

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Смирнов Анатолий Васильевич

Оптимизация процесса обработки материала на станках с ЧПУ

Направление подготовки 01.04.02
«Прикладная математика и информатика»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная математика» ФГБОУ ВО Комсомольский-на-Амуре государственный университет
Козлова Ольга Викторовна

Рецензент: кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационной безопасности, информационных систем и физики ФГБОУ ВО «АмГПУ»
Анисимов Антон Николаевич

Защита состоится 19 июня 2026 года в 9 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 01.04.02 «Прикладная математика и информатика» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681000, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 203/5. Автореферат разослан 5 июня 2026 г.

Автореферат разослан 5 июня 2026 г.

Секретарь ГЭК

Д.В. Чернышова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы заключается в том, что на сегодняшний день не существует программного решения, которое позволяло бы в автоматическом режиме выполнять комплексную оптимизацию процесса обработки материала на станках с ЧПУ, учитывая параметры оборудования, инструмента, материала заготовки и технологические ограничения. Отсутствие подобных систем приводит к увеличению времени технологической подготовки производства, снижению эффективности использования инструмента и необходимости выполнения большого количества расчётов вручную.

Целью исследования является разработка прототипа программного комплекса для оптимизации процесса фрезерной обработки на станках с ЧПУ, включающего: формирование единой базы инструментов и материалов; математическую модель износа режущего инструмента как критерия оптимизации; модуль подбора режимов резания с учётом технологических ограничений; механизм оценки эффективности оптимизации и генерации отчётности.

Для достижения цели решаются следующие *задачи*:

1. Проанализировать существующие программные решения.
2. Построить математико-аналитическую модель.
3. Разработать алгоритм расчёта параметров резания.
4. Реализовать модуль оптимизации режимов обработки для минимизации износа при заданных производственных ограничениях.
5. Создать программное приложение, реализующее поэтапный сценарий.

Объектом исследования является процесс фрезерной обработки материалов станках с ЧПУ и технологическая подготовка производства.

Предметом исследования являются методы математического моделирования, оптимизации и программной реализации подбора режимов резания, обеспечивающих снижение износа режущего инструмента.

Научная новизна исследования.

1. Комплексная методика формирования единой базы данных для задач оптимизации режимов обработки с учётом параметров цеха, станка, инструмента и заготовки.

2. Модуль комбинированной модели износа, объединяющей эмпирические и механистические составляющие, используемый в качестве целевой функции при многовариантной оптимизации режимов резания.

3. Подход интеграции экспериментальных таблиц и результатов измерений в автоматизированный отчётный модуль приложения для воспроизводимой документации черед работ.

Достоверность и обоснованность результатов исследования достигается путём использования проверенных теоретических моделей, подборки параметров из отраслевой литературы и производителей инструментов, а также валидации на доступных экспериментальных данных и тестовых сценариях.

Практическая значимость работы заключается в разработке программного комплекса, обеспечивающего расчёт и оптимизацию режимов резания, прогнозирование износа инструмента и формирование отчётной документации для поддержки технологических решений.

Магистерская диссертация состоит из введения, общей характеристики, трёх глав, заключения, списка использованных источников. Объем работы – 73 страницы, в том числе 21 рисунка, 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, представлены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе выполнен анализ предметной области и существующих программных решений, применяемых для технологической подготовки производства и выбора режимов обработки на станках с числовым программным управлением. Рассмотрены особенности процесса механической обработки материалов, факторы, влияющие на эффективность технологического процесса, а также современные подходы к автоматизации расчёта технологических параметров.

Проведён сравнительный анализ существующих программных решений, включая системы управления инструментальным хозяйством Zoller Tool Management Solutions, программный комплекс CGTech Vericut и цифровые сервисы компании Sandvik Coromant. Анализ показал, что существующие решения ориентированы на выполнение отдельных задач технологической подготовки производства и не обеспечивают комплексного подхода к автоматизации расчёта и оптимизации параметров обработки в рамках единой программной системы.

На основании проведённого анализа сформулированы требования к разрабатываемому программному комплексу, определены его основные функциональные возможности, разработана функциональная схема будущего решения (рисунок 1).

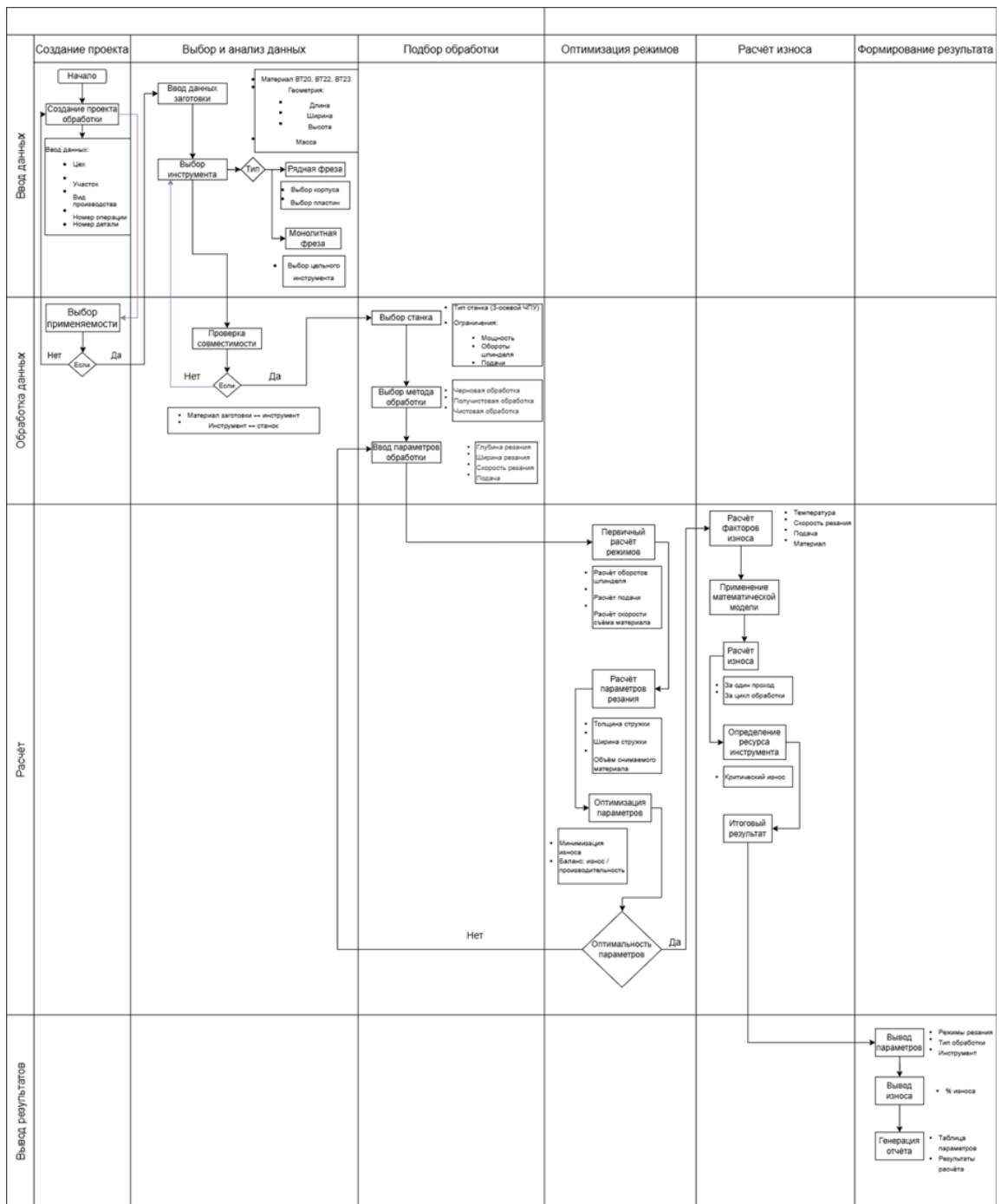


Рисунок 1 – Функциональная схема программного комплекса оптимизации процесса обработки материала на станках с ЧПУ

Во второй главе рассмотрены теоретические основы оптимизации процесса обработки материала на станках с ЧПУ. Выполнен анализ факторов, влияющих на эффективность обработки, исследовано влияние технологических параметров на производительность процесса и условия работы режущего инструмента.

Особое внимание уделено исследованию влияния скорости резания, подачи, глубины и ширины резания на эффективность обработки и стойкость инструмента. Рассмотрены особенности обработки титановых сплавов и влияние геометрических параметров инструмента на характеристики процесса резания.

На основе проведённого анализа разработана математическая модель оптимизации процесса обработки материала. Модель включает систему технологических ограничений, целевую функцию оптимизации и штрафную функцию, обеспечивающую учёт ограничений оборудования и инструмента. Разработанная модель позволяет выполнять поиск рациональных параметров обработки с учётом заданных условий технологического процесса.

В качестве критерия оптимизации используется целевая функция, учитывающая основные показатели эффективности процесса обработки. С помощью этой функции можно оценить, насколько оптимально выбран режим обработки, и решение, которое даст компромисс между производительностью и тем, как долго проработает инструмент. Целевая функция оптимизации имеет вид:

$$J_{\text{нач}} = \lambda \frac{T}{T_0} + (1 - \lambda) \frac{W}{W_0},$$

где $J_{\text{нач}}$ – целевая функция (начальная), T – время обработки (мин); T_0 – время исходного режима (мин); W – прогнозируемый износ инструмента (%); W_0 – износ исходного режима (%); λ – весовой коэффициент (%).

Для исключения решений, нарушающих технологические ограничения, в модель вводится штрафная функция. При превышении допустимых значений параметров обработки значение штрафа возрастает, что делает такие режимы невыгодными для алгоритма оптимизации. Штрафная функция:

$$P = \rho_h \left(\max\left(0, \frac{h - h_{\text{доп}}}{h_{\text{доп}}}\right) \right)^2 + \rho_a \left(\max\left(0, \frac{a_p - a_{p,\text{доп}}}{a_{p,\text{доп}}}\right) \right)^2 + \rho_F \left(\max\left(0, \frac{F - F_{\text{max}}}{F_{\text{max}}}\right) \right)^2,$$

где P – штрафная функция; h – максимальная толщина стружки (мм); a_p – глубина резания (мм); F – минутная подача (мм/мин).

Итоговая функция формируется путём суммирования целевой и штрафной функций:

$$J = J_{\text{нач}} + P;$$

$$J = W \rightarrow \min.$$

Ограничения задают диапазоны изменения оптимизируемых параметров и исключают варианты режимов, которые не могут быть реализованы на практике. Ограничения модели:

$$V_{c,\min} \leq V_c \leq V_{c,\max};$$

$$f_{z,\min} \leq f_z \leq f_{z,\max};$$

$$a_{e,\min} \leq a_e \leq a_{e,\max};$$

$$a_p \leq a_{p,\max}.$$

где f_z – подача на зуб (мм); V_c – скорость резания (мм/мин); a_e – ширина резания (мм).

Для количественной оценки износа инструмента используется интегральная модель, основанная на модифицированном уравнении Тейлора и учитывающая влияние режимов резания, охлаждения, врезаний, поворотов и типа обработки. Мгновенная скорость износа $k(\tau)$ описывается степенной зависимостью:

$$k(\tau) = k_0 \cdot V_c^\alpha \cdot f_z^\beta \cdot \alpha_p^\gamma \cdot \alpha_e^\delta \cdot K_{\text{cool}} \cdot K_{\text{plunge}} \cdot K_{\text{turn}} \cdot K_{\text{profile}},$$

где k_0 – эмпирический коэффициент; K_{cool} – коэффициент охлаждения; K_{plunge} – коэффициент, учитывающий дополнительные нагрузки при врезаниях; K_{turn} – коэффициент, учитывающий повороты инструмента на траектории; K_{tprofile} – коэффициент вида обработки, $\alpha = 1,5$; $\beta = 0,8$; $\gamma = 0,3$; $\delta = 0,2$ – показатели степеней;

Текущий износ $V_B(t)$ вычисляется как:

$$V_B(t) = V_{B0} + \int_0^t k(\tau) d\tau.$$

В результате математическая модель, включает: систему ограничений, целевую функцию и механизм штрафов за нарушение технологических

требований. Разработанная модель позволяет выполнять поиск оптимальных режимов обработки.

В третьей главе представлена программная реализация разработанного решения. Программный комплекс реализован в среде C# Windows Forms и предназначен для автоматизации основных этапов технологической подготовки производства.

Разработанное приложение обеспечивает последовательный ввод технологических данных, выбор оборудования, инструмента и материала заготовки, проверку совместимости выбранных элементов, расчёт параметров обработки, выполнение оптимизации режимов резания и анализ полученных результатов. В работе описана структура программного комплекса, реализованные алгоритмы расчёта и оптимизации, а также особенности взаимодействия отдельных модулей приложения. Для хранения и обработки технологической информации используется база данных, содержащая сведения о станках, инструментах, материалах и параметрах обработки.

В ходе тестирования программного комплекса выполнено сравнение исходных и оптимизированных режимов обработки. Полученные результаты показали работоспособность разработанного алгоритма и возможность повышения эффективности процесса обработки за счёт автоматизированного выбора рациональных технологических параметров. На рисунке 2 и 3 представлены результаты работы программного комплекса до и после выполнения процедуры оптимизации.

Шаг 5: Пргноз износа инструмента

<p>1. Оптимальный метод обработки</p> <p>Метод: <input type="text" value="Планировка"/></p> <p>Тип траектории: <input type="text" value="Профиль"/></p> <p>Проходы по ширине Y:</p> <p>Количество проходов: <input type="text" value="3"/> шт.</p> <p>Шаг между проходами: <input type="text" value="45"/> %</p>	<p>2. Параметры обработки</p> <p>Глубина обр. по Z: <input type="text" value="1"/> мм</p> <p>Ширина обр. по Y: <input type="text" value="40"/> мм</p> <p>Длина обр. по X: <input type="text" value="120"/> мм</p>	<p>Шифр Фр: <input type="text" value="MT190-032W32R04BC"/></p> <p>Тип: <input type="text" value="Сборная"/></p> <p>Диаметр: <input type="text" value="32"/></p> <p>Зубья: <input type="text" value="4"/></p> <p>Материал Фр: <input type="text" value="HCS35X"/></p> <p>Радиус Фр: <input type="text" value="4"/></p> <p>Длина р.ч: <input type="text" value="36"/></p> <p>Вылет: <input type="text" value="115"/></p> <p>Шифр пласт: <input type="text" value="BDMT10T320ER"/></p> <p>Материал Пл: <input type="text" value="HCS35X"/></p> <p>Кол-во пл: <input type="text" value="4"/></p> <p>Радиус пл: <input type="text" value="4"/></p>
<p>3. Опт. подачи и режимы</p> <p>Скорость резания (Vc): <input type="text" value="35"/> мм/мин</p> <p>Подача на зуб (fz): <input type="text" value="0.104"/> мм/зуб</p> <p>Подача (F): <input type="text" value="145.318"/> мм/мин</p> <p>Обороты шпинделя (n): <input type="text" value="348.151"/> об/мин</p>	<p>4. Опт. врезание и отвод</p> <p>Тип врезания: <input type="text" value="Дуга"/></p> <p>Радиус дуги: <input type="text" value="8"/> мм</p> <p>Угол дуги: <input type="text" value="90"/> °</p> <p>Угол погружения: <input type="text" value="2"/> °</p> <p>Тип отвода: <input type="text" value="Дуга"/></p> <p>Радиус дуги: <input type="text" value="8"/> мм</p> <p>Угол дуги: <input type="text" value="90"/> °</p> <p>Угол погружения: <input type="text" value="2"/> °</p>	<p>Результат прогноза</p> <p>Прогнозируемый износ инструмента: <input type="text" value="0.511"/> %</p> <p>Рекомендация: <input type="text" value="Износ в допустимой зоне."/></p>
<p>Длина траектории</p> <p>Путь на врезание: <input type="text" value="42"/> мм</p> <p>Путь на отвод: <input type="text" value="42"/> мм</p> <p>Скругление в углах: <input type="text" value="1"/> мм</p> <p>Общая длина траектории: <input type="text" value="642.8"/> мм</p>	<p>Время обработки</p> <p>Толщина стружки: <input type="text" value="0.07"/> мм</p> <p>Общее время обработки: <input type="text" value="4.423"/> мин</p>	

Назад Выход **Рассчитать процент износа**

Рисунок 2 – Результаты расчёта исходного режима обработки

Шаг 5: Пргноз износа инструмента

<p>1. Оптимальный метод обработки</p> <p>Метод: <input type="text" value="Планировка"/></p> <p>Тип траектории: <input type="text" value="Профиль"/></p> <p>Проходы по ширине Y:</p> <p>Количество проходов: <input type="text" value="2"/> шт.</p> <p>Шаг между проходами: <input type="text" value="30"/> %</p>	<p>2. Параметры обработки</p> <p>Глубина обр. по Z: <input type="text" value="1"/> мм</p> <p>Ширина обр. по Y: <input type="text" value="40"/> мм</p> <p>Длина обр. по X: <input type="text" value="120"/> мм</p>	<p>Шифр Фр: <input type="text" value="MT190-032W32R04BC"/></p> <p>Тип: <input type="text" value="Сборная"/></p> <p>Диаметр: <input type="text" value="32"/></p> <p>Зубья: <input type="text" value="4"/></p> <p>Материал Фр: <input type="text" value="HCS35X"/></p> <p>Радиус Фр: <input type="text" value="4"/></p> <p>Длина р.ч: <input type="text" value="36"/></p> <p>Вылет: <input type="text" value="115"/></p> <p>Шифр пласт: <input type="text" value="BDMT10T320ER"/></p> <p>Материал Пл: <input type="text" value="HCS35X"/></p> <p>Кол-во пл: <input type="text" value="4"/></p> <p>Радиус пл: <input type="text" value="4"/></p>
<p>3. Опт. подачи и режимы</p> <p>Скорость резания (Vc): <input type="text" value="25"/> мм/мин</p> <p>Подача на зуб (fz): <input type="text" value="0.5"/> мм/зуб</p> <p>Подача (F): <input type="text" value="497.359"/> мм/мин</p> <p>Обороты шпинделя (n): <input type="text" value="248.68"/> об/мин</p>	<p>4. Опт. врезание и отвод</p> <p>Тип врезания: <input type="text" value="Дуга"/></p> <p>Радиус дуги: <input type="text" value="12"/> мм</p> <p>Угол дуги: <input type="text" value="90"/> °</p> <p>Угол погружения: <input type="text" value="1"/> °</p> <p>Тип отвода: <input type="text" value="Дуга"/></p> <p>Радиус дуги: <input type="text" value="12"/> мм</p> <p>Угол дуги: <input type="text" value="90"/> °</p> <p>Угол погружения: <input type="text" value="1"/> °</p>	<p>Результат прогноза</p> <p>Прогнозируемый износ инструмента: <input type="text" value="9.307"/> %</p> <p>Рекомендация: <input type="text" value="Критическая перегрузка режущей"/></p>
<p>Длина траектории</p> <p>Путь на врезание: <input type="text" value="66"/> мм</p> <p>Путь на отвод: <input type="text" value="66"/> мм</p> <p>Скругление в углах: <input type="text" value="1"/> мм</p> <p>Общая длина траектории: <input type="text" value="535"/> мм</p>	<p>Время обработки</p> <p>Толщина стружки: <input type="text" value="0.484"/> мм</p> <p>Общее время обработки: <input type="text" value="1.076"/> мин</p>	

Назад Выход **Рассчитать процент износа**

Рисунок 3 – Результаты расчёта оптимизированного режима обработки

В исходном режиме используются параметры обработки, назначенные пользователем или полученные на основе справочных данных. После выполнения оптимизации программа автоматически подбирает значения технологических параметров, обеспечивающие более эффективные условия обработки с учётом заданных ограничений оборудования и инструмента.

Сравнение результатов показало, что разработанный алгоритм позволяет выбирать более рациональные режимы обработки и снижать прогнозируемый износ режущего инструмента при сохранении требуемой производительности технологического процесса.

В заключении приведены основные результаты исследования, выполнен анализ полученных результатов оптимизации процесса обработки материала на станках с ЧПУ и проведено их сравнение с существующими программными решениями, используемыми для технологической подготовки производства и расчёта режимов резания.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1 Смирнов, А.В. АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ/ А.В. Смирнов, О.В. Козлова // материалы 8-й всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. 2025. – С. 549-552.

2 Смирнов, А.В. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ / А.В. Смирнов, О.В. Козлова // материалы 9-й всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. 2026. – С. 349-352.