработки компенсируется существенным сокращением суммарных затрат в пересчете на килограмм детали (до 10 раз) и повышением производительности в пересчете на скорость съема металла в минуту (до 15 раз).

Таблица 4.4 - Сравнительный анализ затрат и производительности при разных технологиях фрезерной обработки

Виды затрат на 1 станко-час		Традиционное фрезерование	Высокоскоростное фрезерование
		d-12 мм; Vf-525 мм/мин; Vрез-160 м/мин	d-12 мм; Vf-10 м/мин; Vрез-925 м/мин
		Численные значения затрат по данным аналитической службы ПАО «КАМАЗ» [10]	
1.	Реновация станка, руб/час.	800	3200
2.	Расходы на режущий инструмент, руб/час.	960	2200
3.	Зарплата станочника, руб/час.	625	
4.	Сервис, руб/час.	980	
5.	Инжиниринг, руб/час.	1000	500 (авт. проект)
6.	Прочие цеховые расходы, руб/час.	1200	
7.	Итого расходов на 1 час, руб/час	5565 руб/час	8705 руб/час
8.	Время обработки детали, час/мин	3.54 часа (184,5 мин)	0.50 часа (30.22 мин)
9.	Расходы на обработку, руб.	19700	4352.50
Результаты	Затраты на изготовление детали, руб/кг.	<b>1240 руб/кг</b>	<b>124,27 руб/кг</b> (снижение затрат до 10 раз)
	Скорость съема металла при фрезеровании, кг/мин.	<b>0.09 кг/мин</b>	<b>1.4 кг/мин</b> (повышение производительности в 15 раз)

#### 4.4.2 Сравнительный анализ эффективности применения результатов исследований при традиционном фрезеровании

Разработанные автоматизированные решения проектных задач применяются и при традиционных видах фрезерования. Для оценки эффективности выполненных разработок проводился сравнительный анализ при реализации традиционного фрезерования по базовой технологии и по

технологии с применением при проектировании разработанных автоматизированных проектных решений (Глава 2). На основе анализа конструкторской документации (Рисунок 4.20) разработан маршрут обработки изделия, перечень операций приведен в Таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Маршрутный технологический процесс обработки детали «Плита»

№ операции	Операция	№ операции	Операция
005	Отрезная	025	Слесарная
010	Фрезерная	030	Термообработка
015	Фрезерная с ЧПУ	035	Шлифовальная
020	Фрезерная с ЧПУ	040	Контрольная

На операции по изготовлению изделия, выполняемые на станках с ЧПУ разрабатывались единичные операционные технологические процессы в двух вариантах:

- базовый вариант обработки подобных деталей на 3-х осевом фрезерном станке с ЧПУ для объемного фрезерования, частично автоматизированное проектирование технологического процесса и подготовка управляющих программ выполнялось в САМ-системе программы ADEM поочередно для каждого конструктивного элемента изделия;

- вариант с применением результатов исследований (Глава 2) – 2,5-координатная обработка изделия на фрезерном станке для плоского фрезерования, проектирование технологического процесса и подготовка управляющих программ выполнялось в САМ-системе программы ADEM.

На первом этапе проектирования, экономия рабочего времени привлечения специалиста к процессу разработки технологического процесса и подготовки управляющих программ во втором варианте исполнения с использованием результатов исследования достигал 80% по сравнению с традиционным проектированием по первому варианту.

Результаты повышения производительности при выполнении операций и снижения стоимости обработки при различных видах обработки приведены в Таблице 4.6

Таблица 4.6 - Сравнительный анализ эффективности реализации технологического процесса обработки детали «Плита»

Базовый ТП. Обработка на 3-х осевом фрезерном станке с ЧПУ для объемного фрезерования		Разработанный ТП. 2.5-координатная обработка на фрезерном станке для плоского фрезерования	
Операция, содержание переходов	Время, мин	Операция, содержание переходов	Время, мин
1	2	3	4
015 Фрезерная с ЧПУ 1. Установить заготовку в тисках 2. Фрезеровать 4 колодца по программе (3-ех координатная объемная обработка) 3. Фрезеровать 2 окна по программе (3-ех координатная объемная обработка) 4. Сверлить 4 отверстия диам. 12 мм	52,56 8,25 4,00	015 Фрезерная с ЧПУ 1. Установить заготовку в тисках 2. Фрезеровать 4 колодца по программе (2.5-координатная обработка) 3. Фрезеровать 2 окна по программе (плунжерное фрезерование) 4. Сверлить 4 отверстия диам. 12 мм	48,24 5,54 4,00
020 Фрезерная с ЧПУ 1. Установить деталь в приспособление 2. Фрезеровать наружный контур по программе (3-ех координатная объемная обработка)	16,28	020 Фрезерная с ЧПУ 1. Установить деталь в приспособление 2. Фрезеровать наружный контур по программе (адаптация обработки по толщине стружки)	10,48
Суммарное время обработки по программе	1.21,09	Суммарное время обработки по программе	1.08.26
Сокращение времени обработки по программе за счёт применения разработанных технологических решений на приведенных операциях составляет <b>16,17%</b>			
Затраты на выполнение операции через стоимость нормо-часа (1450 руб/час)	1.959,67 руб.	Затраты на выполнение операции через стоимость нормо-часа (850 руб/час)	967,01 руб
Стоимость выполнения операций за счёт использования фрезерного станка для плоского фрезерования вместо 3-ех осевого обрабатывающего центра при применении разработанных технологических решений сокращена на <b>50,56%</b>			

Т.к. производство таких деталей относится к мелкосерийному, то критерием оптимальности для обработки этих изделий будут минимальные затраты на выполнение операций через стоимость нормо-часа.

Для оценки применения выполненных разработок на производстве использована разработанная методика определения показателя эффективности KPI (Key Perfomance Indicators) участка станков с ЧПУ механического цеха и отдельно взятого оператора. Методика позволила проводить оперативный анализ эффективности работы операторов и участка, в целом, за любой временной отрезок – смена, сутки, декада, месяц для

принятия управленческих решений с использованием информационных возможностей систем УЧПУ оборудования и разработанного программного обеспечения. Сравнительная оценка эффективности применения двух вариантов обработки приведены по показателям ОЕЕ в Таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Сравнительный анализ оценки эффективности реализации фрезерной операции на станках с ЧПУ по показателям ОЕЕ

		Базовый ТП. Обработка на 3-ех осевом фрезерном станке с ЧПУ для объемного фрезерования	Разработанный ТП. 2.5-координатная обработка на фрезерном станке для плоского фрезерования
Исходные данные	Объект	Плита для пресс-формы	
	Время обработки по программе, $T_{маш}$ (мин)	81,09	68.26
	Количество смен, отработанных в течение месяца, $лсммес$ (шт)	24	
	Количество изготовленных деталей, $N_{годн}/N_{общ}$ (шт)	369/376	446/454
	Количество обслуживаемых станков оператором, $n$ (шт)	3	
Результаты расчета	Время работы оборудования, $T_{об}$ (мин)	30489	30990
	Время работы оператора, $T_{оп}$ (мин)	11520	
	Показатель – <i>Готовность</i>	<b>0.88 - 88%</b>	<b>0.89 - 89%</b>
	Выпуск продукции в смену, $T_{сммес}$ (нормо-час)	21.17	21.52
	Показатель – <i>Производительность</i>	<b>0.88 - 88%</b>	<b>0.89 - 89%</b>
	Показатель – <i>Качество</i>	<b>0.98 - 98%</b>	<b>0.98 - 98%</b>
	Показатель – <i>ОЕЕ (%)</i>	<b>75,89%</b>	<b>77.62%</b>

#### 4.4 Выводы по Главе 4

1. Выполненная методика автоматизации решения проектной задачи по определению условий послойного фрезерования, в т.ч. высокоскоростного, для обеспечения заданных параметров качества поверхности позволяют на стадии проектирования с определенной степенью вероятности обеспечивать соответствие обработанной поверхности требованию чертежа.

2. При определении условий фрезерования, в т.ч. высокоскоростного, в соответствии с проектной задачей оптимизации по толщине стружки при обработке с переменным по величине припуском, выравнивается мощность на протяжении всего цикла фрезерования, снижается уровень ударной нагрузки на режущий инструмент и кинематику станка, снижается уровень вибрации за счет изменения величины подачи в зависимости от толщины снимаемого слоя и увеличивается производительность обработки. Анализ соответствия теоретических расчетов экспериментальным данным показал, что при использовании разработанных математических зависимостей для определения условий обработки позволяют обеспечивать в процессе производства заданные параметры качества поверхности.

3. Анализ соответствия теоретических результатов практическим данным, полученным в результате экспериментальной проверки параметров качества поверхности при плунжерном фрезеровании вертикальных стенок на станках с ЧПУ в зависимости от условий обработки следует, что относительная погрешность расчета составляет не более 5%, а средняя относительная погрешность – 3%. При плунжерном фрезеровании производительность обработки выше на 20% и более, чем при контурном при всех прочих равных условиях.

4. При высокоскоростной фрезерной обработке повышенные расходы на более производительное оборудование и режущий инструмент компенсируется существенным сокращением суммарных затрат в пересчете на килограмм детали (до 10 раз) и повышением производительности в пересчете на скорость съема металла в минуту (до 15 раз).

5. Сравнительный анализ выполнения технологических процессов традиционного фрезерования, реализуемых по базовому варианту и подготовленному по результатам разработки проектных решений показал сокращение времени обработки на 16% и уменьшение расходов на изготовление детали «Плита» до 50%.

## **ГЛАВА 5 ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, НА ПРОИЗВОДСТВЕ И ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ**

Целью данной главы является изложение результатов внедрения выполненных исследований в проектную деятельность организацию производственных процессов предприятий и подготовку специалистов. Приводятся результаты эффективности разработанных решений.

Разработанные модели и научно-обоснованные технологические решения в области автоматизированного проектирования внедрены в практику использования системы ADEM CAD/CAM/CAPP «ADEM - 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), ООО «Миракс» (г. Москва), ПАО «Дидактические системы» (г. Москва).

### **5.1 Применение результатов исследований на этапе выполнения технологических проектных работ**

Программы расчёта параметров фрезерования в зависимости от качества поверхности при высокоскоростном фрезеровании объемных изделий в послойном режиме и 2,5-координатной традиционной обработки на станках с ЧПУ, плунжерного фрезерования и рациональной стабилизации контурного фрезерования изделий с переменным по величине припуском включены в виде Приложения к интегрированной конструкторско-технологической компьютерной системе ADEM CAD/CAM/CAPP «ADEM - инжиниринг» (г. Москва). Для реализации результатов исследований в проектной деятельности в технологических службах предприятий разработаны подробные пошаговые

инструкции по проектированию высокоскоростных операций для станков с ЧПУ в автоматизированной системе CAD/CAM/CAPP.

Методика технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ включает следующие этапы (Алгоритм последовательности проектирования на Рисунке 2.12, Глава 2), содержание которых и примеры реализации приведены ниже.

**1. Выбор оборудования.** При выборе оборудования определяются параметры необходимые для дальнейших расчетов - мощность, максимальные число оборотов шпинделя и скорость подачи, максимально допустимое ускорение, обеспечиваемое приводами станка, система УЧПУ [9]. В качестве примера - вертикальный обрабатывающий центр FIVE 650 производства Тверского станкостроительного завода. Технические характеристики станка - мощность электродвигателя главного привода 15 кВт, диапазон частот вращения шпинделя 50 - 12000 об/мин, скорость рабочей подачи 1-20000 мм/мин, максимально допустимое ускорение, обеспечиваемое приводами станка 8 м/с<sup>2</sup>.

**2. Выбор режущего инструмента.** Подбор необходимой фрезы выполняется из базы данных системы, материал режущего инструмента - мелкодисперсные сплавы, способные надежно работать на высоких скоростях, [68]. Параметры инструмента необходимые для дальнейших расчетов – диаметр и число зубьев фрезы, радиус скругления режущей кромки, материал режущей части. При высокоскоростном трохойдальном фрезеровании пазов фреза должна быть на 15%, а лучше на 35% меньше в диаметре, чем ширина паза. В качестве примера - для фрезерования паза шириной 16 мм можно использовать фрезу концевую R998ST6-120 диаметром 12 мм, изготовитель Ижевский инструментальный завод. Число зубьев-6, радиус скругления режущей кромки – 0,2 мм. Фреза предназначена высокоскоростной, высокопроизводительной обработки стали S2-70 HRS.



### 3. Определение скорости резания и числа оборотов шпинделя.

Рекомендуемая скорость резания при высокоскоростном фрезеровании стали  $V_{рез} - 350 - 2000$  м/мин [9]. Определяется по справочным источникам с учетом характеристик материала детали и рекомендаций по применению режущего инструмента [8]. Максимальная скорость резания ограничивается предельной для данного станка частотой вращения шпинделя, например, для вышеупомянутого обрабатывающего центра FIVE 650  $n_{max} - 12000$  об/мин. При диаметре фрезы  $D - 12$  мм максимально достижимая скорость резания на этом оборудовании будет соответствовать 450 м/мин. Выбранное значение скорости резания  $V_{рез}$  в м/мин заносится в табло диалога **Фрезерная** в закладке **Шпиндель/Подачи** (Рисунок 5.1). Система автоматически сделает пересчет этого значения в число оборотов шпинделя станка в минуту, которое будет использоваться в управляющей программе.

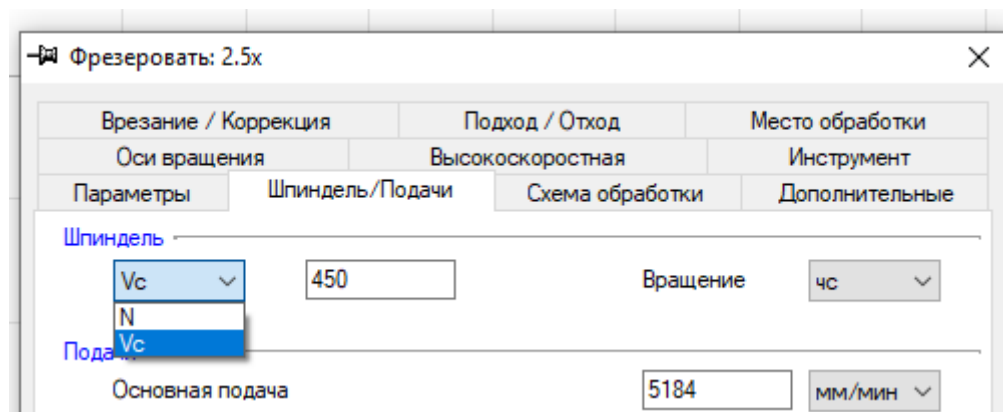


Рисунок 5.1 - Табло диалога в закладке Шпиндель/Подачи для занесения параметров скорости резания и скорости подачи

4. **Определение скорости подачи.** При высокоскоростном фрезеровании скорость подачи может варьироваться в зависимости от материала обрабатываемой детали и возможностей оборудования для стали — до 6000 мм/мин, для лёгких сплавов — до 10000 мм/мин [9]. Выбранное значение скорости подачи  $V_f$  в мм/мин заносится в табло диалога **Фрезерная** в закладке **Шпиндель/Подачи** (рис. 5.1).

**5. Определение перемещения по оси Z.** Высокоскоростная обработка предусматривает малые сечения среза, снимаемые с высокой скоростью. Для обеспечения заданной шероховатости обрабатываемых вертикальных плоскостей при послойном высокоскоростном фрезеровании необходимо задать определенную величину однократного перемещения по оси Z. Подробно о реализации этой проектной задачи в Разделе 2.2.1 Глава 2. Полученное численное значение величины однократного перемещения по оси Z -  $h_z$  заносится в табло диалога **Фрезерная** в закладке **Шпиндель/Подачи** в окне **Глубина прохода** при проектировании высокоскоростной фрезерной операции с послойным удалением материала (Рисунок 5.2).

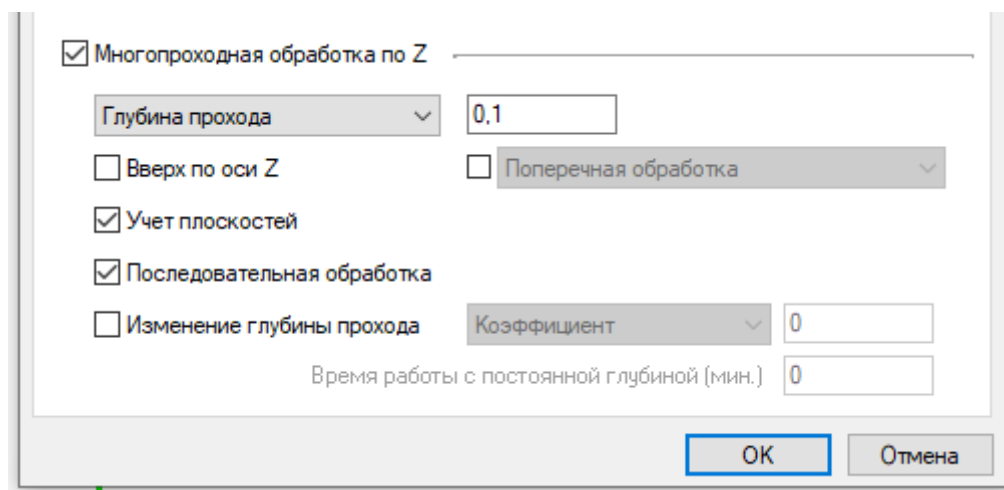


Рисунок 5.2 - Табло диалога в закладке **Шпиндель/Подачи** для занесения параметров однократного перемещения по оси Z

**6. Определение оптимальной толщины стружки.** Для стабилизации усилий при высокоскоростном фрезеровании устанавливается толщина стружки и постоянство её обеспечивается программой при изменении толщины снимаемого слоя. Подробно о реализации этой проектной задачи в Разделе 2.2.2 Глава 2. Полученное численное значение величины толщины стружки  $a_{max}$  заносится в табло диалога системы **Фрезерная** в закладке **Шпиндель/Подачи** при проектировании операции (Рисунок 5.3). Для более гибкого управления расчетом режимов резания, кроме оптимального значения

толщины стружки, система ADEM позволяет указывать при программировании ее минимальные и максимальные значения с учетом технических возможностей станка.

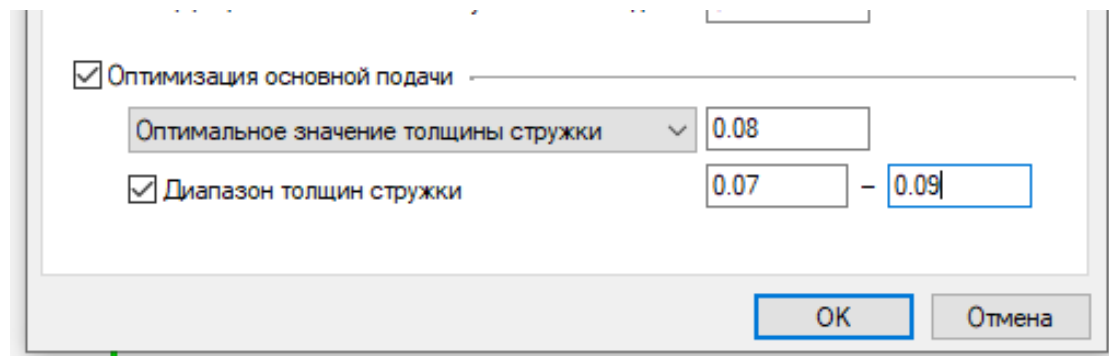


Рисунок 5.3 - Табло диалога в закладке Шпиндель/Подачи для занесения параметров оптимальной толщины стружки

7. **Определение минимального радиуса скругления траектории перемещения инструмента.** Применяется для снижения динамических нагрузок во время резкой смены направления движения инструмента. Подробно о реализации этой проектной задачи в Разделе 2.2.4 Глава 2. Расчетное значение ширины трохойды заносится в табло диалога **Фрезеровать** в закладке **Высокоскоростная** при проектировании операции (Рисунок 5.4).

8. **Определение ширины трохойды.** При высокоскоростном фрезеровании фрезами из мелкодисперсных сплавов при обработке сталей рекомендуемая ширина трохойды - 0,2 диаметра фрезы. Подробно о реализации этой проектной задачи в Разделе 2.2.4 Глава 2. Расчетное значение ширины трохойды заносится в табло диалога **Фрезеровать** в закладке **Высокоскоростная** при проектировании операции (Рисунок 5.4).

9. **Определение шага трохойды.** Величина шага трохойды рассчитывается в зависимости от требований к качеству поверхности. Подробно о реализации этой проектной задачи в Разделе 2.2.4 Глава 2.

Расчетное значение ширины трохойды заносится в табло диалога **Фрезеровать** в закладке **Высокоскоростная** при проектировании операции (Рисунок 5.4).

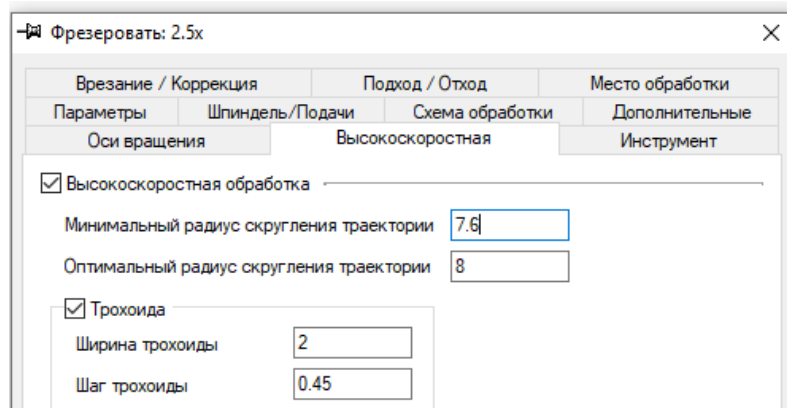


Рисунок 5.4 - Табло диалога в закладке **Высокоскоростная** для занесения параметров минимального радиуса скругления и параметров трохойды

Далее в соответствии с расчетными параметрами система в автоматическом режиме формирует комплект технологической документации и управляющую программу, определяет временные нормативы выполнения операции

Применение результатов исследований на этапе выполнения проектных работ в модулях CAD/CAM/CAPP системы ADEM обеспечивают:

- сокращение сроков подготовки технологической документации и управляющих программ для обработки деталей на станках с ЧПУ за счёт применения разработанной системы автоматизированного проектирования до 80% по сравнению с традиционным поэлементным проектированием;
- разработанные автоматизированные решения проектных задач позволяют выполнять расчёт параметров фрезерования, в т.ч. высокоскоростного, которые на стадии проектирования обеспечивают заданные показатели шероховатости рабочих поверхностей;
- за счёт совмещения технологом обязанностей программиста и нормировщика почти в 2,5 раза сокращаются трудовые ресурсы,

привлекаемые для выполнения работ (технолог – 1 условная проектная единица, программист – 1 ед., нормировщик – 0,3 ед.);

- автоматизация процессов проектирования позволяет сократить срок обучения специалистов по подготовке высокотехнологичных проектов обработки.

В результате применения разработанных методик автоматизированного проектирования в технологических службах предприятий, а также совмещения ранее отдельно существовавших должностей технолог (разработка технологической документации) и программист (разработка управляющих программ для станков с ЧПУ) в одном лице – инженер технолог-программист, который выполняет весь комплекс работ по подготовке технологий и программ для станков с ЧПУ, определение нормативов времени, эффективность решений по технологической подготовке производства обработки на станках с ЧПУ в целом достигала 28%.

## **5.2 Результаты эффективности при внедрении выполненных исследований на этапе обработки деталей на станках с ЧПУ**

Применение математических моделей, алгоритмов и программ расчета определения условий послойного высокоскоростного фрезерования объемных изделий на станках с ЧПУ, оптимизации режимов контурного фрезерования с переменным припуском по оптимальной величине толщины стружки, параметров плунжерного фрезерования при проектировании операций в САМ-системе с последующим использованием выполненных разработок при изготовлении деталей на ряде предприятий (АО Ярославский завод дизельной аппаратуры (г. Ярославль), АО «Компрессор» (г. Санкт-Петербург), ООО «Миракс» (г. Москва), АО «Карачевский завод «Электродеталь» (г. Карачев, Брянская обл.) и др.) обеспечило снижение себестоимости обработки по

отдельным изделиям до 10 раз, повышение производительности труда до 15 раз при обработке на станках с ЧПУ [47; 48; Приложение И].

Эффективность месячной работы одного из производственных участков предприятия АО Ярославский завод дизельной аппаратуры (г. Ярославль) по показателю КРІ Коэффициент загрузки оборудования оценивалась по методике, приведенной в Главе 4 и отражена на Рисунке 5.5. На первом этапе был выполнен расчет  $K_{зо}$  до проведения исследований, он составлял не более 56%. После проведения исследований и разработки, и внедрения нормативов времени и норм выработки, что нашло отражение в сменно-суточных заданиях для операторов,  $K_{зо}$  возрос до 80 и более процентов. Эти показатели близки к расчетным значениям, такой критерий по мировым стандартам должен приближаться к 90% [65], эта ситуация показана на Рисунке 5.5. Аналогичный расчет этого показателя можно выполнить для каждого оператора.

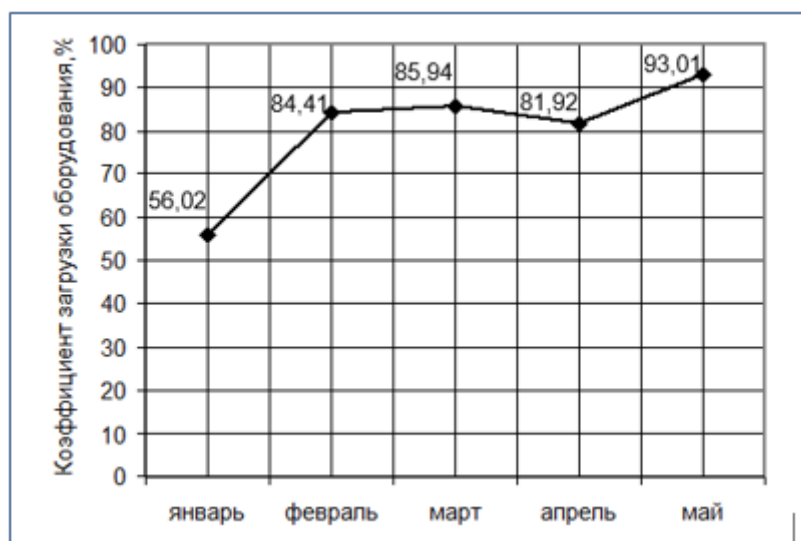


Рисунок 5.5 - Помесячный анализ эффективности работы участка станков с ЧПУ по показателю КРІ Коэффициент загрузки оборудования ( $K_{зо}$ )

[Приложение Л]

Пример реализации проведения анализа эффективности работы операторов по указанному выше показателю показан на Рисунке 5.6. В январе происходил запуск новых изделий, сменные задания операторам не выдавались и объемы выпуска крайне низкие. С февраля каждому оператору

выдавались сменные задания на основе нормативов, разработанных по описанной выше методике, и эффективность выпуска изделий значительно повысилась, результаты отражаются на диаграмме (Рисунок 5.6).

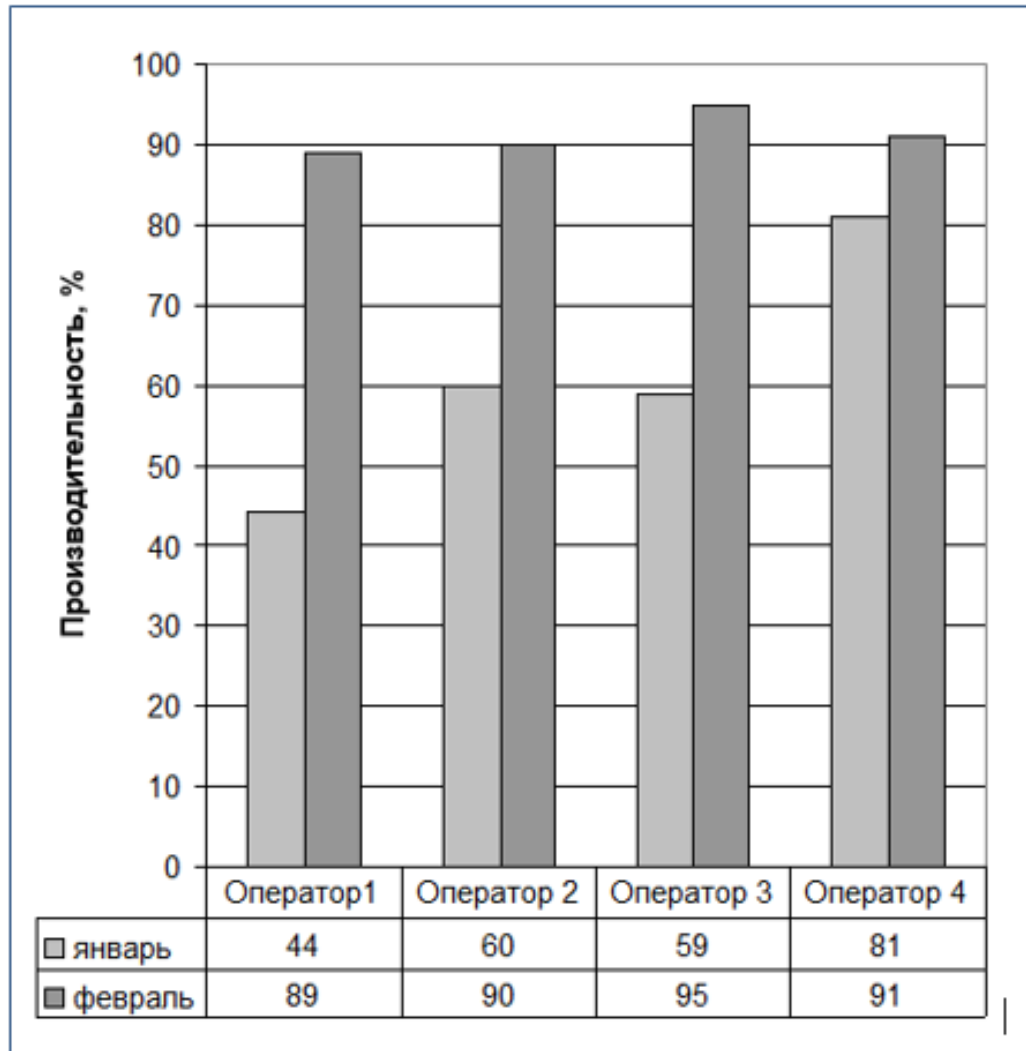


Рисунок 5.6 - Диаграмма сравнительного анализа эффективности работы операторов станков с ЧПУ по показателю ОЕЕ Производительность - Объем выпуска продукции за условную смену на единицу оборудования

[Приложение Л]

### 5.3 Применение результатов исследований при подготовке специалистов технологического профиля для работы в разработанной автоматизированной проектной системе

На этапе подготовки специалистов технологического профиля для работы в разработанной автоматизированной проектной системе:

- применяется разработанная компетентностно-ориентированная образовательная платформа;
- используется разработанная и изданная линейка учебников для освоения теоретического материала и получения навыков практического технологического проектирования.

Формирование общих знаний о предмете обучения может реализоваться алгоритмическим (визуальным) или текстовым способами. Эффективность применения этих вариантов подачи информации проверялась с помощью энтропийного метода исследования процессов информационного взаимодействия человека и компьютера при обучении студентов Брянского государственного университета им. ак. И.Г. Петровского (Рисунок 5.3).

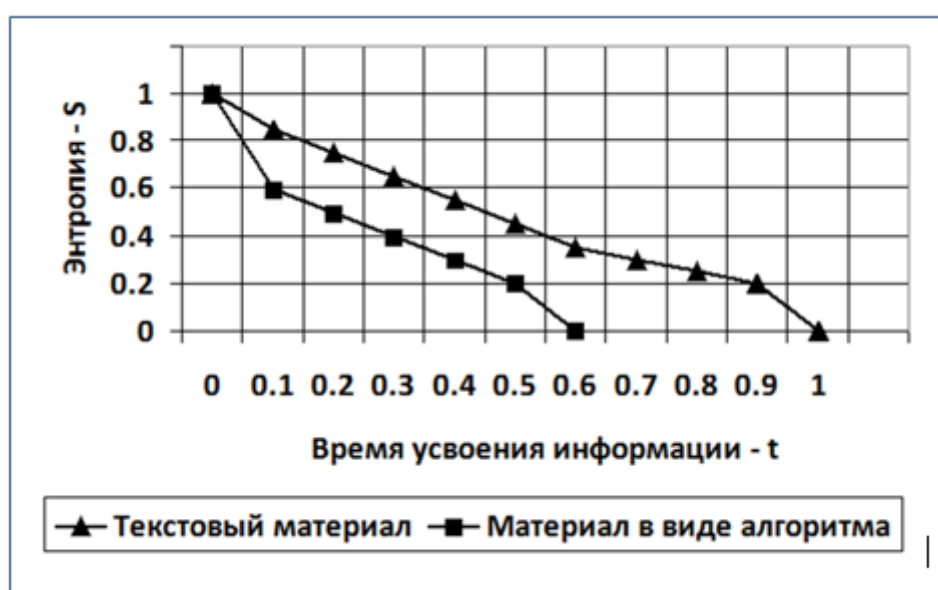


Рисунок 5.7 - Изменение энтропии ( $S$ ) во времени ( $t$ ) при освоении сведений о процессе технологического проектирования



Из графика, построенного в относительных величинах на основе экспериментальных данных при освоении общих сведений о технологическом проектировании в соответствии с индуктивным методом обучения, из Рисунка 5.7 следует, что алгоритмический метод позволяет существенно сократить период обучения. А также визуализации учебной информации в виде алгоритма способствует более интенсивному усвоению материала, ориентирует обучающегося на поиск системных связей и закономерностей. Объем выборки при проведении этих исследований составил 257 чел. [Приложение Н].

Результаты выполненных исследований включены в программы подготовки студентов Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (г. Москва), Брянского государственного университета им. ак. И.Г. Петровского (г. Брянск) и других учебных заведения высшего образования РФ. Подготовка преподавателей учебных заведений проводилась на курсах обучения автоматизированной технологической проектной деятельности и реализации технологических решений на станках с ЧПУ на предприятии выпускающем учебное оборудование с ЧПУ ПАО «Дидактические системы» (г. Москва) [33; 38; 46; Приложение М].

Результаты выполненных исследований отражены в разработанной и изданной линейке из 7 учебных пособий, которым присвоен индекс «УМО рекомендован в качестве учебника для системы ВО» [25; 29; 36; 37; 39; 40]. По данным издательства Юрайт (г. Москва) учебники востребованы в технических библиотеках 776 учебных заведений и организаций РФ и ближнего зарубежья [Приложение О].

## 5.4 Выводы по Главе 5

1. Автоматизированная подготовка технологического процесса и управляющей программы для станка с ЧПУ на основе разработанных

автоматизированных решений проектных задач позволяет до 80% проектных действий выполнять в автоматическом режиме без участия проектировщика.

2. За счёт совмещения технологом обязанностей программиста и нормировщика почти в 2,5 раза сокращаются высококвалифицированные трудовые ресурсы, привлекаемые для выполнения проектных работ.

3. Разработанные технологические решения для фрезерной обработки, в т.ч. высокоскоростной на станках с ЧПУ, при их реализации в производственных условиях позволяет сократить время обработки до 10 раз и снижения себестоимости обработки до 15 раз.

4. Практическое применение методики определения показателя эффективности KPI (Key Performance Indicators) позволило проводить оперативный анализ эффективности работы операторов и участка в целом, за любой временной отрезок – смена, сутки, декада, месяц для принятия управленческих решений с использованием информационных возможностей систем УЧПУ оборудования и разработанного программного обеспечения.

5. Подготовка специалистов технологического профиля для работы в разработанной автоматизированной технологической проектной системе с применением компетентностно-ориентированной образовательной платформы показала свою результативность при сокращении времени подготовки без потери качества и позволила решать высокотехнологичные задачи на производстве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программные документы Российской Федерации ставят конкретные задачи развития обрабатывающей промышленности, на которые ориентированы выполненные исследования:

- автоматизация производства в ближайшее время станет одним из приоритетных направлений развития в России, одним из путей её реализации в машиностроении - использование автоматизированного оборудования с программным управлением;

- создание в обрабатывающей промышленности высокопроизводительных секторов, развивающихся на основе современных технологий, обеспеченных квалифицированными кадрами [60];

- повышение эффективности производства за счёт цифровизации реального сектора экономики, увеличение количества предприятий, участвующих в программе по поддержке автоматизации и использования цифровых технологий [44];

- обеспечение темпов роста производительности труда на не сырьевых отраслях экономики до 5% к каждому предыдущему году [43];

- решение кадровой проблемы, снижающей эффективность производства, устранение профессионально-квалификационного дисбаланса - несоответствия компетенций квалификационным требованиям [60];

- разработка научных основ автоматизации технологической подготовки производства (АСТПП) [49];

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 существующих исследований 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 автоматизированного производства.

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

4. Выявлены взаимосвязи и установлены зависимости между параметрами выполнения высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ (послойном 2,5-координатном фрезеровании, рациональном управлении контурным фрезерованием с переменным по величине припуском и плунжерным фрезерованием) и характеристиками качества обработанной поверхности при автоматизированном технологическом проектировании в САМ-системе.

5. Разработаны математические модели и алгоритмы автоматизированных расчетов параметров выполнения высокоскоростных фрезерных работ на станках с ЧПУ, обеспечивающих повышение производительности и снижение себестоимости выполнения операций с учетом требуемого качества поверхности.

6. Разработаны автоматизированные решения проектных задач для технологической подготовки выполнения операций высокоскоростного фрезерования на станках с ЧПУ, обеспечивающих заданные характеристики качества поверхности.

7. 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.

8. 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 [Приложение И; Приложение К; Приложение Л].

8. Предложенные решения позволяют их тиражировать в реальном секторе экономики при подготовке выпуска изделий на станках с ЧПУ, т.к. используется отечественное программное обеспечение, уже применяемое на целом ряде предприятий обрабатывающей отрасли.

**ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ**

- АРМ – автоматизированное рабочее место
- БД — база данных
- ВО — ведомость оснастки
- ВОБ — ведомость оборудования
- ВТД — ведомость технологических документов
- ГОСТ — государственный стандарт
- ЕВ — единицы величин
- ЕН — единица норм
- ЕСКД — Единая система конструкторской документации
- ЕСТД — Единая система технологической документации
- ЖЦИ — жизненный цикл изделия
- ИИ – искусственный интеллект
- ИТ – информационные технологии
- КК — комплектовочная карта
- ККИ — карта кодирования информации
- КОИД — количество одновременно изготавливаемых деталей
- КР — количество рабочих
- КТИ — карта технологической информации
- КТП — карта технологического процесса
- КТПП — конструкторско-технологическая подготовка производства
- Кшт — понижающий коэффициент штучного времени
- КЭ — карта эскизов
- ЛИ — лист изменений
- ЛРИ — лист регистрации изменений
- Минобрнауки России — Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации
- Минтруда России — Министерство труда и социальной защиты  
Российской Федерации

- МК — маршрутная карта
- МТП — маршрутный технологический процесс
- ОК — операционная карта
- ОКПДТ — Общероссийский классификатор профессий рабочих, должностей служащих и тарифных разрядов
- САПР — система автоматизированного проектирования
- СМ — степень механизации
- СОЖ — смазочно-охлаждающая жидкость
- СПО — среднее профессиональное образование
- СЧПУ — системы числового программного управления
- Тв — вспомогательное время
- ТД — технологическая документация
- ТИ — технологическая инструкция
- ТК — технологическая команда
- ТЛ — титульный лист
- ТО — технологический объект
- То — основное время
- Тобсл — время на обслуживание рабочего места
- Топ — оперативное время
- Тотд — время на отдых и личные потребности
- Тп — технологический переход
- ТП — технологический процесс
- Тпз — подготовительно-заключительное время
- ТПП — технологическая подготовка производства
- Тшт. — штучное время
- Тшт.к — штучно-калькуляционное время
- УП — управляющая программа
- УТ — код условий труда
- УЧПУ — устройство числового программного управления
- УЭ — учебный элемент

ЧПУ — числовое программное управление

CAE (Computer Aided Engineering) — автоматизированные расчеты и анализ.

CAD (Computer Aided Design) — автоматизированное проектирование.

CAM (Computer Aided Manufacturing) — автоматизированная технологическая подготовка производства.

CAPP (Computer Aided Process Planning) — модуль проектирования технологических процессов.

CLDATA — последовательность команд станку.

KPI (Key Performance Indicators) – ключевые показатели эффективности подразделения или отдельно взятого сотрудника.

OEE (Overall Equipment Effectiveness) - Готовность x Производительность x Качество) – международный показатель эффективности работы производства

STEAM-технологии (Science, Technology, Engineering, Arts, Mathematics) - сочетания междисциплинарного и прикладного подхода к процессу обучения

2D — плоское изображение объекта, имеющее две оси.

3D — пространственное изображение объекта, имеющее три оси.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация проектно-конструкторской и технологической подготовки производства: официальный сайт. – Москва. - URL: <http://www.adem.ru> (дата обращения 05.04.2021). – Текст: электронный.
2. ADEM CAD/CAM/TDM Черчение, моделирование, механообработка: учебник / Быков А.В., Силин В.В., Семенников В.В., Феоктистов В.Ю. – Санкт-Петербург : Изд-во БХВ – Петербург, 2003. -320 с. – Текст : непосредственный.
3. АСКОН. Российское инженерное ПО для проектирования, производства и бизнеса: [сайт]. - URL: <https://www.ascon.ru> (дата обращения 26.11.2022). – Текст : электронный.
4. Батуев, В.В. Повышение производительности и точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Батуев Виктор Викторович; Южно-Уральский государственный университет. - Челябинск, 2007. – 151 с. – Библиогр.: с. 126-143. – Текст : непосредственный.
5. Бубликова, А. С. Разработка цифрового двойника технологического процесса обработки на оборудовании с ЧПУ / А. С. Бубликова, В. В. Ветохин. — Текст : электронный // Молодой ученый. — 2021. — № 3 (345). — С. 78-79. — URL: <https://moluch.ru/archive/345/77786/> (дата обращения: 25.08.2024).
6. Бутов, А. М. Рынок продукции станкостроения / А. М. Бутов . – Текст : электронный // [сайт] Национального исследовательского университета Высшей школы экономики. - 2020 – URL: <https://www.hse.ru/data/2020/11/07/1361776905/Рынок%20продукции%20станкостроения-2020.pdf>.

7. Быков, А. В. Новое в программировании ЧПУ с ADEM CAM-EXPERT / А. В. Быков. – Текст : электронный // [сайт] ADEM – Автоматизация проектно – конструкторской и технологической подготовки производства. – URL: <https://adem.ru/products/cam/> (дата обращения 28.07.2020).
8. Высокоскоростная обработка / К. Виттингтон, В. Н. Власов. – Текст : непосредственный // САПР и графика. – 2002. - №11. - С. 51- 68.
9. Высокоскоростная обработка (High Speed Machining) на станках с ЧПУ. – Текст : электронный // MULTICUT: [сайт]. - URL: <https://www.multicut.ru/articles/high-speed-machining-na-stankakh-s-chpu/> (дата обращения 20.06.2024).
10. ГОСТ 14.004—83. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий: межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 09.02.83 №714. – Москва : ФГУП «Стандартинформ», 2008. – Текст : непосредственный.
11. Цифровые двойники технологических процессов в легкой промышленности / Н. Н. Губачев. – Текст : непосредственный // Технология текстильной промышленности. - 2022. - №2. - С. 334 – 339.
12. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, платформы, перспективы / В.М. Дозорцев. – Текст : непосредственный // Автоматизация в промышленности. - 2020. - №9. - С. 3 -11.
13. Доросинский, Л. Г. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия / Л. Г. Доросинский, О. М. Зверева. – Ульяновск: Зебра, 2016. – 243 с. – ISBN 978-5-9908739-8-8. – Текст : непосредственный.
14. Ивченко, Г. И. Математическая статистика : учебное пособие / Г. И. Ивченко, Ю. И. Медведев. – Москва : КД Либроком, 2019. – 352 с. – ISBN 978-5-397-04141-6. – Текст : непосредственный.

15. Особенности и преимущества системы ADEM в области создания управляющих программ для станков с ЧПУ / Д. Зинченко. – Текст : непосредственный // САПР и графика. - 2017. - №7. - С. 31- 41.
16. Автоматизация разработки управляющих программ для станков с ЧПУ в различных САПР с использованием информационно-технологической среды / Е. П. Дьяченко, А. В. Рыбаков, Е. Н. Дьяченко, Шептунов С. А. – Текст : - непосредственный // Вестник Брянского государственного университета. – 2017. - № 2 (55). – С. 178-184.
17. Иванов, П. В. Автоматизация формирования траектории движения инструмента / П. В. Иванов, А. И. Сергеев. – Текст: непосредственный // В сборнике: Автоматизированные системы управления и информационные технологии. Материалы всероссийской научно-технической конференции «Машиностроение: инновационные аспекты развития»: в двух томах. – Санкт – Петербург, 2019. - С. 120-124.
18. Исакова, А. Ж. Анализ существующих систем автоматизированного проектирования технологических процессов / А. Ж. Исакова, В. В. Юрченко, Т. Ю. Никонова. – Текст : - непосредственный // Автоматика. Информатика. - 2017. - № 1 - С. 56-59.
19. Казаков, А. А. Опыт применения ADEM-VX для высокоскоростного, высокоэффективного фрезерования в авиационной промышленности / А. А. Казаков, А. В. Конюхов. – Текст : электронный // ADEM.ru : [сайт]. – 2023. - URL: <https://adem.ru/press/articles/2009-06-10/> (дата обращения 20.06.2024).
20. Казаков, Ю. Н. Применение САМ и САД систем при современном проектировании и производстве / Ю. Н. Казаков, Н. В. Токмаков, С. В. Колпакова, А. В. Горин. – Текст: электронный // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Сборник научных трудов 14-ой Международной научно-практической конференции / «Юго-Западный государственный университет» //

- ADEM.ru : [сайт]. - 2019. - URL: <http://www.adem.ru> (дата обращения 05.04.2021).
21. 2,5 координатное фрезерование в системе ADEM / А. А. Казаков. – Текст : непосредственный // САПР и графика. - 2002. - №6. - С. 29-34.
  22. Области применения высокоскоростной обработки материалов (HSM) / С. В. Кирьянов. – Текст : непосредственный // Евразийский научный журнал. Технические науки. – 2018. – №3 - С. 74-75.
  23. Кирюшин, И. Е. Обеспечение качества поверхностного слоя деталей при высокоскоростном торцевом фрезеровании закаленных сталей : специальность 05.03 01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Кирюшин Игорь Евгеньевич ; Энгельский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО Саратовский государственный технический университет/ - Саратов, 2007. – 137 с. - Библиогр.: с. 118–126. - Текст : непосредственный.
  24. Классификация станков с ЧПУ, их виды и возможности. – Текст : электронный // TOP3DSHOP : [сайт]. - 2019 - URL: <https://top3dshop.ru/blog/klassifikatsija-stankov-s-chpu.html>.
  25. Колошкина, И. Е. Автоматизация проектирования технологической документации: учебник и практикум для вузов / И. Е. Колошкина. — Москва: Издательство Юрайт, 2020. — 371 с. – ISBN 978-5-534-14010-1. – Текст : непосредственный.
  26. Автоматизация разработки технологической документации / И. Е. Колошкина. – Текст : непосредственный // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2019. – № 1(173). – С. 56–62.
  27. Методика автоматизированной разработки технологической документации в системе CAD/CAM/CAPP / И. Е. Колошкина. – Текст : непосредственный // Автоматизация в промышленности. - 2019. - №9. - С. 32-34.

28. Автоматизация принятия решения о возможности 2.5-координатного фрезерования объемных изделий на станках с ЧПУ для плоской обработки / И. Е. Колошкина. – Текст : непосредственный // Автоматизация в промышленности. - 2021. - №2. - С. 55-60.
29. Колошкина, И. Е. Инженерная графика. САД: учебник и практикум для академического бакалавриата / И. Е. Колошкина, В. А. Селезнев. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 220 с. – ISBN ISBN 978-5-534-10412-7. – Текст : непосредственный.
30. Оптимизация режимов контурного фрезерования при программировании для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) в САМ-системе/ И. Е. Колошкина. – Текст : непосредственный // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2021. - №2(182). - С. 15-19.
31. Автоматизация определения геометрических параметров качества поверхности при плунжерном фрезеровании на станке с ЧПУ/ И. Е. Колошкина. – Текст : непосредственный // Автоматизация в промышленности. - 2022. - Сентябрь. С. 29-71.
32. Информационные технологии при проектировании высокоскоростных фрезерных операций на станках с ЧПУ / И. Е. Колошкина, А. В. Капитанов, А. Н. Феофанов. – Текст : непосредственный // Информационные технологии в проектировании и производстве. - 2024. - №03. - С. 22-29.
33. Технологическое единство: технолог-программист-нормировщик-оператор станка с ЧПУ - подготовка специалистов для машиностроения / И. Е. Колошкина, А. В. Капитанов, А. Н. Феофанов. – Текст : непосредственный // Современные проблемы теории машин. - 2024. - №17. - С. 21-26.
34. Эффективность применения автоматизированной интеллектуальной системы для формирования технологической документации / / И. Е. Колошкина, А. В. Капитанов, А. Н. Феофанов. – Текст :

- непосредственный // Информационные технологии в проектировании и производстве. - 2024. - №1(193). - С. 50-57.
35. Автоматизированное проектирование технологических процессов и управляющих программ для высокоскоростного фрезерования на станках с ЧПУ / И. Е. Колошкина, А. В. Капитанов, А. Н. Феофанов. – Текст : непосредственный // Автоматизация в промышленности. - 2024. - №09. - С. 7-10.
36. Колошкина, И. Е. Автоматизация проектирования конструкторской документации для машиностроения в примерах и решениях: учебное пособие / И.Е. Колошкина. — Москва: РУСАЙНС, 2024. — 216 с - ISBN 978-5-534-13635-7. – Текст : непосредственный.
37. Колошкина, И. Е. Автоматизированная разработка технологий и программ для станков с числовым программным управлением в примерах и решениях: учебное пособие / И.Е. Колошкина. — Москва: РУСАЙНС, 2024. — 232 с. – ISBN 978-5-466-07500-7. - Текст : непосредственный.
38. Колошкина, И. Е. Подготовка специалистов по САПР технологического профиля применяемых в современной промышленности / И. Е. Колошкина. Текст : непосредственный // IV Международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике», 22 - 23 октября 2020 г. – Брянск: БГТУ, 2020. - С. 28-32.
39. Колошкина, И. Е. Основы программирования для станков с ЧПУ в САМ-системе: учебное пособие / И. Е. Колошкина. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 260 с. - ISBN 978-5-9729-0949-0. - Текст : непосредственный.
40. Колошкина, И. Е. Основы программирования для станков с ЧПУ: учебное пособие для академического бакалавриата / И. Е. Колошкина, В. А. Селезнев. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 260 с. - ISBN 978-5-534-10446-2. - Текст : непосредственный.

41. Использование фрезерного станка с ЧПУ для нанесения регулярного микрорельефа на поверхности заготовки / Ю. П. Кузьмин, К. П. Помпеев, А. А. Целищев. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2015. - № 4. - С. 273-277.
42. Мировой рынок станочного оборудования с числовым программным управлением. – Текст : электронный // [сайт] МНИАП – Институт анализа инвестиционной политики. – 2020. – URL: <https://мниап.рф/analytics/Mirovoj-rynok-stanocnogo-oborudovania-s-cislovy-programmny-upravleniem>
43. Национальный проект «Производительность труда». - Текст : электронный // Национальный проект «Производительность труда. - URL: <https://национальные проекты.рф/> (дата обращения 28.07.2020).
44. Национальной программа «Цифровая экономика Российской Федерации». - Текст : электронный // [сайт] Национальный проект «Цифровая экономика Российской Федерации». – URL: <https://национальные проекты.рф/> (дата обращения 24.11.2021).
45. VEKTOAUS : [сайт]. - Нормирование работ по обслуживанию станков с ЧПУ. - URL: <https://vektorus.ru/blog/normirovanie-rabot-po-obsluzhivaniju-stankov-s-chpu.html> (дата обращения 26.08.2024).- Текст : электронный.
46. Отчет о хоздоговорной научно-технической работе по теме: «Разработка комплекта научно-методических материалов интерактивного образовательного контента для обучения операторов и наладчиков станков с ЧПУ для АО «Карачевского завода «Электродеталь», 2016. – 86 с. (г. Карачев, Брянская обл., Россия) (№АААА-А17-117030310002-4).
47. Отчет о хоздоговорной научно-технической работе по теме: «Исследование и разработка мероприятий по повышению эффективности производственных процессов и качества продукции АО

- «Карачевского завода «Электродеталь», 2017. – 144 с. (г. Карачев, Брянская обл., Россия) (№АААА-А17-117030310009-3).
48. Отчет об инициативной научно-исследовательской работе по теме: «Анализ эффективности работы участка станков с ЧПУ механического цеха АО «Завод «Снежить», 2019. – 78 с.
49. Паспорт специальности ВАК 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.
50. Особенности нормирования операций для станков с ЧПУ / Д. С. Пахомов, Т. Н. Гребнева. – Текст : непосредственный // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2015. - № 2. - С. 104 – 112.
51. Влияние цифровизации на качество использования рабочего времени / А. В. Побиянская, Е. А. Кипервар. – Текст : непосредственный // Экономика труда. – 2019. – Т. 6, № 3. – С. 1169–1178.
52. Stankoff : [сайт] / Преимущества и недостатки высокоскоростной обработки. - RL: [https:// https://www.stankoff.ru/blog/post/981](https://www.stankoff.ru/blog/post/981) (дата обращения 20.06.2024). - Текст : электронный.
53. Прохоров, А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. – Москва : ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с. – ISBN 978-5-98094-008-9. – Текст: непосредственный.
54. Разработка цифрового двойника процесса точения на основе машинного обучения / Д. А. Расторгуев, А. А. Севастьянов А.А. – Текст : непосредственный // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. - 2021. - № 1. - С. 32-41.
55. Классификация и место САМ-систем в системах автоматизированного проектирования / А. О. Сазонова, А. А. Дроздов // Master's Journal. - 2014. - № 2. - С. 34-42.
56. ADEM – Автоматизация проектно – конструкторской и технологической подготовки производства : [сайт] / САМ. Плоское



- фрезерование 2х-2.5х. – URL: <https://adem.ru/products/cam/> (дата обращения 28.07.2020).
57. Самодуров, Г.В. Итоги развития станкостроительной отрасли России / Г.В. Самодуров // Комплект. ИТО. – 2022. - №2. – С. 8-10.
58. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021613882. Определение условий 2.5-кординатного фрезерования на станках с ЧПУ в зависимости от требований к качеству обрабатываемой поверхности/ Колошкина И.Е. (RU); заявитель и правообладатель Колошкина И.Е.; заявл. 09.03.2021; зарегистр. 16.06.2021.
59. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021616257. Определение режимов контурного фрезерования изделий с переменным припуском на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) в зависимости от требований к качеству обрабатываемой поверхности/ Колошкина И.Е. (RU); заявитель и правообладатель Колошкина И.Е.; заявл. 26.04.2021; зарегистр. 13.05.2021.
60. Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года.
61. Севостьянова, А. А.. Совершенствование методов управления процессами производства / И. А. Ахвердян, А. П. Штанкевич // Интеллектуальный потенциал XXI века: Международная научно-практическая конференция. – Уфа, 2018. – С. 29–31.
62. Сергеев, А. С. Обеспечение качества металлообработки сборным многолезвийным твердосплавным инструментом на фрезерных станках с ЧПУ / А. Л. Плотников, Ф. Г. Добрынин // Перспективное развитие науки, техники и технологий. Материалы Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор Горохов А.А. - 2011. - С. 212-215.
63. Современные модели УЧПУ / П. П. Серебrenицкий. – Текст : непосредственный // Металлообработка. - 2014. - № 2 (80). - С. 31-49.

64. Система мониторинга «Диспетчер» - мониторинг работы оборудования, станков с ЧПУ и автоматических линий: [сайт]. URL: <http://www.intechnology.ru> (дата обращения 26.10.2020).
65. Скоростное фрезерование PROMEX : [сайт] - URL: <https://promexcut.ru/skorostnoe-frezerovanie> (дата обращения 20.06.2024). - Текст : электронный.
66. Современные методы определения норм машинного и вспомогательного времени для металлорежущих станков с ЧПУ / В. Ф. Макаров, В. Р. Туктамышев, С. В. Масленков [и др.]. – Текст : непосредственный // Инженерный журнал с приложением. – 2016. – № 2 (227). – С. 42–46.
67. Станковый хребет экономики. SONAR 2050 / 2020 : [сайт] - URL: <https://www.sonar2050.org/storage/files/Доклады/Лизан/Станковый%20хребет%20экономики.pdf> . - Текст : электронный.
68. Стоимость фрезерования. – URL: <https://kospas.ru/o-kompanii/>, свободный – (28.09.2020). - Текст : электронный.
69. SprutCAM. Система автоматизированной разработки и моделирования управляющих программ для станков с ЧПУ: [сайт]. - URL: <https://www.csprut.ru> (дата обращения 26.11.2022). - Текст : электронный.
70. ТЕХТРАН. Официальный сайт: [сайт]. URL: <https://www.tehtran.com> (дата обращения 26.11.2022). - Текст : электронный.
71. T-FLEX. Разработчик и интегратор российского ПО для управления жизненным циклом изделий: [сайт]. URL: <https://www.tflex.ru> (дата обращения 26.11.2022). - Текст : электронный.
72. Автоматизация процессов проектирования фрезерных операций для станков с ЧПУ на основе элементов искусственного интеллекта / А. Н. Феофанов, И. Е. Колошкина. – Текст : непосредственный // Информационные технологии в проектировании и производстве. - 2023. - №4(192). - С. 49-51.

73. Опыт применения САПР ADEM в производстве ракетно-космической техники / С. Шачнев, Г. Рожанов, М. Ремизов, С. Евсеев. – Текст : непосредственный // САПР и графика. - 2005. - № 2. - С. 1.
74. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем / В. Н. Шведенко, А. Е. Мозохин. – Текст : непосредственный // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2020. - Т. 20. - № 6. - С. 815–827.
75. Обеспечение качества поверхностного слоя деталей при высокоскоростном торцевом фрезеровании закаленных сталей / Ю. Ю. Хусанов, Б. И. Абдуллаев. – Текст : -непосредственный // SCIENTIFIC PROGRESS. - Том 3. Выпуск 3. - 2022. - С. 156-165.
76. Юрин, В. Н. Компьютерный инжиниринг и инженерное образование: монография / В. Н. Юрин. – Эдиториал УРСС, 2002. – 152 с. – Текст : непосредственный.
77. Stankoff.RU : 23 отрасли, использующие технологию с ЧПУ: сайт. - 2022 – URL: <https://www.stankoff.ru/blog/post/810>.
78. Top3dshop.ru 3D принтер LASERTEC 65 3D hybrid: сайт: - 2022 - URL: <https://top3dshop.ru/blog/3d-pechat-i-chpu-frezerovka-druzja-ili-vragi.htm>.
79. B. Kennedy. Plunger milling // «Cutting Tool Engineering Plus». – March 2012.
80. D. Hong Kho, Y. Altintas. Dynamics and stability of plunger milling operations// «Journal of Manufacturing Science and Engineering». – February 2007.
81. Financial sector leading the way in using AI, Microsoft report reveals Режим доступа: <https://news.microsoft.com/en-gb/2019/10/01/financial-sector-leading-the-way-in-using-ai-microsoft-report-reveals>.
82. Neuroscience and philosophy, or how the brain creates categories. Massachusetts Institute of Technology. URL: <http://web.mit.edu> (дата обращения 26.04.2021).

83. Norton P.,The Peter Norton Programmer's Guide to the IBM-PC.1980.
84. Seleznev V.A. Evaluating the effectiveness of the development of integrated design-engineering of computer systems in educational institutions. Navigator in the world of science and education. Journal №6 (14) 2011. P.20.

**Приложение А Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ по  
определению условий 2,5-координатного фрезерования на станках с  
ЧПУ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2021613882**

**«ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ 2.5-КОРДИНАТНОГО  
ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ В  
ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ  
ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ»**

Правообладатель: *Колошкина Инна Евгеньевна (RU)*

Автор(ы): *Колошкина Инна Евгеньевна (RU)*

Заявка № **2021612904**  
Дата поступления **09 марта 2021 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **16 марта 2021 г.**



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Излиев* Г.П. Излиев

**Программа по определению условий 2,5-координатного  
фрезерования на станках с ЧПУ в зависимости от требований к качеству  
поверхности.**

A1 – Rz, мкм

A2 - (число)

B1 - Ra, мкм

B2 - (число)

C1 - r, мм

C2 - (число)

D1 -  $\alpha$ , град.

D2 - (число)

E1 - hrp, мкм

E2 - =ЕСЛИМН(A2>0;A2;B2>12,5;4·B2;B2<12,5;5·B2)

F1 -  $\beta$ , град.

F2 - =2·ГРАДУСЫ(ACOS(1-(E2/(C2·1000))))

G1 - Sm, мкм

G2 - =2·C2·SIN(РАДИАНЫ(F2/2))·1000

H1 - hz, мм

H2 - =G2·COS(РАДИАНЫ(D2))/1000

**Приложение Б Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ  
по определению режимов контурного фрезерования на станках с ЧПУ**



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
№ 2021617381

**«ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ КОНТУРНОГО  
ФРЕЗЕРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ С ПЕРЕМЕННЫМ  
ПРИПУСКОМ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ  
ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ (ЧПУ) В  
ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ  
ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ»**

Правообладатель: **Колошкина Инна Евгеньевна (RU)**

Автор(ы): **Колошкина Инна Евгеньевна (RU)**

Заявка № **2021616257**  
Дата поступления **26 апреля 2021 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **13 мая 2021 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности



 Г.П. Ивлиев

**Программа расчёта режимов контурного фрезерования изделий  
с переменным припуском на станках с числовым  
программным управлением (ЧПУ) в зависимости от  
требований к качеству обрабатываемой поверхности**

A1 – Rz, мкм	K2	-	=
A2 – (число)	ЕСЛИМН(A2>0;0,2·КОРЕНЬ((F2·A		
B1 – Ra, мкм	2)/1000);B2>12,5;0,35·		
B2 – (число)	·КОРЕНЬ((F2·B2)/1000);B2<0;0,45·		
C1 – tmax, мм	КОРЕНЬ((F2·B2)/1000))		
C2 – (число)	L1 - amax, мм		
D1 – tmin, мм	L2	-	=
D2 – (число)	2·K2·КОРЕНЬ((D2/F2)-		
E1 – h, мм	((D2/F2) · (D2/F2)))		
E2 – (число)	M1 - Sz max, мм/зуб		
F1 – D, мм	M2	-	=
F2 – (число)	0,5·L2·F2/КОРЕНЬ(D2·F2-		
G1 – z, зуб	(D2·D2))		
G2 – (число)	N1 - Sмин max, мм/мин		
H1 - V, м/мин	N2	-	=
H2 – (число)	M2·G2·J2		
I1 - Kс, н/мм <sup>2</sup>	O1 - Sz min, мм/зуб		
I2 – (число)	O2	-	=
J1 - n, об/мин	(0,5·L2·F2)/КОРЕНЬ(C2·F2-		
J2 - = (H2·1000)/(3,14·F2)	(C2·C2))		
K1 - Sz, мм/зуб	P1 - Sмин max, мм/мин		
	P2	-	=
	O2·G2·J2		
	Q1- Nрез, кВт		
	Q2	-	=
	(C2·E2·H2·I2)/(6·1000000)		



**Приложение В Программа расчёта режимов плунжерного  
фрезерования на станках с ЧПУ в зависимости от требований  
к качеству обрабатываемой поверхности**

A1 – Rz, мкм

A2 – (число)

B1 – Ra, мкм

B2 – (число)

C1 – D, мм

C2 – (число)

D1 – h<sub>гр</sub>, мкм

D2 – = ЕСЛИ (A2>0;A2;B2>12.5;5·B2;B2<12.5;4·B2)

E1 – R, мм

E2 – = C2/2

F1 – OC, мм

F2 – = (E2-D2)/10<sup>3</sup>

G1 – α/2, град

G2 – = arccos(F2/E2)

H1 - S<sub>xy</sub>, мм

H2 – = (sin G2) · C2

I1 – S<sub>xy</sub>%, %

I2 – = (H2·100)/C2

**Приложение Г Программа расчёта показателей общей эффективности  
эксплуатации оборудования с программным управлением  
(Overall Equipment Effectiveness)**

A1 – Оператор	I1 – Время работы оператора Top, мин
A2 – (текст)	
B1 – Изделие	$I2 = (480 - H2) \cdot D2$
B2 – (текст)	J1 - Время работы всех единиц оборудования Tоб, мин
C1 - Количество обслуживаемых станков n, шт	$J2 = E2 \cdot F2$
C2 – (число)	K1 – Коэффициент загрузки оборудования Kзо, %
D1 – Количество смен nсммес, шт	$K2 = (J2 / I2 \cdot C2) \cdot 100$
D2 – (число)	L1 – Среднемесячный объем выпуска продукции за усл. смену на ед. оборуд. Tсмср, нормо-час
E1 – Время обработки изделия по программе Tмаш, мин	$L2 = (E2 \cdot F2) / (60 \cdot D2 \cdot C2)$
E2 - (число)	M1 – Производительность П, %
F1 – Количество всего изготовленных изделий Nобщ, шт	$M2 = ((L2 \cdot 60) / (480 - H2)) \cdot 100$
F2 – (число)	N1 – Качество K, %
G1 – Количество годных изделий Nгодн, шт	$N2 = (G2 / F2) \cdot 100$
G2 - (число)	O1 – Показатель общей эффективности OEE
H1 – Время остановок Tост, мин	
H2 - (число)	$O2 = (K2 / 100) \cdot (M2 / 100) \cdot (N2 / 100) \cdot 1$

## Приложение Д Комплект технологической документации на обработку детали «Плита» высокоскоростным фрезерованием

ГОСТ 3.1105-2011		Форма 2	
Дубл.			
Взам.			
Подл.			
		15	1
МГТУ СТАНКИН		С.078.00.08	А.Д.02141.4100140
Плита			
Министерства науки и высшего образования			
КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА механической обработки			
Акт N ..... от .....		Руководства № .....	
ТЛ	Титульный лист	Деталь Плита по переходам 06.10.2024.dwg	

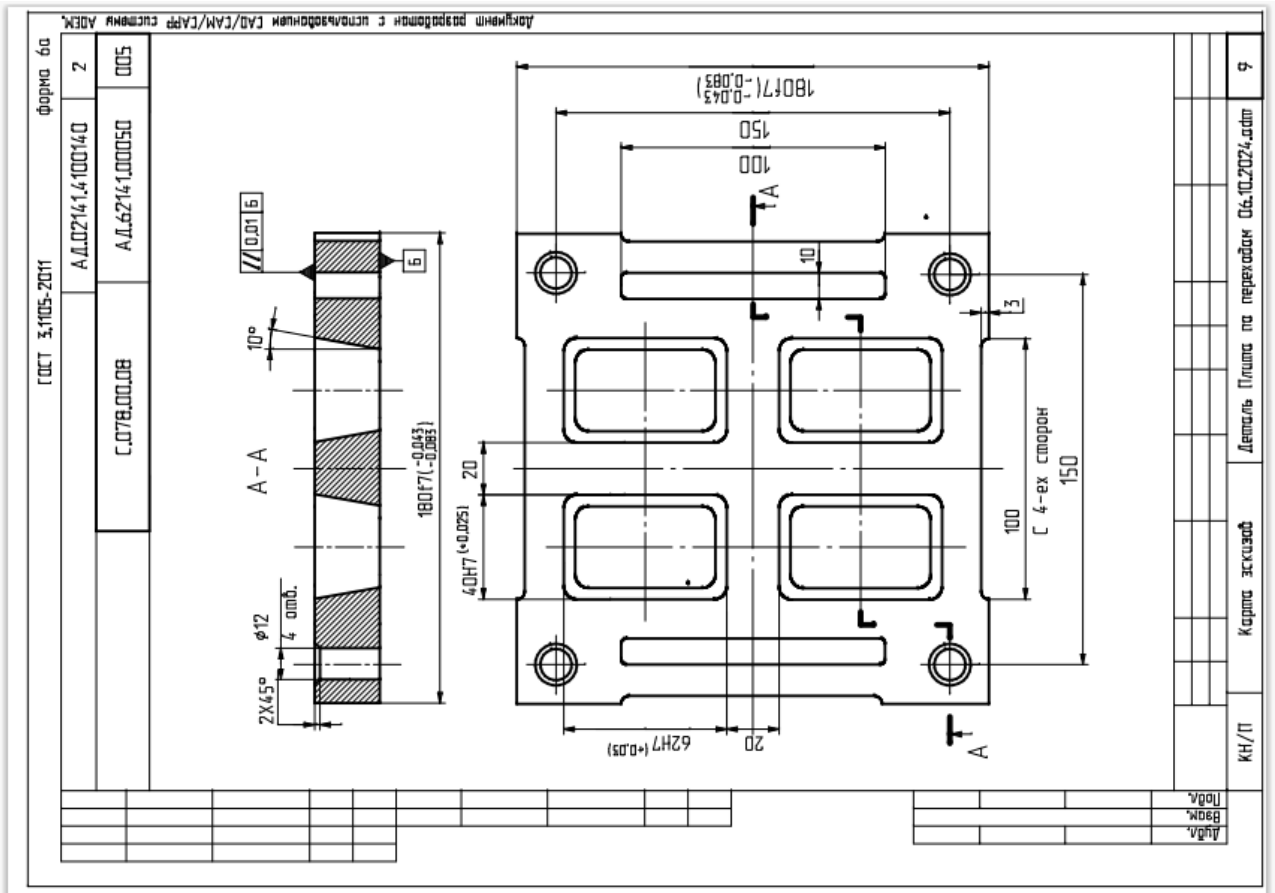
ГОСТ 3.1122-84		Форма 5		
Дубл.				
Взам.				
Подл.				
		1	1	
МГТУ СТАНКИН		С.078.00.08	А.Д.02141.4100340	
Плита				
Разработ. Калашкина И.Е. Проверил Капитанов А.В. Утвердил Т.контр. И.контр.				
с	ИПП	Обозначение ДСЕ		
ф	ИПП	Обозначение комплекта ТД		
г	ИПП	Обозначение ДСЕ		
		Наименование комплекта ТД		
		Классификация		
		Лист	Листов	
		Наименование		
		Примечание		
Г	01	А.Д.40141.4100340	ВТД 2 1	Ведомость технологических документов
	02	А.Д.02141.4100140	ТЛ 1 1	Титульный лист
	03	А.Д.42141.4100142	ВО 3 1	Ведомость оснастки
	04	А.Д.50141.4100141	КТП 4 1	Карта технологического процесса
	05	А.Д.60141.00366	ОК 5 2	Операционная карта (опер.005)
	06	А.Д.20141.00367	КЭ 7 1	Карта эскизов (опер.005)
	07	А.Д.62141.00050	КН/П 8 2	Карта наладки инструмента (опер.005)
	08	А.Д.60141.00370	ОК 10 1	Операционная карта (опер.010)
	09	А.Д.20141.00371	КЭ 11 1	Карта эскизов (опер.010)
	10	А.Д.62141.00372	КН/П 12 1	Карта наладки инструмента (опер.010)
	11	А.Д.46141.4100338	ВОБ 13 1	Ведомость оборудования
	12	А.Д.72141.4100342	ВОП 14 1	Ведомость операций технического контроля
	13		ЛРИ 15 1	Лист регистрации изменений
	14			
	15			
	16			
ВТД		Ведомость технологических документов		Деталь Плита по переходам 06.10.2024.dwg 2

ГОСТ 3.1122-84										Форма 3		
Дubl.												
Взам.												
Подл.												
А.Д.02141.4100140										1		
Разраб.	Колошкова И.Е.			МГТУ СТАНКИН			С.078.00.08			А.Д.42141.4100142		
Проверил	Капитанов А.В.											
Утвердил												
Т.контр.												
Н.контр.												
Плита												
С	НПО	Обозначение ДСЕ			Наименование ДСЕ			КП				
Т	Опер	Обозначение ТО			Наименование ТО							
Т 01	005	7201-0014			1 Тиски ГОСТ 16518-96							
02	010				1 Специальное приспособление							
03	005				1 Новый Зенковка D11 R0 A90 L2.5							
04		2300-3132			1 Сверла ГОСТ 4010-77							
05		2844-0781			1 Фреза φ10 ГОСТ 18948-73							
06	005	2844-0781			1 Фреза φ12 ГОСТ 18948-73							
07	010											
08	010	ШЦ-II-200-0,05			1 Штангенциркуль ГОСТ 166-89							
09	005				1 ПРОГРАММА №1000							
10	010				1 ПРОГРАММА №2000							
11												
12												
13												
14												
15												
16												
ВО												
Ведомость оснастки							Деталь Плита на переходах 06.10.2024.adm				3	

Документ разработан с использованием САД/САМ/САР систем АБЕК.

ГОСТ 3.1404-86										Форма 1								
Дubl.																		
Взам.																		
Подл.																		
А.Д.02141.4100140										1								
Разраб.	Колошкова И.Е.			МГТУ СТАНКИН			С.078.00.08			А.Д.50141.4100141								
Проверил	Капитанов А.В.																	
Утвердил																		
Т.контр.																		
Н.контр.																		
Плита																		
М01	Сталь Х12ВМ ГОСТ 5950-73																	
М02	Код	ЕВ	МД	ЕН	Н.расх	КИМ	Код загот.	Профиль и размеры		КД	МЭ							
	166			1	0					1								
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код наименования операции			Обозначение документа										
Б	Код наименования оборудования							СМ	Проф.	Р	ЧТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Т.л.з.	Тшт.
Р								ПМ	0 или В	Г	Г	Г	Г	Г	Г	С	п	у
03	1 Технические требования																	
04	1.1 Общие технические требования выполнять согласно ОСТ 92-0400-69																	
05																		
06	2 Требования безопасности																	
07	2.1 Требования пожарной безопасности выполнять по ГОСТ 12.1.004-91																	
08																		
А 09	005 4230 ПРОГРАММНАЯ			А.Д.60141.00366; А.Д.20141.00367; А.Д.62141.00050														
Б 10	FIVE 650 Обрабатывающий центр с ЧПУ			15474 2-4		1		10		13,5		25,566						
11																		
12																		
А 13	010 4230 ПРОГРАММНАЯ			А.Д.60141.00370; А.Д.20141.00371; А.Д.62141.00372														
Б 14	FIVE 650 Обрабатывающий центр с ЧПУ			15474 2-4		10		13,5		1,953								
15																		
КТП																		
Карта технологического процесса							Деталь Плита на переходах 06.10.2024.adm				4							

Документ разработан с использованием САД/САМ/САР систем АБЕК.



Дубл.				ГОСТ 3.1404-86		Форма 2	
Взам.				А.Д.02141.4.100140		2 1	
Подл.							
Разраб.	AFR	МГТУ СТАНКИН		С.078.00.08		А.Д.60141.00366	
Проверил	Капитанов А.В.						
Утвердил							
Т.контр.							
Н.контр.							
				Плита		005	
				Наименование операции		Материал	
				ПРОГРАММНАЯ		Сталь Х12ВМ ГОСТ 5950-73	
				Твердость		Профиль и размеры	
				125(НВ)		МЭ КОИД	
				166		1	
				Оборудование, устройства ЧПУ		Обозначение программы	
				FIVE 650 Обрабатывающий центр с ЧПУ; FANUC6G		1000	
				Тв		СОЖ	
				Тв			
				Тпз			
				Тшт.			
				21.8			
				0.431			
				13.5			
				25.566			
Р		ПМ		В	или	В	
0 01	1. Установить заготовку в тиски и закрепить						0.35
Т 02	ПР. 7201-0014 Тиски ГОСТ 16518-96						
03							
0 04	2. Установ1 (АО ВО СО)						
05							
0 06	2.1 Фрезеровать 2 окна по программе						
Т 07	РМ. 2844-0781 Фреза φ10 ГОСТ 18948-73						
Р 08					1	10000	925
09							
0 10	2.2 Фрезеровать 4 колодца по программе						
OK	Операционная карта (опер.005)			Деталь Плита по переходам 06.10.2024.adm			5

Документ разработан с использованием САП/САМ/САРР систем АДЕМ.

ГОСТ 3.1404-86										Форма 2а		
Дубл.												
Взам.												
Подл.												
										АД.02141.4100140	2	
										С.078.00.08	АД.60141.00366	005
Р												
Т 01	РИ. 2844-0781	Фреза	φ12	ГОСТ	18948-73							
Р 02										1	10000	925
О 03												
О 04	2.3	Сверлить	4	сквозных	отверстия	по	программе					
Т 05	РИ. 2300-3132	Сверло	φ12	ГОСТ	4010-77							
Р 06											100	600
О 07												
О 08	2.4	Зенковать	4	фаски	по	программе						
Т 09	РИ. Новый!	Зенковка	D11	RO	A90	L2.5						
Р 10										1	100	600
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
ОК	Операционная карта							Деталь Плита на переходам 06.10.2024.dtm			6	

Документ разработан с использованием САУ/САМ/САРР системы АДЕМ.

Активация Wind

ГОСТ 3.1404-86										Форма 4			
Дубл.													
Взам.													
Подл.													
										АД.02141.4100140	2	1	
Разраб.	Коласкина И.Е.												
Проверил	Капитанов А.В.					МГТУ СТАНКИН		С.078.00.08			АД.62141.00050		
Утвердил													
Т.контр.								Плита				005	
Н.контр.													
У	Опер.	Обозначение детали, программы, оборудования, устройства ЧПУ											
Т	Пер.	ПМ	Вспомогательный и режущий инструмент (код, наименование)					Наладочные размеры		Коррект. разм. НК			
У 01	005		Управляющая программа 1000; Станок FIVE 650 Обрабатывающий центр с ЧПУ; Устройство ЧПУ FANUC6(G)										
Т 02		3	2844-0781	Фреза	φ10	ГОСТ	18948-73						
Т 03		4	2844-0781	Фреза	φ12	ГОСТ	18948-73						
Т 04		3	2300-3132	Сверло	φ12	ГОСТ	4010-77						
Т 05		4	Новый!	Зенковка	D11	RO	A90	L2.5					
06													
07													
08													
09													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
КН/П	Карта наладки инструмента							Деталь Плита на переходам 06.10.2024.dtm			8		

Документ разработан с использованием САУ/САМ/САРР системы АДЕМ.

Дubl.		Взам.		Подл.		ГOCT 3.1404-06		Форма 3		
						AД.02141.4100140		1		
Разрaб.	Кoлaшкaнa И.Е.	MГTУ CТАНKИH		C.078.00.08				AД.60141.00370		
Пpoвepил	Кoпцaнoв A.В.									
Утвepдил										
Т.кoнтp.										
И.кoнтp.								010		
Наименование операции		Материал		Твердость		EB		MD		
ПРОГРАММНАЯ		Сталь X120M ГОСТ 5950-73		125(HB)		166		Профиль и размеры		
Оборудование, устройство ЧПУ		Обозначение программы		Тa		Тb		Тaз		
FIVE 650 Обрабатывающий центр с ЧПУ; FANUC6(G)		2000		0.83		0.868		13.5		
								1.953		
								COЖ		
								M3		
								KOD		
								S		
								n		
								v		
P 01		1. Установить заготовку в приспособление и закрепить						0.62		
T 02		ПР. Специальное приспособление								
03										
P 04		2. Фрезеровать наружный контур по программе								
T 05		PИ. 2844-0701 Фреза φ12 ГОСТ 18948-73								
P 06								10000		
07								925		
P 08		3. Проверить деталь на соответствие требованиям чертежа						Процент контроля 100%.		
T 09		СИ. ШЦ-Ш-200-0.05 Штангенциркуль ГОСТ 166-89								
10										
11										
12										
13										
OK		Операционная карта (опер.010)				Деталь Плита на переходах 06.10.2024.gdm				10

Активация

Дubl.		Взам.		Подл.		ГOCT 3.1404-06		Форма 4		
						AД.02141.4100140		1		
Разрaб.	Кoлaшкaнa И.Е.	MГTУ CТАНKИH		C.078.00.08				AД.62141.00372		
Пpoвepил	Кoпцaнoв A.В.									
Утвepдил										
Т.кoнтp.										
И.кoнтp.								010		
У		Обозначение детали, программы, оборудования, устройства ЧПУ								
Т		Пер.		ПИ		Вспомогательный и режущий инструмент (код, наименование)		Наладочные размеры		
У 01		010		Управляющая программа 2000; Станок FIVE 650 Обрабатывающий центр с ЧПУ; Устройство ЧПУ FANUC6(G)				Коррект. разм. НК		
T 02		1		2844-0701 Фреза φ12 ГОСТ 18948-73						
03										
04										
05										
06										
07										
08										
09										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
KH/П		Карта наладки инструмента				Деталь Плита на переходах 06.10.2024.gdm				12

Документ разработан с использованием САД/САУ/САР системы АБЕН.





## Приложение Е Фрагменты управляющий программ для высокоскоростного фрезерования детали «Плита»

Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
plent00010012.tmp – Блокнот				
%				
O0000				
N1 G21				
( 1 FREZA 2844-0781 D12 GOST 18948-73)				
(0)				
N2 T1 M6				
N3 G54				
N4 G0 A0 C0				
N5 X0 Y0				
N6 G43 Z100 H1				
N7 G96 S925 M3				
N8 Z10				
N9 X187 Y181				
N10 Z-3				
N11 G1 G98 Z-5 F10000				
N12 X186				
N13 Y141				
N14 G17 G2 X183 Y135.804 R6				
N15 G1 Y45.196				
N16 G2 X186 Y40 R6				
N17 G1 Y0				
N18 G2 X180 Y-6 R6				
N19 G1 X139.778				
N20 G2 X134.582 Y-3 R6				
N21 G1 X45.196				
N22 G2 X40 Y-6 R6				
N23 G1 X0				
N24 G2 X-6 Y0 R6				
N25 G1 Y41				
N26 G2 X-3 Y46.196 R6				
N27 G1 Y135.804				
N28 G2 X-6 Y141 R6				
N29 G1 Y181				
N30 G2 X0 Y187 R6				
N31 G1 X40				
N32 G2 X45.196 Y184 R6				
N33 G1 X134.837				
plent00010006.tmp – Блокнот				
%				
O1000				
N1 G21				
( 3 FREZA 2844-0781 D10 GOST 18948-73)				
(0)				
N2 T3 M6				
N3 G54				
N4 G0 A0 C0				
N5 X0 Y0				
N6 G43 Z100 H3				
N7 S2000 M3				
N8 Z10				
N9 X144.537 Y12.181				
N10 Z2				
N11 G1 G98 Z-25.5 F300				
N12 G0 Z2				
N13 Y16.982				
N14 G1 Z-25.5				
N15 G0 Z2				
N16 Y21.784				
N17 G1 Z-25.5				
N18 G0 Z2				
N19 Y26.585				
N20 G1 Z-25.5				
N21 G0 Z2				
N22 Y31.386				
N23 G1 Z-25.5				
N24 G0 Z2				
N25 Y36.187				
N26 G1 Z-25.5				
N27 G0 Z2				
N28 Y40.988				
N29 G1 Z-25.5				
N30 G0 Z2				
N31 Y45.789				
N32 G1 Z-25.5				
N33 G0 Z2				
N34 Y50.59				

## Приложение Ж Цифровой двойник технологического процесса высокоскоростной обработки детали «Плита» на станке с ЧПУ

Деталь: С.078.00.08[Плита]

1 Технологический процесс механической обработки Обозначение: С.078.00.08 Наименование: Плита

- Комплектовочная карта Примечание: 1. Для создания нового элемента комплектовочной карты: - Нажмите правую к
- Технические требования Примечание: Для создания нового технического требования 1. Встаньте на объект и нажми
- Общие технические требования выполнять согласно ОСТ 92-0400-69
- Требования безопасности Примечание: Для создания нового требования безопасности 1. Встаньте на объект и нажм
- Требования пожарной безопасности выполнять по ГОСТ 12.1.004-91
- 005 ПРОГРАММНАЯ FIVE 650 Обрабатывающий центр с ЧПУ Тпз на организационную подготовку T=10мин. : Пол
- Лист эскиза карты наладки Примечание: Для создания эскиза встаньте на объект и нажмите кнопку "Эскиз" н
- SAM Эксперт 3D v01.09.01.2023 (26/09/2023 22:48:33) Тип обработки: Фрезерование Параметры: Dmax=32 Hm
- Инструменты[4]
- Блок 181x182x26
- 1. Установить заготовку в тиски и закрепить
- 2. Установ1 (A0 B0 C0)
  - Нач. точка обработки
  - Безопасная позиция
  - Плоскость холостых ходов
  - 2.1 Фрезеровать 2 окна по программе
    - #3 Фреза 2844-0781 D10 ГОСТ 18948-73
    - Место обработки
  - 2.2 Фрезеровать 4 колодца по программе
    - #4 Фреза 2844-0781 D12 ГОСТ 18948-73
    - Место обработки
    - Колодец
  - 2.3 Сверлить 4 сквозных отверстия по программе
    - #3 Сверло 2300-3132 ГОСТ 4010-77
    - Место обработки
    - Отверстие
  - 2.4 Зенковать 4 фаски по программе
    - #4 Новый! Зенковка D11 R0 A90 L2.5
    - Место обработки
- 010 ПРОГРАММНАЯ FIVE 650 Обрабатывающий центр с ЧПУ Тпз на организационную подготовку T=10мин. : Пол
- Начальная точка обработки
- Безопасная позиция
- Плоскость холостых ходов
- 1. Установить заготовку в приспособление и закрепить
  - Специальное приспособление
- 2. Фрезеровать наружный контур по программе
  - #1 Фреза 2844-0781 D12 ГОСТ 18948-73
  - Место обработки
  - Стенка
- 3. Проверить деталь на соответствие требованиям чертежа
  - Штангенциркуль ШЦ-II-200-0,05 ГОСТ 166-89

**Приложение 3 Справка об использовании результатов  
диссертационного исследования от ООО «АДЕМ-инжиниринг»**

«УТВЕРЖДАЮ»



Генеральный директор  
ООО «АДЕМ-инжиниринг»  
Силин Виктор Викторович

**СПРАВКА**

об использовании в проектной технологической деятельности  
результатов диссертационной работы Колошкиной Инны Евгеньевны  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Результаты диссертационной работы Колошкиной Инны Евгеньевны на тему «Повышение эффективности технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ» применяются ООО «АДЕМ-инжиниринг» (г. Москва) в качестве Приложения к интегрированной конструкторско-технологической программе автоматизированного проектирования отечественной разработки ADEM CAD/CAM/CAPP, версия 9.05. Автоматизированные решения проектных задач для разработки операций высокоскоростного фрезерования – определение условий послойного 2,5-координатного фрезерования объемных изделий, рациональное управление контурным фрезерованием с переменным по величине припуском и плунжерного фрезерования, рассмотренные в диссертационном исследовании автора используются при разработке технологий и управляющих программ при проектировании высокоскоростной фрезерной обработки в системе ADEM CAD/CAM/CAPP. Результаты исследований сокращают время технологического проектирования и обеспечивают качество обрабатываемой поверхности на стадии подготовки производства. Программные комплексы с применением разработанных автоматизированных решений проектных задач автора поставлены и успешно эксплуатируются на ряде предприятий (ЗАО ЗЭМ РКК Энергия, ПАО Завод Красное Знамя и др.)

Советник Генерального директора  
ООО «АДЕМ-инжиниринг»  
Феоктистов Виталий Юрьевич

**Приложение И Акт об использовании результатов  
диссертационного исследования от АО «Компрессор»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

АО «КОМПРЕССОР»

Сирченко Александр Владимирович



**АКТ**

об использовании результатов диссертационной работы  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
Колошкиной Инны Евгеньевны

Результаты диссертационной работы Колошкиной Инны Евгеньевны на тему «Повышение эффективности технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ» приняты к использованию на АО «КОМПРЕССОР» (г. Санкт-Петербург) и применяются в технологических службах предприятия при разработке технологий и управляющих программ для обработки на станках с ЧПУ. Это позволило сократить время технологической подготовки производства изготовления деталей насосов и компрессоров, выпускаемых предприятием. Увеличение объемов выполненных проектных работ составило 36% от ранее выполняемых объемов за тот же период. Применение на производстве технологий высокоскоростного фрезерования по результатам выполненных автором исследований увеличило производительность выпуска продукции на 48%.

Использование результатов диссертационной работы Колошкиной И.Е. по оценке эффективности действующего производства позволяет вести оперативное управление выпуском продукции в номенклатуре, объемах и сроках согласно планируемым показателям.

Главный технолог АО «Компрессор»

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Шарапов'.

М. М. Шаратов

## Приложение К Акт об использовании результатов диссертационного исследования от ООО «Миракс»



**ООО «Миракс»**  
ИНН / КПП 5920040229 / 592001001  
617764, Пермский край, г. Чайковский,  
ул. Ленина, д.61А  
Телефон: +7 (342) 259-88-55  
Эл.почта: info@mirax-safety.com

### АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
Колошкиной Инны Евгеньевны

Настоящим актом подтверждаю, что результаты диссертационной работы Колошкиной Инны Евгеньевны на тему «Повышение эффективности технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ» внедрены и используются на ООО «Миракс» (обособленное подразделение «Производство» г. Москва) на производстве при обработке изделий для предприятий газовой промышленности на станках с ЧПУ.

Применение операций высокоскоростного фрезерования, разработанных по результатам исследований автора, обеспечило при обработке отдельных изделий снижение затрат на обработку до 8 раз и увеличение производительности обработки до 12 раз.

Использование результатов диссертационной работы Колошкиной И.Е. по оценке эффективности действующего производства позволило вести оперативное управление выпуском продукции в номенклатуре, объемах и сроках согласно планируемых показателей.

В целом повышение объемов выпуска продукции на участке, оснащенном автоматизированным оборудованием с программным управлением за текущий период составило 148% по сравнению с аналогичными периодами, предшествующими внедрению выполненных исследований.

Директор по производству

Борисов С.В.



**Приложение Л Акт об использовании результатов диссертационного исследования от АО «Ярославский завод дизельной аппаратуры»**



АО «Ярославский завод  
дизельной аппаратуры»  
150999, г. Ярославль,  
проспект Машиностроителей, д. 81  
Тел.: +7 (4852) 40-60-01  
Факс: +7 (4852) 24-25-00  
SecrDirYZDA@gaz.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

АО «Ярославский завод дизельной аппаратуры»  
Директор по развитию  
С.А. Шустров \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024



**АКТ**

об использовании результатов диссертационной работы  
Колошкиной Инны Евгеньевны

Настоящим актом подтверждаю, что результаты диссертационной работы Колошкиной Инны Евгеньевны на тему «Повышение эффективности технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ» внедрены и используются на АО «Ярославский завод дизельной аппаратуры» при технологической подготовке производства на стадии проектных работ и на производстве при обработке деталей ТНВД на станках с ЧПУ.

1. При выполнении технологических проектных работ по методикам автора в системе ADEM CAD/CAM/CAPP при разработке технологий и программ для изготовления корпусных деталей дизелей на станках с ЧПУ, сокращается время проектирования, закладываются основные параметры качества обрабатываемых поверхностей и эффективности реализации технологических процессов. Сокращение времени проектирования позволило структурному подразделению до 42% увеличить объемы выполнения проектных работ за отчетный период.

2. Применение операций высокоскоростного фрезерования корпусных деталей дизелей, разработанных по результатам исследований автора, обеспечило при обработке отдельных изделий снижение затрат обработки до 10 раз и увеличение производительность обработки до 15 раз.

Главный технолог АО «ЯЗДА» \_\_\_\_\_

С.С. Верещагин



**Приложение М Справка об использовании результатов  
диссертационного исследования в подготовке специалистов от ООО «ДиСис»**



Адрес: 119313, г. Москва, Ленинский проспект,  
д.95, эт.цок., пом.Х, оф.10  
Тел./факс: +7(495) 229-11-17  
Электронная почта: sale@disys.ru  
Сайт: www.disys.ru

**СПРАВКА**

об использовании в учебном процессе  
результатов диссертационной работы Колошкиной Инны Евгеньевны  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Результаты диссертационной работы Колошкиной Инны Евгеньевны на тему «Повышение эффективности технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ» используются на предприятии выпускающем учебное оборудование с ЧПУ ООО «Дидактические Системы» (г. Москва) при подготовке преподавателей учебных заведений высшего и среднего профессионального образования на курсах повышения квалификации по направлению автоматизация технологической проектной деятельности и реализации технологических решений на станках с ЧПУ. Колошкина И.Е. подготовила необходимое методическое обеспечение учебного процесса на основе выполненных ею диссертационных исследований и проводит занятия на высоком учебно-методическом уровне.

Генеральный директор  
ООО «ДиСис»



Ю.С. Гольденштейн

ИНН 7736332791 / КПП 773601001 ОГРН 1217700033638

Банковские реквизиты: р/с 40702810942030000671 Филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО) в г. Москве к/с 30101810145250000411  
в ГУ Банка России по ЦФО БИК 044525745

**Приложение Н Справка об использовании в учебном процессе результатов  
диссертационной работы от ФГБОУ ВО Брянский государственный  
университет им. ак. И. Г. Петровского**


**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
**БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ИМЕНИ АКАДЕМИКА И. Г. ПЕТРОВСКОГО**  
(БГУ)  
Бежицкая ул., д. 14, Брянск, 241036.  
Тел. (4832) 66-65-38. Факс (4832) 66-63-53  
E-mail: [bryanskgu@mail.ru](mailto:bryanskgu@mail.ru)  
<http://www.brgu.ru>  
18.10.2024 № 22.2237  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

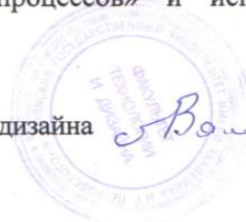
**СПРАВКА**

об использовании в учебном процессе  
результатов диссертационной работы Колошкиной Инны Евгеньевны  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Результаты диссертационной работы Колошкиной Инны Евгеньевны на тему «Повышение эффективности технологической подготовки производства изделий машиностроения на основе автоматизации решения проектных задач при высокоскоростной фрезерной обработке на станках с ЧПУ» используются в учебном процессе на кафедре «Профессионально - технологического образования и безопасности жизнедеятельности» Брянского государственного университета имени академика И.Г. Петровского при подготовке кадров по квалификации - бакалавриат по специальности «44.03.04 Профессиональное обучение, профиль: Информатика и вычислительная техника» по учебному предмету «Системы автоматизированного проектирования».

Для методического обеспечения занятий Колошкина И.Е., по результатам выполненных ею исследований разработала и издала линейку учебников из 4 наименований, все учебники прошли экспертизу и рекомендованы Экспертным советом учебно-методическим объединения в системе высшего образования в качестве учебного пособия для бакалавриата и магистратуры по направленности «Автоматизация технологических процессов» и используются в учебном процессе.

ВРИО декана факультета технологии и дизайна  В.П. Лямцев





## Приложение О Справки об использовании разработанных и изданных учебных пособий в образовательных учебных заведениях

ПОВЫШАЕМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ В РОССИИ



Образовательная платформа ЮРАЙТ  
Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС77-53549  
Образовательная лицензия № 039822  
Адрес: 111123, г.Москва, ул.Плеханова, д.4А  
E-mail: gred@urait.ru

Телефон: +7 (495) 744 00 12

Образовательная платформа: urait.ru

г. Москва

11 Января 2023 г.

### Справка

*Колошкина Инна Евгеньевна (Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (г. Брянск).) является автором следующего произведения, опубликованного в Издательстве «Юрайт» (приведены выходные данные последнего издания):*

*Автоматизация проектирования технологической документации : учебник и практикум для среднего профессионального образования / И. Е. Колошкина. — Москва : Издательство Юрайт, 2023. — 371 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-13635-7.*

В рамках формирования национальной цифровой экономики и реализации приоритетов в сфере образования (Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017г. № 203 «О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы), а также в соответствии с Паспортом федерального проекта «Кадры для цифровой экономики» (утвержден президиумом Правительственной комиссии по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности - протокол от 28 мая 2019 г. №9) и требованиями действующих федеральных государственных образовательных стандартов цифровая версия произведения представлена на Образовательной платформе «Юрайт» (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013620832 от 15.07.2013г., Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2013615800 от 20.06.2013г., Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77-78116 от 13.03.2020 в составе цифрового учебно-методического комплекса (ЦУМК):

<https://urait.ru/book/9DED134E-427A-4EF4-BC26-E1AA2182B9EB>

На дату предоставления справки к цифровой версии произведения имеют одновременный доступ 3341725 студентов из 776 учебных заведений (Приложение 1), кроме того реализовано 111 печатных и 1 цифровой экземпляр произведения.

Директор



Рыбкина Н. В.

ПОВЫШАЕМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ В РОССИИ



Образовательная платформа ЮРАЙТ  
Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС77-53549  
Образовательная лицензия № 039822  
Адрес: 111123, г.Москва, ул.Плеханова, д.4А  
E-mail: gred@urait.ru

Телефон: +7 (495) 744 00 12

Образовательная платформа: urait.ru

г. Москва

10 Января 2023 г.

### Справка

*Колошкина Инна Евгеньевна (Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (г. Брянск).)* является автором следующего произведения, опубликованного в Издательстве «Юрайт» (приведены выходные данные последнего издания):

*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.*

В рамках формирования национальной цифровой экономики и реализации приоритетов в сфере образования (Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017г. № 203 «О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы), а также в соответствии с Паспортом федерального проекта «Кадры для цифровой экономики» (утвержден президиумом Правительственной комиссии по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности - протокол от 28 мая 2019 г. №9) и требованиями действующих федеральных государственных образовательных стандартов цифровая версия произведения представлена на Образовательной платформе «Юрайт» (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013620832 от 15.07.2013г., Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2013615800 от 20.06.2013г., Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77-78116 от 13.03.2020 в составе цифрового учебно-методического комплекса (ЦУМК):

<https://urait.ru/book/8A6080EA-29AE-49C2-8397-27420D40AB90>

На дату предоставления справки к цифровой версии произведения имеют одновременный доступ 2708975 студентов из 468 учебных заведений (Приложение 1), кроме того реализовано 66 печатных и 8 цифровых экземпляров произведения.

Директор



Рыбкина Н. В.