

На правах рукописи



КУЗНЕЦОВА Елена Михайловна

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ  
ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ  
ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена  
в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении  
высшего образования  
«Курганский государственный университет»

**Научный руководитель**

**Овсянников Виктор Евгеньевич**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», профессор кафедры «Машиностроение» (г. Курган)

**Официальные оппоненты**

**Чигиринский Юлий Львович**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Технология машиностроения» (г. Волгоград)

**Нагоркин Максим Николаевич**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» (г. Брянск)

**Ведущая организация**

ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» (г. Омск)

Защита состоится 19 декабря 2024 года в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 в ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» и на официальном сайте университета [www.istu.edu](http://www.istu.edu).

Автореферат разослан «01» ноября 2024 года.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим выслать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНИТУ; Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.

Е-mail: [vulix2011@yandex.ru](mailto:vulix2011@yandex.ru)

Тел./факс: (3952) 40-51-17.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
к.т.н., доцент

Н.В. Вулых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Традиционно обеспечение точности и качества обработки на оборудовании с числовым программным управлением базируется на том, что станок предварительно настраивается таким образом, что требуемые выходные параметры процесса получаются автоматически. Наиболее широко используемые системы управления предполагают, что станок работает по циклу без возможности контроля за процессом (в частности, за состоянием режущего инструмента и изменением выходных параметров процесса обработки из-за износа резца). Чаще всего эта функция возлагается на оператора. В последнее время все более широкое распространение получают системы мониторинга оборудования, которые позволяют оценивать состояние станка, его загрузку и т.д. В качестве дальнейшей перспективы развития такой концепции рассматривается часть методологического подхода индустрии 4.0: концепция цифровых двойников. Уже сегодня применение цифровых двойников позволяет повысить эффективность эксплуатации оборудования и исключить аварийные ситуации на основе прогнозирования их наступления. Однако применяемые решения распространены в основном на медленно протекающие во времени процессы, кроме того, вопросы обработки информации в решении указанных выше задач все равно возложены на человека. Обработка же заготовок из закаленных сталей как раз сопровождается интенсивным изнашиванием режущего инструмента. Во многом это является причиной того, что шероховатость обработанных деталей отличается высокой нестабильностью.

Для решения проблемы обеспечения качества поверхностного слоя при обработке на станках с ЧПУ необходимо, прежде всего, иметь надежный источник информации, который позволяет оценивать выходные параметры процесса. С учетом требований физического подобия необходимо, чтобы оценочные показатели были безразмерными величинами и имели общую природу с выходными величинами (в нашем случае с шероховатостью). Следующей проблемой, которую необходимо решить, является неопределенность данных (колебания свойств обрабатываемого материала, параметры обрабатывающей системы и т.д.). Таким образом, реализация указанных выше подходов должна быть представлена в виде системы мониторинга и прогнозирования параметров шероховатости, а также учитывать состояние режущего инструмента.

Таким образом, объективно существует важная народнохозяйственная проблема обеспечения заданных требований по шероховатости поверхности при обработке деталей из термоупрочненных сталей на станках с ЧПУ.

В своей работе автор опирался на отечественных и зарубежных ученых А.Г. Сулова, В.Ф. Безъязычного, А.В. Анцева, А.К. Туренгольда, Ю.Г. Кабалдина, В.Л. Заковоротного, Б.М. Бржозовского, Д.И. Петрешина, М. Merchant, W. Dutschke, W. Rau, J.C. Chen и др.

**Цель диссертационного исследования.** Технологическое обеспечение требуемой шероховатости деталей из термоупрочненных сталей, обработанных точением в условиях обработки на станках с ЧПУ.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**:

1. Выявить процессы, которые оказывают основное влияние на формирование профиля шероховатости при токарной обработке термоупрочненных сталей.
2. Разработать модель, описывающую профиль шероховатости поверхности.
3. Выявить параметры (диагностические признаки), которые могут быть использованы для оценки состояния режущего инструмента и шероховатости обработанной поверхности в процессе токарной обработки на станках с ЧПУ.
4. Установить зависимости между диагностическими признаками и параметрами шероховатости обработанной поверхности и состояния режущего инструмента.
5. Разработать алгоритм и модель системы управления, которые позволяют осуществлять обеспечение требуемой шероховатости поверхности и мониторинг состояния режущего инструмента.

**Объект исследования.** Чистовая токарная обработка деталей из термоупрочненных сталей на станках с ЧПУ.

**Предмет исследования.** Технологическое обеспечение требуемой шероховатости при обработке деталей из термоупрочненных сталей на станках с ЧПУ.

**Научная гипотеза.** На основе исследования особенностей формирования микропрофиля шероховатости поверхности и выявления взаимосвязей диагностических признаков, технологических режимов с параметрами шероховатости обработанных поверхностей имеется возможность решения проблемы технологического обеспечения шероховатости поверхности при чистовой токарной обработке термоупрочненных сталей на станках с ЧПУ.

**Научную новизну** исследования представляют:

- обоснование того, что ординаты профиля шероховатости поверхностей деталей из термоупрочненных сталей, обработанных точением, распределены по закону Накагами;
- выявленные зависимости, которые характеризуют количественное соотношение систематической и случайной компонент шероховатости поверхности деталей, обработанных чистовым точением, и показывают, что на формирование профиля основное влияние оказывают вибрации технологической системы;
- результаты анализа сигналов виброакустики, заключающиеся в выявлении наиболее информативного частотного диапазона и параметров для оценки шероховатости и состояния инструмента в процессе обработки;
- разработанный алгоритм и модель системы управления, позволяющей обеспечивать требуемую шероховатость и предусматривающей возможность самообучения.

**Теоретическая и практическая значимость исследования.** Разработанные алгоритм и модель профиля шероховатости поверхности на базе фрактальной геометрии и генератора на основе закона распределения Накагами позволяют решать широкий ряд задач контактного взаимодействия, моделирова-

ния герметичных соединений и т.д. Разработанные алгоритм и программный комплекс позволяют обеспечивать заданные параметры шероховатости поверхности в автоматическом режиме, а также повысить эффективность эксплуатации режущего инструмента за счет предупреждения его поломок.

Результаты исследования могут быть использованы производственными предприятиями различного профиля в условиях средне- и крупносерийного производства. Также результаты могут быть использованы в учебном процессе при изучении блока дисциплин, связанных с автоматизацией производства и управлением технологическими процессами, а также моделированием шероховатости поверхности различных объектов.

**Методология и методы исследования.** Общая концепция исследования построена на комплексе теоретических и экспериментальных методов, включающих математическую статистику и теорию вероятности, фрактальную геометрию, теорию обработки сигналов, теорию случайных процессов, нечеткую логику и искусственные нейронные сети.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель профиля шероховатости поверхности с применением безразмерных величин, что позволяет повысить эффективность управления технологическим процессом за счет выполнения требований теорем физического подобия.

2. Результаты экспериментального исследования особенностей формирования шероховатости поверхности при токарной обработке деталей из закаленных сталей, подтверждающие доминирующее влияние вибраций.

3. Экспериментально установленные зависимости между параметрами обработки, диагностическими признаками и параметрами шероховатости поверхности, а также состоянием режущего инструмента.

4. Структурная схема, алгоритм и программный комплекс, позволяющий обеспечивать требуемую шероховатость и реализовать мониторинг состояния режущего инструмента.

**Степень достоверности** обеспечивается использованием устоявшихся и стандартизованных методик и методов проведения теоретических исследований и экспериментов, применением измерительной аппаратуры, обеспечивающей надлежащую точность, корректным применением методик измерения, а также согласованностью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации обсуждались на конференциях и совещаниях: V Международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований» (Москва, 2014), международная научно-практическая конференция «Наука и образование: проблемы и перспективы развития» (Тамбов, 2014), международная научно-практическая конференция «Новые задачи технических наук и пути их решения» (Уфа, 2014), международная научно-практическая конференция «Теоретические и практические аспекты технических наук» (Уфа, 2015), международная научно-практическая конференция «Новая наука: современное со-

стояние и пути развития» (Стерлитамак, АМИ, 2015), всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств» (Омск, ОмГУПС, 2015), Международная научно-практическая конференция в рамках международного научного форума Донецкой Народной Республики (Донецк, ДонГТУ, 2016), Международная научно – практическая конференция «Наука 21 века» (Курган, КГУ, 2017), международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в машиностроении» (Новополоцк, 2023).

**Реализация результатов работы.** Результаты работы приняты к внедрению на ООО «Зауральский инструментальный завод», г. Курган, ООО «Завод геологоразведочного оборудования и машин» (ООО ИТМ «Спецмашина»), г. Курган. Также результаты используются в учебном процессе Курганского государственного университета и Тюменского индустриального университета.

**Личный вклад автора** состоит в разработке математических моделей, которые позволяют реализовать мониторинг и прогнозирование шероховатости поверхности и состояния режущего инструмента при токарной обработке термоупрочненных сталей, в планировании и реализации экспериментальных исследований и обработке их результатов, а также оценке эффективности полученных решений.

Соискателем получены новые научные результаты, направленные на достижение показателей, которые определены в рамках программы Правительства РФ «Цифровая экономика», утвержденной постановлением №1632-р от 28.07.2017.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертационной работы соответствует требованию паспорта научной специальности 2.5.6 (п. 7 «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин» и п. 8 «Проблемы управления технологическими процессами в машиностроении»).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы отражены в 17 публикациях, в том числе в 5 работах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 4 публикациях в изданиях из международных баз данных Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и приложений. Работа изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 91 рисунок, 14 таблиц, список литературы содержит 94 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, представлены общая характеристика и значимость диссертационной работы.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние методов оценки шероховатости поверхности в процессе обработки, а также выполнен анализ существующих моделей профиля поверхности и параметров для его описания.

Широкое внедрение станков с ЧПУ остро ставит вопрос об автоматическом контроле качества деталей на конечных операциях обработки, как показал анализ литературных источников, для оценки шероховатости поверхности, в основном, используются косвенные методы, наиболее распространен метод, связанный с оценкой износа режущего инструмента, соответствующего лимитирующему фактору качества обрабатываемой поверхности. Использование в виде информационного сигнала акустического излучения, которое всегда присуще процессу обработки, является наиболее предпочтительным. На основании аналитического обзора были сделаны следующие выводы:

- Для того чтобы получить оптимальные эксплуатационные свойства, необходимо обеспечить строго определенные значения параметров качества поверхностного слоя, в том числе шероховатости. При обработке на станке с ЧПУ обеспечение заданных параметров шероховатости должно реализовываться автоматически.

- Использование прямых методов оценки и измерения шероховатости поверхности неприемлемо в случае автоматического обеспечения шероховатости, т.к. невозможно реализовать активный контроль.

- Самыми перспективными способами активной диагностики и мониторинга состояния технологической системы являются методы, основанные на применении виброакустических сигналов.

- Характерной особенностью процесса чистового точения является то, что переход из устойчивого состояния в неустойчивое происходит в очень узком диапазоне изменения технологических режимов, что затрудняет обеспечение требуемого качества обработки, особенно в автоматическом режиме.

- Решение вопросов автоматического обеспечения заданных параметров шероховатости поверхности при чистовом точении необходимо реализовывать на основе подходов, которые учитывают индивидуальные свойства каждой конкретной технологической системы.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы разработки математической модели выходного фактора (микрорельефа шероховатости поверхности). В качестве инструмента для разработки модели использовалась фрактальная геометрия. На первом этапе подбирался закон распределения ординат профиля. Были рассмотрены 4 закона: закон нормального распределения, Вейбула, Рэлея и Накагами. Было изучено и проанализировано более 200 профилограмм поверхностей, обработанных чистовым точением. Оценка производилась по критерию согласия Колмогорова-Смирнова. Величина критического значения равна при  $p=0.01$ :  $D_k = 1.63/\sqrt{n} = 0.036$ .

Максимальные значения  $D$  для законов распределения:

- $D_{\text{норм}} = 0,121915 > D_k$  – гипотеза отвергается;
- $D_{\text{вейб}} = 0,0938776 > D_k$  – гипотеза отвергается;
- $D_{\text{рел}} = 0,0569481 > D_k$  – гипотеза отвергается;
- $D_{\text{нак}} = 0,0321951 < D_k$  – гипотеза принимается.

Тесты показали, что параметры соответствуют закону распределения Накагами.

Тогда плотность распределения можно описать при помощи выражения вида:

$$w(x) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{2m-1} \exp(-mx^2/\Omega), \quad (1)$$

где  $\Omega$  – второй момент амплитуды, т.е.  $\Omega = \langle r^2 \rangle$ ;

$\Gamma(m)$  – гамма-функция.

Параметр  $m$  является обратной величиной к нормированной дисперсии квадрата амплитуды. Параметр  $m$  связан с параметром  $r^2 = \alpha_P^2/2\sigma^2$  в распределении Райса (который характеризует отношение мощности регулярной  $\alpha^2$  и случайной  $2\sigma^2$  составляющих реального профиля) соотношением:

$$m = 1 + \gamma^4 / (1 + 2\gamma^2) = 1 + (\alpha_P^2 / 2\sigma_B^2)^2 / (1 + \alpha_P^2 / 2\sigma_B^2). \quad (2)$$

Далее исследовалось соотношение случайной и систематической составляющих профиля с использованием теории случайных процессов и фрактальной геометрии. Определялся уровень случайной компоненты  $\gamma$  и показатель Хёрста  $H$ . На рисунке 1 приведены зависимости вида  $\gamma = f(Ra)$  и  $H = R(Ra)$ , полученные для деталей из закаленной стали, обработанных чистовым точением. Сплошной линией показаны зависимости, полученные экспериментально. Штриховой линией показаны аппроксимирующие кривые.

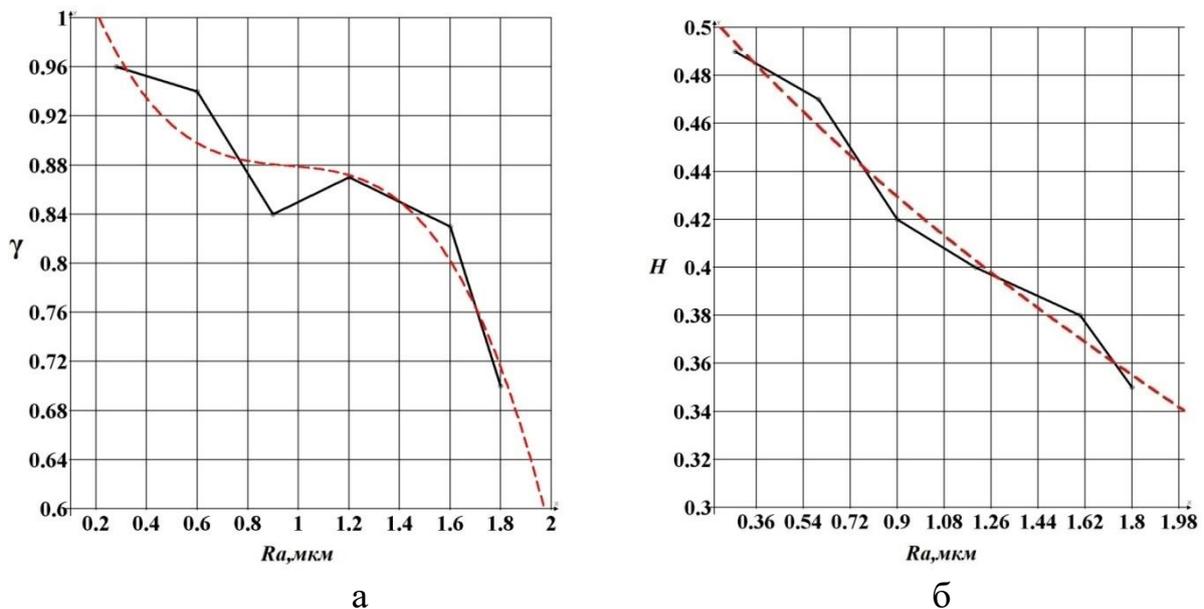


Рисунок 1 – Зависимость уровня случайной компоненты  $\gamma = f(Ra)$  (а) и показателя Хёрста  $H = R(Ra)$  (б) от среднеарифметического отклонения профиля

Аналитически данные зависимости задаются выражениями вида:

$$\gamma = 1.12301 - 0.25377 \times Ra^3 + 0.73304 \times Ra^2 - 0.72368 \times Ra, \quad (3)$$

$$H = 0.52733 - 0.0036 \times Ra^3 + 0.02416 \times Ra^2 - 0.12757 \times Ra. \quad (4)$$

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что при повышении требований к качеству обработки роль случайных процессов растет. Соответ-

ственно, для решения задачи автоматического обеспечения шероховатости при токарной обработке закаленных сталей необходимо осуществлять мониторинг вибраций.

Полученные данные были использованы в качестве исходных при построении модели шероховатости поверхности. Был использован метод случайных сложений. На рисунке 2 приведен алгоритм моделирования шероховатости поверхности с использованием генератора с распределением Накагами.

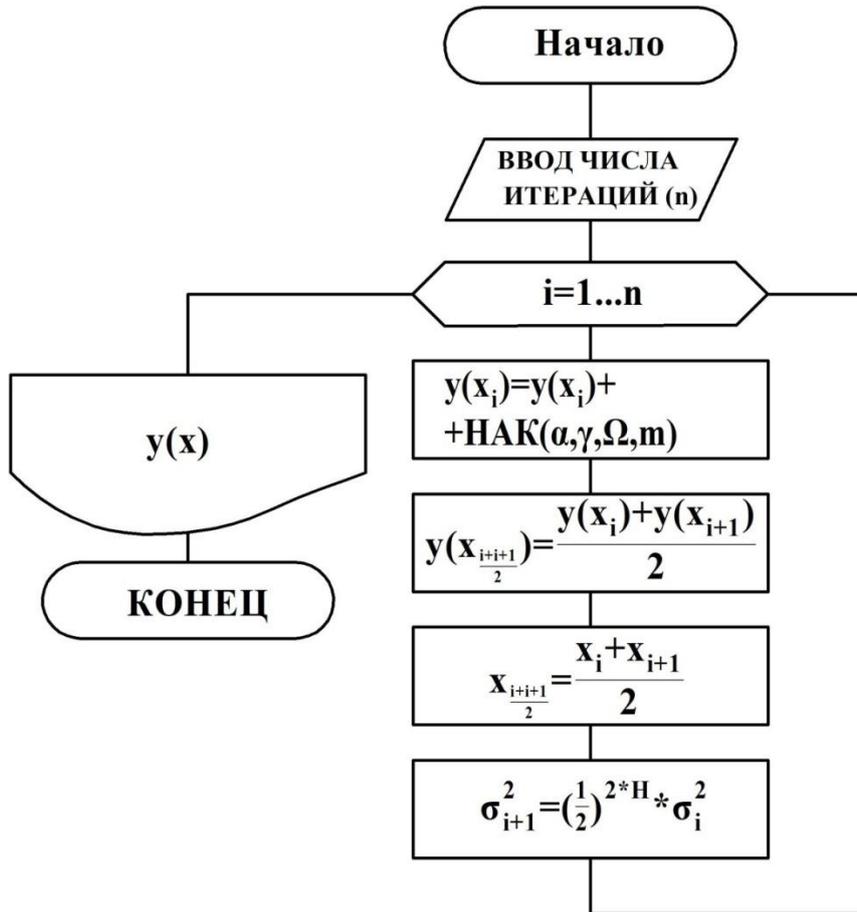


Рисунок 2 – Алгоритм построения кривой методом случайных сложений с использованием генератора с распределением Накагами

$x_i$  - начальные значения аргумента, в которых значения функции принимаются равными нулю,  $y(x_i)$  – значения функции после сложения со случайными числами, выбранными из закона распределения Накагами,

$y(x_{\frac{i+i+1}{2}})$ ,  $x_{\frac{i+i+1}{2}}$  – интерполяция функции и значений аргумента,

$\sigma_{i+1}^2$  – дисперсия,  $N$  – показатель Хёрста

На рисунке 3 приведен пример результатов определения параметров по ГОСТ 2789-73 для реальных профилей (линии 2 на рисунке), моделей, построенных с использованием генератора ординат профиля на основе закона распределения Гаусса (линии 1 на рисунке) и закона распределения Накагами (линии 3 на рисунке).

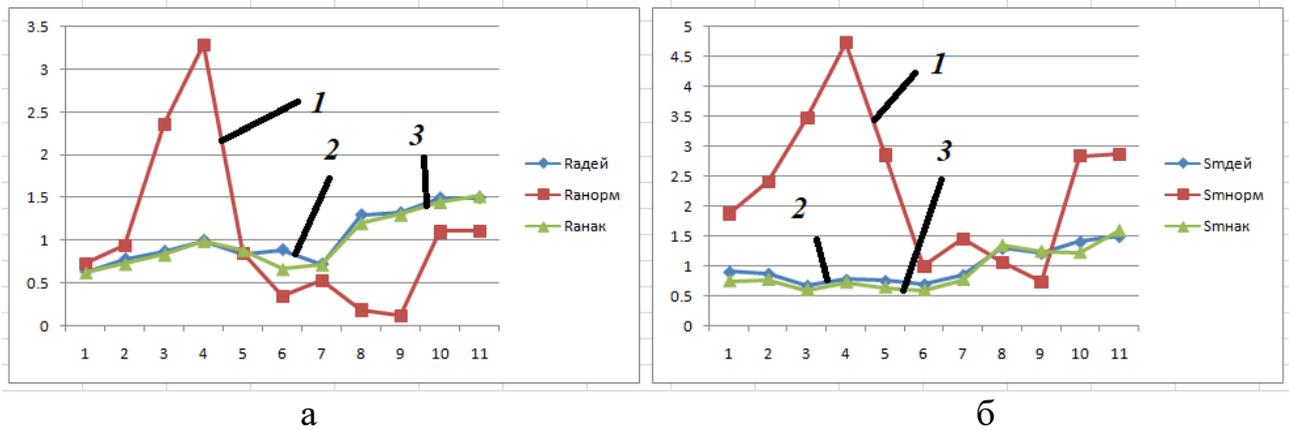


Рисунок 3 – Пример точности моделей:  
 а – значения  $Ra$  для реальных профилей и модели;  
 б – значения  $Sm$  для реальных профилей и модели

Как можно видеть из рисунка 3, использование генератора ординат профиля на основе закона распределения Гаусса дает значительную погрешность (более 25%). Генератор ординат на основе закона распределения Накагами позволяет получать погрешность, не превышающую 10%, что вполне достаточно как для решения задач описания шероховатости поверхности, так и при решении прикладных задач, связанных с исследованием эксплуатационных свойств.

В третьей главе диссертационной работы приведены методика экспериментальных исследований и результаты предварительных экспериментов по исследованию вибраций. Экспериментальные исследования проводились на токарном обрабатывающем центре с наклонной станиной модели SuperJobber 500.

В качестве обрабатываемого материала – углеродистые конструкционные и легированные стали с твердостью более 35 HRC: сталь 45, 40XH и 45XH.

Режимы испытаний:

1) оптимальный режим обработки:

- а) пределы скорости резания от 50 до 300 м/мин с постоянной подачей – измерение вибросигнала в выбранных точках;
- б) пределы подачи от 0,01 до 0,2 мм/об при постоянной скорости резания – измерение вибросигнала в выбранных точках;
- в) глубина резания от 0,1 до 0,3 мм при постоянных режимах обработки – измерение вибросигнала в выбранных точках;

2) обработка с износом:

- а) пределы фаски износа режущей пластины от 0,02 до 0,5 мм, технологические режимы обработки постоянны - измерение вибросигнала в выбранных точках.

В качестве режущего инструмента использовались стандартные токарные резцы с механическим креплением режущих пластин из наиболее распространенных в производстве инструментальных материалов: композит 01 (эльбор), композит 10 (гексанит), ВОК60.

Для измерения вибрации использовались акселерометры KD45в сочетании с анализатором спектра ZET-017U, осциллографом ZET 302и АЦП ZET 230.

Для последующей обработки использовались программное обеспечение ZETLAB и оригинальное программное обеспечение. Схема стенда приведена на рисунке 4.

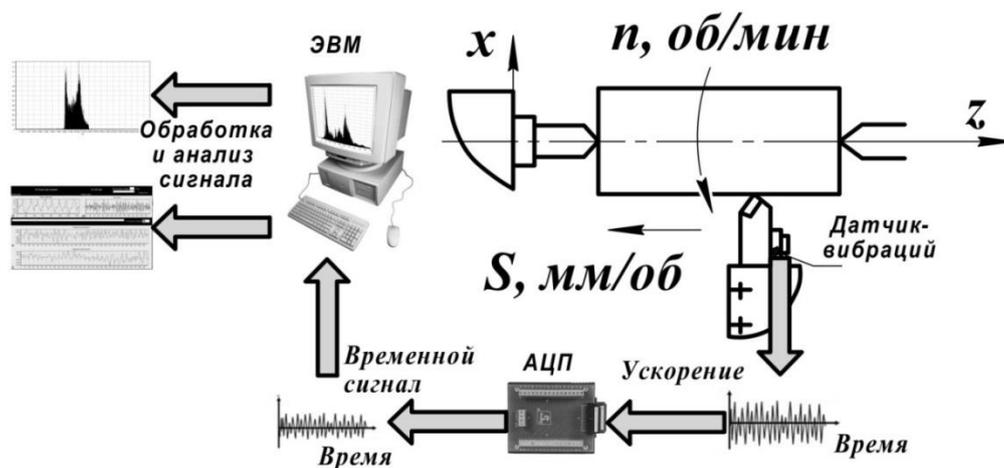


Рисунок 4 – Исследовательский стенд

С целью выявления частотного диапазона вибросигнала, который обладает наибольшей информативностью при оценке параметров шероховатости поверхности, производилась его фильтрация в различных диапазонах. В результате вычисления взаимной корреляции между мощностью вибросигнала и режимами резания (скоростью резания и продольной подачей) было установлено, что при обработке закаленных сталей наиболее чувствительный диапазон к изменению режимов резания 13...15 кГц. Также были получены зависимости параметров шероховатости ( $Ra$ ,  $Sm$ ) и диагностических признаков (мощности вибросигнала  $Sw$  и показателя Хёрста по вибросигналу  $H$ ) от режимов обработки и износа инструмента.

Установлено, что при увеличении значения продольной подачи среднеарифметическое отклонение профиля  $Ra$ , средний шаг  $Sm$  возрастают. Значение показателя Хёрста  $H$  с увеличением подачи снижается, значение мощности вибросигнала  $Sw$  растет с увеличением подачи (рисунок 5).

В результате исследований было установлено, что с увеличением скорости резания среднеарифметическое отклонение профиля  $Ra$  изменяется по параболической зависимости. Значения среднего шага микронеровностей  $Sm$  и показателя Хёрста практически не изменяются (отклонения не превышают 5-10%). Значение мощности вибросигнала  $Sw$  убывает с увеличением скорости резания (рисунок 6). Мощность вибросигнала и показатель Хёрста при увеличении ширины фаски износа растут. Таким образом, данные показатели можно использовать в дальнейшем при активном контроле состояния режущего инструмента (рисунок 7).

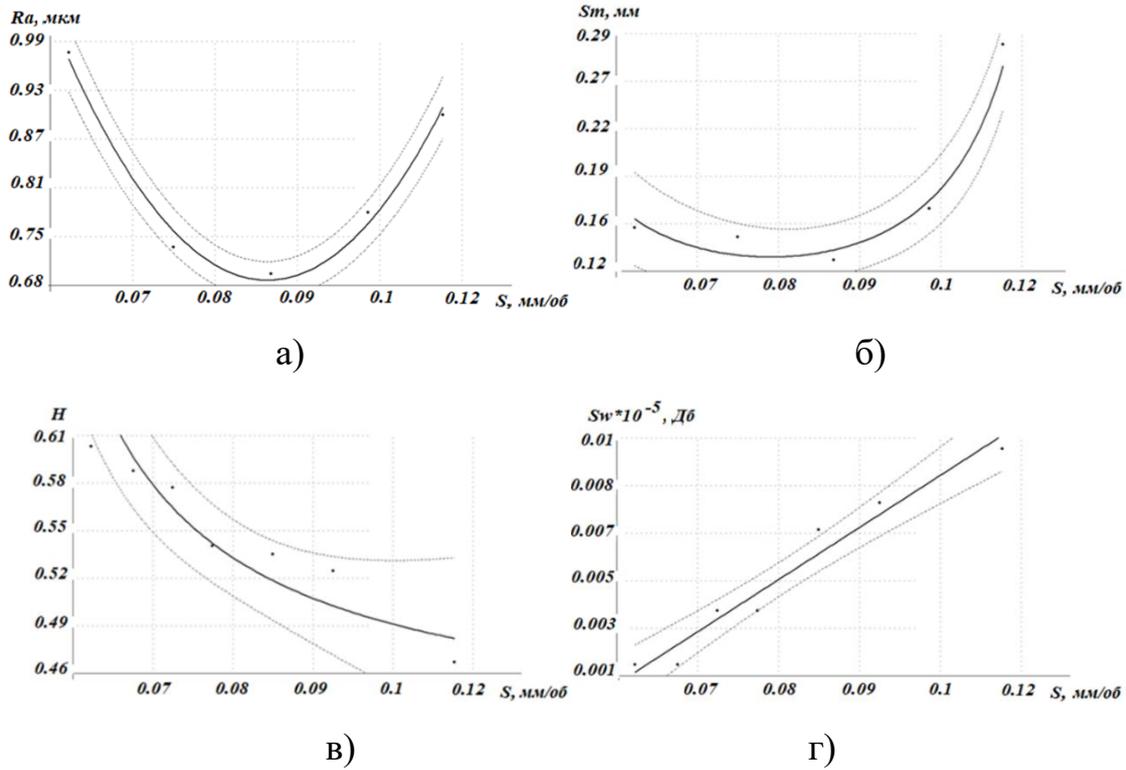


Рисунок 5 – Зависимости среднеарифметического отклонения профиля  $Ra$  от подачи  $S$  (а), среднего шага неровностей  $Sm$  от подачи  $S$  (б), показателя Хёрста  $H$  от подачи  $S$  (в) и мощности вибросигнала  $Sw$  от подачи  $S$  (г)

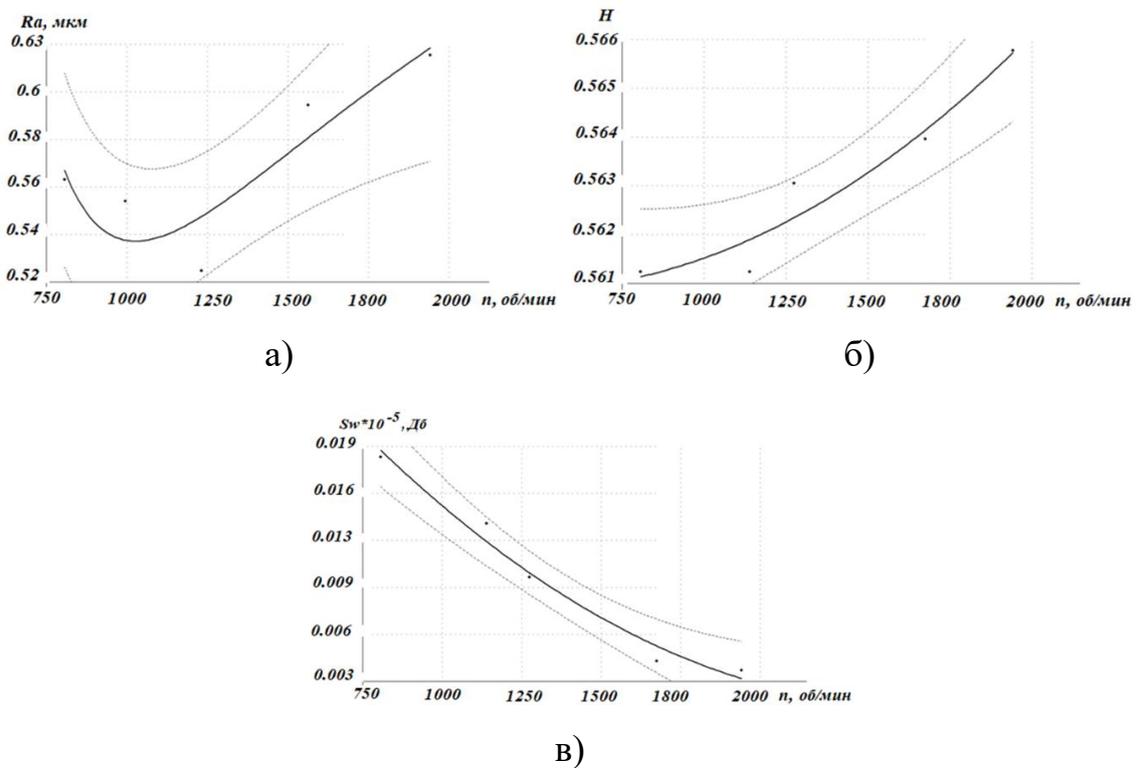


Рисунок 6 – Зависимости среднеарифметического отклонения профиля  $Ra$  от скорости резания  $V$  (а), показателя Хёрста  $H$  от скорости резания  $V$  (б), мощности вибросигнала  $Sw$  от скорости резания  $V$  (в)

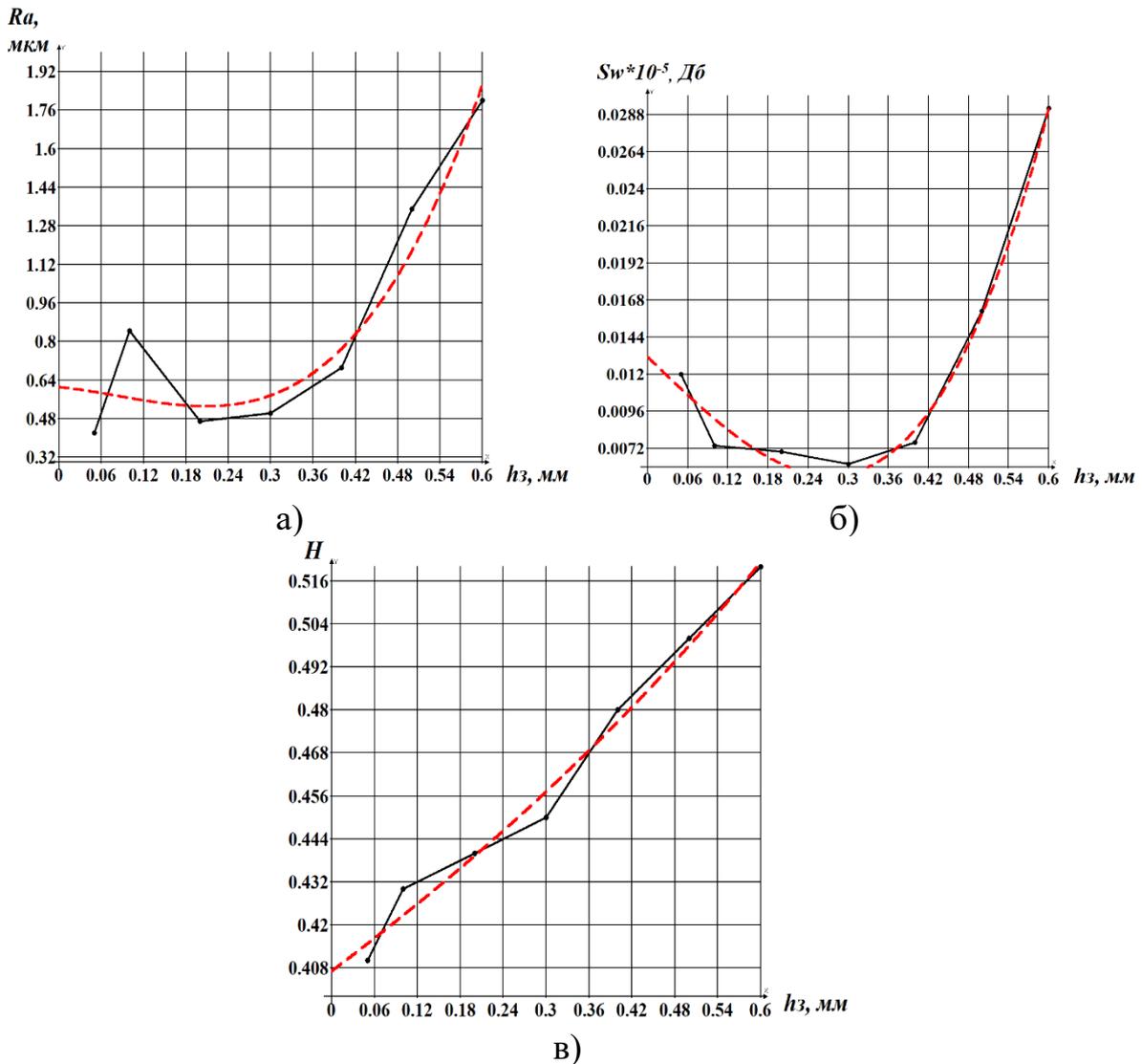


Рисунок 7 – Зависимость шероховатости  $Ra$  от ширины фаски износа (а), мощности вибросигнала  $Sw$  от ширины фаски износа (б) и показателя Хёрста  $H$  вибросигнала от ширины фаски износа (в)

В четвертой главе выполнена разработка структуры системы мониторинга и прогнозирования шероховатости поверхности. Была разработана структура системы на основе декомпозиционного анализа. При этом было установлено, что для решения поставленных задач не требуется режим реального времени.

Также был выполнен выбор модели для устройства принятия решений. Был проведен анализ точности моделей, которые традиционно используются для реализации устройств принятия решений: модель на основе передаточных функций (transfer functions), пространства состояний (state space), полиномиальная модель (polynomial model), комбинированная модель (polynomial and state space model), спектральная модель (spectral model) и корреляционная модель (correlation model). В ходе исследования было установлено, что данные модели дают достаточно высокую погрешность (более 25%), что неприемлемо. Также рассматривалось использование нейро-нечетких моделей. Пример тестирования точности нейро-нечеткой модели приведен на рисунке 8.

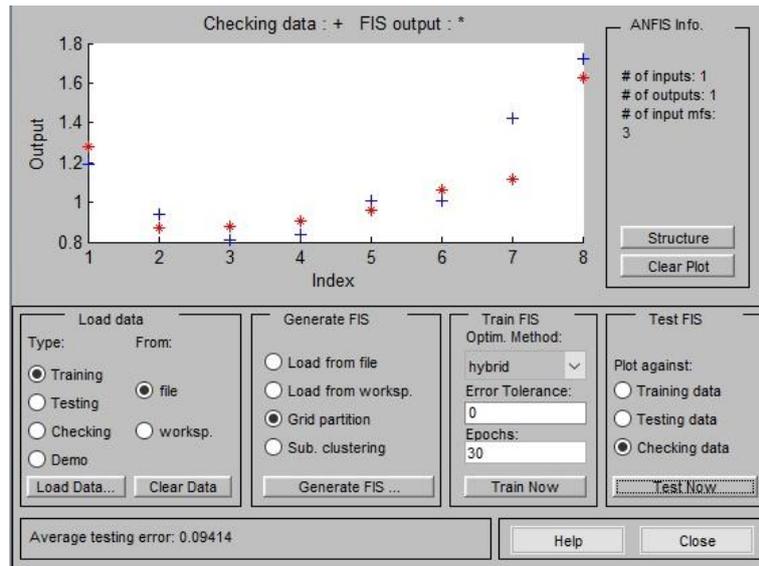


Рисунок 8 – Тестирование точности нейро-нечеткой модели для взаимосвязи вида  $Ra = f(Sw)$

В целом тестирование нейро-нечетких моделей показало, что погрешность оценивания по проверочным выборкам не превышает 10%. Причем увеличение числа данных для анализа и обучения повышает точность модели, что подтверждает лучшую применимость данного методологического аппарата по сравнению с классическими спектральными и корреляционными моделями.

**Пятая глава** посвящена разработке алгоритма управления, обеспечивающего автоматическое получение заданной шероховатости поверхности. Предложенный алгоритм и его программная реализация позволяют на основе требований чертежа ( $Ra$ ,  $Sm$ ), используя технологический банк данных, получить фрактальную математическую модель профиля поверхности и назначить наиболее оптимальные режимы обработки для конкретного оборудования. Алгоритм позволяет в процессе обработки непрерывно оценивать шероховатость поверхности с учетом динамического состояния технологической системы и поддерживать режимы обработки на максимально допустимом уровне в каждой конкретной ситуации. Одновременно с контролем шероховатости поверхности осуществляется и контроль состояния режущего инструмента.

Разработана система адаптивного управления, состоящая из четырех основных блоков (рисунок 9): нейро-нечеткий блок 1 (ННБ1) используется для определения требуемой величины режимов резания (частоты вращения и подачи). В качестве входных переменных используется переменная «наименование детали», а также требуемые значения шероховатости поверхности ( $Ra$ ,  $Sm$ ). В качестве выходных переменных используются частота вращения шпинделя и продольная подача. В данном блоке используется информация из базы знаний, которая заполняется по результатам пробной обработки партии деталей с последующими замерами шероховатости. При этом имеется возможность более корректного назначения режимов резания с учетом неопределенности исходных данных. Нейро-нечеткий блок 2 (ННБ2) производит вычисление входных

параметров модели построения шероховатости поверхности по виброакустическому сигналу. В качестве входных переменных используются показатель Хёрста вибросигнала (НС) и мощность вибросигнала. Выходные параметры – среднеквадратическое отклонение и показатель Хёрста профиля шероховатости поверхности. Нейро-нечеткий блок 3 (ННБ3) производит оценку износа режущего инструмента. В качестве входных переменных используются показатель Хёрста вибросигнала (НС) и мощность вибросигнала. Выходной параметр – ширина фаски износа. Нейро-нечеткий блок 4 (ННБ) используется для вычисления величины корректирующего воздействия по рассогласованию данных между эталонной моделью шероховатости поверхности и построенной по сигналам виброакустики.

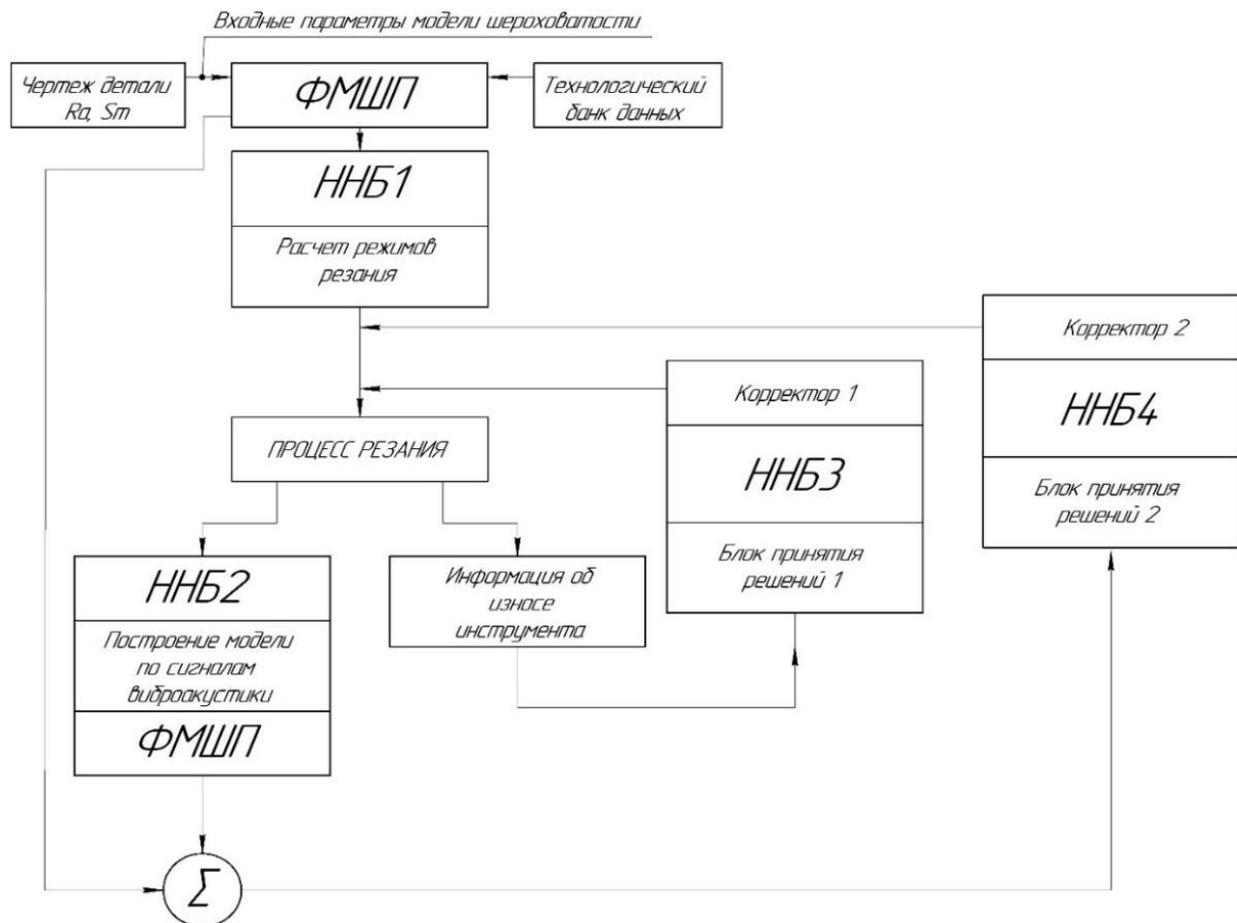


Рисунок 9 – Структура системы с нейро-нечеткими блоками

Разработанная система адаптивного управления реализована в программном виде с использованием компонентного программирования. С помощью данной разработки определялось корректирующее воздействие (изменение подачи). Для сравнения производилась обработка без коррекции. На рисунке 10 приведен график зависимости  $Ra$  от основного времени без коррекции подачи, а на рисунке 11 – с коррекцией.

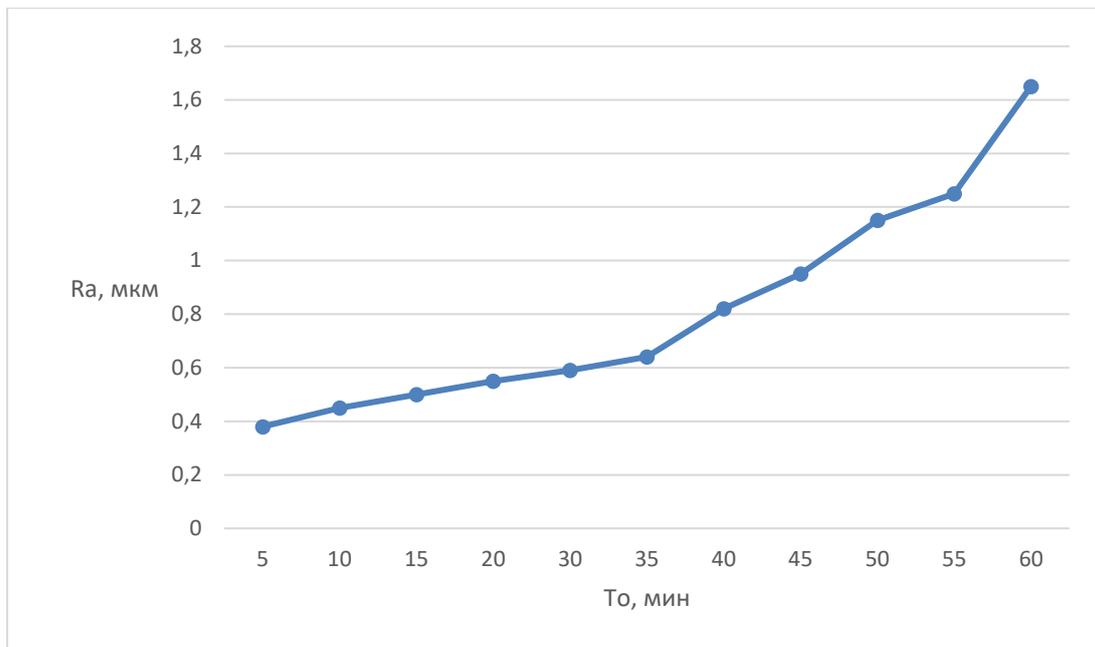


Рисунок 10 – Зависимость  $Ra(T_o)$  без коррекции подачи

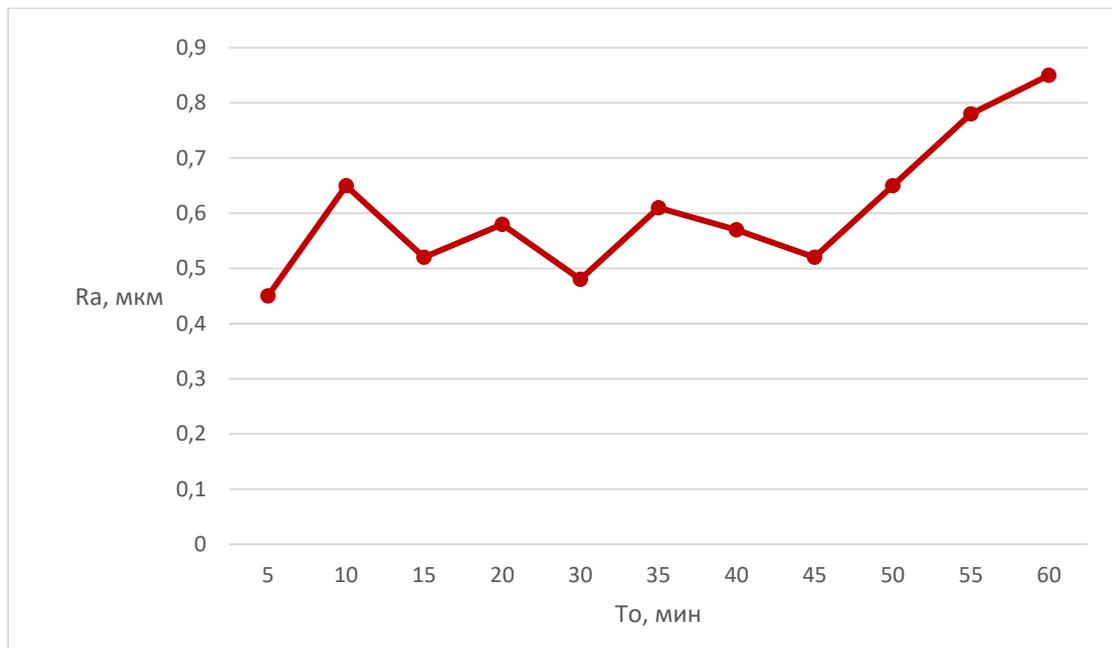


Рисунок 11 – Зависимость  $Ra(T_o)$  с коррекцией подачи

Использование коррекции позволяет обеспечить требования к шероховатости поверхности. Однако при превышении времени более 60 минут наблюдается катастрофический износ инструмента, что подтверждается появлением характерного свиста при обработке, и фиксируется как органолептически, так и по показаниям датчика.

Учитывая современные тенденции развития производства, для практического применения предлагаемых решений целесообразно интегрировать данные разработки в общую систему мониторинга и управления производственной системой (например, на базе CRM). Схема приведена на рисунке 12.

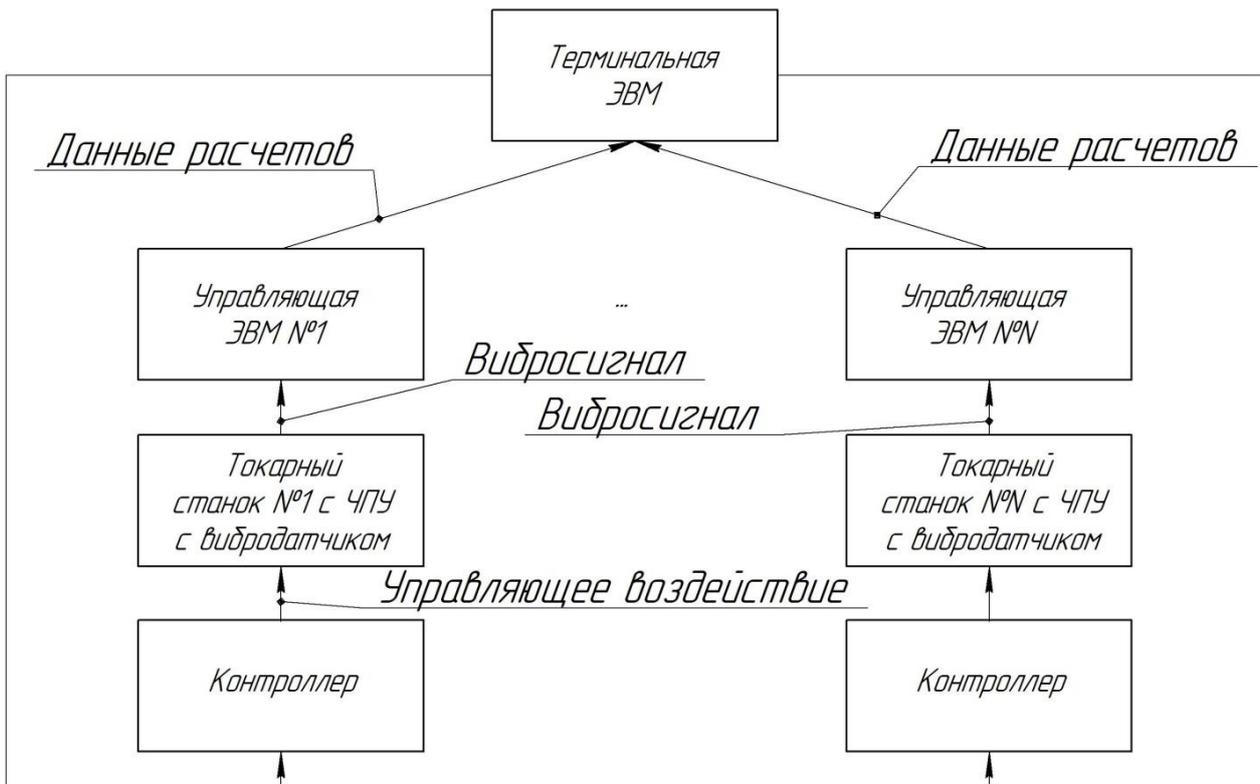


Рисунок 12 – Схема реализации комплекса

Работа комплекса будет осуществляться по следующей схеме: на станке устанавливается беспроводной датчик вибраций, который передает данные в управляющую ЭВМ, где в последующем производится обработка данных и выполнение расчетов. После выполнения расчетов управляющая ЭВМ передает сигнал в терминальную ЭВМ (ЭВМ верхнего уровня), которая является сервером для всей производственной системы. Далее сигнал передается на контроллер, сопряженный непосредственно со станком, и реализуется управляющее воздействие.

Применение этой системы позволило уменьшить количество брака, вызванного разрушением инструментов и несоответствием требованиям к шероховатости поверхности, на 40 %. Проведенные экономические расчеты показали, что величина дохода составляет 150 рублей на условную деталь, срок окупаемости меньше года, что демонстрирует эффективность данного подхода.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения диссертационной работы выявлены особенности формирования микропрофиля при токарной обработке термоупрочненных сталей, разработана модель шероховатости поверхности, а также разработана модель системы мониторинга и прогнозирования шероховатости поверхности с возможностью самообучения. Таким образом решена важная научно-техническая задача обеспечения и повышения качества поверхностного слоя при чистовой токарной обработке на станках с ЧПУ. По завершении исследования были получены следующие результаты:

1. Анализ текстуры профилей поверхностей, обработанных чистовым точением, позволил установить зависимости уровня случайной компоненты и фрактальной размерности от параметров качества поверхности. Установлено, что доля случайной составляющей профиля превышает 85%, соответственно преобладает роль вибраций в формировании микрорельефа.

2. Разработанные алгоритм и модель шероховатости поверхности на основе модернизированного метода случайных сложений и генератора с использованием закона распределения Накагами позволяют получать описание объекта с погрешностью, не превышающей 10%.

3. Установлено, что в качестве диагностического признака целесообразно использовать виброакустический сигнал в частотном диапазоне от 13 до 15 кГц. При этом для прогнозирования шероховатости поверхности и оценки состояния режущего инструмента целесообразно использовать мощность сигнала и показатель Хёрста.

4. Определены зависимости между параметрами шероховатости поверхности и показателем Хёрста вибросигнала и параметрами шероховатости обработанной поверхности и состояния режущего инструмента, которые могут быть использованы в системе прогнозирования и мониторинга.

5. Разработаны алгоритм и система мониторинга и прогнозирования параметров шероховатости поверхности и состояния режущего инструмента, которые позволяют обеспечивать требуемые параметры качества обработанной поверхности и повысить эффективность эксплуатации режущего инструмента при токарной обработке термоупрочненных сталей на станках с ЧПУ.

**Перспективные направления для дальнейших исследований.** В качестве направлений для дальнейших исследований следует рекомендовать расширение круга исследуемых материалов, т.е. необходимо исследовать особенности формирования микропрофиля при обработке жаропрочных, нержавеющей сталей и других труднообрабатываемых материалов. Также целесообразно изучить выявленные аспекты применительно к другим видам обработки, которые позволяют получать регулярный микрорельеф, например, выглаживанию и т.д. Это позволит получить единую картину процесса и сформировать решения, позволяющие повысить качество обработки на станках токарной группы.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ*

1. **Кузнецова, Е.М.** Разработка экспертной системы технологического обеспечения требуемой шероховатости при обработке закаленных сталей на станках с ЧПУ / **Е.М. Кузнецова, В.Е. Овсянников, Р.Ю. Некрасов, У.С. Путилова** // iPolytech Journal. – 2024. – Т. 28. – № 3. – С. 418-426.

2. **Рогов, Е.Ю.** Технологическое обеспечение точности формы в поперечном сечении деталей при токарной обработке на станках с ЧПУ / **Е.Ю. Рогов,**

В.Е. Овсянников, **Е.М. Кузнецова**, Р.Ю. Некрасов // Наука и бизнес: пути развития. – 2024. – № 1 (151). – С. 112-117.

3. Остапчук, А.К. Особенности управления точностью прецизионной обработки деталей машин / А.К. Остапчук, **Е.М. Кузнецова**, А.Г. Михалищев, А.И. Шашков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18. – № 4. – С. 21-33.

4. Остапчук, А.К. Экспериментальные исследования и моделирование устойчивости процесса резания при обработке стальных деталей / А.К. Остапчук, **Е.М. Кузнецова**, О.В. Дмитриева // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – №1. – С. 43-47.

5. Остапчук, А.К. Исследование процессов резания с использованием системы уравнений Лоренца / А.К. Остапчук, **Е.М. Кузнецова**, О.В. Дмитриева // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2017. – №4. – С. 18-22.

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную реферативную базу данных Scopus*

6. Ostapchuk, A.K. Estimation of the stability of the machining technological system using nonlinear dynamics mathematical models. / А.К. Ostapchuk, **Е.М. Kuznetsova**, O.V. Dmitrieva // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. – 2018. – С. 8602523.

7. Ostapchuk, A.K. Adaptive process control system of fine turning with the use of vibroacoustic signal on CNC machines / А.К. Ostapchuk, **Е.М. Kuznetsova**, Е.К. Karpov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference "EarthScience". – 2020. – P. 062088.

8. Karpov, E.K. Using of control actions shaper for movement control process of mobile platform. / Е.К. Karpov, **Е.М. Kuznetsova**, T.R. Zmyzgova // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – P. 8934309.

9. Zmyzgova, T.R., Problems of processing and recognition of digital images in technical vision systems. / T.R. Zmyzgova, **Е.М. Kuznetsova**, Y.K. Karpov // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – P. 8934840.

*Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ*

10. Овсянников, В.Е. Моделирование фрактальной кривой с использованием генератора высот на основе закона распределения Накагами : свид. о регистрации электронного ресурса с оценкой новизны / В.Е. Овсянников, **Е.М., Кузнецова**, А.С. Губенко. – № 25334; дата рег. 03.06.2024.

*Другие публикации*

11. **Кузнецова, Е.М.** Особенности микрорельефа шероховатости при токарной обработке закаленных сталей / **Е.М. Кузнецова**, В.Е. Овсянников,

И.М. Ковенский, Р.Ю. Некрасов // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – №8. – С. 46-50.

12. **Кузнецова, Е.М.** Повышение точности моделирования профилей шероховатости поверхности с регулярным микрорельефом / **Е.М. Кузнецова**, В.Е. Овсянников, Р.Ю. Некрасов, У.С. Путилова // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – №3. – С. 34-39.

13. **Кузнецова, Е.М.** Комплексный технико-экономический анализ методов измерения и контроля шероховатости поверхности / **Е.М. Кузнецова**, В.Е. Овсянников, Д.В. Кузнецов // Инновационные технологии в машиностроении. Сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой. – Новополоцк, 2023. – С. 45-47.

14. Остапчук, А.К. Адаптивное управление чистовой токарной обработкой деталей транспортных машин на станках с ЧПУ / А.К. Остапчук, **Е.М. Кузнецова** // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2019. –Т. 1. – С. 98-103.

15. Остапчук, А.К. Особенности управления точностью прецизионной обработки деталей транспортных машин / А.К. Остапчук, А.И. Шашков, А.Г. Михалищев, **Е.М. Кузнецова** //Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы международной научно-практической конференции (Пермь, 2016). – Пермь: ПНИПУ, 2016. – С. 96-100.

16. Михалищев, А.Г. Разработка измерительного стенда для исследования сигналов виброакустики / А.Г. Михалищев, **Е.М. Кузнецова**, А.И. Вагина // Новая наука: Теоретический и практический взгляд: материалы международной научно-практической конференции (Ижевск, 2016). – Ижевск: АМИ, 2016. – С. 127-129.

17. **Кузнецова, Е.М.** Методы активной диагностики состояния технологической системы / **Е.М. Кузнецова**, А.Г. Михалищев // Новая наука: теоретический и практический взгляд: сборник статей Международной научно-практической конференции (Стерлитамак, 2015). - Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2015. – С. 45-47.

---

Подписано в печать 10.10.2024 г.	Формат 60×84×1/16	Бумага 80 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Уч. – печ. л. 1,25	Уч. - изд. л. 1,25
Заказ №43	Тираж 100	

---

Библиотечно-издательский центр КГУ.  
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет.