

Министерство науки и высшего образования РФ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»

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»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор технических наук,

доцент Овсянников В.Е.

Иркутск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Состояние вопроса	11
1.1 Шероховатость поверхности и эксплуатационные свойства деталей....	11
1.2 Методы измерения и оценки шероховатости поверхности и состояния режущего инструмента.....	19
1.3. Выбор параметров и метода описания шероховатости	27
1.4. Технологическое обеспечение параметров шероховатости при чистовом точении.....	34
1.5 Основные выводы по главе	42
2 Разработка фрактальной математической модели шероховатости поверхности, полученной после чистового точения	44
2.1 Шероховатость поверхности как выходной фактор процесса чистового точения	44
2.2 Подбор закона распределения шероховатости	49
2.3 Исследование количественного соотношения составляющих профиля шероховатости на основе теории случайных процессов	55
2.4 Исследование количественного соотношения составляющих профиля шероховатости на основе фрактальной геометрии	60
2.5 Разработка модели шероховатости поверхности	65
2.6 Основные выводы по главе	69
3 Экспериментальные исследования обеспечения шероховатости при точении закаленных сталей.....	71
3.1 Измерительный стенд для исследования виброакустических сигналов	71
3.2 Средства для измерения шероховатости и оценки состояния инструмента.....	74
3.3 Исследование закономерностей формирования поверхностного слоя при обработке закаленных сталей	76

3.4 Исследование зависимости шероховатости и вибросигнала от подачи и скорости резания	80
3.5 Исследование зависимости шероховатости и вибросигнала от износа режущего инструмента	86
3.6 Основные выводы по главе	89
4 Разработка структуры системы мониторинга и прогнозирования шероховатости поверхности. Выбор устройств принятия решений	91
4.1 Разработка структуры системы методами декомпозиционного анализа	91
4.2 Выбор модели для устройств принятия решений.....	100
4.3 Основные выводы по главе	107
5 Разработка модели системы мониторинга и прогнозирования шероховатости поверхности. Практические рекомендации.....	108
5.1 Разработка общей структуры и алгоритма системы	108
5.2 Практические рекомендации	113
Заключение	119
Библиографический список	121
Приложение А	130

ВВЕДЕНИЕ

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. Cheni др. [1,3,4,9,28,48,56-59,62,72,75,76,93].

Цель диссертационного исследования. Технологическое обеспечение требуемой шероховатости деталей из термоупрочненных сталей, обработанных точением на основе 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 и параметров качества 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, моделирования 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 шероховатых 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 состояние 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 4 работах, входящих в список ВАК РФ, 4 публикациях в журналах Scopus и Web of science, 1 учебном пособии.

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 из 94 наименований.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Шероховатость поверхности и эксплуатационные свойства деталей

Технологическое обеспечение качества продукции промышленного производства предполагает то, что должны быть выдержаны в заданных пределах такие показатели, как надежность, точность, производительность, эффективность, экономичность выпускаемых изделий и т.д. Эти характеристики во многом определяются эксплуатационными свойствами деталей и узлов (износостойкость, коэффициент трения, коррозионная стойкость, контактная жесткость, прочность сопряжений и др.).

Анализ научных работ, выполняемых в машиностроительной отрасли, показал, что большая часть случаев выхода из строя деталей машин происходит из-за износа в сопряжениях узлов трения. Свойства контактируемых узлов и деталей зависят не только от параметров точности и качества поверхности каждой детали или узла, но и от взаимного положения контактирующих поверхностей.

На основании научно обоснованного подхода к нормированию качества поверхностей деталей машин рекомендуются для нормирования параметры Ra , Sm , Rp , Wz , Smw , $Hmax$, Hr , $H\mu_0$. На сегодняшний день разработаны расчетные зависимости, по которым можно оценить эксплуатационные свойства деталей в зависимости от параметров качества поверхностного слоя [3, 18, 21, 22, 27, 30, 35, 37, 40-42, 47, 49, 56-59, 63].

Зависимость интенсивности износа от параметров шероховатости и физико-механических свойств [3, 56-59]:

$$I = \frac{1.2 \times Ra^{2/3}}{n \times \lambda \times Sm \times tm^{3/2}} \times \left[\frac{P}{H\mu_0} \right]^{7/6} \times \sqrt{15\pi \times (2\pi \times Wz \times H \max)^{1/3} \left[1 + \frac{2\pi \times H\mu_0 \times (1 - \mu^2)}{E} \right]}, \quad (1.1)$$

где n – число циклов работы, которое приводит к разрушению материала;

λ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений на процесс изнашивания.

$$\lambda = \left[\frac{\sigma_B - \sigma_o}{\sigma_a} \right]^{t_y}, \quad (1.2)$$

где σ_B – временное сопротивление разрыву;

σ_o – поверхностные остаточные напряжения;

σ_a – действующие амплитудные напряжения поверхности трения;

t_y – параметр фрикционной усталости.

Зависимость, связывающая основные параметры качества поверхностного слоя (шероховатость, глубину наклепа и остаточные напряжения) и предел выносливости детали после механической обработки имеет вид [56-59]:

$$\sigma_{-1} = m \times \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{B\Omega}} \right)^K \times R_Z^{-0,05} \times h_C^{-0,147} \times \sigma_{ocm}^{-0,09}. \quad (1.3)$$

Зависимость износостойкости от параметров шероховатости и физико-механических свойств [56-59]:

$$J_h = 0,036 \times \frac{\alpha^{0,5} \times \varepsilon_1^{2,1}}{n} \times R_Z^{0,874}. \quad (1.4)$$

Комплексный параметр качества поверхностного слоя для оценки коррозионной стойкости деталей имеет вид:

$$C_y = (1,1u_H^4 \times 4u_H^3 - 4,1 \times u_H^2) \times \left(28 \times 10^6 \times \frac{R_v}{t_m^2 \times S_m^2} \right). \quad (1.5)$$

Зависимость предела выносливости от параметров шероховатости и физико-механических свойств имеет вид:

$$\sigma_{-1M} = (c_1 - n \times \ln R_z) \times \sigma_{-1}. \quad (1.6)$$

Герметичность соединений определяет их способность удерживать утечку газа или жидкости. С учетом геометрии и контактных деформаций сопрягаемых поверхностей величина утечки в общем случае имеет вид:

$$Q = 0.0066 \times \frac{\pi \times d \times \Delta p \times u \times [0.5 \times (H_{\max 1} + H_{\max 2} + W_{z_1} + W_{z_2} + R_{z_1} + R_{z_2}) - y]}{\mu' \times l}, \quad (1.7)$$

где d и l – размеры соединения; Δp – перепад давления; $u=0,2$ – константа кармана; μ' – динамический коэффициент уплотняемой среды.

Значение контактной деформации y определяется по следующей зависимости:

$$y = (y_{пл1} + y_{пл2}) + (y_{уп1} + y_{уп2}), \quad (1.8)$$

где $y_{пл1}$, $y_{пл2}$ – пластические контактные деформации деталей; $y_{уп1}$, $y_{уп2}$ – упругие контактные деформации деталей.

$$y_{пл} = \pi \times \left(\frac{2 \times \pi \times P \times Ra \times W_z \times H \max}{A \times H \mu_0} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (1.9)$$

$$y_{уп} = 2 \times \pi \times \frac{1 - \mu^2}{E} \times H \mu_0 \times Sm \times \frac{y_{пл}}{Ra}. \quad (1.10)$$

Зависимость для оценки коррозионной стойкости после механической обработки имеет следующий вид:

$$v = v_0 \times (1.1 \times u^4 + 4 \times u^3 - 4.1 \times u^2) \times \left(28 \times 10^6 \times \frac{R_v}{t_m^2 \times S_m^2} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (1.11)$$

где v и v_0 – скорости разрушения детали до и после обработки детали; u – степень упрочнения.

Как видно из приведенных выше зависимостей, определяющих эксплуатационные свойства, далеко не последнее место в формировании эксплуатационных характеристик занимает шероховатость поверхности. Для наглядности информации о степени влияния каждого из факторов данные представим в виде Таблицы 1.1.

Условные обозначения:

«+» и «-» говорят о прямой или обратной связи между указанными факторами и рассматриваемым эксплуатационным свойством;

* - говорит о том, что указанный параметр оказывает решающее влияние на приведенное эксплуатационное свойство;

0 – параметр не оказывает влияния на данное эксплуатационное свойство.

Таблица 1.1 – Параметры, определяющие эксплуатационные свойства машин и их соединений

Эксплуатационные характеристики сопряжения	Характеристики материала детали				Параметры точности размеров		Качество поверхности						
	σ_s	σ_T	E	HB	d, l, B	T	Hmax	Hp	Wz	Wp	Smw	Ra, Rz	Rmax
Контактная жесткость:													
Первое нагружение	0	+	+	+	+*	-*	-	-*	-	-*	-	-	-
Повторные нагружения	0	0	+	-	+*	-*	-	-*	-	-*	-	-	-
Коэффициент трения	-	-	0	0	0	0	+	+*	+	+*	-	+*	+
Износостойкость	+	+	+	+	+*	-	-	-*	-	-*	+	-	-
Герметичность соединений	0	-	-*	-	-*	-*	-	-*	-	-*	-	-	-
Прочность посадок	0	-	+	-	+*	-*	-	-*	-	-*	-	-	-
Усталостная прочность	+*	+*	+	-	+*	0	0	0	0	0	0	-	-
Коррозионная стойкость	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	+	-*	-

Анализируя данные Таблицы 1.1, можно увидеть, что на все основные эксплуатационные свойства оказывает влияние шероховатость поверхности.

Влиянию шероховатости поверхности на работу пар трения посвящены работы И.В. Крагельского [35-37], П.Е. Дьяченко [21,22] и др. Авторы этих работ доказывают, что на стадии первоначального износа существенную роль играет исходная микрогеометрия наиболее твердой детали. Вопросом изучения влияния качества поверхностного слоя на эксплуатационные

свойства изделий занимались такие ученые, как Ю.Р. Виттенберг [13], В.Ф. Безъязычный [3, 4], А.Г. Суслов [56-59], А.И. Хусу [64], Ю.Г. Шнейдер [65, 66], А.А. Маталин [41, 42], В.М. Приходько [47] и др. Этими учеными были установлены параметры качества поверхности деталей машин, которые непосредственно определяют их эксплуатационные свойства, и выявлены зависимости, определяющие влияние параметров процесса обработки на заданные эксплуатационные характеристики.

На Рисунках 1.1 – 1.3 приведены примеры влияния параметров шероховатости на характеристики процесса трения [47].

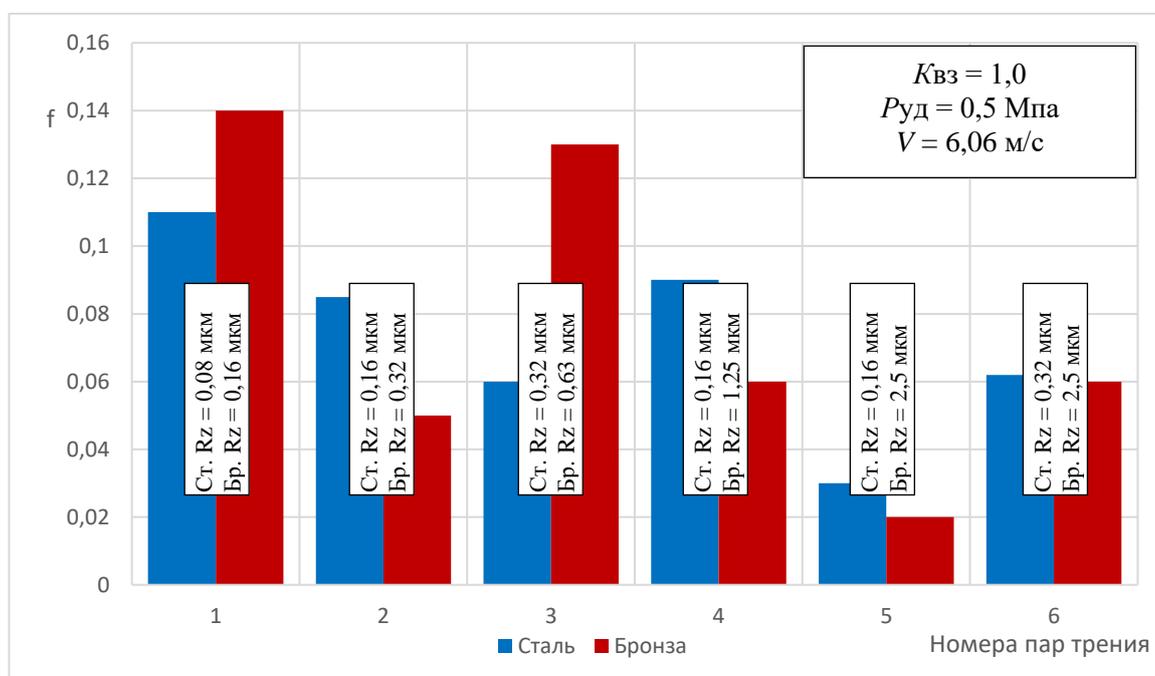


Рисунок 1.1 – Зависимость коэффициента трения от шероховатости в контакте пары трения сталь Х12Ф1 и бронза БрОСН-10-2-3

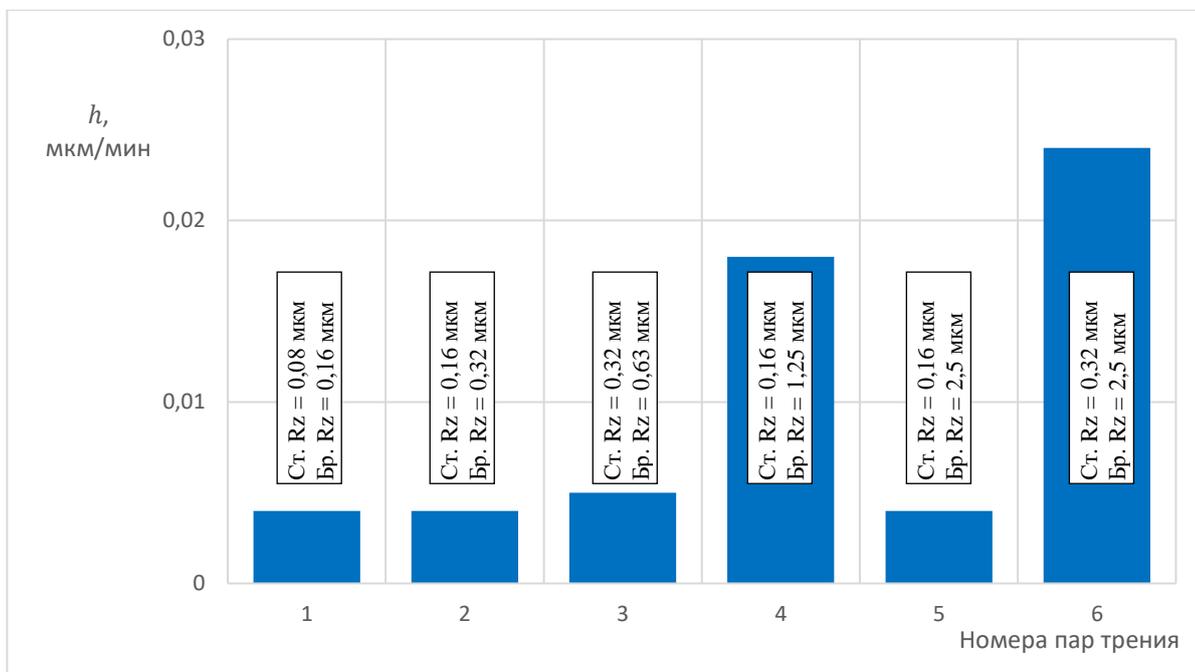


Рисунок 1.2 – Зависимость скорости изнашивания от шероховатости в контакте пары трения сталь Х12Ф1 и бронза БрОСН-10-2-3

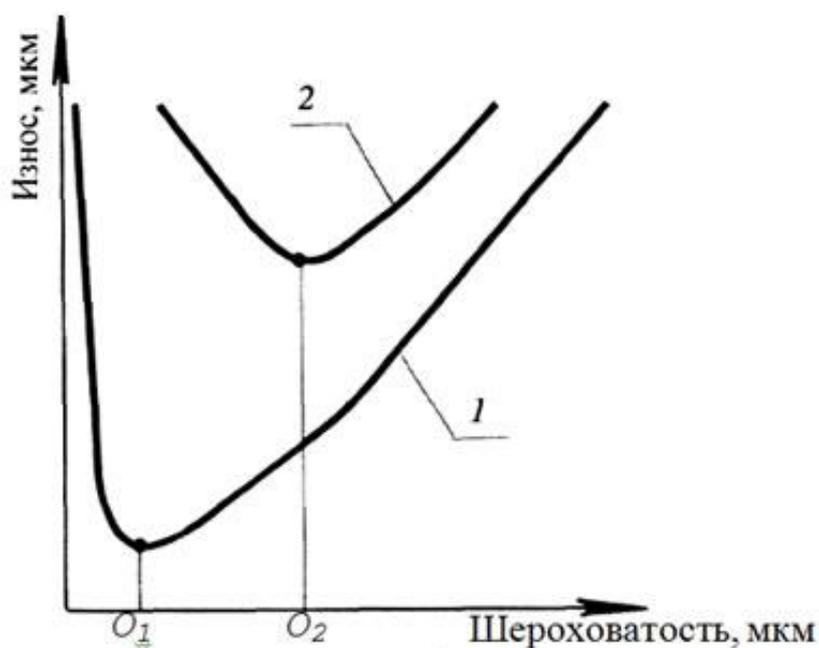


Рисунок 1.3 – Зависимость износа от шероховатости поверхностей при некоторых оптимальных значениях микронеровностей:

точки O_1 и O_2 – оптимальная шероховатость;
 кривая 1 соответствует легким условиям износа,
 кривая 2 соответствует тяжелым условиям износа

Характер и величина неровностей в большой степени сказываются на длительности процесса приработки сопрягаемых поверхностей.

Повысить износостойкость деталей пар трения можно, уменьшив первоначальный износ поверхности. Для этого необходимо создать поверхность скольжения с шероховатостью, соответствующей шероховатости поверхностей приработанных деталей, т.е. создать «оптимальную» или «равновесную» шероховатость.

Если поверхности детали придать шероховатость, соответствующую «оптимальной», то при постоянных условиях износ такой детали будет минимальным. По данным П.Е. Дьяченко [21, 22], кривые имеют ярко выраженный минимум, которому соответствует оптимальное значение среднего квадратического отклонения σ .

Вследствие шероховатости поверхности касание двух твердых тел всегда происходит в отдельных точках. Процесс контактирования рассмотрен в работах Э.В. Рыжова [49] и др. Вследствие дискретного контакта в точках касания площадь контактирования составляет 1...10% от номинальной, развиваются большие удельные давления, приводящие к деформации неровностей. Пример влияния шероховатости поверхности на площадь контакта приведен на Рисунке 1.4 [47].

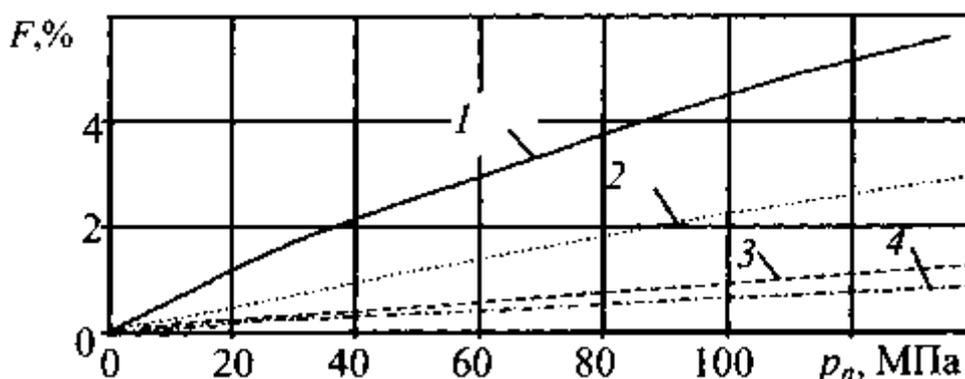


Рисунок 1.4 – Зависимость фактических значений площади контакта от номинального давления

(1 – $Ra=0.32 \text{ мкм}$; 2 – $Ra=0.63 \text{ мкм}$; 3 – $Ra=0.8 \text{ мкм}$; 4 – $Ra=1.25 \text{ мкм}$)

В целом, исследования показали, что фактическая площадь контакта резко снижается при изменении Ra в диапазоне 0,41...1,32 мкм. С дальнейшим увеличением Ra фактическая площадь контакта убывает слабо.

Величина фактической площади контакта $S\phi$ связана с деформацией микровыступов и определяет жесткость узлов машин в стыковых соединениях, и от нее в значительной степени зависят такие эксплуатационные свойства, как электрическая проводимость контакта, прочность прессовых посадок, контактная жесткость, герметичность и др. Пример влияния шероховатости на герметичность приведен на Рисунке 1.5 [47].

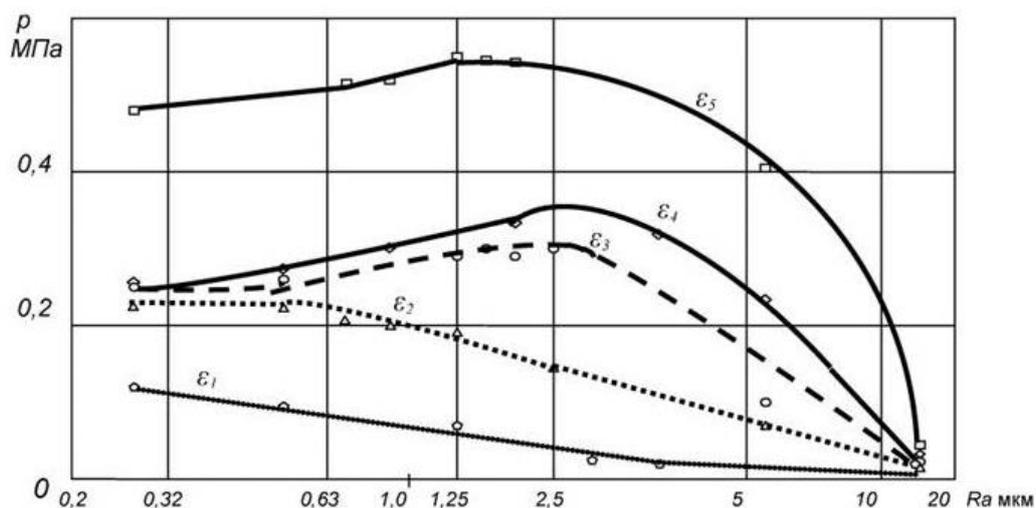


Рисунок 1.5 – Экспериментальные характеристики зависимости давления потери герметичности от шероховатости поверхности контртела

ϵ_1 - ϵ_5 – коэффициент сжатия жидкости

Установлено, что шероховатость поверхности практически не оказывает влияния на статическую прочность деталей, но параметры микрогеометрии поверхности существенно влияют на циклическую прочность [56 - 59]. Мелкие надрезы, острые кромки и риски, образующиеся на поверхности изделий после механической обработки, вызывают

концентрацию напряжений, которые снижают усталостную прочность материала детали. Концентрация напряжений происходит главным образом во впадинах, чем глубже впадина и меньше ее радиус, тем интенсивнее происходит концентрация напряжений. Установлено, что снижение шероховатости поверхности повышает циклическую прочность.

Таким образом, оптимальные значения эксплуатационных свойств получаются при некотором строго определенном значении шероховатости поверхности. Необходим автоматический контроль качества деталей, а именно – заданное значение шероховатости поверхности после чистовой (финишной) обработки.

1.2 Методы измерения и оценки шероховатости поверхности и состояния режущего инструмента

В настоящее время существует достаточно большой арсенал методов, которые используются для измерения и оценки шероховатости поверхности. В целом, их можно разделить на прямые и косвенные, контактные и бесконтактные [5, 11, 20, 23-25, 38, 39, 60].

Самым простым и распространенным в промышленной практике методом оценки шероховатости является **метод сравнения** [60]. Данный метод относится к бесконтактным. С использованием данного метода возможно производить оценку шероховатости поверхности в пределах $Ra > 1,25$ мкм, $Rz > 10$ мкм, ограничения прежде всего объясняются возможностями зрения контролера.

При этом сам процесс оценивания шероховатости поверхности сводится к сопоставлению обработанной поверхности и стандартных образцов шероховатости по ГОСТ 9378-93 (см. Рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Образцы сравнения

Следующим методом измерения шероховатости поверхности без физического контакта средства измерения и измеряемой поверхности является **метод светового сечения**. Суть метода заключается в том, что на шероховатую поверхность направляется пучок света, который проходит через щель. После того, как свет отражается от поверхности, он попадает в окуляр и формируется картина в виде искривленных световых линий, по которым можно вычислить параметры шероховатости. Диапазон измерений данным методом составляет $Ra = 0,8...62,5$ мкм. Внешний вид световых полос приведен на Рисунке 1.7 [60].

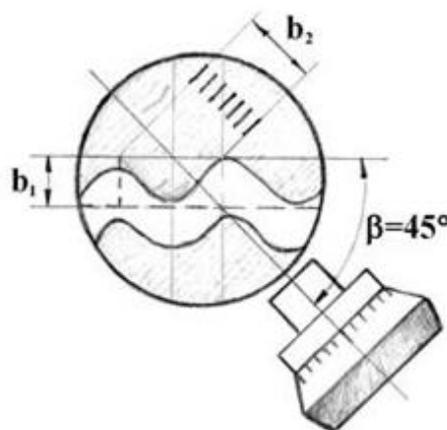


Рисунок 1.7 – Внешний вид световых полос
(b_1 и b_2 – размеры светового сечения)

Аналогичным по своему принципу действия методом является **интерференционный метод**. Данный метод положен в основу двойного оптического микроскопа Б.С. Линника [60]. В отличие от метода светового сечения, параметры шероховатости определяются с использованием интерференционных полос (см. Рисунок 1.8) [60]. Диапазон измерений данным методом составляет $Ra > 0,1\text{мкм}$.

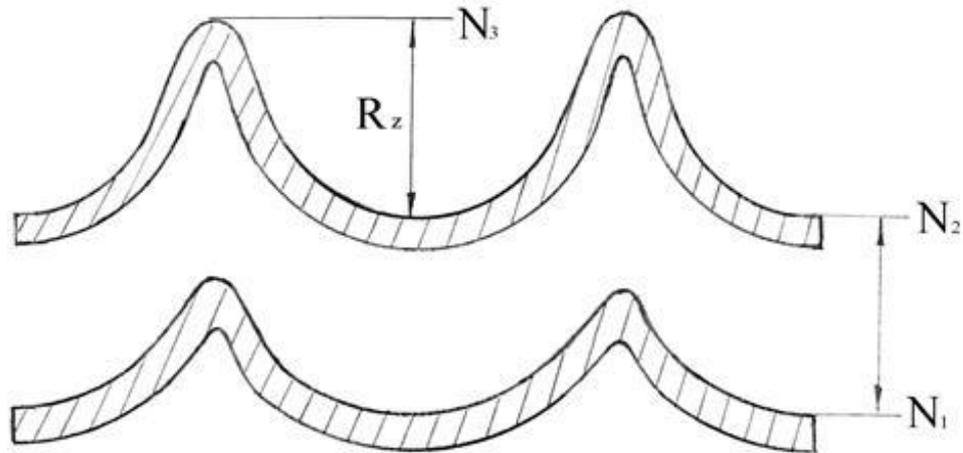


Рисунок 1.8 – Картина интерференционных полос

Также к оптическим бесконтактным методам измерения шероховатости относится **эллипсометрия**. В данном случае в качестве источника света используется лазерное излучение. При этом метод основан на том, что имеется возможность исследовать состояние отражающей поверхности на основе поляризации отраженного от нее света. При этом имеется возможность для измерения шероховатости с весьма малыми параметрами $Ra = 0,003 \dots 0,06 \text{ мкм}$. А также метод может быть использован для исследования качества покрытий и тонких пленок (см. Рисунок 1.9) [39].

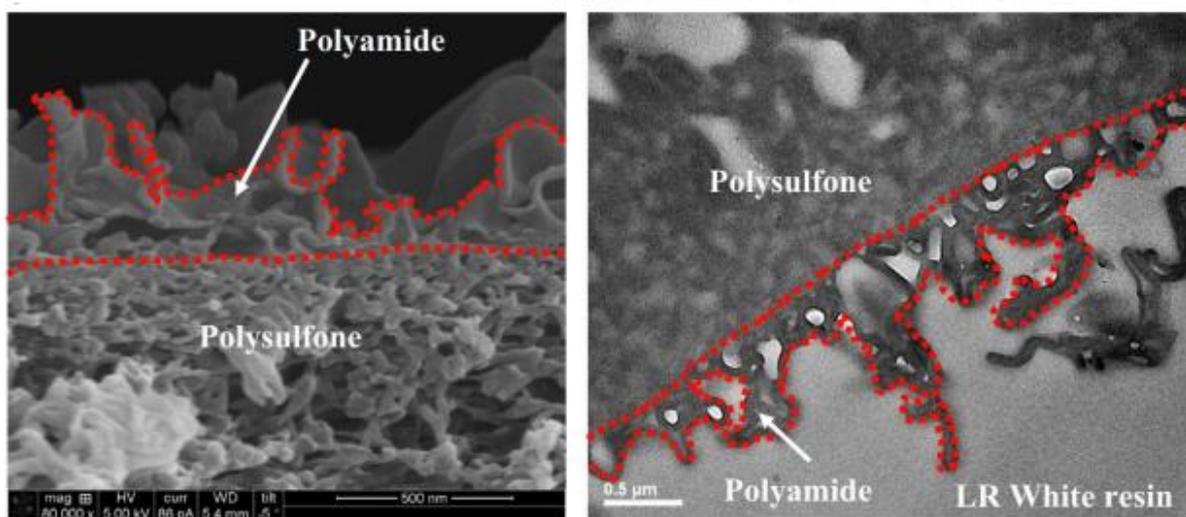


Рисунок 1.9 – Пример изображений поверхностей при эллипсометрии

Идея **растровой электронной микроскопии** заключается в том, что на поверхность направляется тонкий электронный луч, который в последующем собирается при помощи линз [39]. Современный растровый микроскоп, помимо линз, содержит катушки, которые синхронизированы между собой и образуют сканирующий зонд. Очевидно, что данный метод также относится к бесконтактным. Достоинством метода является высокая разрешающая способность (возможно оценивать размеры объектов в несколько нанометров), а также его производительность. Пример поверхности с увеличением в 90000 раз приведен на Рисунке 1.10 [39].

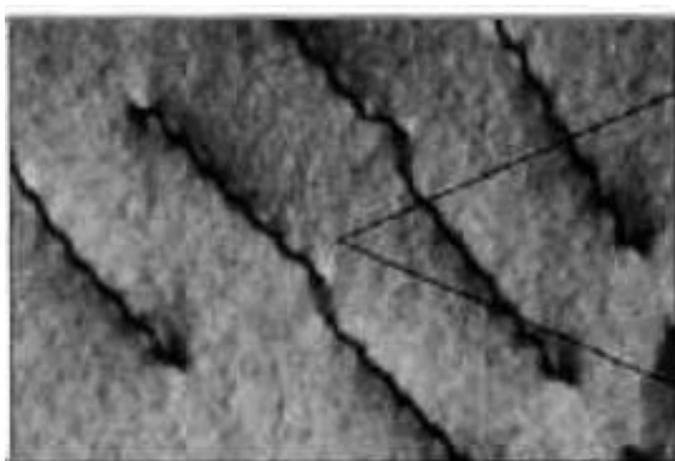


Рисунок 1.10 – Растровый снимок полированной поверхности

Контактные методы измерения шероховатости основаны на том, что объект измерения ощупывается контактным элементом. Наиболее распространенные на практике приборы, которые основаны на контактных измерениях, – профилометры (профилографы). В данных средствах измерений процесс осуществляется за счет того, что по поверхности передвигается острозаточенная алмазная игла (см. Рисунок 1.11) [39].

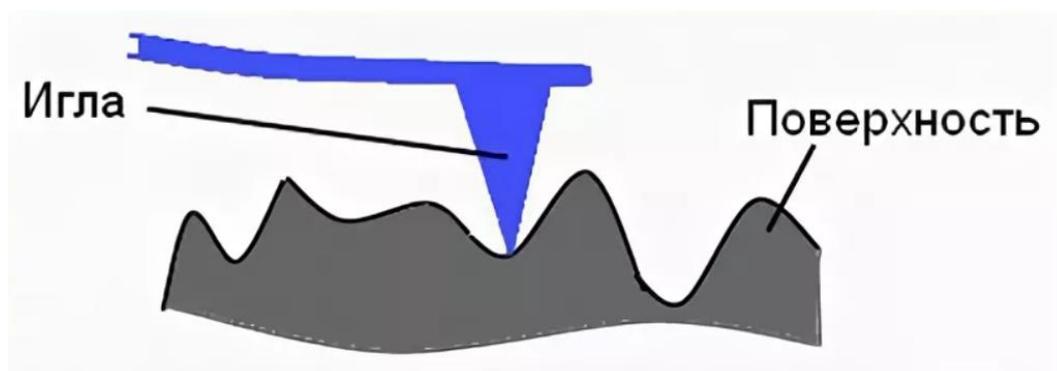


Рисунок 1.11 – Схема измерения профиля поверхности контактным методом

При этом перемещение иглы в вертикальной плоскости преобразуется в электрический сигнал. Метод позволяет измерять шероховатость с параметрами в пределах $Ra = 0,08 \dots 63$ мкм [39].

На контактном принципе основана **атомно-силовая микроскопия** [39]. В отличие от рассмотренного выше метода, в состав зонда измерительного средства входит игла, размеры которой измеряются в нанометрах. Также отличием является способ регистрации сигнала: если в предыдущем способе рассматривается вертикальное перемещение, то в данном случае в расчет принимается изгиб чувствительного элемента (кантилевера). Все это позволяет исследовать объекты чрезвычайно малых размеров (вплоть до атомарных слоев).

К отрицательным чертам данного метода можно отнести небольшие размеры поля для исследования (по сравнению с растровой микроскопией),

низкую производительность и достаточно высокую сложность обработки изображений.

На Рисунке 1.12 приведен пример рельефа полированной поверхности с увеличением в 27 млн. раз.

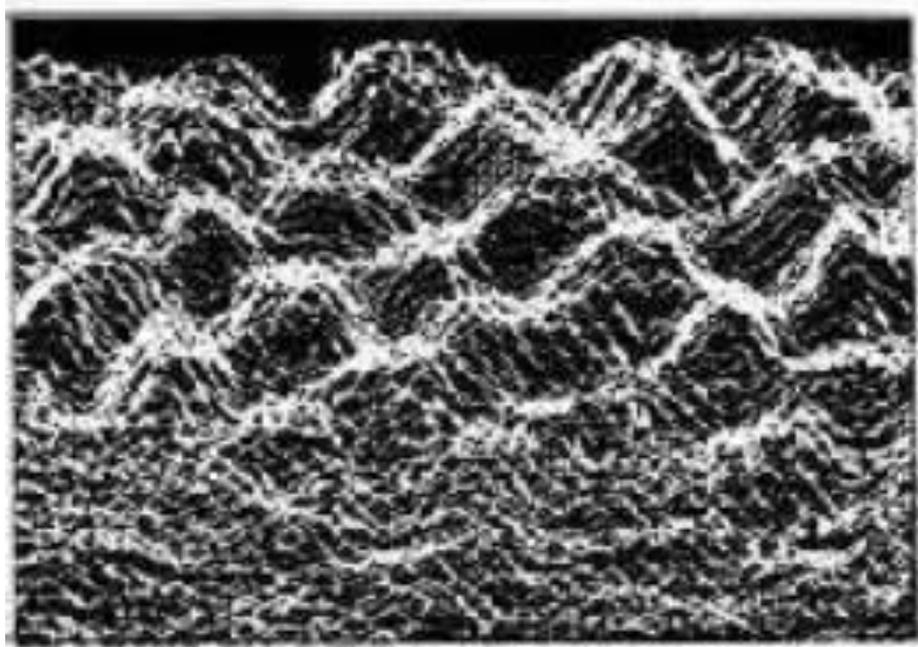


Рисунок 1.12 – Рельеф полированной поверхности, полученный на атомно-силовом микроскопе

Сравнительную оценку прямых методов оценки и измерения шероховатости представим в виде Таблицы 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительная характеристика прямых методов измерения и оценки шероховатости поверхности

Наименование метода	Диапазон измеряемых высотных значений, мкм	Возможность вывода результатов на ЭВМ	Сложность метода
Бесконтактные методы			
Сравнительный метод с использованием образцов	$R_a > 1.25$ мкм, $R_z > 10$ мкм	Отсутствует	Низкая
Метод светового сечения	$R_a = 0.8 \dots 62.5$ мкм	Отсутствует	Низкая
Интерференционный метод	$R_a > 0.1$ мкм	Отсутствует	Средняя
Лазерная эллипсометрия	$R_a = 0.003 \dots 0.06$ мкм	Имеется	Высокая
Растровая электронная микроскопия	$R_a > 0.001$ мкм	Имеется	Очень высокая
Контактные методы			
Профилографы (профилометры)	$R_a = 0.08 \dots 63$ мкм	Имеется	Средняя
Атомно-силовая микроскопия	$R_a > 0.0001$ мкм	Имеется	Очень высокая

Как видно из Таблицы 1.2, прямые методы имеют разную сложность и точность. Однако можно отметить, что все они не применяются в задачах автоматического обеспечения шероховатости поверхности. Хотя попытки такого использования были [39], промышленного применения данные решения не получили.

Известно, что при настройке станка на получение заданных размеров и качества обработки выставляются такие величины технологических режимов, которые обеспечивают требуемые выходные параметры автоматически. Однако главным фактором, влияющим на появление брака, является износ инструмента. Поэтому в контексте решаемой научной задачи целесообразно рассмотреть методы оценки износа инструмента. Достаточно

подробный анализ основных методов оценки износа инструмента был выполнен в работе А.М. Макеева [39]. На Рисунке 1.13 приведены методы оценки износа инструмента.



Рисунок 1.13 – Методы оценки износа инструмента

Система критериев, по которой проводился анализ, приведена на Рисунке 1.14.

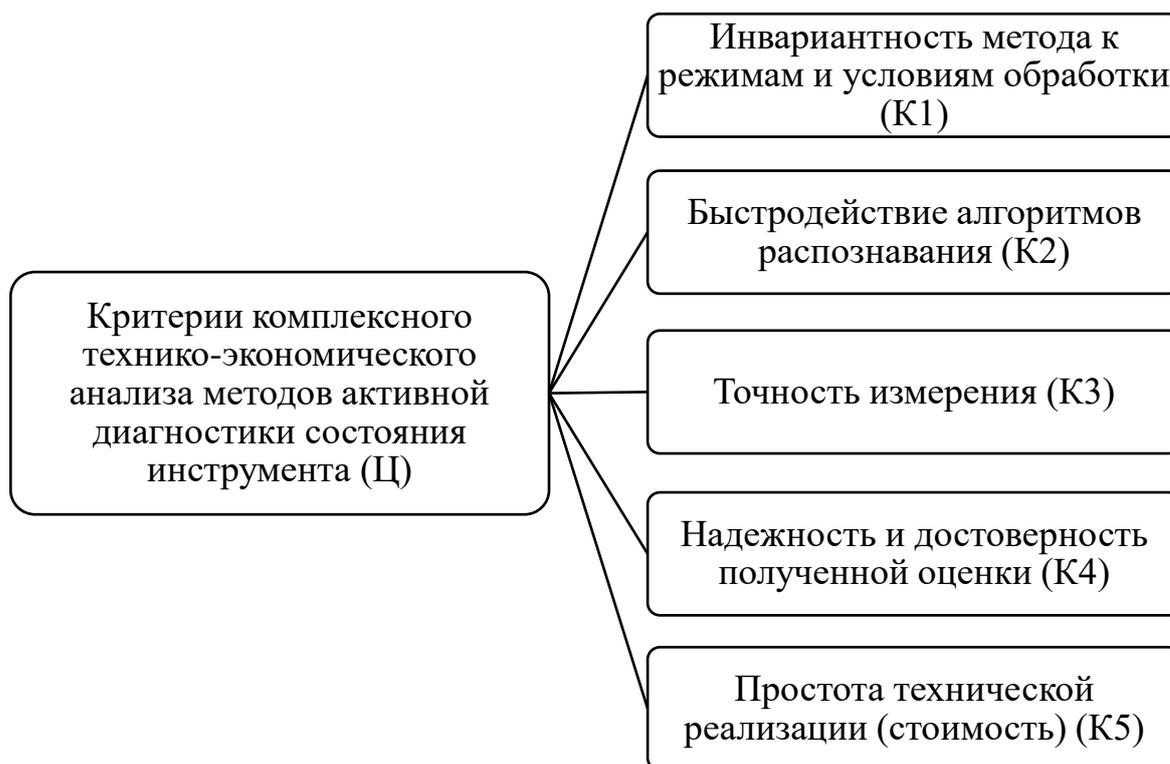


Рисунок 1.14 – Система критериев анализа методов оценки износа инструмента

В работе А.К. Остапчука [45] показано, что наилучшим сочетанием критериев обладают виброакустические измерения, что делает их наиболее пригодными для решения задачи контроля износа инструмента в контексте обеспечения шероховатости поверхности.

1.3 Выбор параметров и метода описания шероховатости

На заре исследований в части описания профиля шероховатости поверхности существовала гипотеза, что для однозначной характеристики данного объекта достаточно одного параметра. Поэтому в период 1933-1970 гг. исследования сводились к поиску такого параметра, который бы наиболее информативно описывал шероховатость поверхности. В Таблице 1.3 приведен перечень параметров, а также год, когда они были предложены [60].

Таблица 1.3 – Однопараметрическое моделирование профиля шероховатости

Параметр	Обозначение	Год
Величина среднего арифметического отклонения профиля	$Ra = \frac{1}{l} \times \int_0^l y(x) dx$	1933
Среднее квадратичное отклонение профиля	$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \times \int_0^l y^2(x) dx}$	1933
Наибольшая высота профиля	$Rmax$	1957
Отношение наибольшей высоты профиля к среднему квадратичному отклонению профиля	$Rmax/Rq$	1958
Среднее квадратичное значение производной высоты профиля	$Z_5 = \sqrt{\frac{1}{l} \times \int_0^l (dy/dx)^2 dx}$	1962
Среднее квадратичное значение второй производной высоты профиля	$Z_6 = \sqrt{\frac{1}{l} \times \int_0^l (d^2y/dx^2)^2 dx}$	1962
Характеристика направленности	Z_7	1962
Средний шаг впадин	λ	1963
Глубина впадин профиля	ε	1964
Отношение шага к базовой длине	S/l	1964
Автокорреляционная функция	$K_{xx} = \frac{1}{l} \int_0^l f(x) f(x + \Delta x) dx$	1965

Позднее было установлено, что использование однопараметрической оценки параметра профиля не способно характеризовать свойства поверхности и ее служебное назначение, т.к. необходимо учитывать не только высотные параметры, но и шаговые, а также форму и расположение микронеровностей. В этом свете были предложены системы оценки шероховатости, которые использовали несколько параметров.

В Таблице 1.4 приведен перечень комбинаций из трех параметров, которые использовались для характеристики шероховатости [60].

Таблица 1.4 – Трехпараметрическое описание профиля поверхности

Выбранные параметры	Год
Вероятностные характеристики профиля	1946
Высотные, шаговые параметры и характеристика формы неровностей	1961
Распределение высот, шаговые параметры и поверхностная плотность	1968

Анализируя мировую практику, можно сказать, что существует более 100 параметров для описания характеристики шероховатости, которые можно разбить на группы (см. Рисунок 1.15).

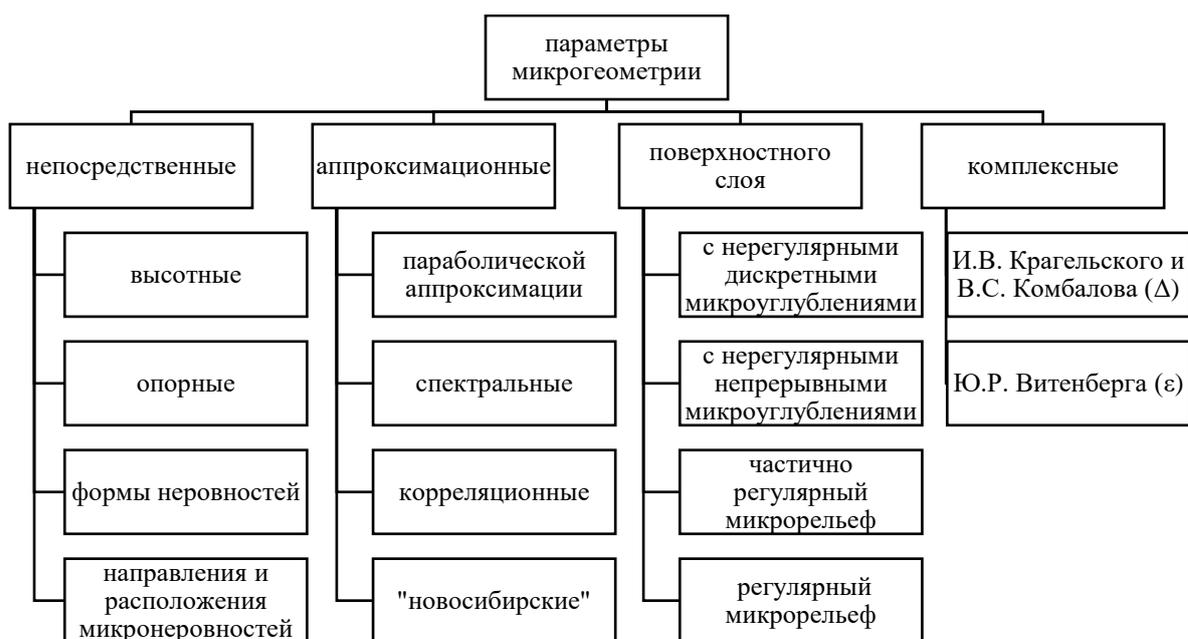


Рисунок 1.15 – Система параметров характеристики шероховатости поверхности

На сегодняшний день в РФ наибольшее распространение получила параметрическая оценка шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-1973 (см. Рисунок 1.16).

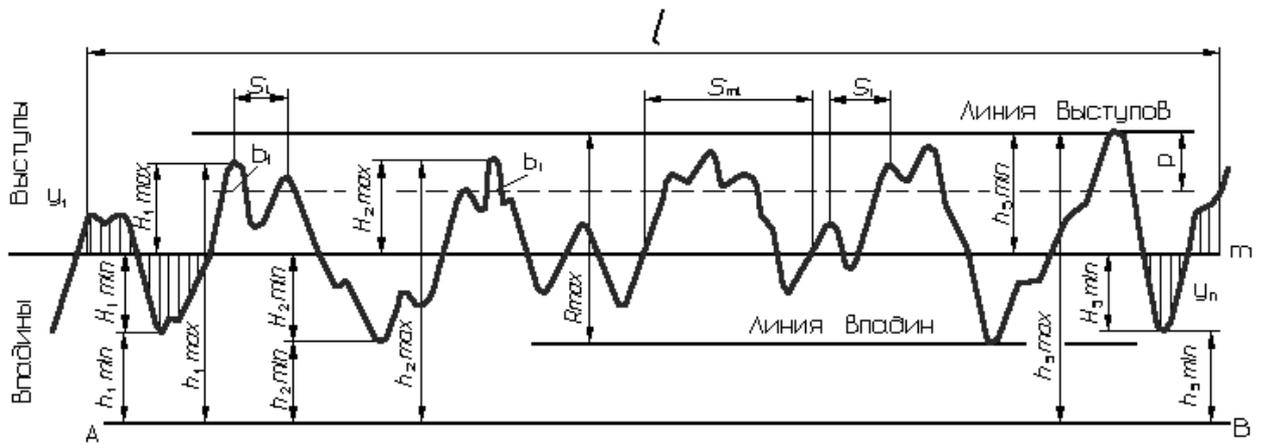


Рисунок 1.16 – Параметрическая оценка шероховатости по ГОСТ 2789-73

Как было установлено более поздними исследованиями [14, 43], для решения многих прикладных задач параметрическая оценка шероховатости не подходит. К числу таких задач можно отнести рассмотрение вопросов контактного взаимодействия, герметичности и т.д. В этом свете стал формироваться непараметрический подход к описанию шероховатости. Первоначально для описания были использованы сферы [43].

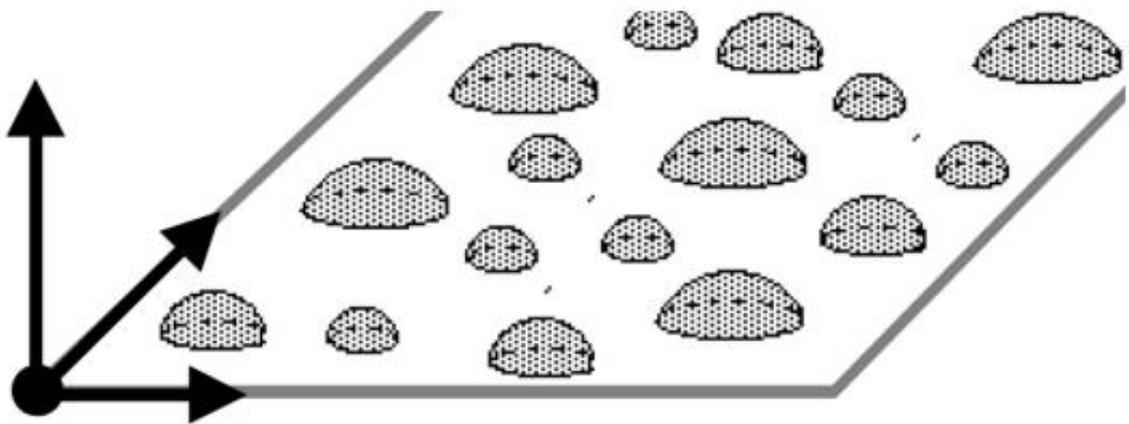


Рисунок 1.17 – Использование сфер для описания шероховатых поверхностей

В более поздних работах сферические сегменты были заменены на цилиндрические фрагменты (стержневые модели) [43].

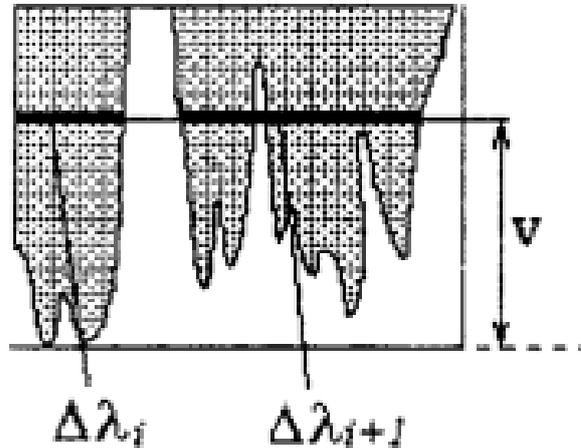


Рисунок 1.18 – Стержневая модель описания шероховатых поверхностей

Применение данных моделей позволило оценивать деформацию элементов микропрофиля и решать на этой основе прикладные задачи, в частности, механики контактного взаимодействия и т.д.

Общим недостатком данных моделей является то, что они рассматривают шероховатость как детерминированную кривую (поверхность). Более поздними исследованиями было установлено, что распределение ординат профиля шероховатости имеет случайный характер. Пример гистограммы приведен на Рисунке 1.19.

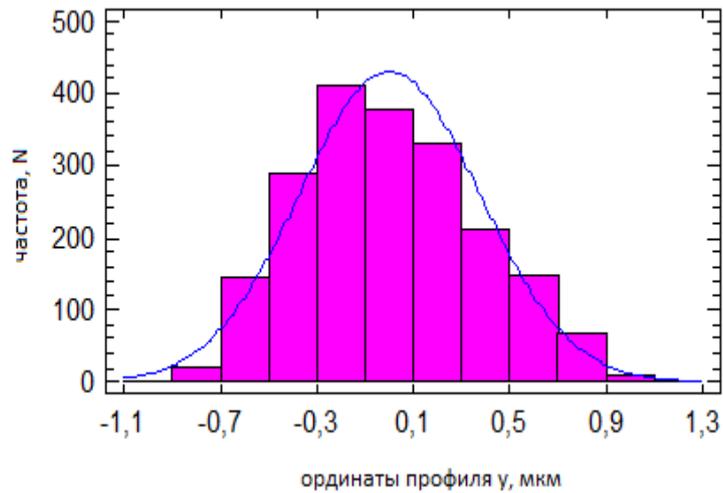


Рисунок 1.19 – Гистограмма ординат профиля

Введение элемента случайности в модели профиля позволило изучать объекты со свойствами, которые приближены к реальным. Например, в работе З. Брандта [8] была построена модель профиля шлифовального круга, которая имела случайное распределение зерен по высоте, подчиняющееся нормальному закону. Пример модели приведен на Рисунке 1.20.

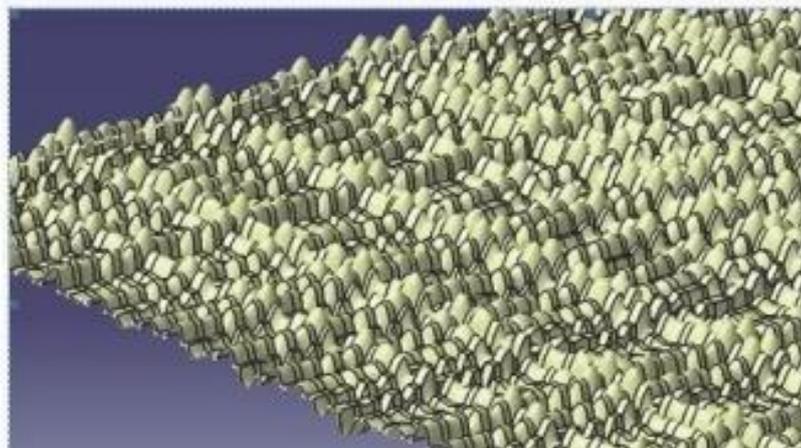


Рисунок 1.20 – Модель поверхности шлифовального круга

В последнее время все большее распространение при решении задач моделирования шероховатых объектов приобретает фрактальная геометрия [6, 8, 40, 66, 67, 70, 71, 73, 74, 77-84, 92]. Рядом исследователей [46, 77-84] было доказано, что профиль шероховатости поверхности, который имеет

регулярный микрорельеф, обладает свойством самоафинности (масштабной инвариантности по одной из осей).



Рисунок 1.21 – Самоафинность профиля шероховатости

Построенные на основе фрактальной геометрии модели позволяют учесть структурные особенности профиля и в ряде случаев добиться высокой точности по основным параметрам ГОСТ 2789-73.

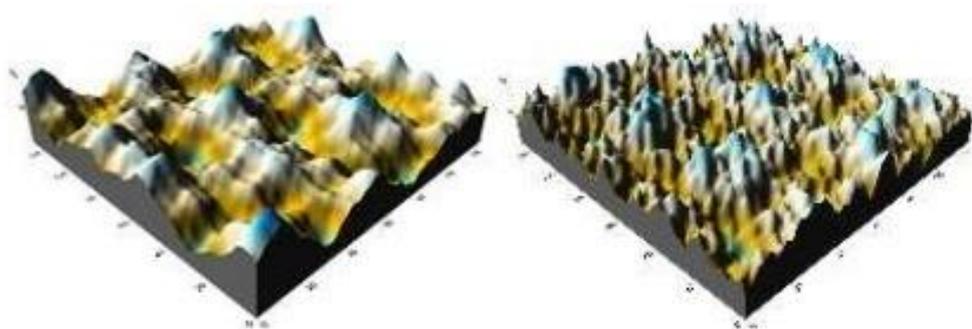


Рисунок 1.22 – Примеры фрактальных поверхностей

Существенным недостатком фрактальных моделей является их низкая универсальность [46], т.е. необходимость индивидуальной подстройки модели под каждую текстуру профиля.

Таким образом, актуальной задачей является разработка такой модели шероховатости поверхности, которая, с одной стороны, наиболее корректно позволяет учитывать свойства профиля, а с другой, обеспечивает требуемую точность параметрической оценки.

1.4 Технологическое обеспечение параметров шероховатости при чистовом точении

В ряде случаев точение может использоваться в качестве окончательного метода обработки. Основным условием при этом является обеспечение требуемых параметров точности и качества обработки. Для этого необходимо назначить такие значения технологических режимов, которые гарантированно обеспечивают указанные выше требования.

В Таблице 1.5 приведена зависимость шероховатости поверхности и эксплуатационных свойств детали от различных технологических факторов [4, 10, 24, 25, 27, 30-34, 53-59].

Примечания: 1. Знак «+» означает, что увеличение (или уменьшение) данного условия обработки способствует увеличению (или уменьшению) определенного параметра качества поверхности.

2. Знак «-» означает, что увеличение (или уменьшение) данного условия обработки способствует уменьшению (или увеличению) определенного параметра качества поверхности.

3. Знак «0» означает, что изменение данного условия обработки не оказывает влияния на определенные параметры качества поверхности.

4. «*» – условия обработки, оказывающие основное влияние на определенные параметры качества поверхности.

Таблица 1.5 – Взаимосвязь параметров поверхностей деталей машин с условиями их обработки

Эксплуатационное свойство	Геометрические характеристики обработанной поверхности					
	Шероховатость					
	Ra (Rz)	R _{max}	S _m	S	t _p	R _p
Подача S, мм/об:						
< 0.1	0	0	+*	+*	0	-
≥ 0.1	+*	+*	+*	+*	0	+*
Скорость резания V, м/мин						
< 40	+	+	0	-	0	+
≥ 40	-	-	0	+	0	-
Глубина резания t	+	+	+	+	0	+
Углы резца в плане φ и φ ₁ :						
< arcsin S/ (2r)	+*	+*	0	+	0	+*
≥ arcsin S/ (2r)	0	0	0	+	0	0
Передний угол резца:						
> 0	+	+	0	-	0	+*
< 0	+	+	0	+	0	+
Радиус при вершине r	-*	-*	0	-	0	-
Радиус скругления режущей кромки ρ	+	+	0	-	0	+
Шероховатость режущей кромки R _{zркр}	+*	+*	0	-*	-*	+*
Жесткость ТС j _{ТС}	-	-	+	+	+	-
Неравномерность твердости заготовки ΔНВ	+	+	0	0	-	+
Предел текучести материала σ _T	-	-	0	-	0	-
Исходное макроотклонение H _{махисх}	0	0	0	0	0	0
Исходная волнистость W _{Z исх}	0	0	0	0	0	0
Исходная шероховатость R _{Z исх}	+	+	+	-	-	+
Молекулярная составляющая силы трения τ ₀	-*	-*	0	+	+*	-
СОТС	+	+	0	-	0	+

Первоначально для описания зависимости шероховатости от технологических факторов использовались аналитические зависимости,

которые описывали образование шероховатости поверхности исходя в основном из кинематики процесса резания, рассмотрим основные из них.

Рассматривая поверхность как след движения резца, из чисто геометрических соображений была предложена формула по определению высоты неровностей профиля [27, 53-56]:

$$R_z = \frac{S^2}{8 \times r}, \quad (1.12)$$

где S – продольная подача; r – радиус при вершине резца.

Величина шероховатости, определенная по данной формуле, значительно отличается от действительной, т.к. данная формула не учитывает целый ряд факторов, которые оказывают влияние на образование шероховатости.

В работе А.И. Исаева [27] была предложена зависимость для определения шероховатости, которая учитывает влияние пластических течений материала на образование микронеровностей:

$$R_z = \frac{S}{8 \times r} + \frac{h_{\min}}{2} \times \left(1 + \frac{r \times h_{\min}}{S^2} \right), \quad (1.13)$$

где h_{\min} – минимальная толщина среза.

Но при последующих экспериментальных проверках было доказано, что данная зависимость справедлива при точении с подачами $S \geq 0.12 \text{ мм/об}$, а при подачах меньше указанных наблюдается большое расхождение с экспериментальными данными.

А.И. Исаев предложил формулы, которые учитывают влияние углов в плане резца, подачи и радиуса при вершине инструмента на среднюю высоту неровностей обработанной поверхности [27]:

$$\begin{aligned} &\text{при } \varphi_1 < \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right); \quad \varphi < \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right) \\ &R_z = \frac{\sin \varphi \times \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \times \left(S - r \times \left(\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) + \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) \right) \right), \quad (1.14) \\ &\text{при } \varphi_1 > \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right); \quad \varphi < \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right) \end{aligned}$$

$$R_z = r \times (1 - \cos \varphi) + S \times \sin \varphi \times \cos \varphi - \sin \varphi \times \sqrt{S \times \sin \varphi \times (2 \times r - S \times \sin \varphi)}, \quad (1.15)$$

$$\text{при } \varphi_1 < \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right); \quad \varphi > \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right)$$

$$R_z = r \times (1 - \cos \varphi_1) + S \times \sin \varphi_1 \times \cos \varphi_1 - \sin \varphi \times \sqrt{S \times \sin \varphi_1 \times (2 \times r - S \times \sin \varphi_1)}, \quad (1.16)$$

$$\text{при } \varphi_1 > \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right); \quad \varphi > \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right)$$

$$R_z = r - \frac{\sqrt{4 \times r^2 - S^2}}{2}, \quad (1.17)$$

Эти зависимости учитывают большое число параметров процесса резания, но они обладают существенными недостатками, т.к. не учитывают физико-механических свойств обрабатываемого материала и условий обработки.

На смену теоретическим формулам пришли эмпирические расчетные зависимости, которые были получены в лабораторных условиях. Многочисленными исследованиями было установлено большое число зависимостей высоты микронеровностей от различных технологических факторов.

Можно выделить следующую группу технологических факторов, которые оказывают влияние на образование шероховатости [53-56]:

- форма режущего инструмента;
- кинематика процесса резания;
- наличие упругих и пластических деформаций;
- вибрации элементов технологической системы;
- шероховатость режущей кромки инструмента;
- вырывы обработанного металла с поверхности детали, вызванные адгезионным трением.

Исходя из условий обработки в работе А.Г. Сулова [56] была предложена зависимость для расчета высоты микронеровностей:

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (1.18)$$

где h_1 – составляющая высоты микронеровностей, вызванная кинематикой процесса резания и формой режущей части резца;

h_2 – составляющая высоты микронеровностей, определяемая амплитудой колебаний от частоты возмущающей силы, вызванной неравномерностью припуска при прохождении резца по выступу или впадине исходной шероховатости и неравномерностью твердости заготовки в продольном и поперечном направлениях;

h_3 – составляющая высоты микронеровностей, определяемая упругими и пластическими деформациями;

h_4 – составляющая высоты микронеровностей, определяемая шероховатостью режущей кромки инструмента,

$$\text{при } \varphi_1 < \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right); \quad \varphi > \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right)$$

$$R_z = \frac{r \times (1 - \cos \varphi)}{\cos \gamma} + \frac{\operatorname{tg} \varphi \times \operatorname{tg} \varphi_1 \times (S - r \times (\sin \varphi - \sin \varphi_1)) - r \times \operatorname{tg}(\cos \varphi_1 - \cos \varphi)}{\cos \gamma \times (\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi)} +$$

$$+ \frac{C_y \times S^{yP} \times V^{-zP} \times (HB_{\max}^n \times t^{xP} - HB_{\min}^n \times (1 + R_{zucx} \times 10^{-3})^{xP}) \times \left(\frac{1}{\gamma_{CT}} + \frac{1}{\gamma_u} + \frac{1}{\gamma_3}\right)}{HB_{CP}^m} +$$

$$+ \frac{0.5 \times \rho \times \left(1 - \frac{2 \times \tau_0}{\sigma}\right)}{\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} + \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1}} + R_{zp.k}, \quad (1.18)$$

$$\text{при } \varphi_1 \geq \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right); \quad \varphi \geq \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right)$$

$$R_z = \frac{r}{\cos \gamma} - \frac{\sqrt{4 \times r^2 - S^2}}{2 \times \cos \gamma} + \frac{0.5 \times \rho \times \left(1 - \frac{2 \times \tau_0}{\sigma_\tau}\right) \times \left(2 \times S + 1 - \frac{2 \times \tau}{\sigma_\tau}\right)}{32 \times r} + R_{zp.k} +$$

$$+ \frac{C_y \times S^{yP} \times V^{-zP}}{HB_{CP}^n} \times \left(HB_{\max}^n \times t^{xP} - HB_{\min}^n \times (t - R_{zucx} \times 10^{-3})^{xP} \right) \times \left(\frac{1}{\gamma_{CT}} + \frac{1}{\gamma_u} + \frac{1}{\gamma_3} \right) \quad (1.19)$$

$$\text{при } \varphi_1 \geq \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right); \quad \varphi < \arcsin\left(\frac{S}{2 \times r}\right)$$

$$\begin{aligned}
R_z = & \frac{r \times (1 - \cos \varphi) + \sin \varphi_1 \times \left(S \times \cos \varphi_1 - \sqrt{S \times \sin \varphi_1 \times (2 \times r - S \times \sin \varphi_1)} \right)}{\cos \gamma} \times \\
& \times \frac{C_y \times S^{XP} \times V^{-ZP} \times (HB_{\max}^n \times t^{XP} - HB_{\min}^n \times (1 + R_{\text{учех}} \times 10^{-3})^{XP}) \times \left(\frac{1}{\gamma_{CT}} + \frac{1}{\gamma_u} + \frac{1}{\gamma_3} \right)}{HB_{CP}^m} \times \\
& \times \frac{0.5 \times \rho \times \left(1 - \frac{2 \times r_0}{\sigma} \right)}{\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} + \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1}} + R_{z.p.k.}
\end{aligned} \tag{1.20}$$

Все полученные эмпирические зависимости для расчета параметров шероховатости поверхности обладают ограниченностью, т.к. пригодны для использования лишь в условиях адекватных тем, при которых были получены.

Также значимой причиной ухудшения качества обработанной поверхности является рост вибраций по мере увеличения износа инструмента. На Рисунке 1.23 приведена схема образования неровностей поверхностей с регулярным микропрофилем [13, 64].

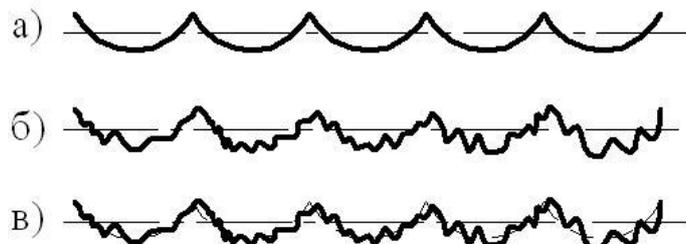


Рисунок 1.23 – Схема образования неровностей поверхностей с регулярным микропрофилем

При обработке имеется регулярная составляющая профиля (Рисунок 1.23, а), которая обусловлена геометрическими и кинематическими аспектами процесса. Также вследствие возмущающего воздействия возникают вибрации технологической системы, которые порождают случайную компоненту (Рисунок 1.23, б). И результирующий профиль является суммой двух этих составляющих (Рисунок 1.23, в).

Таким образом, процесс образования микропрофиля можно проиллюстрировать в виде схемы, которая представлена на Рисунке 1.24 [13, 64].



Рисунок 1.24 – Схема образования микропрофиля

Таким образом, одним из факторов, который оказывает существенное влияние на качество поверхностей, обработанных точением, является устойчивость процесса обработки.

Изучению устойчивости посвящен ряд исследований [8], результаты которых говорят о том, что существует определенная область технологических режимов, которые обеспечивают устойчивость процесса обработки и стабильные значения параметров качества поверхностного слоя, в том числе и шероховатости поверхности.

Например, в работе И.А. Телкова [61] проводилось исследование колебаний технологической системы. На Рисунке 1.25 приведены области технологических режимов, соответствующие устойчивому и неустойчивому состоянию технологической системы.

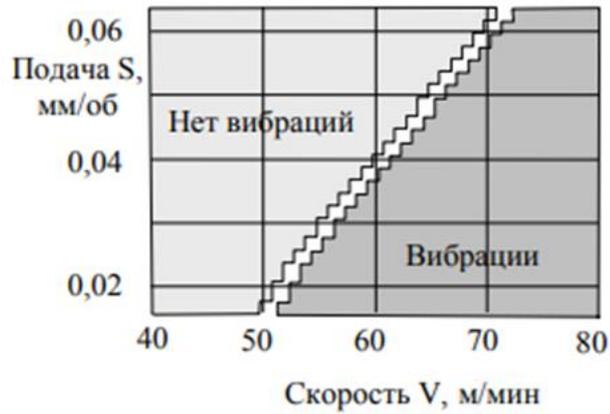


Рисунок 1.25 – Области технологических режимов, соответствующие устойчивому и неустойчивому состоянию технологической системы

Из Рисунка 1.25 видно, что переход из устойчивого состояния в неустойчивое происходит в очень узком диапазоне изменения технологических режимов. Также проблема усугубляется тем, что процесс сопровождается некоторой степенью неопределенности, связанной с различиями в характеристиках станков, обрабатываемых материалов и т.д. Все это порождает нечеткий характер зависимостей (см. Рисунок 1.26).

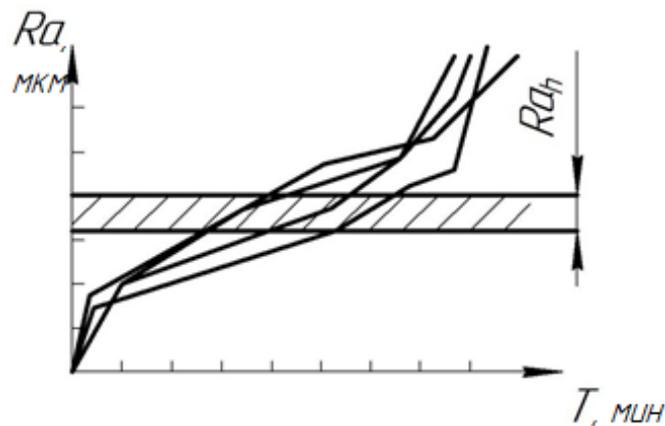


Рисунок 1.26 – Нечеткая граница шероховатости обработанной поверхности

Таким образом, решение вопросов автоматического обеспечения заданных параметров шероховатости поверхности необходимо реализовывать на основе подходов, которые учитывают индивидуальные свойства каждой конкретной технологической системы.

1.5 Основные выводы по главе

Проведенный аналитический обзор состояния вопроса позволяет сделать ряд выводов:

1. Основные эксплуатационные свойства деталей и узлов зависят от качества поверхностного слоя, в том числе от шероховатости поверхности, причем значимые параметры шероховатости (с точки зрения влияния на эксплуатационные свойства) не только высотные, но и шаговые.

2. 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.

3. Использование прямых методов оценки и измерения шероховатости поверхности затруднительно в случае автоматического обеспечения шероховатости. В результате анализа состояния вопроса используемых на практике решений подобного рода выявлено не было.

4. Одними из самых перспективных способов активной диагностики и мониторинга состояния технологической системы являются методы, основанные на применении виброакустических сигналов.

5. 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.

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

На основе указанных выше выводов можно сформулировать цель диссертационного исследования: технологическое обеспечение требуемой шероховатости деталей из термоупрочненных сталей, обработанных точением на основе 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.

2 РАЗРАБОТКА ФРАКТАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПОСЛЕ ЧИСТОВОГО ТОЧЕНИЯ

2.1 Шероховатость поверхности как выходной фактор процесса чистового точения

Среди главных задач функционирования и развития любого производства, в том числе и автоматизированного, можно выделить повышение производительности обработки с одновременным обеспечением заданных требований по точности и качеству обработки. Причем производительность повышается за счет сокращения как основного, так и вспомогательного времени. Если вспомогательное время сокращают за счет автоматизации загрузки/разгрузки, сокращения затрат времени на холостые ходы и смену режущего инструмента, основное время при этом можно сократить за счет определения оптимального технологического режима обработки и контроля в процессе обработки всех необходимых входных и выходных параметров на основе адаптивного управления процессом.

При этом в общем случае производительность можно определить по формуле вида [53-56]:

$$\Pi = \Pi(t, V, F, S, \Delta, \delta, H), \quad (2.1)$$

где t, S, V – параметры режимов; F, Δ, δ, H – параметры усилий и деформаций.

Параметры F, B, t , от которых зависит производительность, имеют некоторые отклонения от номинальных за счет имеющихся возмущающих воздействий H, δ, Δ . Эта ситуация порождает необходимость искусственного занижения параметров технологических режимов, что в свою очередь порождает снижение производительности.

В этом свете имеет смысл рассмотреть более подробно процессы, которые протекают в технологической системе и оказывают влияние на

выходные параметры процесса обработки. Схема процессов приведена на Рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Схема процессов в технологической системе

Учитывая специфику рассматриваемой в данной работе задачи, следует отметить, что влияние части процессов, представленных на схеме (Рисунок 2.1), нивелируется за счет настройки на выполнение конкретной операции. Т.к. обработка на станке с программным управлением предполагает изготовление пробной партии, дополнительно определяются параметры

обработки, которые обеспечивают требуемые значения точности и качества обработанной поверхности. Применительно к адаптивному управлению данный процесс можно представить в виде схемы на Рисунке 2.2.

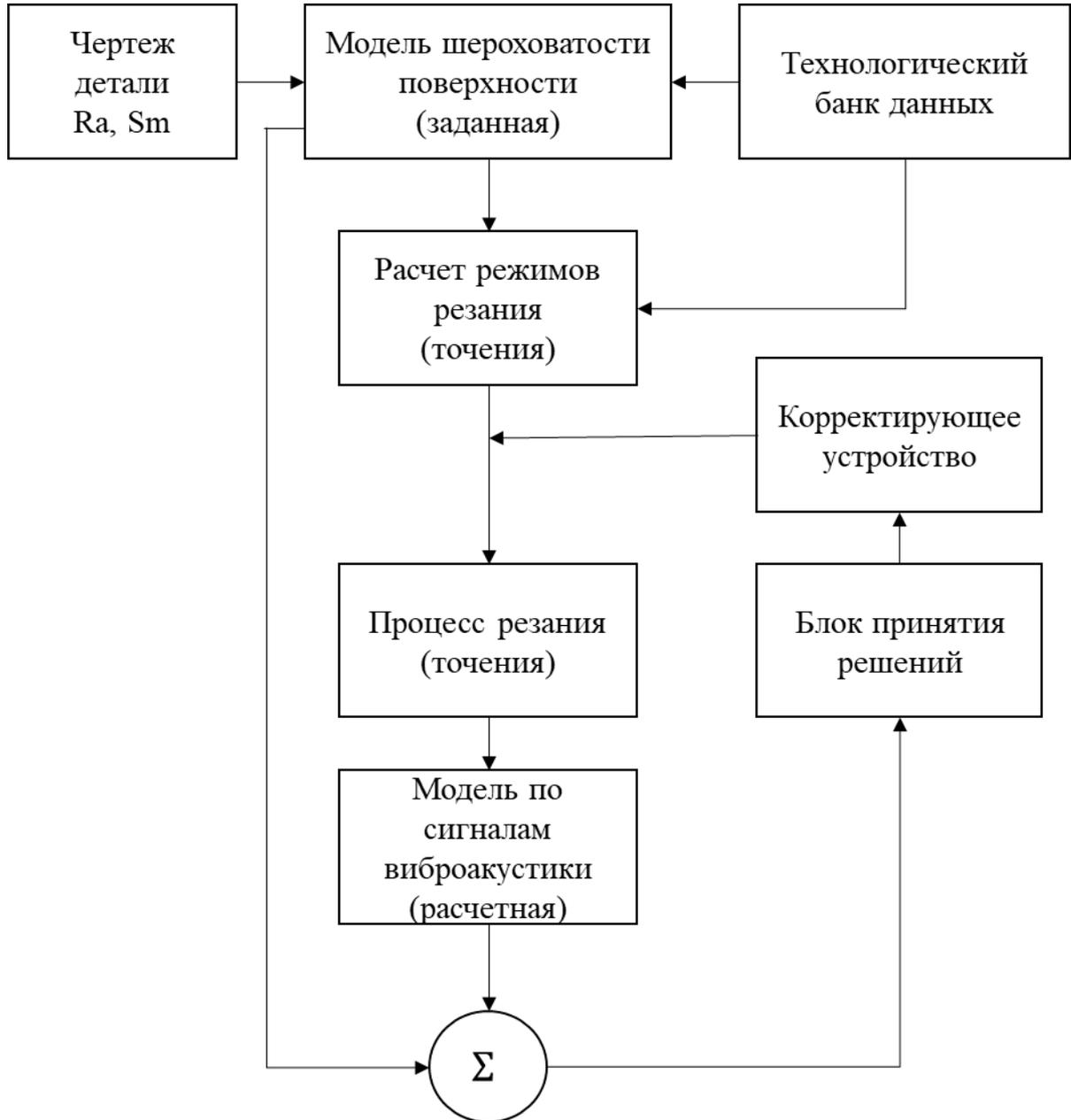


Рисунок 2.2 – Схема настройки станка

Можно выделить следующие этапы настройки:

– определяется максимально допустимая величина подачи исходя из требований к служебному назначению детали;

– определяется максимально допустимое значение скорости резания, которое обеспечивает требуемые выходные параметры.

Также действует система ограничений. В качестве факторов, ограничивающих режимы резания, принимаются следующие:

- ограничения по максимальной и минимальной частоте вращения шпинделя, допустимой кинематикой станка:

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max} . \quad (2.2)$$

- ограничения по максимальной и минимальной подаче:

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max} . \quad (2.3)$$

- ограничения по заданной производительности:

$$S \times n \geq L \times R / (60 \times K_3 - T_{eu} R) , \quad (2.4)$$

где R – заданная производительность станка,

L – длина рабочего хода, мм;

K_3 – коэффициент загрузки станка.

Анализируя схему, которая представлена на Рисунке 2.2, можно отметить, что в ее составе есть два главных блока:

- модель шероховатости поверхности;
- технологический банк данных.

Учитывая, что конечная текстура профиля шероховатости обработанной поверхности является результатом воздействия процессов, которые представлены на Рисунке 2.1 (в разной степени влияния), модель шероховатости необходимо строить так, чтобы она, с одной стороны, максимально точно описывала реальный профиль (моделируемый объект), а с другой стороны, позволяла учитывать процессы, которые влияют на ее формирование.

Также необходимо сформировать технологический банк данных с возможностью самообучения и выявить информационный признак (признаки) для оценки выходных параметров в процессе управления и

выработки управляющего воздействия. В этом свете схему, представленную на Рисунке 2.2, можно привести к виду, который представлен на Рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Схема обеспечения заданных параметров качества обработки

2.2 Подбор закона распределения шероховатости

В большинстве реально встречающихся поверхностей, полученных в процессе механической обработки, профиль поверхности является суперпозицией большого числа «сигналов», приходящих в точку приема по различным «траекториям». Поверхность обработанной детали является результатом сложения всех возможных движений и отражает последствия всех процессов, происходящих в системе станка. Случайная составляющая профиля налагается на систематическую (идеальную шероховатость), вызванную геометрией рабочей части инструмента и кинематикой работы его движения.

Естественно ожидать, что хаотический характер профиля и в целом поверхности будет сказываться на статистических характеристиках суммарной поверхности. Чем более хаотичной является поверхность, тем меньшей степени определенности следует ожидать от распределения амплитуды профиля. Это проявляется в величине дисперсии квадрата амплитуды, т.е. в ожидаемом отклонении мощности «сигнала» от ее среднего значения.

Кривые распределения, построенные на основании данных наблюдений, получаются в виде ломаных линий не вполне правильной формы; их форма в большой степени зависит от числа интервалов, на которые было разбито поле рассеивания при их построении. Вывод каких-либо закономерностей, имеющих общее значение, на основании рассмотрения таких кривых представляется затруднительным. Поэтому при проведении статистических исследований часто заменяют опытные кривые распределения некоторыми теоретическими кривыми («математическими кривыми распределения»), изображающими вполне определенные законы распределения случайных величин.

Большинство законов распределения, применяемых для анализа амплитуд профиля, содержат в себе один или несколько параметров, которые в зависимости от конкретной ситуации могут принимать различные значения в широком диапазоне. Поскольку в каждом отдельном случае значения

параметров распределения неизвестны, их приходится оценивать по результатам экспериментов.

Среди законов распределения, предлагаемых для описания профиля шероховатости поверхности, одним из наиболее универсальных оказался закон распределения Накагами [7, 8, 12], который зависит от единственного параметра m .

Плотность распределения [7, 8, 12]:

$$w(x) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{2m-1} \exp(-mx^2/\Omega), \quad (2.5)$$

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

$\Gamma(m)$ – гамма-функция.

Параметр m является обратной величиной к нормированной дисперсии квадрата амплитуды. Тем самым, m является косвенной мерой степени хаотичности конфигурации профиля. В предельном случае бесконечно больших m распределение Накагами вырождается в дельта-функцию. Параметр m связан с параметром $r^2 = \alpha_P^2/2\sigma_B^2$ распределения Райса (который характеризует отношение мощности регулярной α^2 и случайной $2\sigma^2$ составляющих реального профиля) соотношением:

$$m = 1 + \gamma^4 / (1 + 2\gamma^2) = 1 + (\alpha_P^2 / 2\sigma_B^2)^2 / (1 + \alpha_P^2 / 2\sigma_B^2). \quad (2.6)$$

С прикладной технологической точки зрения, параметр m характеризует энергетику процесса обработки.

Распределение Накагами включает в себя ряд частных случаев: при $m=1/2$ оно представляет собой одностороннее распределение Гаусса, при $m=1$ оно является распределением Рэлея. В пределе, когда m стремится к бесконечности, соответствующая плотность распределения вероятности концентрируется в окрестности $\sqrt{\Omega}$. Моменты распределения Накагами определяются по формуле:

$$\langle r^k \rangle = \frac{\Gamma(m + k/2)}{\Gamma(m)} \left(\frac{\Omega}{m}\right)^{k/2}. \quad (2.7)$$

Таким образом, можно считать, что распределение Накагами является более общим для описания замираний сигналом, а оценка параметров Ω и m распределения является необходимой для определения характеристик канала связи, параметр Ω характеризует среднюю мощность замирающего сигнала, а параметр m – глубину замираний.

При этом можно отметить, что закон распределения Накагами обладает важным свойством: при изменении параметра m он переходит в нормальный.

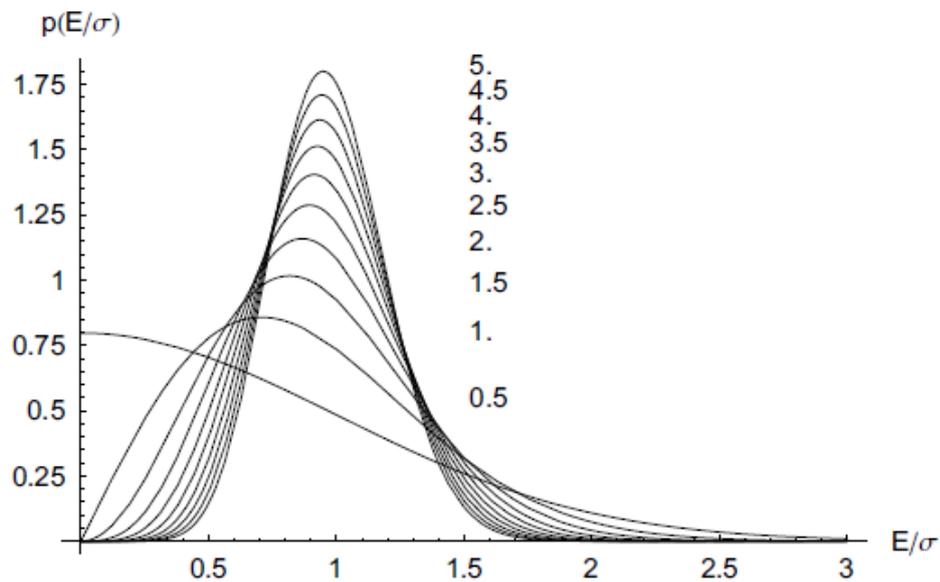


Рисунок 2.4 – Зависимость формы кривой закона распределения Накагами от параметра m

Также проверялись законы:

- нормальный закон распределения, параметры которого определяются по известным зависимостям [8]:

$$\varphi(x, a, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (2.8)$$

где a , σ – параметры закона распределения.

- закон распределения Вейбула [7, 8, 12]:

$$\varphi(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}, \quad (2.9)$$

где a, b – параметры закона распределения.

- закон распределения Рэля [7,8,12]:

$$\varphi(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), & x > 0 \end{cases}. \quad (2.10)$$

Исследовались профили поверхностей, обработанных чистовым точением, режимы обработки принимались согласно рекомендациям [3]. Примеры расчетов приведены на Рисунках 2.5-2.9.



Рисунок 2.5 – Профилограмма поверхности

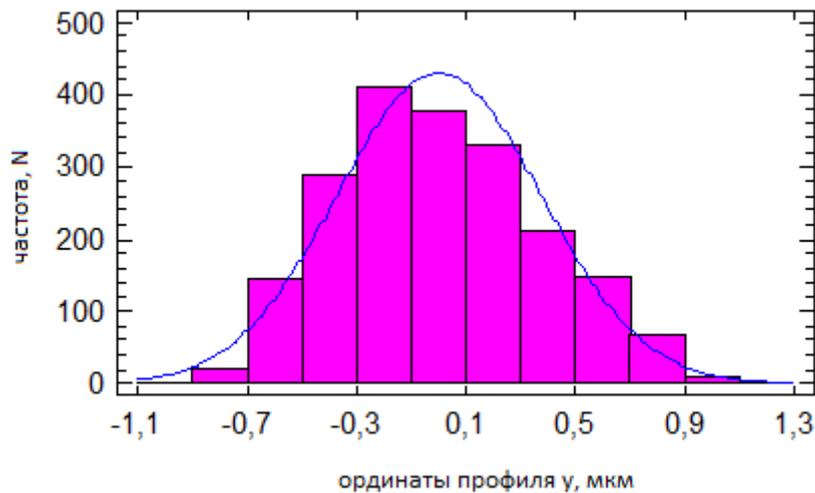


Рисунок 2.6 – Гистограмма (нормальный закон)

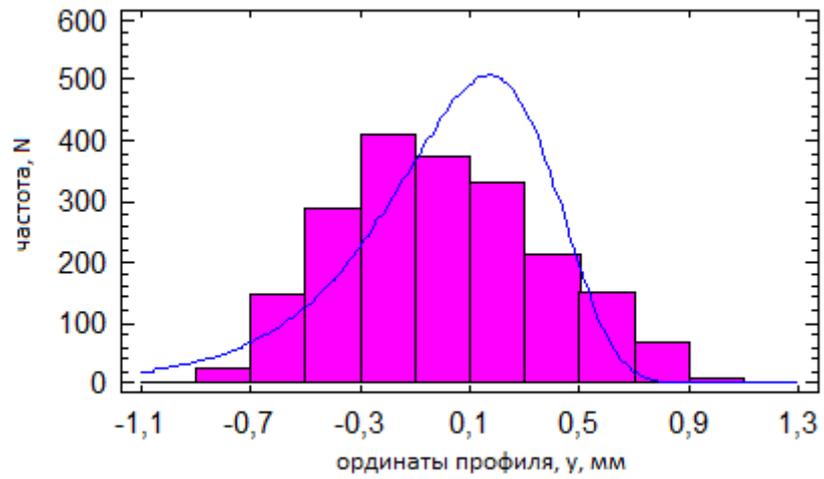


Рисунок 2.7 – Гистограмма (закон Вейбула)

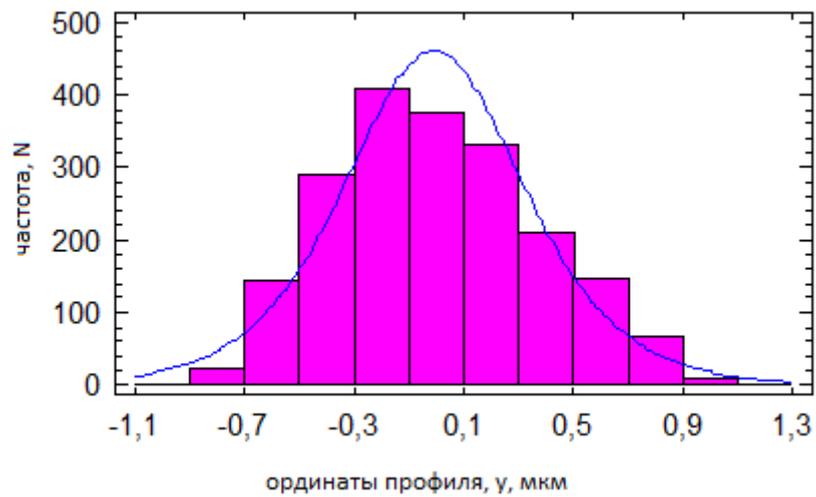


Рисунок 2.8 – Гистограмма (закон Рэлея)



Рисунок 2.9 – Гистограмма (закон Накагами)

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.

Таким образом тесты показали, что параметры соответствуют закону распределения Накагами.

Были рассмотрены 4 закона: закон нормального распределения, Вейбула, Рэлея и Накагами. Было изучено и проанализировано более 200 профилограмм поверхностей, обработанных чистовым точением.

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

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:

композит01 (эльбор), композит 10 (гексанит), ВОК60. Ra обработанных поверхностей находились в пределах от 0,2 до 2,5 мкм.

Были определены параметры закона распределения Накагами, которые обеспечивают соответствие профиля шероховатости поверхности закону для поверхностей деталей из конструкционных сталей (сталь 45 и 20Х13), обработанных чистовым точением: $\Omega = 0,6 \pm 0,1$, $m = 0,8 \pm 0,1$.

2.3 Исследование количественного соотношения составляющих профиля шероховатости на основе теории случайных процессов

Эффективным инструментом для анализа текстуры профиля шероховатости поверхности в рассматриваемом случае является теория случайных функций [13, 64]. При этом текстура профиля шероховатости поверхности описывается стационарной случайной функцией вида [13, 64]:

$$x(t) = x_{\beta}(t) + x_{\gamma}(t), \quad (2.11)$$

где $x_{\beta}(t)$ – детерминированная составляющая,

$x_{\gamma}(t)$ – случайная составляющая, т.е. стационарная нормальная функция с математическим ожиданием $M = 0$ и дисперсией σ^2 .

Свойство стационарности профилей шероховатости поверхности заключается в том, что при стабильных режимах и других условиях обработки реализация профиля имеет вид колебаний. При этом их статистические характеристики не имеют существенных расхождений с изменениями аргумента. Данное свойство реализуется посредством обеспечения стабильности условий выполнения технологической операции.

В теории случайных функций для описания нормальных стационарных процессов используются корреляционные функции, которые определяются из расчетных зависимостей вида [13, 64]:

$$K_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t + \tau)x(t) dt. \quad (2.12)$$

Учитывая, что в нашем случае функция профиля является дискретной,

необходимо произвести замену интеграла в выражении (2.12) на знак суммы [13, 64]:

$$K_{XX}(\tau) = \frac{1}{l-\tau} \sum_{i=0}^{l-\tau} x(t)x(t+\tau), \quad (2.13)$$

где τ – переменная разность между абсциссами двух сечений профилограммы (шаг корреляции), $\tau = 0, 1, 2, \dots, \tau_{\max}$;

l – длина профилограммы;

$x(t)$ – ординаты профилограммы.

Теория случайных процессов позволяет определять количественное соотношение систематической и случайной составляющих профиля. Уровень случайной компоненты определяется следующим образом [13, 64]:

$$\gamma = \frac{D\gamma}{R_q^2}, \quad (2.14)$$

где $D\gamma$ – дисперсия случайной составляющей, R_q – среднеквадратическое отклонение профиля.

Дисперсия случайной составляющей профиля определяется следующим образом [13, 64]:

$$D\gamma = R_q^2 - 0.5A^2, \quad (2.15)$$

где $A = \frac{S^2}{8r}$ – амплитуда систематической составляющей профиля.

Зависимость между корреляционной функцией и среднеквадратическим отклонением профиля имеет вид [13, 64]:

$$R_q = K_{XX}(0), \quad (2.16)$$

где K_{XX} – автокорреляционная функция профиля.

Доля систематической β составляющей обратно пропорциональна случайной [13, 64]:

$$\beta = 1 - \gamma. \quad (2.17)$$

Таким образом, использование методологического аппарата теории случайных процессов и фрактальной геометрии дает возможность провести

количественную оценку текстуры профиля шероховатости поверхностей деталей строительно-дорожных машин. Зная соотношение уровня случайной и систематической компонент в текстуре профиля, имеем возможность оценить технологические факторы, которые оказывают доминирующее влияние на его формирование, а следовательно, выбрать оптимальное управляющее воздействие.

Алгоритм анализа коррелограмм приведен на Рисунке 2.10.

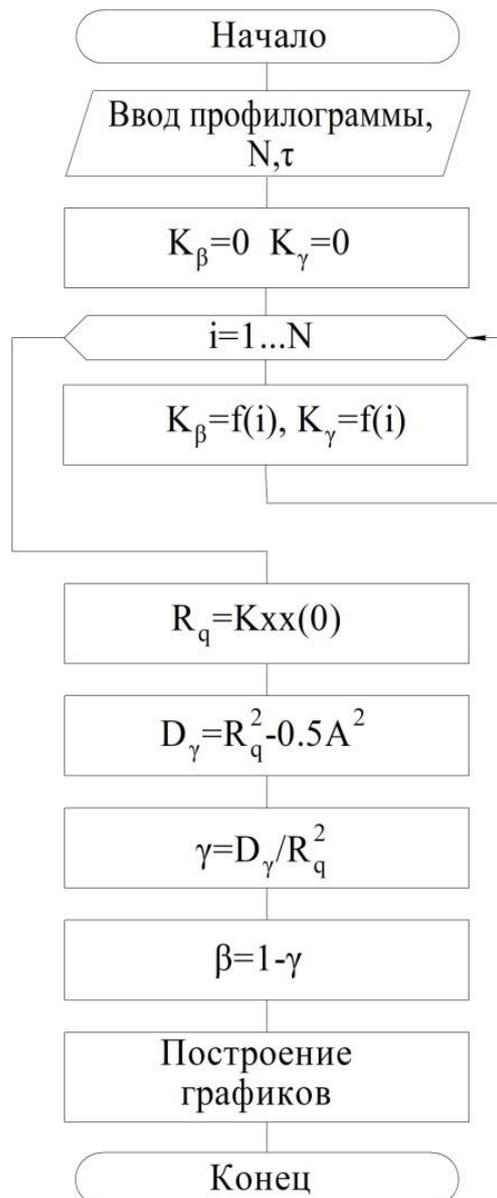


Рисунок 2.10 – Алгоритм анализа коррелограмм

В качестве исходных данных для анализа использовались профилограммы шероховатости поверхностей, обработанных чистовым точением, условия получения которых описаны в пункте 2.2.

Преобразованная в текстовый формат профилограмма использовалась в качестве исходных данных для построения коррелограмм. Для автоматизации процесса обработки профилограмм в среде Delphi была разработана программа «Анализ коррелограмм v1.0», интерфейс которой представлен на Рисунке 2.11.

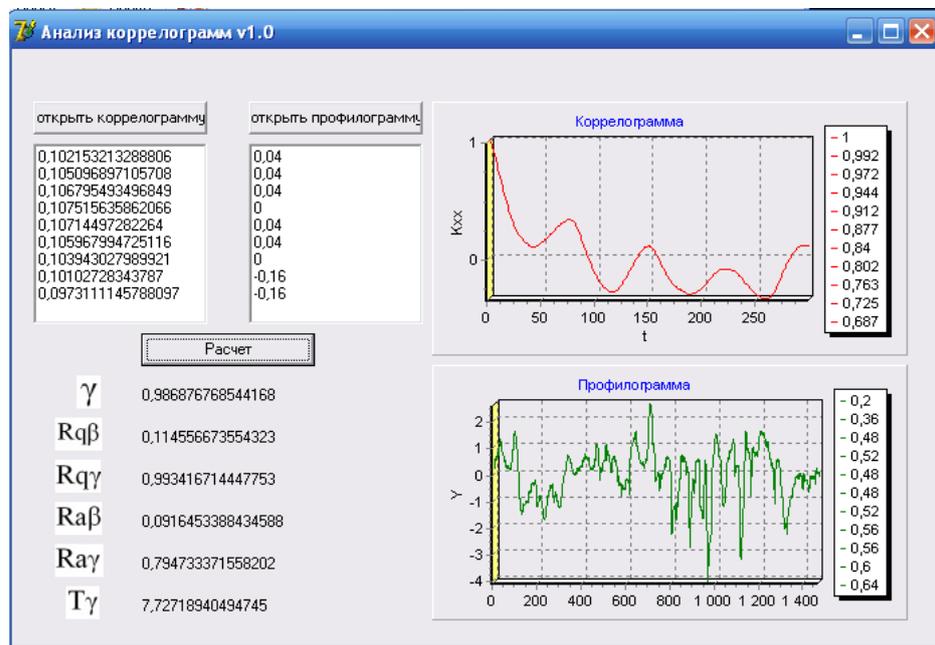


Рисунок 2.11 – Интерфейс программы по анализу коррелограмм

Программа «Анализ коррелограмм v1.0» позволяет определять значения уровня случайной компоненты профиля, среднеарифметическое отклонение систематической и случайной компонент $Ra\beta$ и $Ra\gamma$, среднеквадратическое отклонение систематической и случайной компонент $Rq\beta$ и $Rq\gamma$, а также шаг по средней линии $T\gamma$ для случайной составляющей на основе алгоритма, приведенного на Рисунке 2.10.

Была исследована зависимость уровня случайной компоненты от среднеарифметического отклонения профиля для поверхностей, обработанных чистовым точением (см. Рисунок 2.12). Сплошной линией

показаны зависимости, полученные экспериментально. Штриховой линией показаны аппроксимирующие кривые.

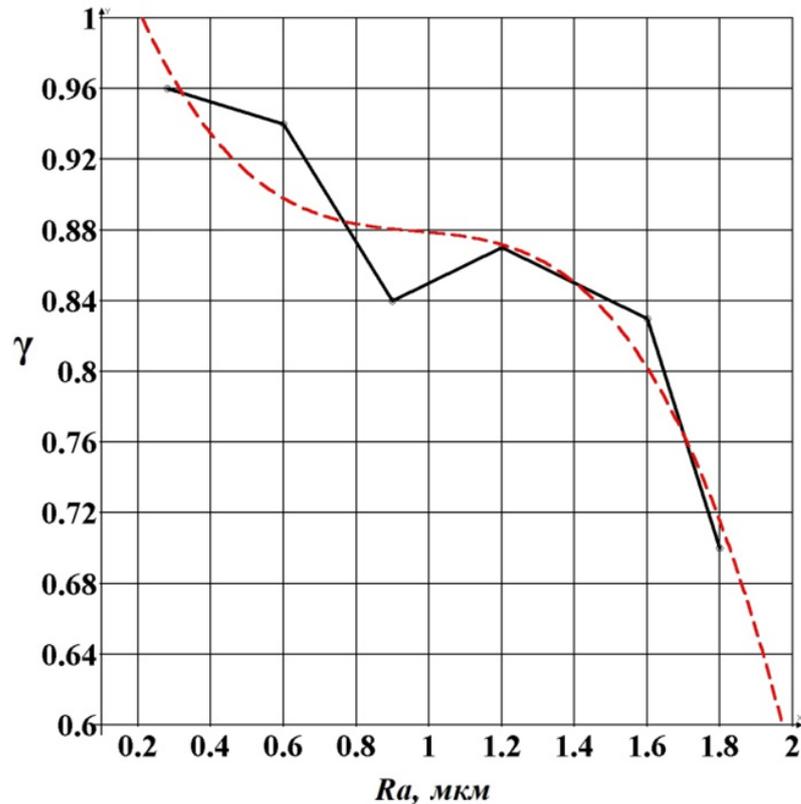


Рисунок 2.12 – Зависимость уровня случайной компоненты $\gamma = f(Ra)$ от среднеарифметического отклонения профиля

Из Рисунка 2.12 видно, что при уменьшении величины Ra уровень случайной компоненты γ возрастает. Это говорит о том, что при ужесточении требований к качеству обработки вклад вибраций в формирование текстуры профиля растет.

Аналитически данная зависимость задается выражением вида:

$$\gamma = 1.12301 - 0.25377 \times Ra^3 + 0.73304 \times Ra^2 - 0.72368 \times Ra \quad (2.18)$$

Стандартное отклонение: $\sigma = 0.03024$.

Коэффициент детерминации: $R^2 = 0.89945$.

Значение коэффициента детерминации говорит о том, что зависимость (2.18) можно использовать для описания взаимосвязи между факторами.

В целом характер зависимости (2.18) согласуется с зависимостью, которая была получена для чистового точения незакаленных сталей, и имеет вид:

$$\gamma = 969.315 \cdot Ra^3 - 388.029 \cdot Ra^2 + 43.734 \cdot Ra - 0.582. \quad (2.19)$$

Это является дополнительным подтверждением универсальности подхода применительно к поверхностям с регулярным микрорельефом.

2.4 Исследование количественного соотношения составляющих профиля шероховатости на основе фрактальной геометрии

Методы фрактальной геометрии позволяют эффективно анализировать особенности текстуры сложных объектов [46, 66, 67, 70, 71]. Важным аспектом фрактальных структур является то, что малые части объекта подобны большим. Для случайных фракталов наблюдается свойство статистического самоподобия, т.е. подобие представляется только статистическими характеристиками, которые можно оценить следующим выражением [46, 66, 67, 70, 71]:

$$x(t + \Delta t) - x(t) = \frac{1}{r^H} \times (x(t + r \times \Delta t) - x(t)), \quad (2.20)$$

где r - коэффициент подобия.

Однако существуют фрактальные объекты, которые не являются самоподобными. Дело в том, что самоподобие основывается на равном масштабном преобразовании во всех направлениях, т.е. полной масштабной инвариантности, однако у многих объектов для получения подобия необходимо применить неодинаковое масштабное увеличение разных направлений. Такие объекты называют самоафинными. Примером самоафинного фрактального объекта являются шероховатые поверхности, имеющие регулярный микропрофиль [46, 66, 67, 70, 71]:



Рисунок 2.13 – Самоафинность профиля шероховатости поверхности

Как можно видеть из Рисунка 2.13, фрагментам профиля, выделенным окружностями, для получения подобия требуется неодинаковое масштабное увеличение. Степень самоафинности объекта также можно оценить количественно при помощи выражения (2.20), если оно выполняется менее чем для половины точек анализируемого объекта [46, 66, 67, 70, 71].

Помимо самоподобия, характеристикой фрактальных структур является размерность. Фрактальная размерность (размерность Хаусдорфа-Безиковича) характеризует то, насколько плотно фигура заполняет координатную плоскость. Фрактальную размерность для классических фракталов определяют посредством покрытия объекта, размерность которого оценивается некими заранее обусловленными геометрическими метриками размера ε [46, 66, 67, 70, 71].

Пусть $N(\varepsilon)$ - минимальное число квадратов размера ε , которые в совокупности полностью покрывают анализируемый фрактал, тогда фрактальная размерность определяется следующим образом [46, 66, 67, 70, 71]:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\frac{\ln(N(\varepsilon))}{\ln(1/\varepsilon)} \right). \quad (2.21)$$

Учитывая, что профиль шероховатости поверхности отображается в виде плоской кривой линии, чем ближе значение D будет к 1.5, тем выше уровень случайной компоненты в текстуре профиля.

Таким образом, использование методологического аппарата теории случайных процессов и фрактальной геометрии позволяет провести количественную оценку текстуры профиля шероховатости поверхностей

деталей строительного-дорожного машин. Зная соотношение уровня случайной и систематической компонент в текстуре профиля, имеется возможность оценки технологических факторов, которые оказывают доминирующее влияние на его формирование, а следовательно, выбрать оптимальное управляющее воздействие.

Определение фрактальной размерности случайных фракталов (к которым относятся профили шероховатости, обработанные чистовым точением) с помощью выражения (2.21) дает большую погрешность. В данной работе вычисление показателя Хёрста производилось стандартным методом нормированного размаха, т.к. в работах А.К. Остапчука, М. Шредера, М.А. Коста и др. [46, 66, 67, 70, 71] было доказано, что именно данный метод позволяет получать оптимальную точность. Суть его состоит в следующем:

1. Вычисляются отклонения от среднего значения:

$$X_{i,N} = \sum_{u=1}^t (x_u - M_N), \quad (2.22)$$

где u – длина периода, которая варьируется от 3 до N ; N – длина временного ряда; t – переменная, меняющая свое значение от 1 до $N-1$; x_u – конкретный элемент временного ряда; M_N – среднее значение N элементов временного ряда.

2. На каждой итерации получается $N-1$ значений $X_{i,N}$, которые используются для определения размаха:

$$R_t = \text{Max}(X_{t,N}) - \text{Min}(X_{t,N}). \quad (2.23)$$

3. Производится нормирование размаха посредством деления его на стандартное отклонение N значений временного ряда:

$$H_t = R_t / S. \quad (2.24)$$

Стандартное отклонение вычисляется по N значениям временного ряда:

$$S = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (x_i - M_N)^2. \quad (2.25)$$

4. Логарифмируются значения R/S и N и строится график функции:

$$\log\left(\frac{R}{S}\right) = f(\log(N)). \quad (2.26)$$

5. По графику функции определяется угол наклона путем линейной аппроксимации методом наименьших квадратов [46, 66, 67, 70, 71]. Тангенс этого угла и является показателем Хёрста.

Графически алгоритм определения показателя Хёрста представлен на рисунке 2.14:

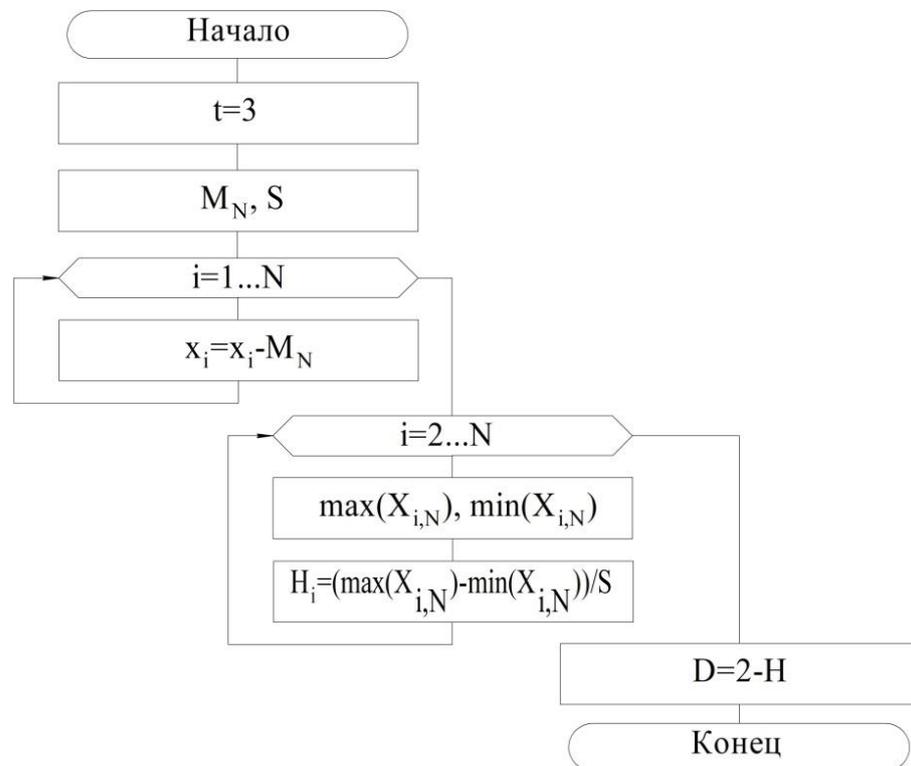


Рисунок 2.14 – Алгоритм определения показателя Хёрста

Данный алгоритм был реализован в программной среде Borland Delphi 7.0, в которой была написана компьютерная программа «Определение фрактальной размерности временного ряда при помощи показателя Хёрста v1.0».

Результат вычисления фрактальной размерности представлен на Рисунке 2.15.



Рисунок 2.15 – Определение фрактальной размерности при помощи показателя Хёрста

На Рисунке 2.16 приведена зависимость показателя Хёрста от среднеарифметического отклонения профиля для поверхностей, обработанных чистовым точением.

В качестве исходных данных для анализа использовались профилограммы шероховатости поверхностей, обработанных чистовым точением, условия получения которых описаны в пункте 2.2. Сплошной линией показаны зависимости, полученные экспериментально. Штриховой линией показаны аппроксимирующие кривые.

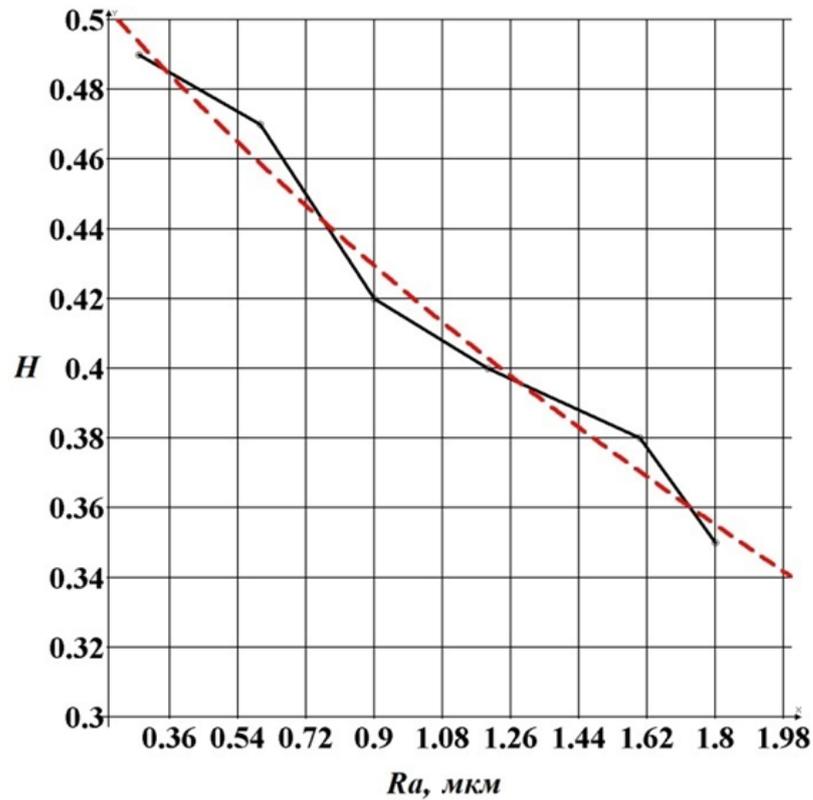


Рисунок 2.16 – Зависимость показателя Хёрста $H=R(Ra)$ от среднеарифметического отклонения профиля

Аналитически зависимость имеет следующий вид:

$$H = 0.52733 - 0.0036 \times Ra^3 + 0.02416 \times Ra^2 - 0.12757 \times Ra. \quad (2.27)$$

Стандартное отклонение: $\sigma=0.00843$.

Коэффициент детерминации: $R^2=0.97513$.

2.5 Разработка модели шероховатости поверхности

Разработка модели строится на методе случайных сложений [5].
Графически алгоритм представлен на Рисунке 2.17.

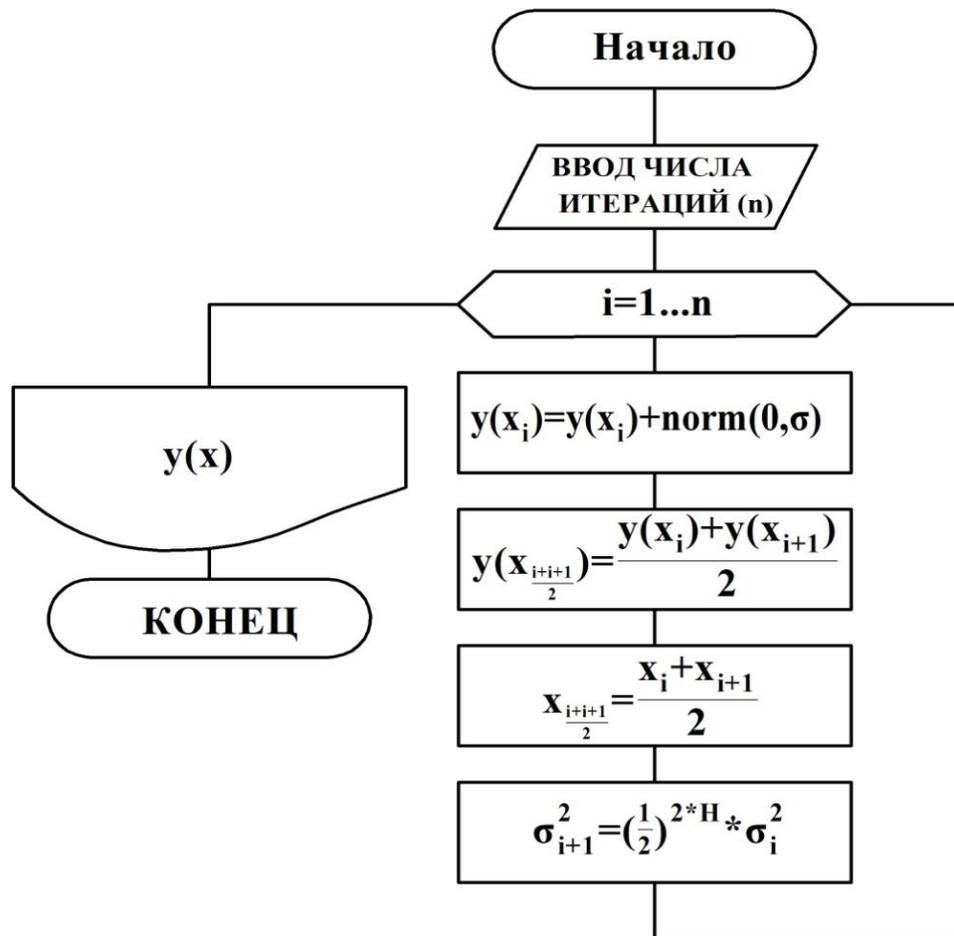


Рисунок 2.17 – Алгоритм построения кривой методом случайных сложений

Суть метода случайных сложений [46] состоит в следующем:

1. Выбираются начальные значения аргумента: $x_i = 0; 0.5; 1$.
2. В этих точках значения функции принимаются равными нулю.
3. К значениям функции прибавляются случайные числа, выбранные из нормального распределения с нулевым средним.
4. Происходит интерполяция этих значений, т.е.:

$$y\left(x_{\frac{i+(i+1)}{2}}\right) = \frac{y(x_i) + y(x_{i+1})}{2} . \quad (2.28)$$

5. После интерполяции дисперсия уменьшается согласно зависимости:

$$\sigma_{i+1}^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^{2H} \times \sigma_i^2 , \quad (2.29)$$

где H – показатель Хёрста.

б. Выбираются новые моменты времени посредством усреднения имеющихся.

Пример кривой и поверхности, которая сгенерирована при помощи указанного выше алгоритма, приведены на Рисунке 2.18.

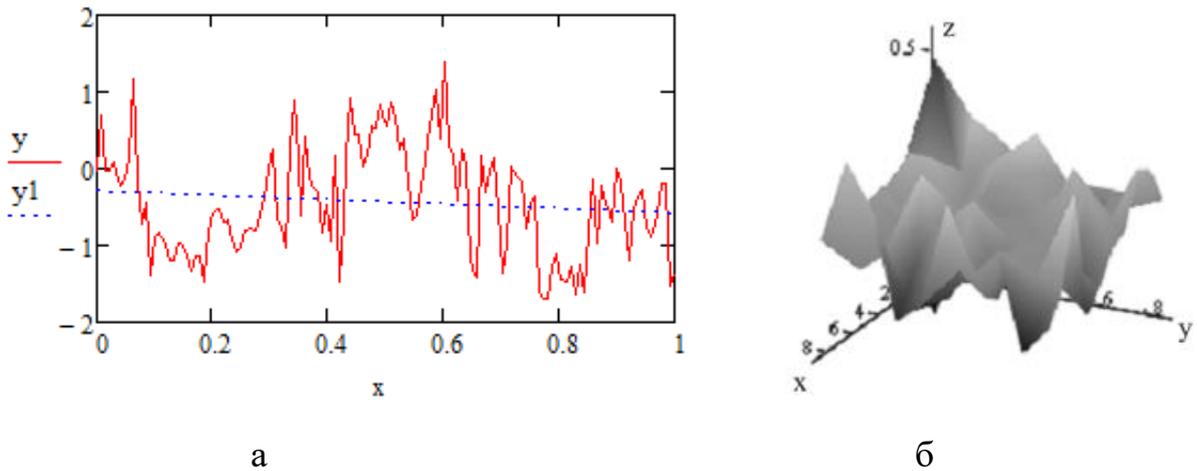


Рисунок 2.18 – Пример результатов моделирования (нормальный закон):

а – фрактальная кривая профиля шероховатости; б – поверхность

Для сравнения также были сгенерированы кривые и поверхности в модели, где, вместо генератора с нормальным распределением, использовался генератор с распределением Накагами.

Пример приведен на Рисунке 2.19.

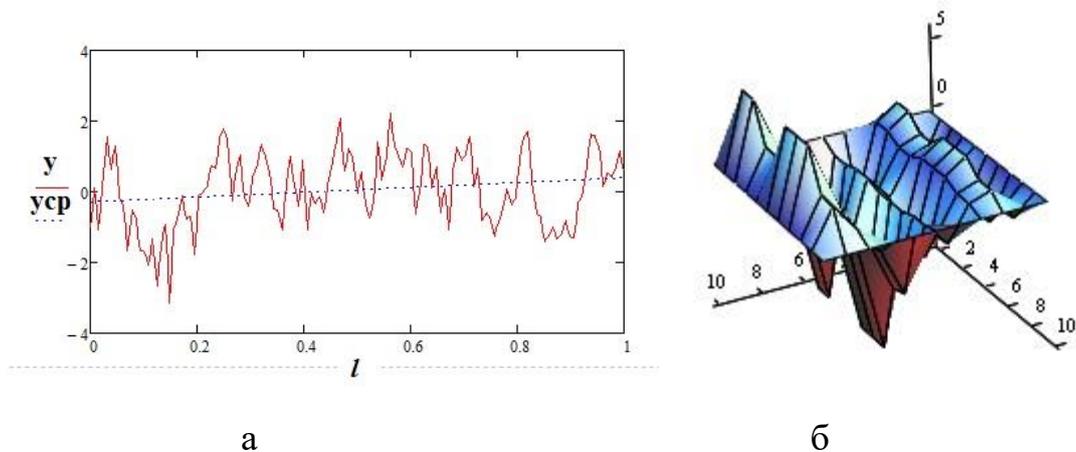


Рисунок 2.19 – Пример результатов моделирования (закон Накагами):

а – фрактальная кривая профиля шероховатости; б – поверхность

На Рисунке 2.20 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).

В качестве исходных данных для анализа использовались профилограммы шероховатости поверхностей, обработанных чистовым точением, условия получения которых описаны в пункте 2.2.

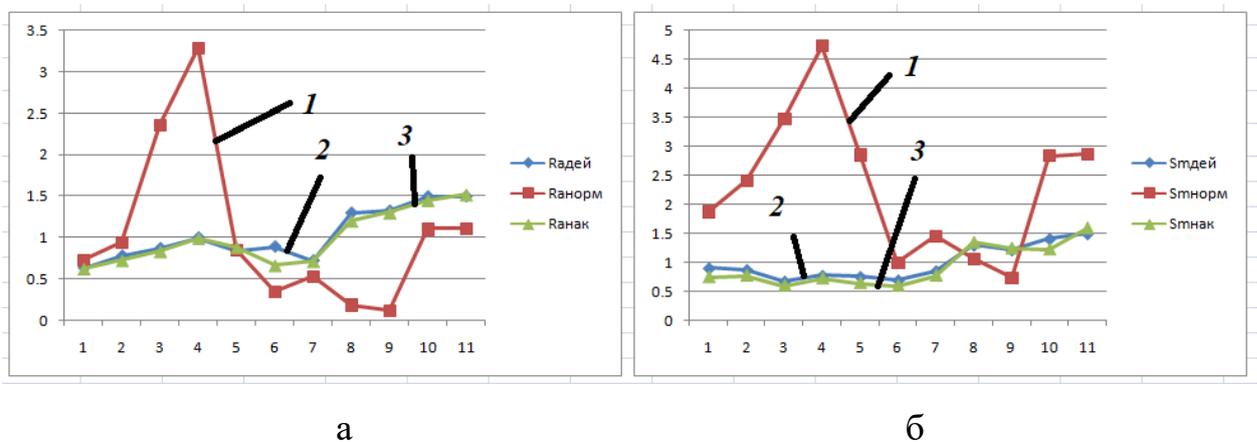


Рисунок 2.20 – Пример точности моделей:

а – значения Ra для реальных профилей и модели;

б – значения Sm для реальных профилей и модели

Как можно видеть из Рисунка 2.20, 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.

Скорректированный алгоритм моделирования можно представить следующим образом.

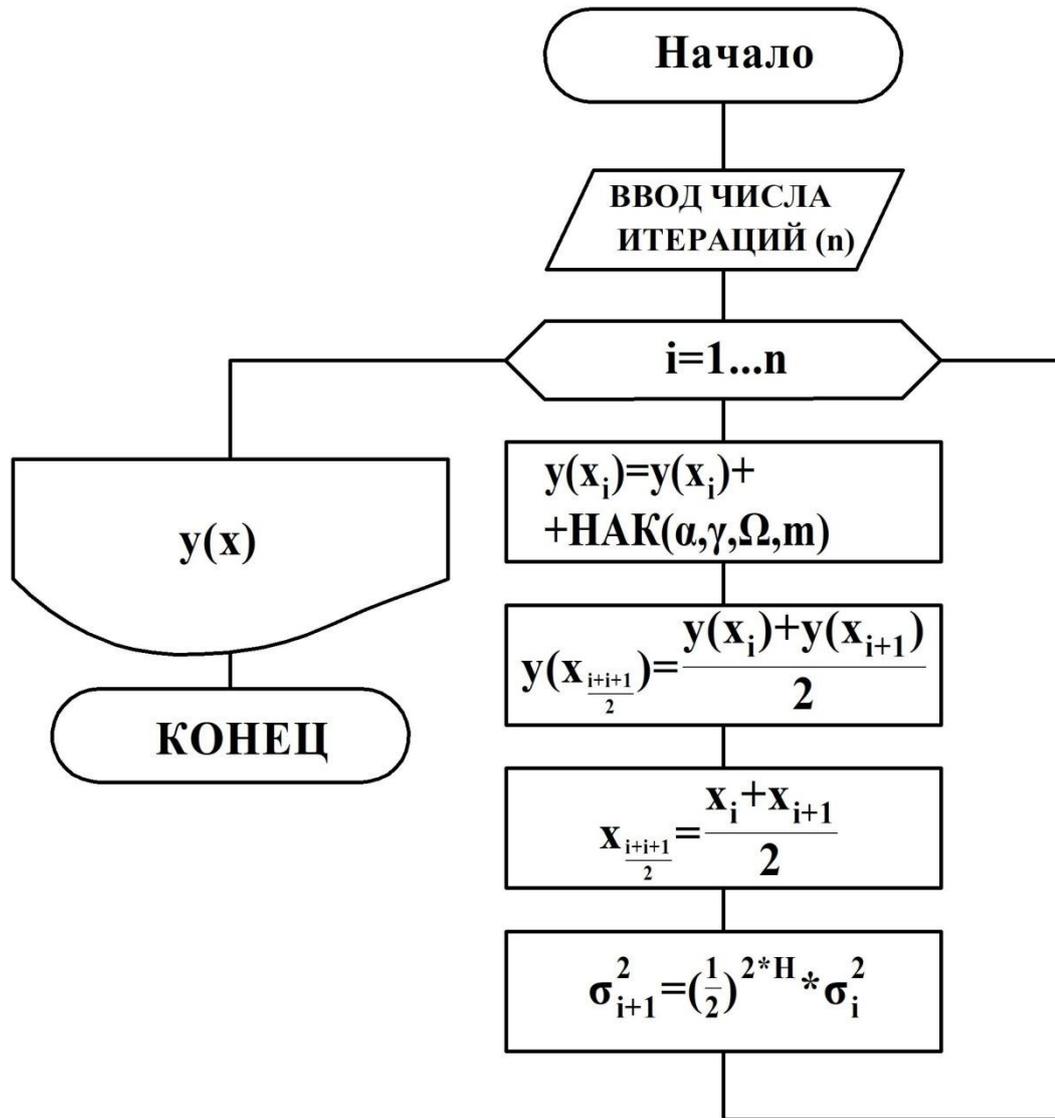


Рисунок 2.21 – Алгоритм построения кривой методом случайных сложений с использованием генератора с распределением Накагами

2.6 Основные выводы по главе

Проведенные исследования позволяют сделать ряд выводов:

1. Текстура профиля шероховатости поверхностей является суммой систематической и случайной компонент, которые являются результатом кинематики процесса и возмущающих воздействий.
2. Ординаты профиля поверхностей соответствуют закону распределения Накагами.

3. Проведенные исследования текстуры профилей поверхностей, обработанных чистовым точением, позволили установить зависимости уровня случайной компоненты и фрактальной размерности от параметров качества поверхности.

4. 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.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ

3.1 Измерительный стенд для исследования виброакустических сигналов

Экспериментальные исследования проводились на токарном обрабатывающем центре с наклонной станиной модели SuperJobber 500.

В качестве обрабатываемого материала использовались углеродистые конструкционные, легированные стали с твердостью более 35 HRC: сталь 45, 40ХН и 45ХН. Диаметр заготовки 50 мм.



Рисунок 3.1 – Внешний вид станка

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 использовалось программное обеспечение ZETLAB и оригинальное программное обеспечение.

Структурная схема для измерения и анализа виброакустических колебаний включает следующие приборы, устройства и регистрирующую аппаратуру (Рисунок3.2): приемный преобразователь, усилитель, блок фильтров, комплекс анализа вибросигналов ZetLab (ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы»), включающий в себя устройства для записи и предварительной обработки вибросигналов.

Поскольку объектом исследования являлись виброакустические колебания, состоящие из высокочастотных колебаний системы станка, и колебаний, генерируемых в зоне резания, то место крепления датчика было приближено к зоне резания и располагалось в резцедержателе. Датчик крепился к телу резца с помощью магнита.

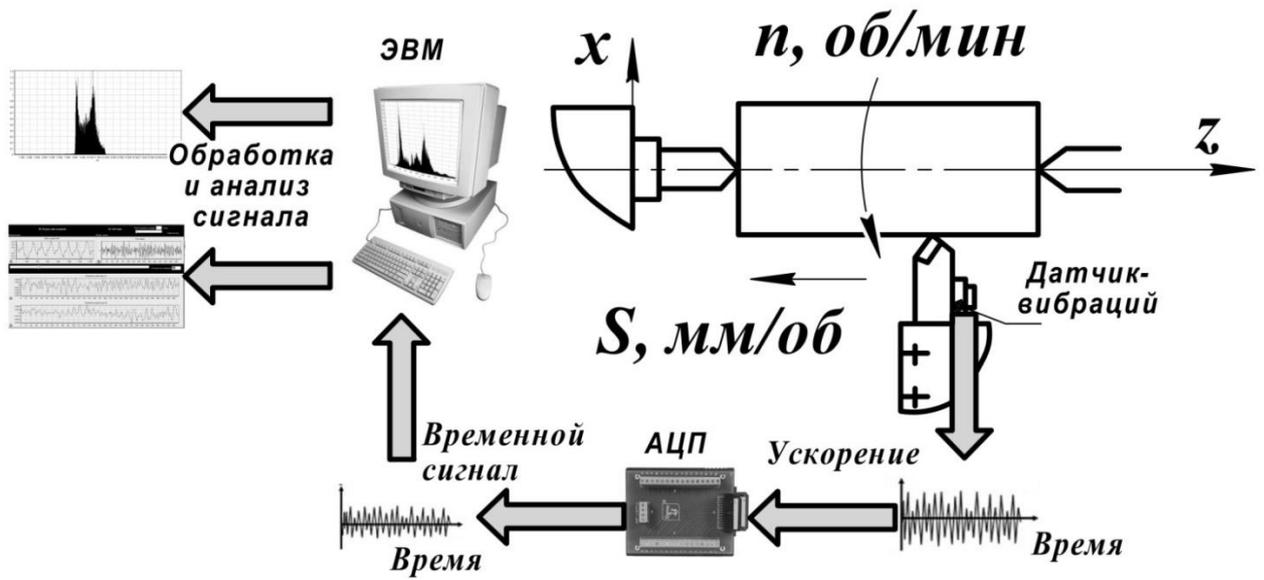


Рисунок 3.2 – Стенд для исследования вибросигнала

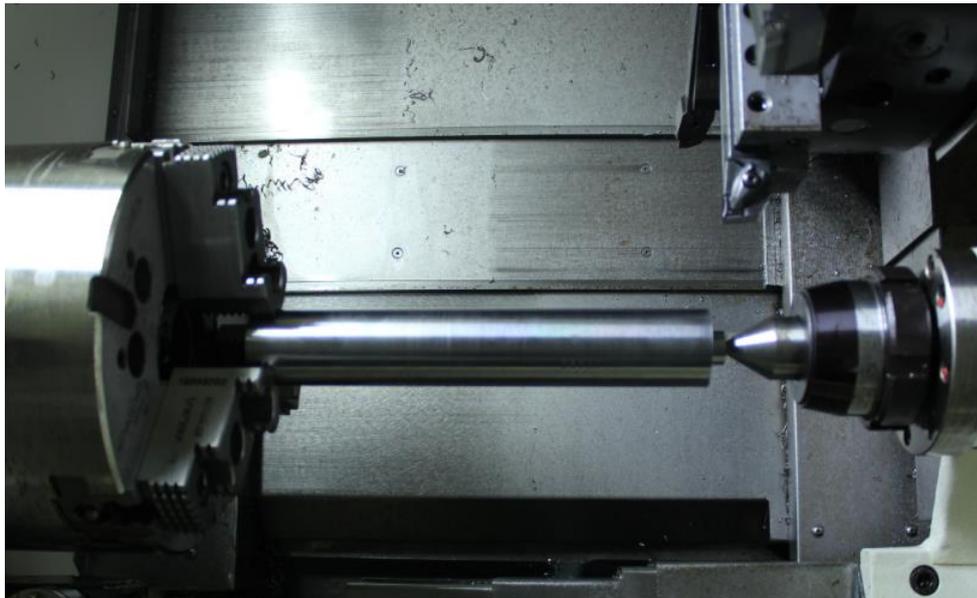


Рисунок 3.3 – Установка детали на станке

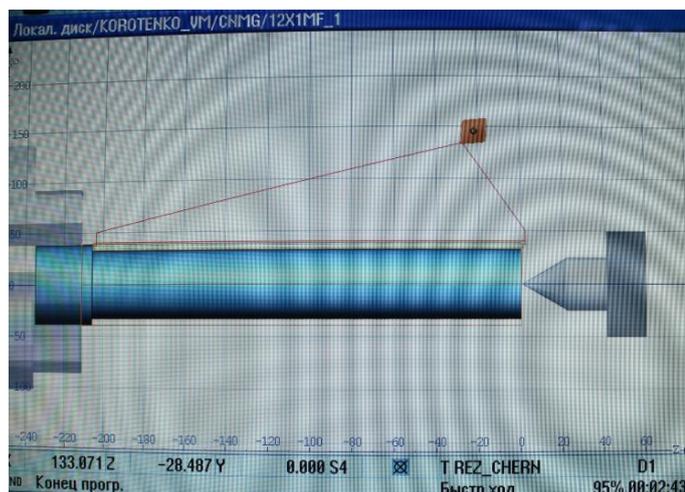


Рисунок 3.4 – Вид экрана симуляции при обработке

3.2 Средства для измерения шероховатости и оценки состояния инструмента

Измерение шероховатости осуществлялось при помощи профилографа-профилометра Mitutoyo SJ210R.



Рисунок 3.5 – Профилометр Mitutoyo SJ210R

Таблица 3.1 – Технические характеристики профилометра Mitutoyo SJ210R

Характеристика	Значение
Диапазон	360 мкм
Измерительное усилие	0,75 мН
Радиус измерительного наконечника	2 мкм
Диапазон измерения	16 мм .. 4,8 мм (S-тип)
Ход траверсы	17,5 мм .. 5,6 мм (S-тип)
Метод измерения	Индукционный способ
Диапазон отображения	Ra, Rq: 0,01 мкм – 100 мкм Ry, Rz, Rt, R3z, Rvk, Rpk, Rk, Rp: 0,02 мкм – 350 мкм Vo: 0,000 – 10,00 (мм ³ /см ²) S, Sm: 2 мкм – 4000 мкм Pc: 2,5/см – 5000/см Mr 1, Mr 2: 0 – 100% mr: 1 – 100%
Стандарты шероховатости	DIN, ISO, ANSI, JIS
Количество базовых длин	x 1, x 3, x 5, x L
Длина отсечки	lc: 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм, ls: 2,5 мкм, 8 мкм

Измерение фаски износа выполнялось на приборе ELBO Controlli HATHOR.



Рисунок 3.6 – Прибор ELBO Controlli HATHOR

Диапазон измерений: максимальный диаметр — 400 мм (радиус 200 мм), максимальная высота — 500 мм.

Типы оправок ISO/BT/HSK/VDI и др. Сменная вращающаяся оправка шпинделя с максимальной погрешностью биения < 2 мкм.

Станина и колонна сделаны из природного гранита. Максимальная погрешность прямолинейности — 2 мкм/м.

Видеоконтроль измерения инструмента и состояния режущей части инструмента включает в себя цветной TFT экран 212×160 мм с разрешением VGA, с увеличением до 35X и видеокамеры с датчиком CMOS с областью изображения $6,4 \times 4,8$ мм.

Пример измерения приведен на Рисунке 3.7.

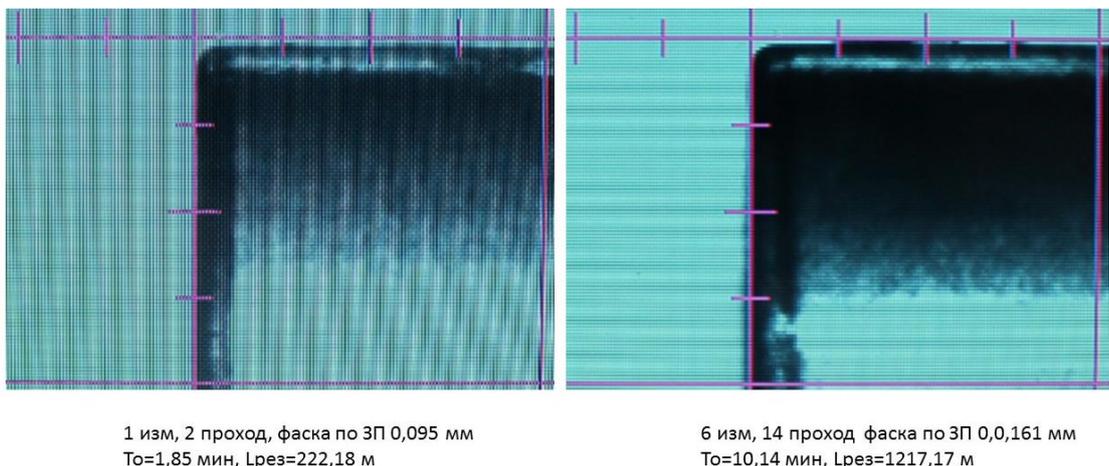


Рисунок 3.7 – Пример измерения фаски износа

3.3 Исследование закономерностей формирования поверхностного слоя при обработке закаленных сталей

С целью установления закономерности формирования поверхностного слоя при обработке труднообрабатываемых материалов была проведена серия экспериментов. Эксперименты проводились на токарном станке с ЧПУ при обработке острым резцом с радиусом вершины режущего инструмента 0,8 мм; глубина резания – 0,1...0,5 мм; скорость резания – 50...300 м/мин при

подачах от 0,02 до 0,2 мм/об. Как показали эксперименты, уменьшение подачи не всегда приводит к постоянному снижению высоты микронеровности [31-34]. При некотором значении подачи s и постоянном радиусе r высота микронеровности практически не изменяется или возрастает в небольших пределах, особенно при работе на малых подачах. Такой характер зависимости наблюдался и другими исследователями [31-34].

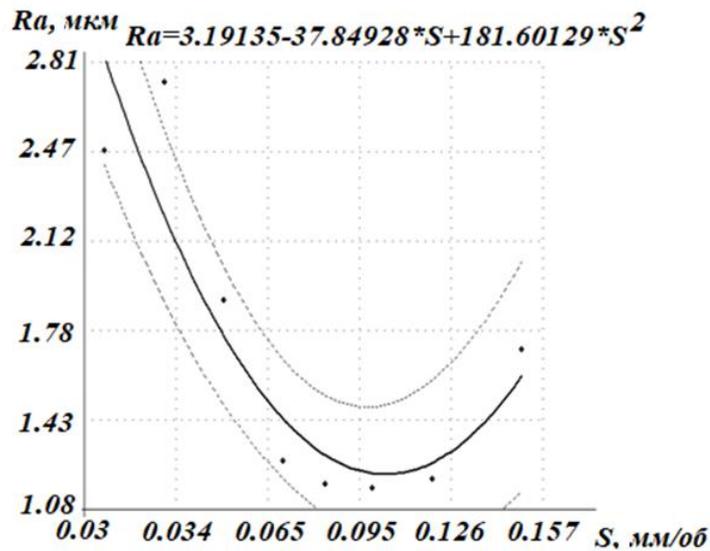


Рисунок 3.8 – Зависимость шероховатость от подачи:

Коэффициент корреляции $r = 0,892$

Доверительные границы по Стьюденту ($P = 0,95$)

При лезвийной обработке с малыми глубинами и малой подачей существенную роль в формировании поверхностного слоя имеет участок врезания режущего лезвия металла. Рассматривая вершину режущего клина как жесткий цилиндр с радиусом ρ , переход от классического обтекания металлом округленной вершины к резанию наступает при условии [31-34]:

$$\frac{t^3}{\rho} \left(\frac{\pi}{5,6} - 1,3 \frac{\tau}{q} \right)^2, \quad (3.1)$$

где τ – прочность связей контактируемых поверхностей на срез; q – фактическое давление, которое можно принять равным твердости материала; t – толщина среза.

Из этого следует, что пластическое обтекание и образование стружки переходит в резание при относительном внедрении $t/\rho \geq 0,31$.

Теоретическая толщина среза по радиусной части режущей кромки резца изменяется от 0 до максимума и может быть рассчитана по формуле:

$$t = r \cdot \cos\alpha - \sqrt{r^2 - S^2 \cdot (1 - \cos 2\alpha)}, \quad (3.2)$$

где α – текущий угол (в полярной системе координат). Тогда:

$$t_{\max} = \frac{S^2}{r}, \quad (3.3)$$

$$t_{\text{cp}} = r - \sqrt{r^2 - S^2 - \frac{S^2}{2r}}. \quad (3.4)$$

На Рисунке 3.9 приведены теоретические толщины среза в зависимости от подачи.

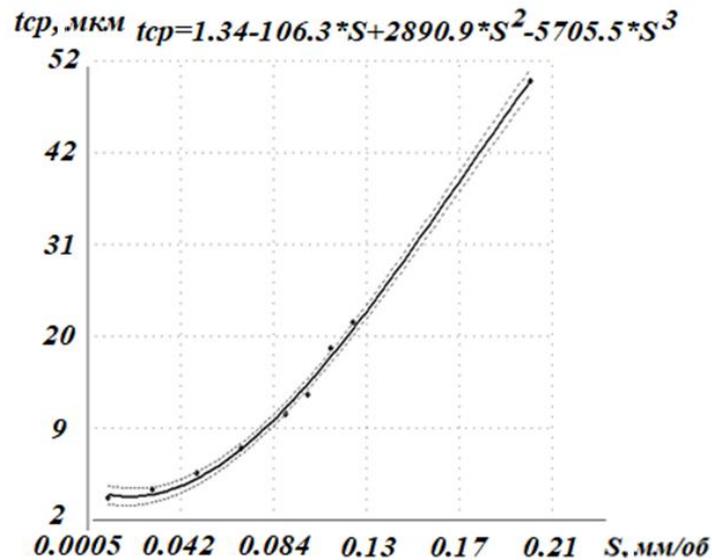


Рисунок 3.9 – Зависимость толщины среза от подачи:

Коэффициент корреляции $r = 0,8574$

Доверительные границы по Стьюденту ($P = 0,95$)

Расчеты показывают, что средняя толщина стружки изменялась от 0,1 до 41 мкм в зависимости от подачи. В диапазоне подач от 0,01 до 0,1 мм/об толщина среза становится соизмеримой с радиусом округления режущего инструмента и даже меньше высоты шероховатости обработанной поверхности. В таких условиях передние углы принимают отрицательное

значение, и на этом же участке происходит не резание, а пластическое обтекание режущей кромки. Следовательно, параметры шероховатости поверхности формируются не резанием, а путем пластического тиснения металла. При определенных условиях обработанная поверхность может быть сформирована путем пластической деформации, а не путем снятия стружки. В связи с тем, что при чистовом точении процесс производится с малыми толщинами среза, окончательное формирование обработанной поверхности происходит за много циклов.

Следы циклического воздействия на одни и те же участки поверхностного слоя детали при точении резцом представлены на Рисунке 3.10.

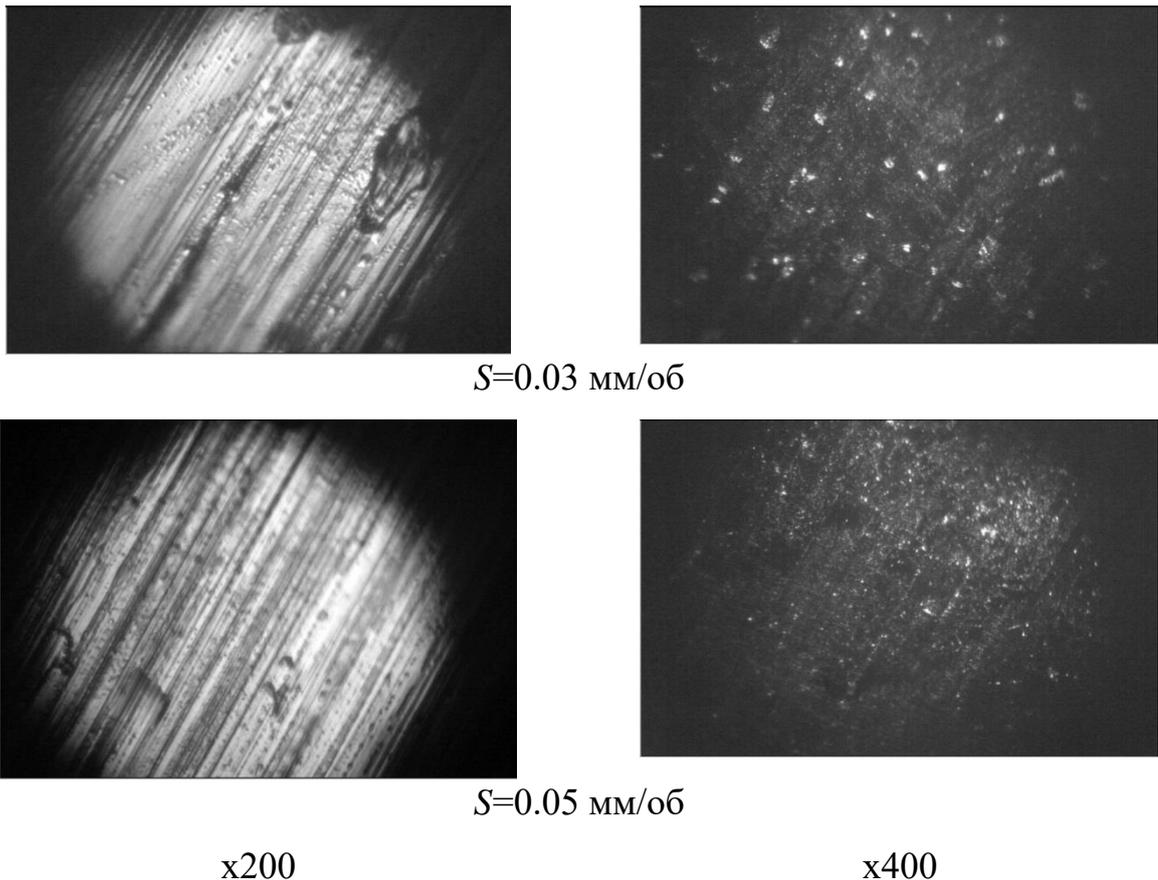


Рисунок 3.10 – Фотографии поверхностей, обработанных с разной подачей (толщиной среза), при различном увеличении

Цикличность воздействия и условия формирования параметров поверхностного слоя необходимо учитывать при анализе процесса чистового точения труднообрабатываемых материалов.

3.4 Исследование зависимости шероховатости и вибросигнала от подачи и скорости резания

С целью выявления частотного диапазона вибросигнала, который обладает наибольшей информативностью при оценке параметров шероховатости поверхности, производилась его фильтрация в различных диапазонах.

Пример спектра вибросигнала в диапазоне от 8000 до 12000 Гц приведен на Рисунке 3.11.

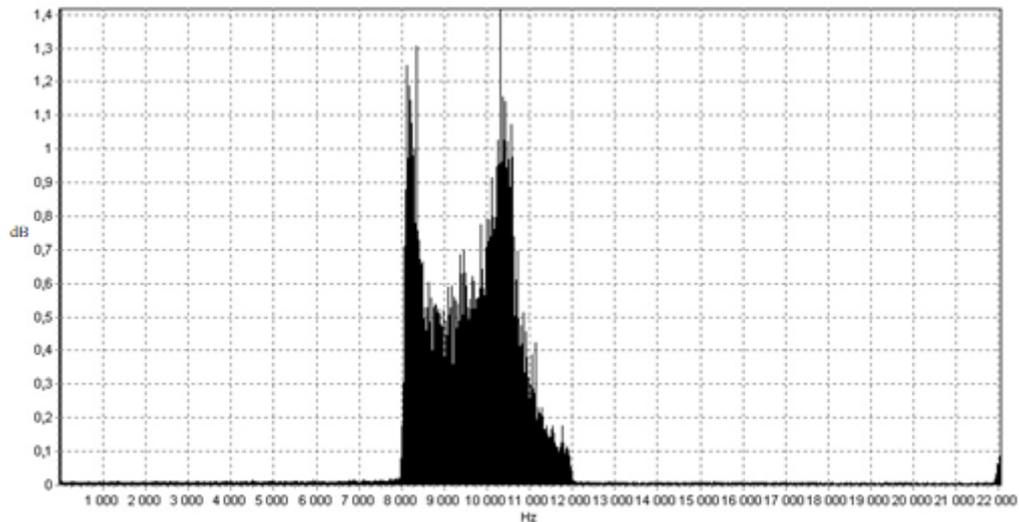


Рисунок 3.11 – Спектр вибросигнала в диапазоне от 8 до 12 кГц

В результате вычисления взаимной корреляции между мощностью вибросигнала и режимами резания (скоростью резания и продольной подачей) было установлено, что при обработке труднообрабатываемых материалов наиболее чувствительный диапазон к изменению режимов резания 13...15 кГц.

Исследовались зависимости мощности вибросигнала от подачи, полученные при различных скоростях резания. Для установления тесноты связи между средним арифметическим отклонением Ra и мощностью виброакустического сигнала был проведен корреляционный анализ, который показал, что наиболее тесная связь наблюдалась между этими величинами по оси Y , коэффициент которой равен $r_{XY} = 0,8$. По двум другим осям коэффициент корреляции составляет: по оси Z $r_{XY} = -0,65$, по оси X $r_{XY} = 0,6$.

Как было установлено, процесс резания генерирует, в основном, сигналы виброакустики в диапазоне от 6 до 14 кГц. При использовании октавного фильтра (в указанном выше диапазоне) коэффициент корреляции увеличился до $r_{XY} = 0,98$ по оси Y , $r_{XY} = 0,7$ по оси Z , $r_{XY} = 0,85$ по оси X .

В ходе эксперимента обработка производилась при постоянной скорости резания $V = 250$ м/мин. Продольная подача варьировалась в пределах: $S = 0,02 \dots 0,11$ мм/об при глубине резания $t = 0,25$ мм.

На Рисунках 3.12-3.15 приведены зависимости параметров шероховатости и вибросигнала от подачи.

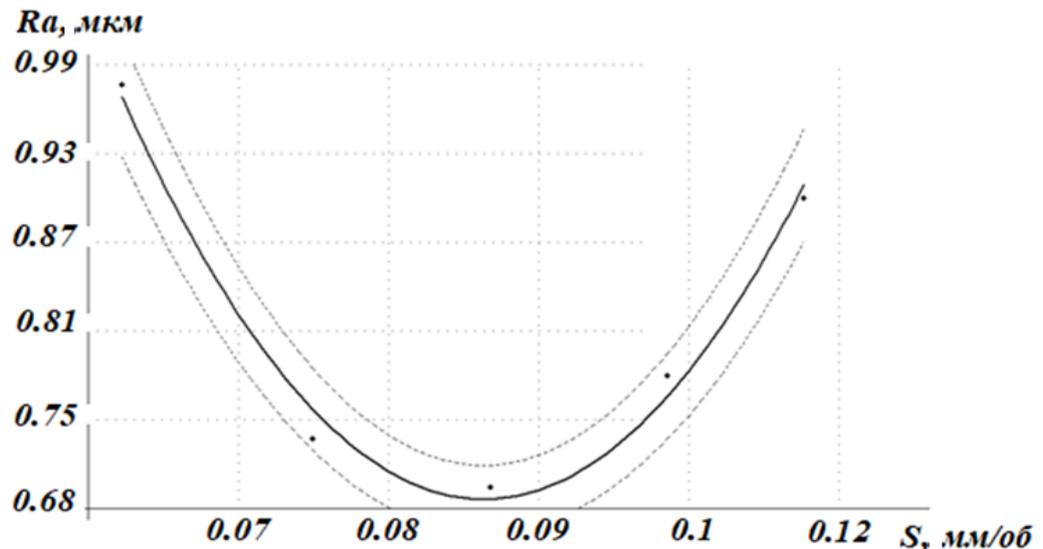


Рисунок 3.12 – Зависимость среднеарифметического отклонения профиля Ra от подачи S :

Коэффициент корреляции $r = 0,99$

Доверительные границы по Стьюденту ($P = 0,95$)

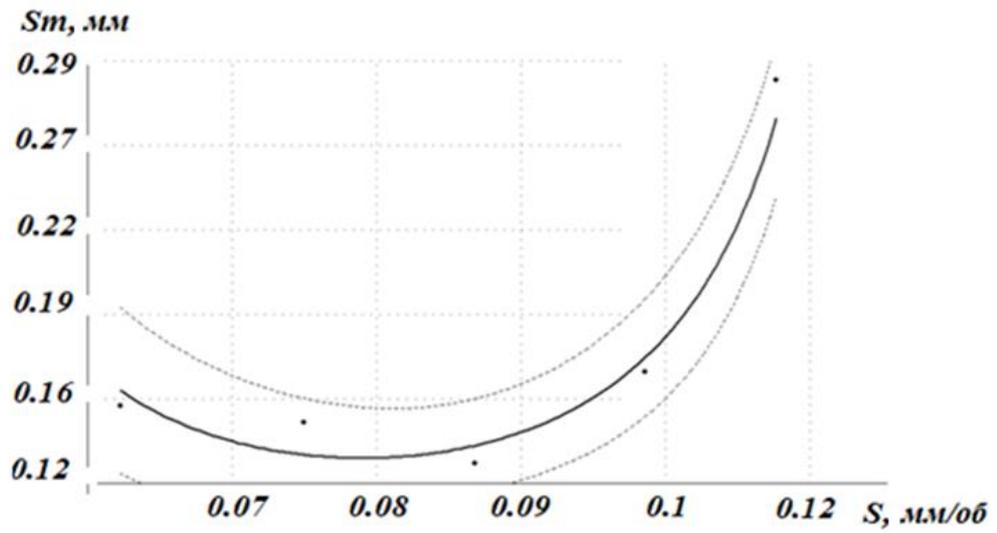


Рисунок 3.13 – Зависимость среднего шага неровностей S_m от подачи S :

Коэффициент корреляции $r = 0,98$

Доверительные границы по Стьюденту ($P = 0,95$)

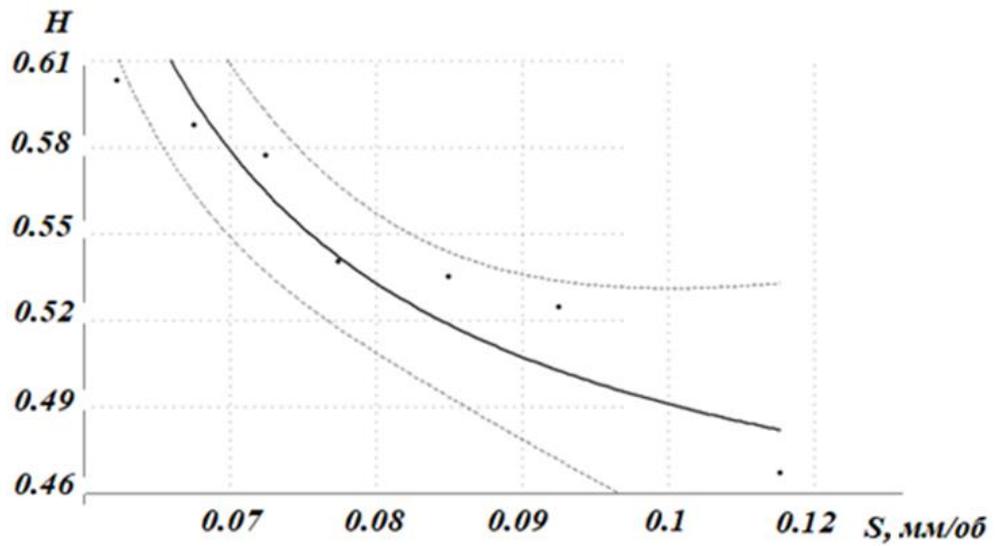


Рисунок 3.14 – Зависимость показателя Хёрста H от подачи S :

Коэффициент корреляции $r = 0,98$

Доверительные границы по Стьюденту ($P = 0,95$)

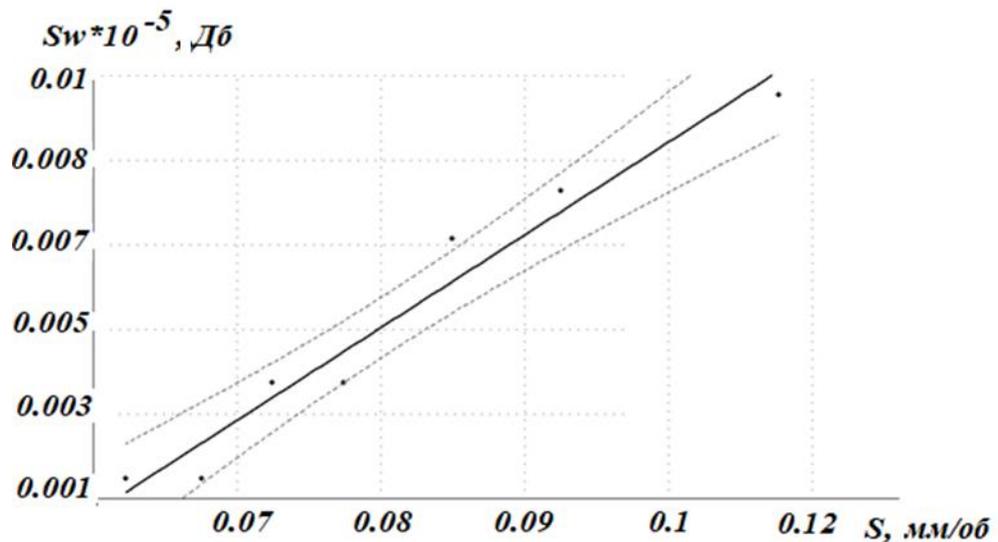


Рисунок 3.15 – Зависимость мощности вибросигнала S_w от подачи S :

Коэффициент корреляции $r = 0,98$

Доверительные границы по Стьюденту ($P = 0,95$)

Установлено, что при увеличении значения продольной подачи среднеарифметическое отклонение профиля Ra , средний шаг S_m возрастают.

Значение показателя Хёрста H с увеличением подачи снижается, что не противоречит теории, т.к. при увеличении степени изрезанности объекта его фрактальная размерность ($D = 2 - H$) увеличивается, а с увеличением высотных параметров шероховатости степень изрезанности профиля растет.

Значение мощности вибросигнала S_w растет с увеличением подачи.

Известно, что с увеличением скорости резания увеличивается производительность обработки. Выбор необходимой скорости резания определяется требуемой стойкостью режущего инструмента и требованиями к точности и шероховатости обрабатываемой поверхности.

На Рисунках 3.16 - 3.18 приведены графики, полученные экспериментальным путем.

Данные зависимости получены при следующих условиях обработки: подача $S = 0,02$ мм/об до 0,15 мм/об, глубина резания $t = 0,25$ мм, радиус вершины режущего инструмента $r = 0,8$ мм. Скорость резания варьировалась в пределах: $V = 120 \dots 315$ м/мин (обороты шпинделя 750...2000 об/мин).

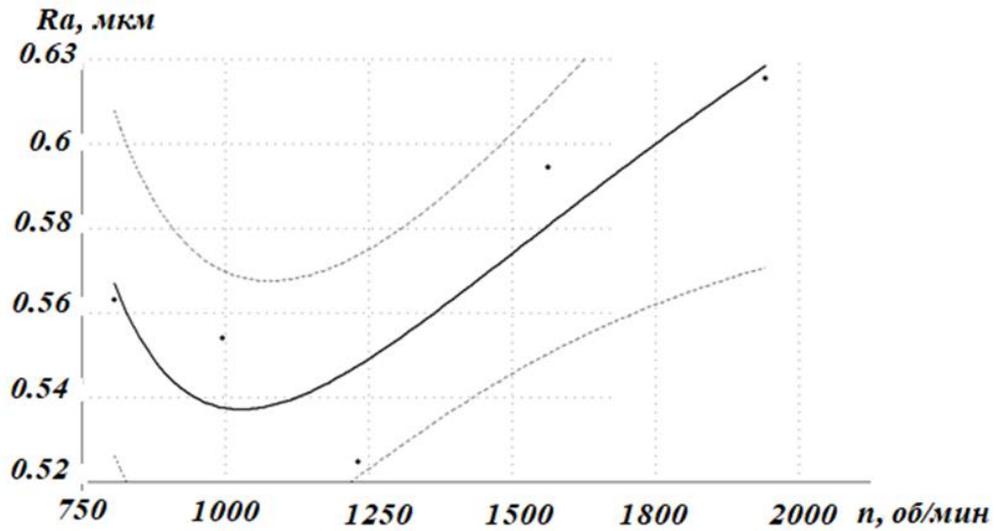


Рисунок 3.16 – Зависимость среднеарифметического отклонения профиля Ra от скорости резания V :

Коэффициент корреляции $r = 0,86$

Доверительные границы по Стьюденту ($P = 0,95$)

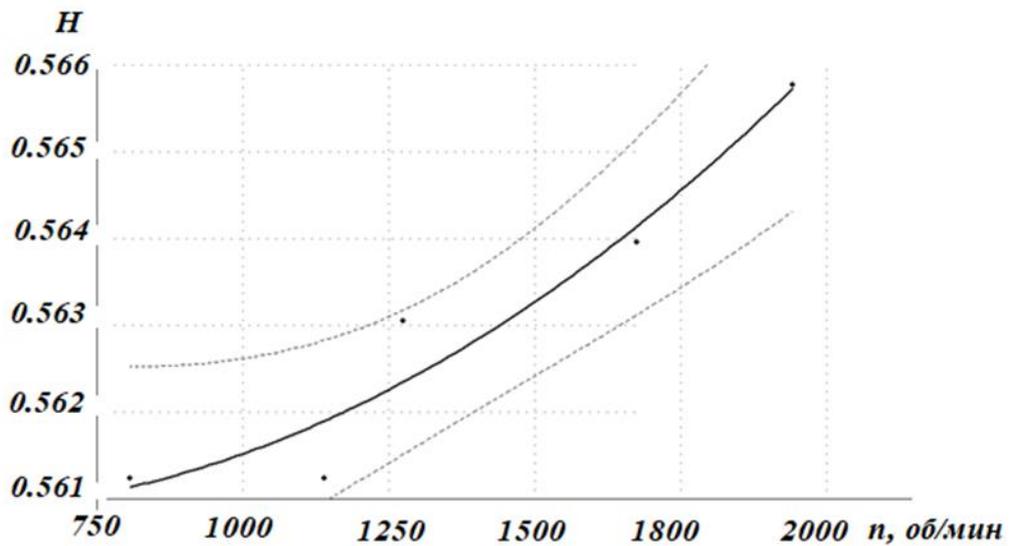


Рисунок 3.17 – Зависимость показателя Хёрста H от скорости резания V :

Коэффициент корреляции $r = 0,86$

Доверительные границы по Стьюденту ($P = 0,95$)

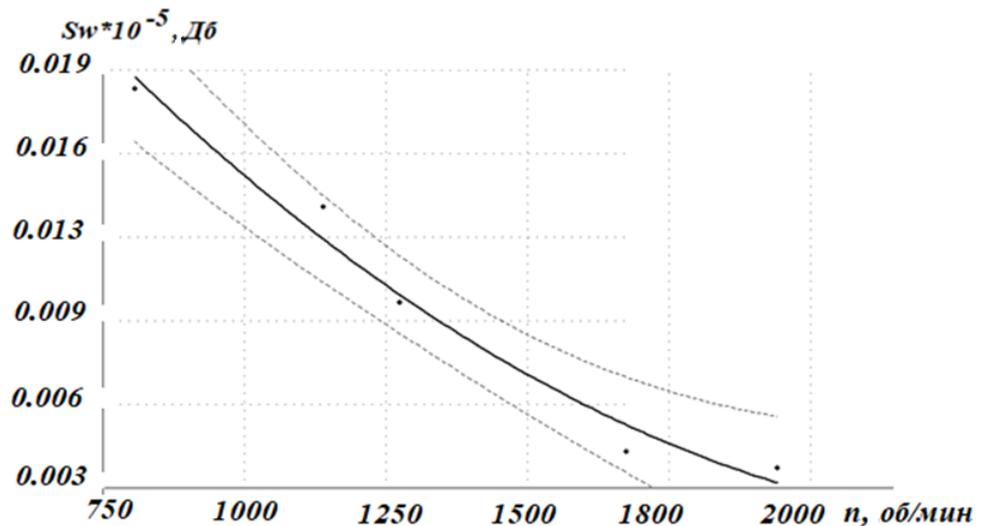


Рисунок 3.18 – Зависимость мощности вибросигнала S_w от скорости резания V :

Коэффициент корреляции $r = 0,86$

Доверительные границы по Стьюденту ($P = 0,95$)

В результате исследований было установлено, что с увеличением скорости резания среднеарифметическое отклонение профиля Ra изменяется по параболической зависимости. Полученные эмпирические зависимости не противоречат теории, т.к. в работах [31-34] доказано, что с увеличением скорости резания высотные параметры шероховатости снижаются, а затем растут. Значения среднего шага микронеровностей S_m и показателя Хёрста практически не изменяются (отклонения не превышают 5-10%).

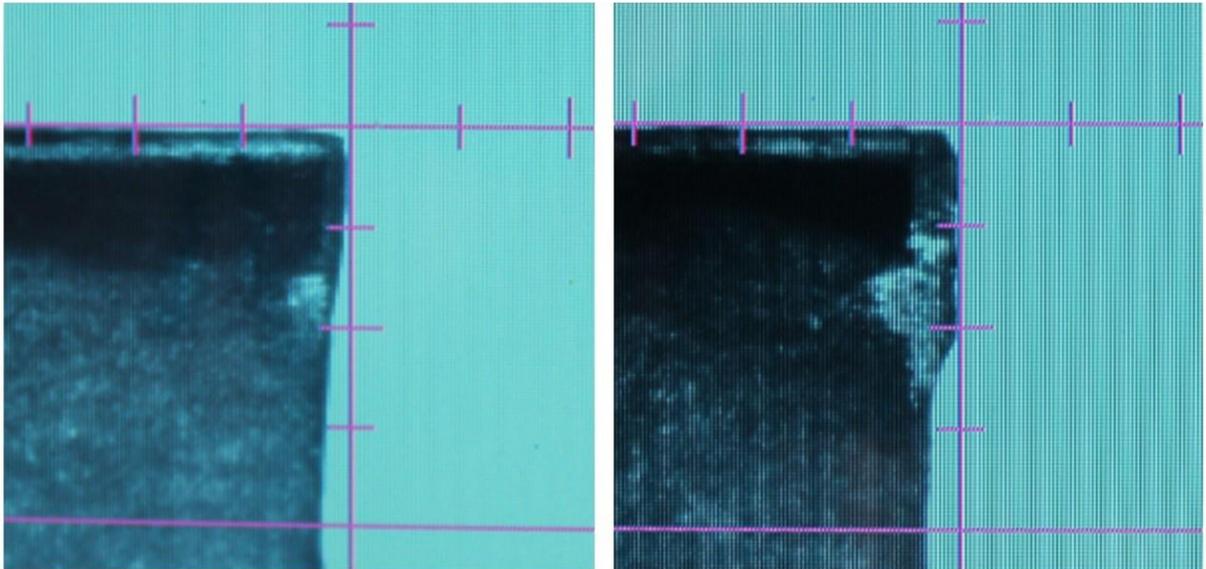
Значение мощности вибросигнала S_w убывает с увеличением скорости резания. В целом следует отметить, что результаты проведенных экспериментальных исследований не противоречат ни результатам теоретических изысканий [14], ни результатам аналогичных исследований [31-34].

3.5 Исследование зависимости шероховатости и вибросигнала от износа режущего инструмента

Методика выполнения испытаний приведена в пункте 3.1, в Таблице 3.2 приведены результаты исследований для режимов резания: $t = 0,3$ мм, $S = 0,1$ мм/об, $V = 150$ м/мин.

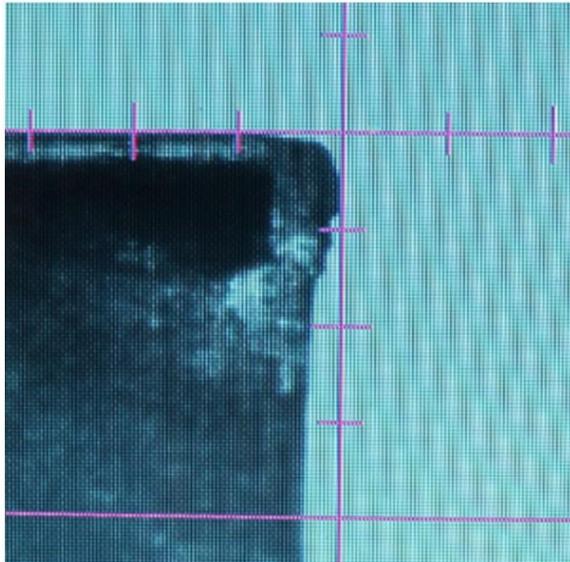
Таблица 3.2 – Выборка результатов экспериментов

№ измерения	T _о (мин)	L _{рез} (м)	Фаска износа (мм)	Ra (мкм)	Примечания
1	5,90	589,97	0,061	0,422	-
2	10,89	1 089,47	0,109	0,583	-
3	16,15	1 614,73	0,109	0,844	Сливная стружка, наматывание стружки на заготовку
4	22,05	2 204,70	0,109	0,684	Наблюдается скругление режущего лезвия
5	27,04	2 704,20	0,199	0,633	-
6	32,29	3 229,46	0,21	0,564	-
7	38,19	3 819,44	0,222	0,525	-
8	43,19	4 318,93	0,242	0,47	-
9	48,44	4 844,19	0,264	0,413	-
10	54,34	5 434,17	0,27	0,454	Изменение звука при обработке, появление легкого свиста
11	59,34	5 933,67	0,278	0,504	-
12	64,59	6 458,92	0,297	0,692	-



1 изм, 3 проход, фаска по ЗП 0,061 мм
 $T_0 = 5,90$ мин, $L_{рез} = 589,97$ мм

6 изм, 20 проход, фаска по ЗП 0,21 мм
 $T_0 = 32,29$ мин, $L_{рез} = 3229,46$ мм



12изм, 40 проход, фаска по ЗП 0,297 мм
 $T_0 = 64,59$ мин, $L_{рез} = 6458,92$ мм

Рисунок 3.19 – Состояние режущей кромки

Графически зависимость шероховатости от ширины фаски износа приведена на Рисунке 3.20.

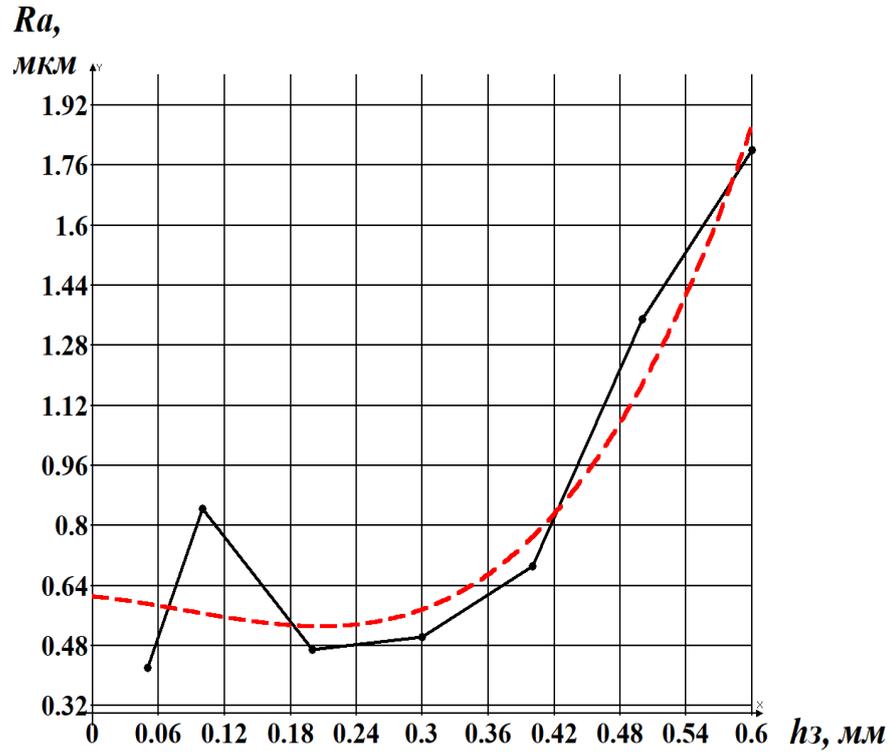


Рисунок 3.20 – Зависимость шероховатости от ширины фаски износа

На Рисунке 3.21 приведена зависимость мощности вибросигнала от ширины фаски износа.

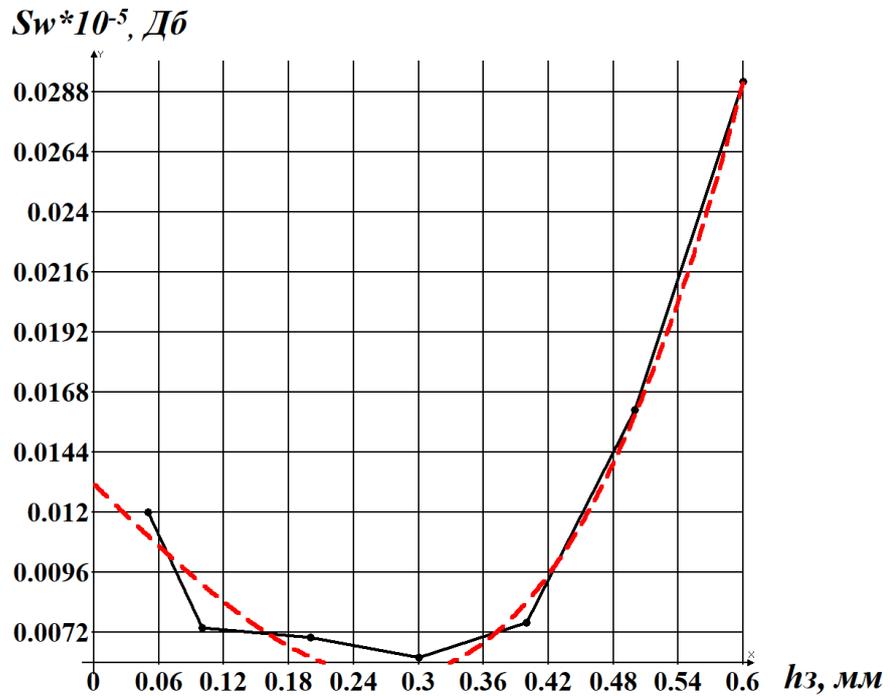


Рисунок 3.21 – Зависимость мощности вибросигнала от ширины фаски износа

На Рисунке 3.22 приведена зависимость показателя Хёрста вибросигнала от ширины фаски износа.

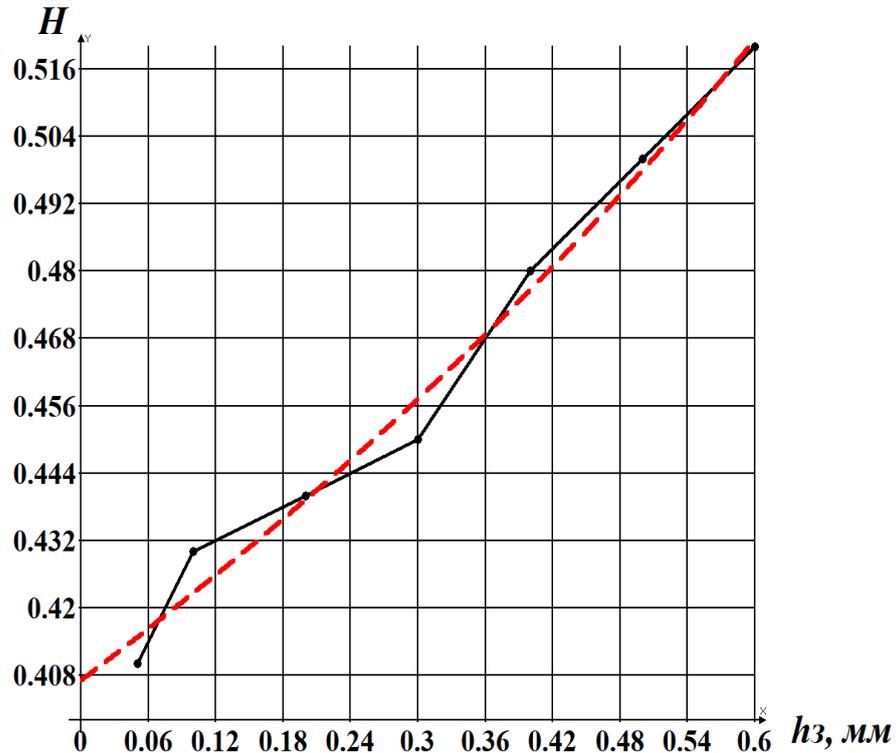


Рисунок 3.22 – Зависимость показателя Хёрста вибросигнала от ширины фаски износа

На данных Рисунках сплошной линией показаны зависимости, полученные экспериментально. Штриховой линией показаны аппроксимирующие кривые.

Как можно видеть из Рисунков 3.21 - 3.22 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.

3.6 Основные выводы по главе

Проведенные исследования позволяют сделать ряд выводов:

1. В диапазоне подач от 0,01 до 0,1 мм/об толщина среза становится соизмеримой с радиусом округления режущего инструмента и даже меньше

высоты шероховатости обработанной поверхности. В данном диапазоне подач работать нерационально.

2. Исследования параметров шероховатости и вибросигнала в зависимости от подачи показали выраженную взаимосвязь текстуры профиля обработанной поверхности и диагностического признака.

3. Исследования параметров шероховатости и вибросигнала в зависимости от скорости резания показали выраженную взаимосвязь текстуры профиля обработанной поверхности и диагностического признака.

4. Исследования параметров шероховатости и вибросигнала в зависимости от износа режущего инструмента показали выраженную взаимосвязь текстуры профиля обработанной поверхности и диагностического признака.

4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ. ВЫБОР УСТРОЙСТВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

4.1 Разработка структуры системы методами декомпозиционного анализа

При структуризации проблемы вышележащей целью для создания автоматизированных систем динамического мониторинга процесса чистовой обработки является создание системы автоматического обеспечения качества поверхности деталей, а нижележащими – цели и задачи создания элементов АСУ процессом резания: системы измерения и управления технологическими параметрами. Решение этих задач (достижение нижележащих целей) является средством достижения поставленной цели – создания системы динамического мониторинга процесса чистовой обработки.

Потребности и цели создания объекта, структуризация целей и предполагаемых задач, решение которых ведет к достижению этих целей, формирует общее представление об объекте. Анализ объекта на втором этапе осуществляется путем декомпозиции поставленных задач в пространстве, в основном, неметрических структурных характеристик, обусловленных требованиями к объекту. Результатом такого анализа является декомпозиционная схема, которая является n -мерным поисковым пространством $R^n = \{X_\xi\}$, в котором каждое решение представлено вектором $x \in R^n$, являющимся множеством из набора альтернатив X_ξ^β вида:

$$X = \{X_1^\beta, \dots, X_i^\beta, \dots, X_n^\beta\}. \quad (4.1)$$

Декомпозиционная схема представлена в Таблице 4.1.

Геометрической интерпретацией R^n является его развертка на плоскость, состоящая из матричных блоков, образованных пересечением всех блоков 1-го уровня декомпозиции и альтернатив, образующих клетки матриц.

$$R^B = n(n-1)/2. \quad (4.2)$$

Общее количество вариантов структуры N определяется:

$$N = m_1 m_2 \dots m_n, \quad (4.3)$$

где m_1 – количество альтернатив реализации первого признака,

m_2 – количество альтернатив реализации второго признака и т.д.

Развертка n -мерного поискового пространства для задачи проектирования автоматизированной системы измерения вибросигналов представлена на Рисунке 4.1.

Таблица 4.1 – Декомпозиционная схема анализа задачи формирования структуры системы измерения вибросигналов.

X_ξ	Первый уровень декомпозиции	X_ξ^β	Второй уровень декомпозиции
X_1	Точность и скорость обработки измерений	X_1^1 X_1^2	Задается программой Не регулируется
X_2	Совместимость с системами верхнего уровня	X_2^1 X_2^2	Совместима Не совместима
X_3	Визуализация полученной информации	X_3^1 X_3^2 X_3^3	Цифровые индикаторы Панель управления SCADA система
X_4	Предварительная обработка сигналов	X_4^1 X_4^2	Не требуется Требуется
X_5	Опрос датчиков	X_5^1 X_5^2 X_5^3	Однократно по запросу В режиме реального времени По запросу и в режиме реального времени
X_6	Сохранение полученной информации	X_6^1 X_6^2	Отсутствует Электронный журнал измерений
X_7	Режим работы системы	X_7^1 X_7^2 X_7^3	Ручной Автоматический Ручной и автоматический
X_8	Управление системой измерений	X_8^1 X_8^2	Не автоматизированное Автоматизированное
X_9	Режим работы устройства для принятия решений	X_9^1 X_9^2	Расчет модели в реальном времени Расчет модели экспертной системой

X_ξ	Признак	X_ξ^β	Альтернатива
X_1	Точность и скорость обработки измерений	X_1^1	Задается программой
		X_1^2	Не регулируется
X_2	Совместимость с системами верхнего уровня	X_2^1	Совместима
		X_2^2	Не совместима
X_3	Визуализация полученной информации	X_3^1	Цифровые индикаторы
		X_3^2	Панель управления
		X_3^3	SCADA система
X_4	Предварительная обработка сигналов	X_4^1	Не требуется
		X_4^2	Требуется
X_5	Опрос датчиков	X_5^1	Однократно по запросу
		X_5^2	В режиме реального времени
		X_5^3	По запросу и в режиме реального времени
X_6	Сохранение полученной информации	X_6^1	Отсутствует
		X_6^2	Электронный журнал измерений
X_7	Режим работы системы	X_7^1	Ручной
		X_7^2	Автоматический
		X_7^3	Ручной и автоматический
X_8	Управление системой измерений	X_8^1	Не автоматизированное
		X_8^2	Автоматизированное
X_9	Режим работы устройства для принятия решений	X_9^1	Расчет модели в реальном времени
		X_9^2	Расчет модели экспертной системой

Рисунок 4.1 – Развертка n -мерного поискового пространства

Заключительный третий этап выбора и принятия решения после проведения системного анализа создания нового объекта путем его декомпозиции существенно облегчается, но остается непростым из-за большого числа комбинаций N , являющихся вариантами искомого решения. Задача синтеза состоит в том, чтобы в каждом из n -блоков первого уровня X_ξ декомпозиционной схемы выбрать по одной альтернативе X_ξ^β , подбор которых должен сформировать «наилучший» вариант.

Простейшим при выборе наиболее эффективного решения является традиционный способ, используемый при обработке морфологических

таблиц и предусматривающий последовательное сокращение (свертку) множества вариантов путем отбрасывания наименее перспективных, нереализуемых, наиболее дорогих и других кажущихся неэффективными альтернатив. Однако этот способ при увеличении количества признаков и реализующих их альтернатив соответственно до $n > 5$ $m > 2$ становится весьма трудоемким, а выбранное решение, в значительной мере, - субъективным. Проблема состоит не только в выборе лучших альтернатив в отдельных блоках, но и в оптимальной их совместимости друг с другом.

Далее будет использован метод двухступенчатого ранжирования с присвоением оценок и при необходимости расчетом «весов» для выбираемых элементов, многократно апробированный при создании новых сложных объектов на уровне изобретений.

Предложенный метод предусматривает на первой ступени упорядочения выделение из n -блоков X_ξ декомпозиционной схемы S -блоков, содержащих на уровне альтернатив X_ξ^β наиболее важные характеристики, которые могут быть отражены в задании на создание объекта или даны в описании потребности в таком объекте. Такие блоки X_ξ обычно в количестве $S = 2 \dots 4$ несут S – целевых условий (по одному условию для каждого блока), представленных альтернативами, реализующими эти блоки. Тогда остальные G -блоков ($G = N - S$) будут содержать на уровне альтернатив локальные решения типа условий – ограничения, а множество, формирующее вариант синтезируемого решения X , составят два подмножества X_S и X_G :

$$X = \{X_S, X_G\}, x \in R^n. \quad (4.4)$$

Набор условий X_S , выбираемых на второй ступени упорядочения, определяет некоторую S -мерную цель синтеза:

$$X_S = \{X_{S_i}^\beta\}, i = 1 \dots S; \beta = 1 \dots m_i. \quad (4.5)$$

Выбранные локальные целевые условия $X_{S_i}^\beta$, как правило, неодинаково влияют на эффективность синтезируемого решения и поэтому должны быть ранжированы по их значимости и оценены с помощью некоторого параметра λ_i , т.е.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_S. \quad (4.6)$$

Значение оценочных параметров λ_i устанавливается с соблюдением дополнительного условия, в качестве которого удобно использовать соотношение:

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_S = 1. \quad (4.7)$$

Для выбора целевых условий применим метод парных сравнений. Этим методом вначале можно определить блоки 1-го уровня декомпозиции X_ξ , которые содержат искомые целевые условия в виде альтернатив X_ξ^β .

Затем производится сравнение всех блоков X_ξ (как альтернатив) попарно, с тем чтобы установить наиболее значимый в каждой такой паре. Для облегчения данной процедуры составляется таблица-матрица парных сравнений (Таблица 4.2). Все сопоставляемые блоки в таблице записывают в одном и том же порядке дважды: в верхней строке и в левом столбце. При заполнении матрицы на пересечении сопоставляемых блоков X_ξ проставляется оценка X_q/X_p . Если блок X_q более предпочтителен, чем блок X_p , эта оценка равна 1; если наоборот, то оценка равна 0. Число таких сравнений I при однопарном сопоставлении будет равно числу матричных блоков $R^B = n(n-1)/2$. Для декомпозиционной схемы с количеством блоков 1-го уровня $n = 9$, $I = 36$.

Таблица 4.2 – Матрица парных сравнений определения блоков X_{Si} , содержащих целевые условия X_{Si}^β

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
X_1	-	1	0	0	0	0	0	1	1
X_2	0	-	1	0	0	0	1	0	1
X_3	1	1	-	0	0	0	1	1	0
X_4	1	1	1	-	1	1	0	1	0
X_5	0	1	0	0	-	0	1	1	0
X_6	1	1	1	0	1	-	1	1	0
X_7	1	1	0	0	0	0	-	1	1
X_8	0	0	0	0	0	0	0	-	1
X_9	1	1	0	0	0	0	1	1	-

Далее после построения матрицы парных сравнений определяется частота предпочтений f_{qi} каждого блока X_{ξ} :

$$f_{qi} = \sum_{q=1}^{n-1} f(q/p)_i, \quad (4.8)$$

где q и p – соответственно номера блоков левого столбца и верхней строки; $f(q/p)$ – частота предпочтений блока q_i по отношению к блокам p . Частота предпочтений f_{qi} формируется как сумма единиц и нулей. Чем больше f_{qi} , тем выше вероятность того, что в q -ом блоке содержится целевое условие в виде одной из альтернатив X_{ξ}^{β} , а ряд больших (с убыванием) значений f_{qi} , следовательно, указывает номера искомых блоков, содержащих целевые условия.

Таким образом целевыми условиями являются альтернативы:

$$X_{S1}=X_2^1, \lambda_1=0,5;$$

$$X_{S2}=X_8^2, \lambda_2=0,5.$$

В итоге двухмерная цель синтеза:

$$X_S = \{X_2^1, X_8^2\}. \quad (4.9)$$

Любой объект, процесс или проект нетехнической сферы деятельности человека характеризуется структурой и параметрами. Начальное представление о строении объекта несет его структура. С её формирования как облика проекта и начинается синтез. Проведя декомпозицию и выбрав в полученном поисковом пространстве R^n некоторую S -мерную цель, необходимо решить вторую часть задачи синтеза – сформировать G -мерное «решение – ограничение».

На основе метода ранжирования определяем условия ограничения:

$$X_G^* = \{X_{Gj}^{\beta}\}, j = 1, \dots, G = N - S, \quad (4.10)$$

где X_{Gj}^{β} - альтернатива, реализующая j -й блок декомпозиционной схемы и удовлетворяющая всем S целевым условиям множества $X_S = \{X_{Si}^{\beta}\}$.

Оптимизация неформальных решений при нескольких целях традиционными методами неосуществима. В этом случае в качестве

оптимизационного подхода целесообразно формировать паретовское множество альтернатив.

Итак, эффективное решение – ограничение X_G^* , в отличие от X_G , определяется паретовским множеством наиболее предпочтительных альтернатив при «мягкой» конкуренции всех ранее выбранных целевых условий $X_{G_j}^\beta$. Для решения этой задачи предлагаются следующие шаги.

1) Каждой альтернативе $X_{G_j}^\beta$ в блоках X_{G_j} по каждому условию $X_{S_i}^\beta$ присваивается оценка $\lambda_{iG_j}^\beta$, например, по трехступенчатой шкале в виде кодов (оценок): «лучшая альтернатива (решение)» – код 1, «альтернативы в блоке по отношению к данной локальной цели равнозначные» – код 2, «в блоке есть лучшая альтернатива» – код 3.

2) Каждой оценке в соответствии с её кодом присваивается численное значение по правилу:

Код Значение $\lambda_{iG_j}^\beta$

$$1\lambda_{iG_j}^\beta = \lambda_i,$$

$$2\lambda_{iG_j}^\beta = \lambda_i / m,$$

$$3\lambda_{iG_j}^\beta = 0,$$

где m_i – количество альтернатив $X_{G_j}^\beta$ в блоке X_{iG_j} .

3) В каждом блоке X_{G_j} выбираются оценки $\lambda_{iG_j}^\beta$ с наилучшими численными значениями и соответствующие им альтернативы $X_{G_j}^\beta$ по принципу:

$$\max_{\lambda_1, \dots, \lambda_S} \lambda_{iG_1}^\beta \rightarrow X_{G_1}^\beta, \dots, \max_{\lambda_1, \dots, \lambda_S} \lambda_{iG_g}^\beta \rightarrow X_{G_g}^\beta \quad (4.11)$$

4) Формируется в виде множества X^* эффективное решение – наилучший оптимальный по Парето вариант структуры (облика) создаваемого объекта.

Согласно этому подходу альтернатива считается оптимальной по Парето, если всякая другая альтернатива, являющаяся более предпочтительной для одних целей, в то же время будет менее

предпочтительна для остальных целей. Принцип оптимальности по Парето далее утверждает, что никогда не следует выбирать альтернативу, которая не является Парето – оптимальной. Лишь при таком (паретовском) выборе можно увеличить степень удовлетворения некоторых целей, не ущемляя при этом других целей. Таким образом, альтернатива паретовского множества обладает тем свойством, что дальнейшее увеличение степени предпочтения для достижения одних целевых условий возможно только за счет других. Сложность заключается в выборе наилучших паретовских альтернатив во всех блоках $G = N - S$.

Таблица 4.3 – Результаты присвоения весов оценкам λ_{iGg}^β при выборе условий-ограничений

X_{Gj}	X_{Gj}^β	$X_{S1}=X_2^1; \lambda_1=0,5$		$X_{S2}=X_8^2; \lambda_2=0,5$	
		λ_{1Gg}^β		λ_{2Gg}^β	
		Код	Значение	Код	Значение
1	2	3	4	5	6
$X_{G1}=X_1$	$[X_1^1]$	1	0,5	2	0,25
	X_1^2	3	0	2	0,25
$X_{G2}=X_3$	X_3^1	3	0	2	0,17
	X_3^2	3	0	2	0,17
	$[X_3^3]$	1	0,5	2	0,17
$X_{G3}=X_4$	X_4^1	3	0	2	0,25
	$[X_4^2]$	1	0,5	2	0,25
$X_{G4}=X_5$	X_5^1	2	0,17	3	0
	X_5^2	2	0,17	3	0
	$[X_5^3]$	2	0,17	1	0,5
$X_{G5}=X_6$	X_6^1	2	0,25	3	0
	$[X_6^2]$	2	0,25	1	0,5
$X_{G6}=X_7$	X_7^1	3	0	2	0,17
	X_7^2	3	0	2	0,17
	$[X_7^3]$	1	0,5	2	0,17
$X_{G7}=X_9$	X_9^1	2	0,25	3	0
	$[X_9^2]$	2	0,25	1	0,5

Оптимальный по Парето вариант формируется в виде множества:

$$X^* = \{X_{Si}, X_{Gj}^*\}. \quad (4.12)$$

В развернутом виде с указанием всех целевых условий X_{Si}^{β} и условий – ограничений X_{Gj}^{β} множество (4.12) запишется так:

$$X^* = \{X_{Si}^{\beta}, \dots, X_{Ss}^{\beta}, X_{G1}^{\beta}, \dots, X_{Gg}^{\beta}\}. \quad (4.13)$$

Таблица 4.4 – Результаты выбора решений-ограничений $\rightarrow X_{Gj}^{\beta}$ целевыми условиями X_{Si}^{β}

X_{Si}^{β}	X_{Gj}^{β}
X_2^1	$X_1^1, X_3^3, X_4^2, X_7^3$
X_8^2	X_5^1, X_6^2, X_9^2

Таким образом,

целевые условия: $X_S = \{X_2^1, X_8^2\}$,

условия ограничения: $X_Q^* = \{X_1^1, X_3^3, X_4^2, X_5^1, X_6^2, X_7^3, X_9^2\}$,

эффективное решение будет иметь вид:

$$X^* = \{X_2^1, X_8^2; X_1^1, X_3^3, X_4^2, X_5^1, X_6^2, X_7^3, X_9^2\}.$$

Система измерения виброакустического сигнала

предусматривает:

совместимость с системами верхнего уровня (X_2^1);

автоматизированное управление системой измерений (X_8^2);

обеспечивает:

задаваемую программой точность и скорость обработки измерений (X_1^1);

визуализацию полученной информации с помощью SCADA систем (X_3^3);

предварительную обработку сигналов (X_4^2);

опрос датчиков, запускаемый по запросу и в режиме реального времени (X_5^3);

сохранение полученной информации в электронный журнал измерений (X_6^2);

работу системы как в ручном (для наладки), так и в автоматическом режиме (X_7^3);

расчет модели устройства принятия решений экспертной системой (X_9^2).

4.2 Выбор модели для устройств принятия решений

На данном этапе необходимо выбрать модель, которая будет реализовывать взаимосвязь входных и выходных параметров в рамках решения поставленных задач. Причем модель должна работать с учетом высказанных выше условий неопределенности. Тестирование моделей выполнялось в программной среде MATLAB при помощи пакетов System Identification Toolbox и Anfis Editor. Данные пакеты позволяют подбирать вид модели в зависимости от заданных исходных данных. При этом имеется выборка для получения модели $y1$ (как $Ra=f(Sw)$) и тестовая выборка $u1$ (как $Ra=f(Sw)$), полученная из данных эксперимента, которые не были учтены при построении модели. Анализ точности полученных результатов проводится сравнением $y1$ и $u1$.

Пример данных для анализа приведен на Рисунке 4.2 (зависимость Ra от мощности вибросигнала в диапазоне 13...15 кГц).

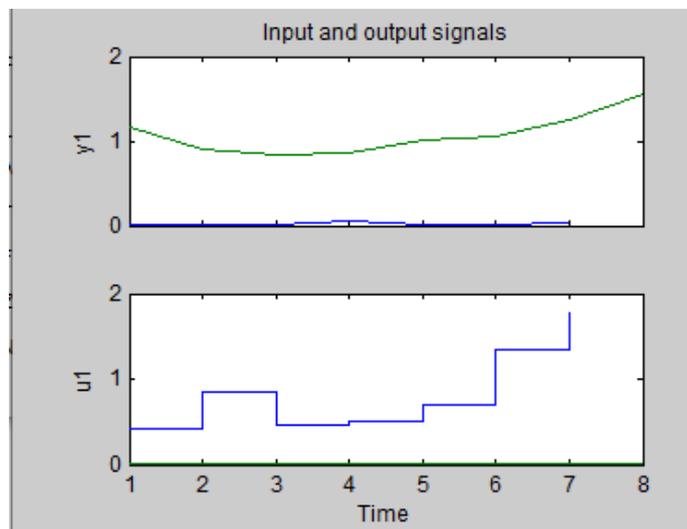


Рисунок 4.2 – Пример данных для анализа

Расширение System Identification Toolbox позволяет построить ряд моделей (см. Рисунок 4.3).

- Transfer Functions

$$\frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_n} \text{ (непрерывная)}$$

$$\frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_mz^m + b_{m-1}z^{m-1} + \dots + b_0}{a_nz^n + a_{n-1}z^{n-1} + \dots + a_0} \text{ (дискретная)}$$

- State Space

$$x_{new} = Ax + Bu + Ke;$$

$$y = Cx + Du + e$$

- Process Models

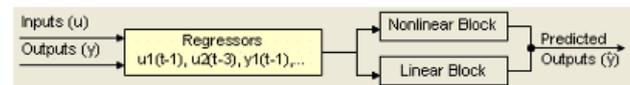
$$\frac{K(1 + Tz s)}{(1 + Tp1s)}, \frac{K \exp(-Td s)}{(1 + Tp1s)}, \frac{K}{s(1 + Tp1s)}$$

- Polynomial and State Space Models

$$Ay = Bu + e; Ay = Bu + Ce; y = [B/F]u + e;$$

$$y = [B/F]u + [C/D]e; \begin{matrix} x_{new} = Ax + Bu + Ke; \\ y = Cx + Du + e \end{matrix}$$

- Nonlinear ARX Models



- Nonlinear Hammerstein-Wiener Models:



- Spectral Models: SPA(Blackman-Tukey); SPAFDR(Freq.dep.res.); ETFE (Smoothed Fourier Trf)

Time span (seconds):

Order of whitening filter:

- Correlation Models:

Рисунок 4.3 – Виды моделей System Identification Toolbox

В нашем случае были рассмотрены полиномиальная модель (ARX), модель пространства состояний (State Space), модель с ошибкой вывода (OE), а также спектральная и корреляционная модели. В качестве данных для оценки адекватности модели были использованы зависимости тех же параметров, полученные при точении деталей из другой марки стали.

Пример результатов приведен на Рисунках 4.4-4.5.

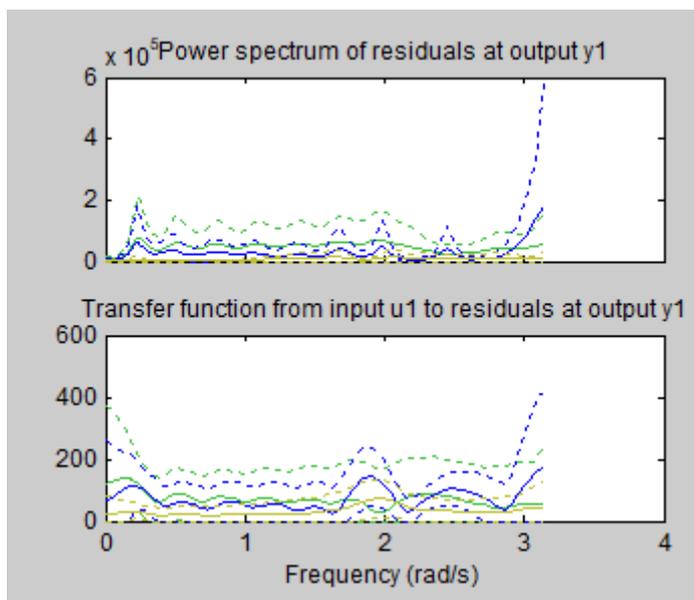


Рисунок 4.4 – Пример результатов применения моделей при расчете выборки y_1 и тестовой выборки u_1

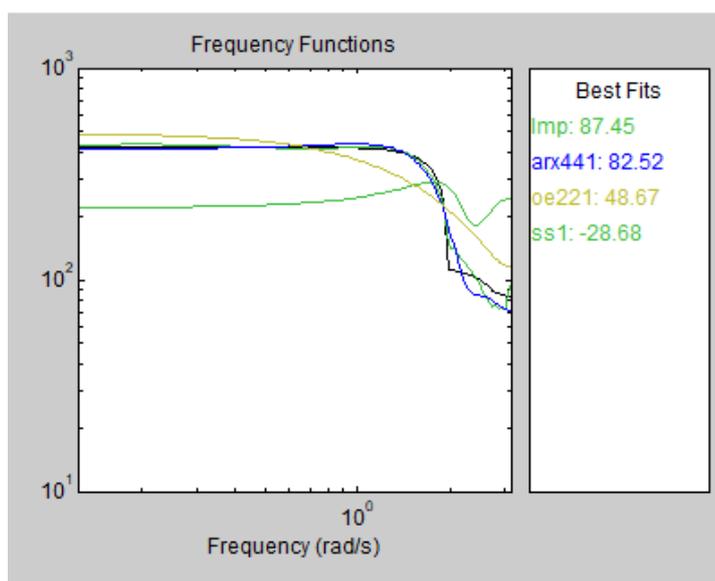


Рисунок 4.5 – Пример результатов применения моделей при расчете средней ошибки

Как видно из Рисунка 4.5, погрешность превышает 10%. В целом в ходе тестирования по всем параметрам было установлено, что погрешность более 20%, что неприемлемо.

Выходом из данной ситуации является использование нейро-нечетких моделей. Нейро-нечеткие системы объединяют в себе достоинства нейронных сетей и классических нечетких систем. В отличие от нейронных сетей, нейро-нечеткие системы характеризуются четким представлением знаний, содержащихся в нечетких правилах. Также нейро-нечеткие сети можно обучать с помощью метода обратного распространения ошибки (основа обучения многослойных нейронных сетей) и эволюционных алгоритмов. Обучению чаще всего подвергаются параметры функций принадлежности суждений (компонент ЕСЛИ...) и заключений (компонент ТО...) нечетких правил. Перечисленные достоинства нейро-нечетких систем обусловили их широкое применение для решения задач моделирования, аппроксимации и классификации. В большинстве таких систем используется вывод типа Мамдани или логического типа. Способ вывода (Мамдани или логический) может быть определен в процессе обучения. Такие системы называются гибкими нейро-нечеткими системами. Структура гибких систем изменяется в процессе обучения [52].

Общая структура нейро-нечеткой сети приведена на Рисунке 4.6.

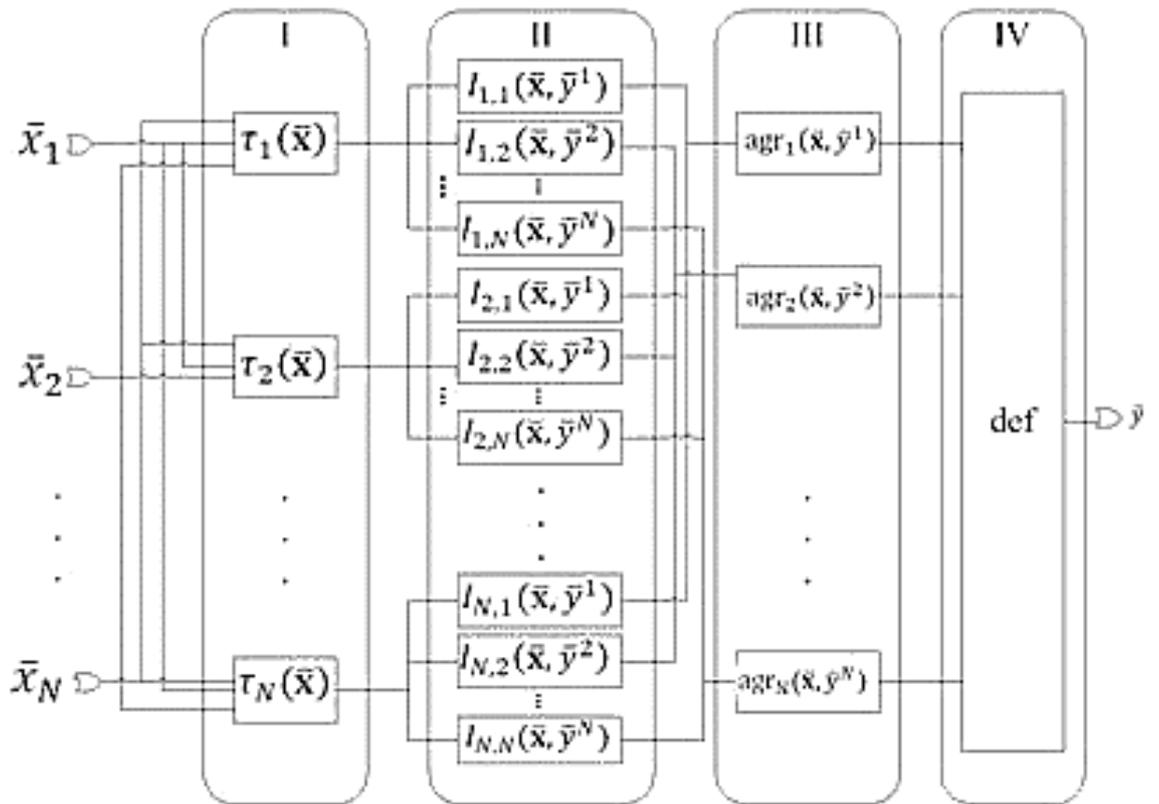


Рисунок 4.6 – Структура нейро-нечеткой сети

Она включает оба типа вывода – Мамдани и логический:

$$\bar{y} = f(\bar{x}) = \frac{\sum_{r=1}^N \bar{y}^r \cdot agr_r(\bar{x}, \bar{y}^r)}{\sum_{r=1}^N agr_r(\bar{x}, \bar{y}^r)}, \quad (4.13)$$

где $agr_r(\bar{x}, \bar{y}^r) = S_{k=1}^N \{I_{k,r}(\bar{x}, \bar{y}^r)\}$ – в нашем случае, т.к. используется

модель Мамдани;

оператор $I_{k,r}(\bar{x}, \bar{y}^r) = T\{\tau_k(\bar{x}), \mu_{B^k}(\bar{y}^r)\}$;

оператор $\tau_k(\bar{x}) = T_{i=1}^n \{\mu_{A_i^k}(\bar{x}_i)\}$.

Построение модели выполнялось средствами библиотеки Anfis программного пакета MATLAB. На Рисунках 4.7-4.10 приведены результаты построения модели для тех же исходных данных, что и в случае, рассмотренном выше.

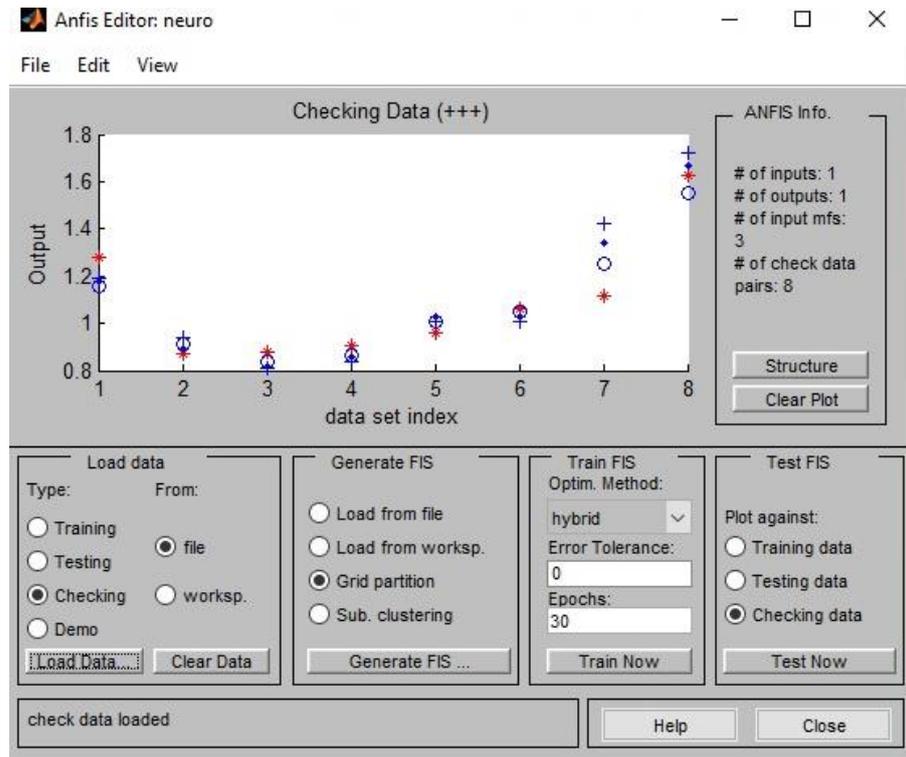


Рисунок 4.7 – Данные для обучения, тестирования и проверки нейронечеткой модели

В качестве функций принадлежности использовались термы, которые описываются функцией Гаусса [2, 7, 8, 15-17, 29, 51, 67-69, 76, 77, 86-90], т.к. в ходе тестирования моделей данная архитектура дает наибольшую точность при тестировании моделей.

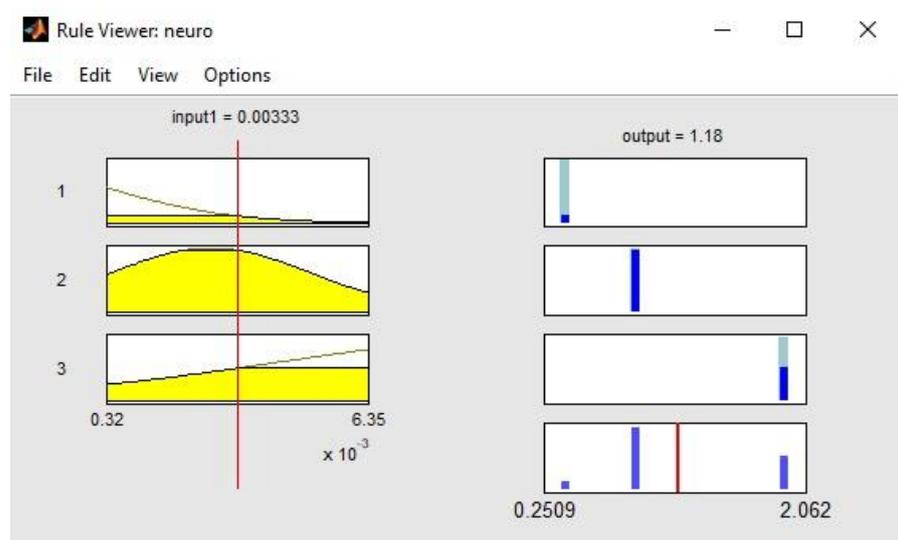


Рисунок 4.8 – Внешний вид системы правил

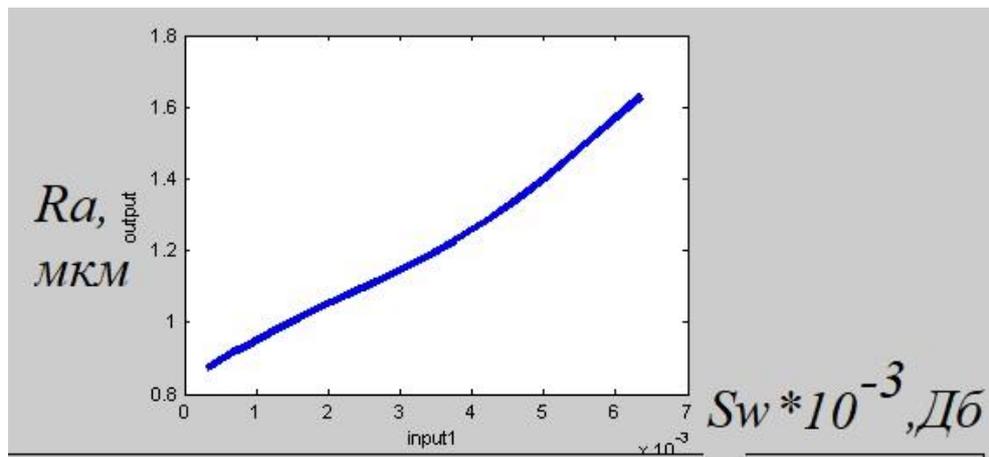


Рисунок 4.9 – Внешний вид функции нечеткой логики

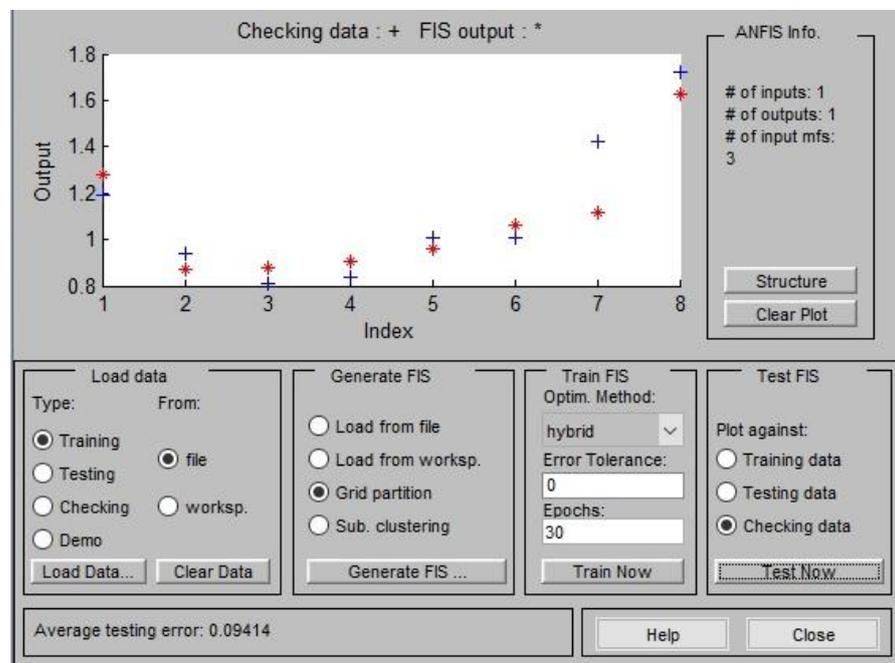


Рисунок 4.10 – Результат оценивания точности модели

Из Рисунка 4.10 видно, что средняя ошибка вычислений не превышает 7%. 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.

4.3 Основные выводы по главе

Проведенные исследования позволяют сделать ряд выводов:

1. В результате декомпозиционного анализа установлено, что создаваемая система должна быть совместима с системами верхнего уровня, обеспечивать автоматизированное управление системой измерений, а также иметь возможность работы как в ручном (обучающем режиме), так и в автоматическом.

2. Анализ традиционных моделей, реализующих устройства принятия решений, показал, что их использование малоэффективно в условиях неопределенности исходных данных.

3. Наилучшие результаты показывает применение нейро-нечетких систем, т.к. они обладают комбинацией свойств обучения и гибкого логического блока, который позволяет принимать решения в условиях неопределенности исходных данных.

4. Учитывая специфику решаемой задачи, можно отметить, что работа системы в режиме реального времени не требуется, поэтому ее можно реализовать в виде экспертной системы, которая на основании использования базы знаний и вычисления диагностических признаков будет выполнять корректировку условий обработки с целью обеспечения заданных значений шероховатости поверхности.

5 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

5.1 Разработка общей структуры и алгоритма системы

Общая структура системы приведена на рисунке 5.1.

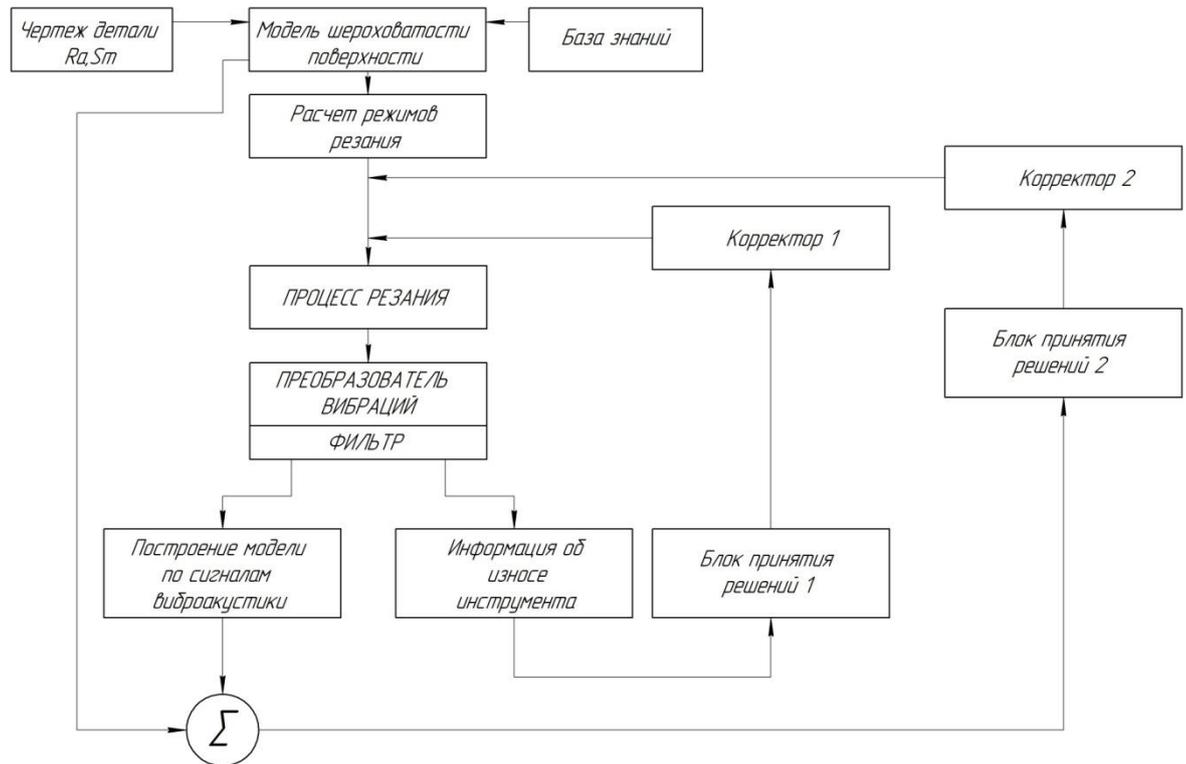


Рисунок 5.1 – Структура системы мониторинга и прогнозирования
шероховатости поверхности

Сигнал вибракустики записывается при помощи датчика-акселерометра, и после этого производится его фильтрация в требуемом диапазоне (фильтр используется цифровой).

В состав системы входят следующие блоки:

- блок «модель шероховатости поверхности» предназначен для построения эталонной модели шероховатости, которая в дальнейшем используется для оценки получаемого профиля. Построение модели

шероховатости поверхности выполняется на основе алгоритма, который представлен в главе 2;

- блок «расчет режимов резания» позволяет назначить режимы резания в зависимости от требований к шероховатости поверхности с использованием предварительно обученной базы знаний;

- блок «построение модели по сигналам виброакустики» используется для того, чтобы получить модель шероховатости поверхности, которая используется для оценки расхождений с эталонной моделью и дальнейшего определения необходимой корректировки режимов резания;

- «блок принятия решений 2» используется для внесения коррекций в процесс обработки с целью устранения рассогласований между требуемой величиной параметров шероховатости и получаемой в процессе обработки. По величине рассогласования определяется корректирующее воздействие по подаче dS , после чего производится коррекция подачи при помощи блока «корректор 2»;

- блок «информация об износе инструмента» используется для того, чтобы производить оценку состояния режущей кромки инструмента и его дальнейшей работоспособности. В качестве входных данных используются показатель Хёрста и мощность вибросигнала в частотном диапазоне от 13 до 15 кГц. Корректор 1 при этом вносит соответствующее управляющее воздействие.

Таким образом, в системе имеется 4 нейро-нечетких блока (ННБ):

1. 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. Структура блока приведена на Рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Структура блока ННБ1

2. Нейро-нечеткий блок 2 (ННБ2) производит вычисление входных параметров модели построения шероховатости поверхности по виброакустическому сигналу. В качестве входных переменных используются показатель Хёрста вибросигнала (H_C) и мощность вибросигнала. Выходные параметры – среднеквадратическое отклонение и показатель Хёрста профиля шероховатости поверхности. Структура блока приведена на Рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Структура блока ННБ2

3. Нейро-нечеткий блок 3 (ННБ3) производит оценку износа режущего инструмента. В качестве входных переменных используются показатель Хёрста вибросигнала (H_C) и мощность вибросигнала. Выходной параметр – ширина фаски износа. Структура блока приведена на Рисунке 5.4.



Рисунок 5.4 – Структура блока ННБ3

4. Нейро-нечеткий блок 4 (ННБ4) используется для вычисления величины корректирующего воздействия по рассогласованию данных между эталонной моделью шероховатости поверхности и построенной по сигналам виброакустики. Структура блока приведена на Рисунке 5.5.

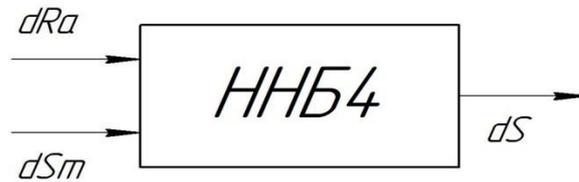


Рисунок 5.5 – Структура блока ННБ4

На Рисунке 5.6 приведена структура системы с учетом блоков ННБ1-ННБ4.

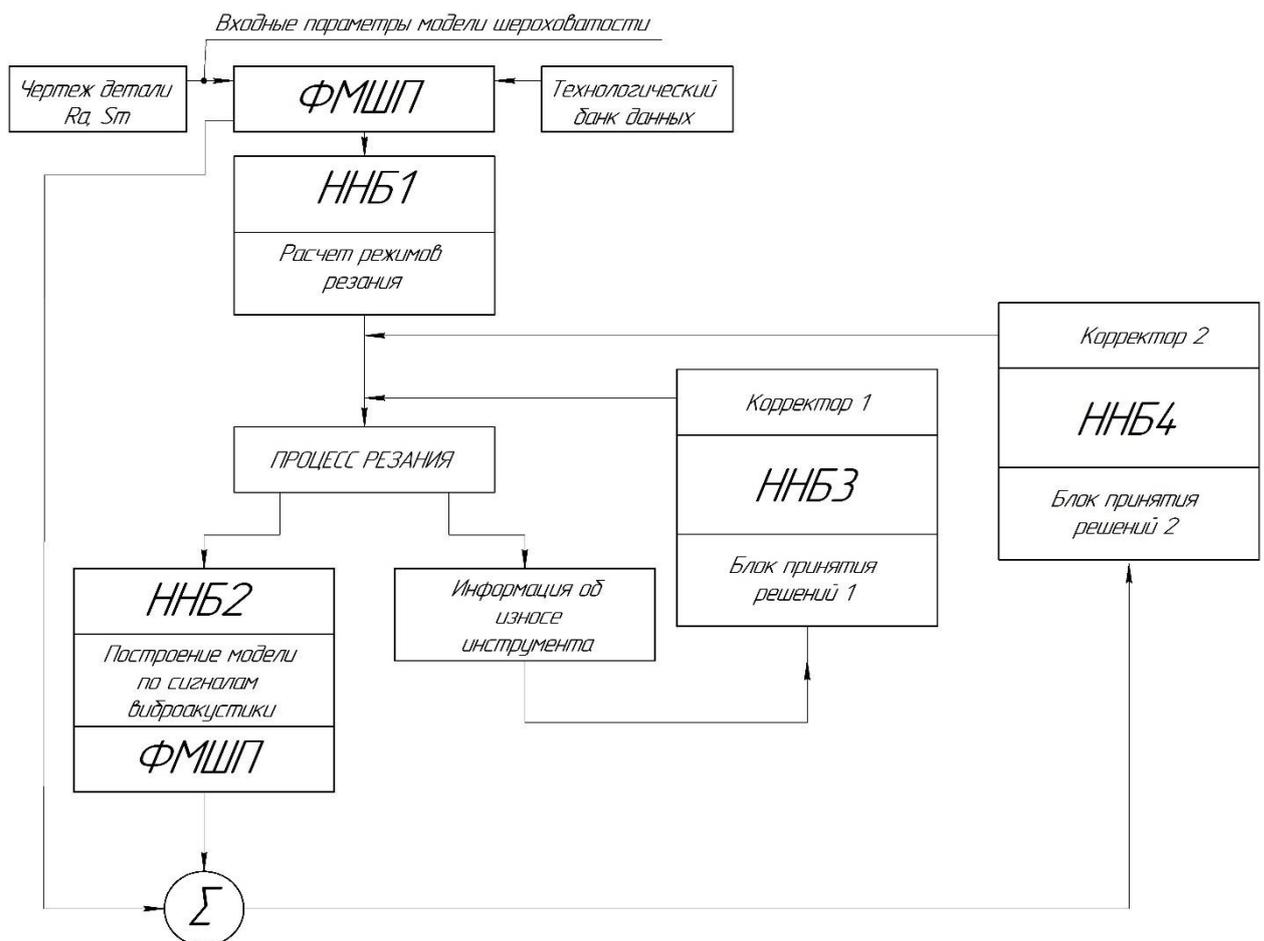


Рисунок 5.6 – Структура системы с нейро-нечеткими блоками

На Рисунке 5.7 приведен алгоритм работы системы.

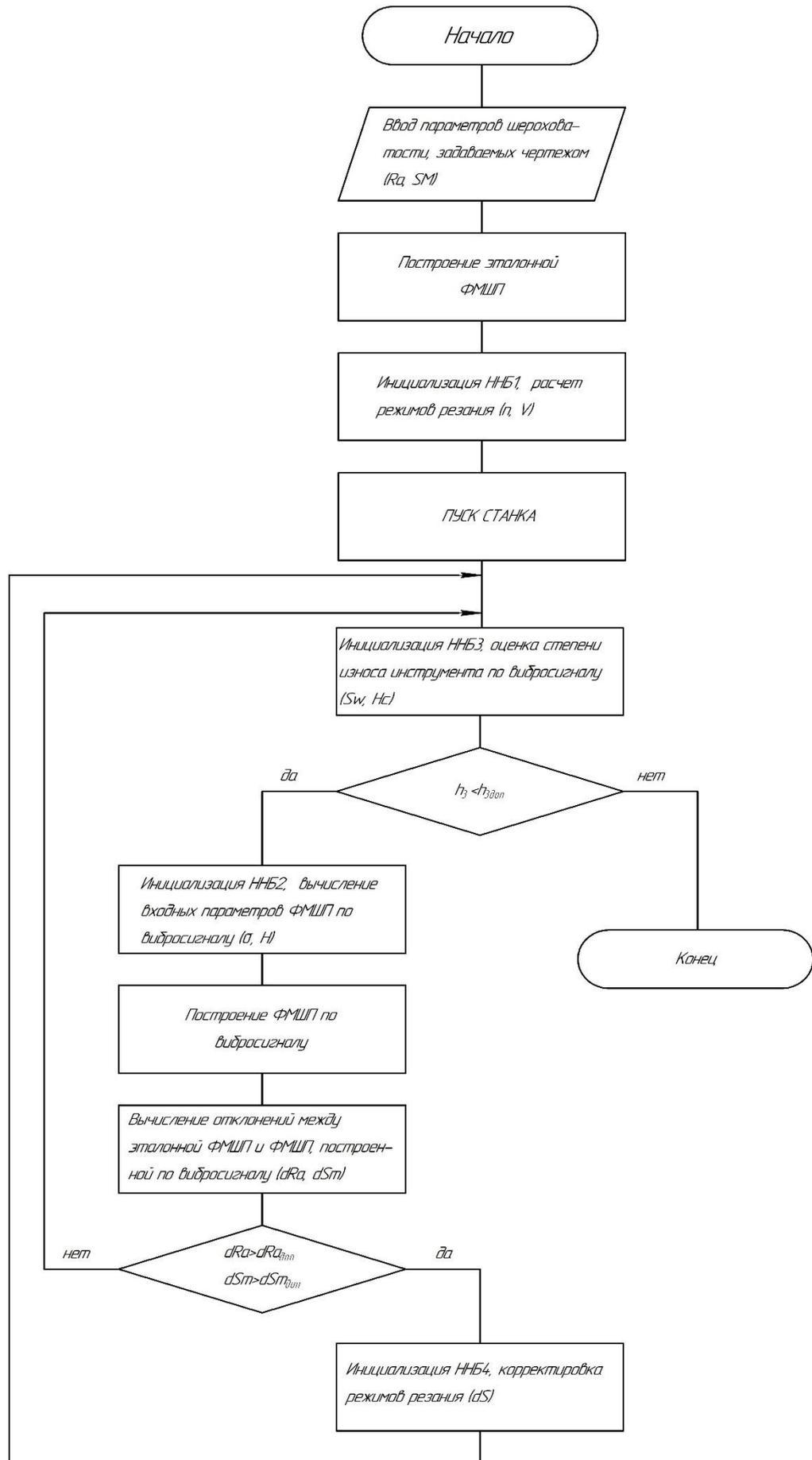


Рисунок 5.7 – Алгоритм работы системы

5.2 Практические рекомендации

На Рисунке 5.8 приведен пример конфигурации типичной детали палец, которая используется в паре трения скольжения спецтехники.

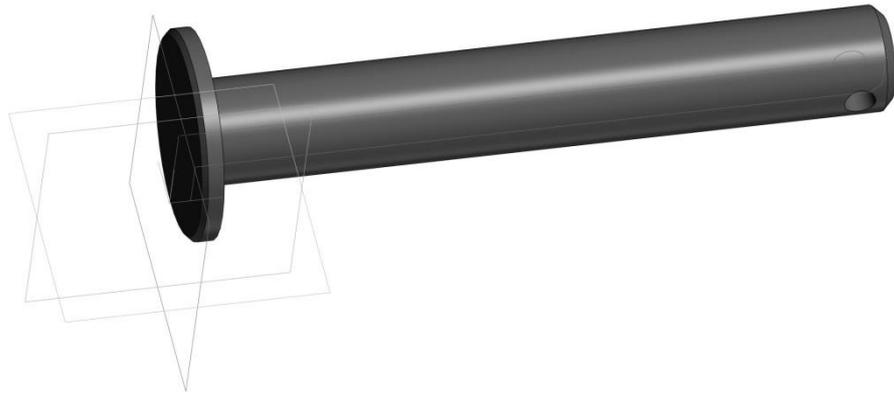


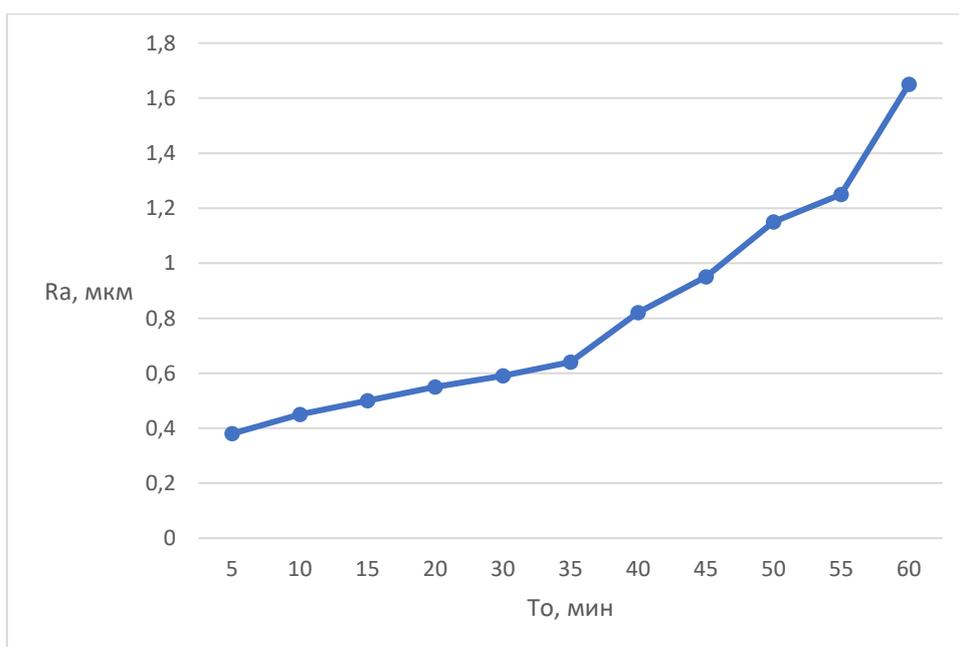
Рисунок 5.8 – Конфигурация детали

На Рисунке 5.9 приведен график среднеарифметического отклонения профиля от времени работы инструмента, который был получен при наружном цилиндрическом точении детали из стали 40ХН с твердостью 38...42 HRC. При этом производилось периодическое снятие и измерение шероховатости обработанной поверхности. Значения подачи принималось постоянным. Требуемое значение шероховатости поверхности $Ra = 0,8$ мкм. Пример протокола испытаний приведен в Таблице 5.1.

Данные, которые были получены в результате испытаний, использовались как обучающая выборка для настройки нейро-нечетких блоков системы. На Рисунке 5.9 приведен график зависимости шероховатости поверхности (Ra) от основного времени (T_0).

Таблица 5.1 – Пример протокола испытаний

№ прохода	D (мм)	L _{рх} (мм)	t (мм)	V (м/мин)	S _о (мм/об)	T _о (мин)
0	45,00	-	-	-	-	-
1	43,40	350,00	0,8	100,00	0,2	1,84
2	41,80	350,00	0,8	100,00	0,2	1,75
3	40,20	350,00	0,8	100,00	0,2	1,66
4	Осмотр и протоколирование состояния инструмента					
5	38,60	350,00	0,8	100,00	0,2	1,57
6	37,00	350,00	0,8	100,00	0,2	1,48
7	35,40	350,00	0,8	100,00	0,2	1,40
8	Осмотр и протоколирование состояния инструмента					
9	33,80	350,00	0,8	100,00	0,2	1,31
10	32,20	350,00	0,8	100,00	0,2	1,22
11	30,60	350,00	0,8	100,00	0,2	1,13
12	29,00	350,00	0,8	100,00	0,2	1,04
			...			

Рисунок 5.9 – Зависимость $Ra(T_o)$ без коррекции подачи

На Рисунке 5.10 приведена зависимость шероховатости поверхности (Ra) от основного времени (T_0), которая была получена посредством коррекции подачи, определяемой на основе разработанных моделей. Схема обработки аналогична указанной выше, только параллельно проводилась запись и анализ сигнала виброакустики и вычисление коррекций.

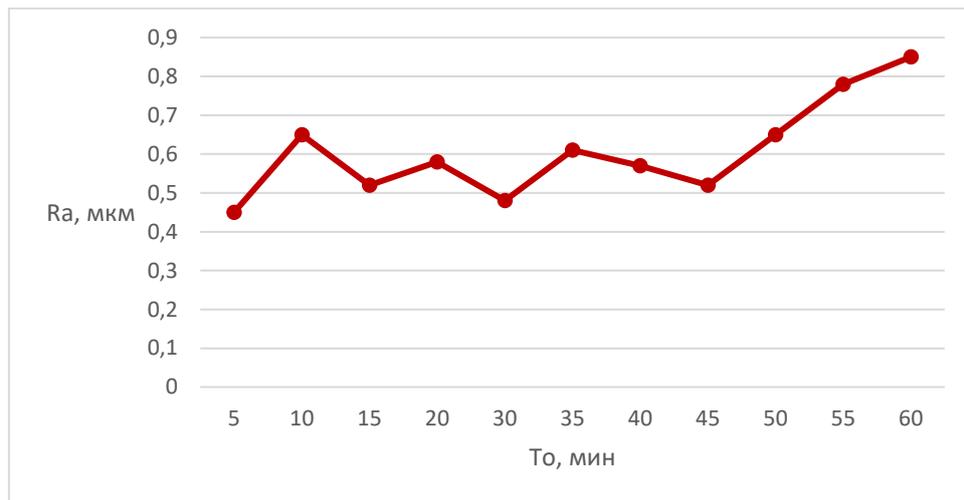


Рисунок 5.10 – Зависимость $Ra(T_0)$ с коррекцией подачи

Из Рисунка 5.10 видно, что 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 5.11.

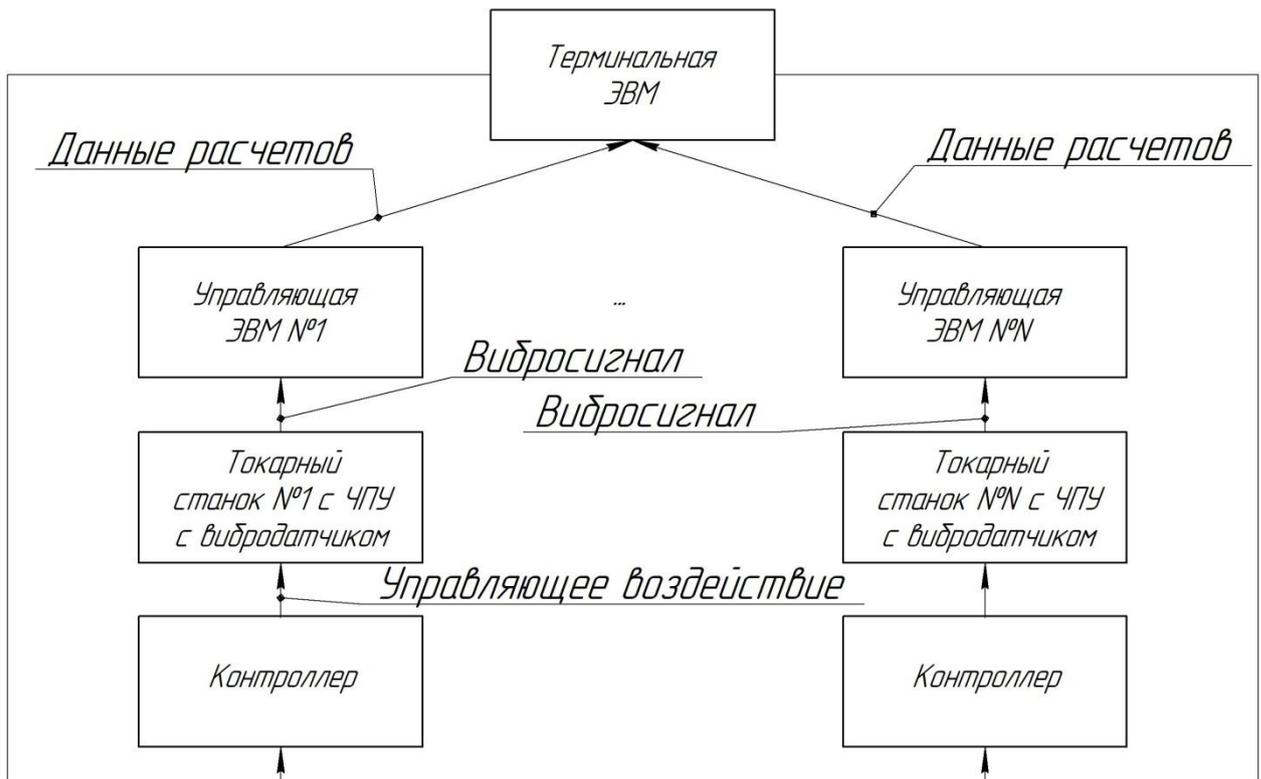


Рисунок 5.11 – Схема реализации

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.

Для передачи управляющих и корректирующих воздействий, вычисленных при помощи ЭВМ методами нейро-нечеткой логики, возможно использовать программируемый логический контроллер как головное устройство управления. Связь с подсистемой станка с ЧПУ обеспечивается по интерфейсу RS-485 как наиболее надежному промышленному интерфейсу связи. Также для повышения надежности системы управления аварийные сигналы от станка передаются в контроллер дискретными сигналами «сухой контакт».

В разрабатываемой системе управления каждое оборудование имеет свое локальное устройство управления, соответственно необходимо объединить введенные датчики и системы управление в единую систему.

Для выбора ПЛК сравним ПЛК популярных производителей.

Таблица 5.2 – Характеристики ПЛК Siemens, Mitsubishi, Omron

Siemens S7-1200	Mitsubishi Electric FX3U	Omron CP2E
Питание, В: 24 DC;	Питание, В: 24DC;	Питание, В: 24DC;
Количество входов: 14DI, 2AI Количество выходов: 10DO, 2AO Возможность расширения каналов: до 146 DI, 142 DO, 67AI, 33AO.	Количество входов: 32 Количество выходов: 32	Количество входов: 64DI Количество выходов: 64DO
Память ЦПУ: загрузочная 4 Мб, рабочая 100Кб\125Кб, энергонезависимая 10Кб.	Память RAM/EEPROM, Емкость памяти программ, шаг: 64000. Возможность подключения кассеты памяти на 16000 или 64000 шагов программы	Емкость памяти программ, шаг: 8000 Емкость памяти данных, слов: 8000
Быстродействие, мкс: 18	Быстродействие, мс: 10	Время выполнения операции, мкс: 23
Интерфейс: Profinet, Modbus, Profibus, RS-232, RS-422, RS-485	Модули и адаптеры расширения с поддержкой RS-232, RS-485, CC-Link, CANopen, Modbus, Profibus-DP, DeviceNet	Максимальное количество модулей расширения: 3 Максимальное количество аналоговых каналов ввода/вывода: 24 Количество входных каналов энкодера: 6 Интерфейс: RS-232C, RS-485, USB
Среда программирования: SIMATIC STEP7	Среда программирования: GX Developer FX	Среда программирования: CX Programmer
Язык программирования: LD (релейно-контактные схемы)	Язык программирования: LD (релейно-контактные схемы)	Язык программирования: LD (релейно-контактные схемы)
Стоимость, тыс. руб: 70-120	Стоимость, тыс. руб: 80-125	Стоимость, тыс. руб: 60-80
Возможность подключения модуля ИИ: Нейропроцессорный модуль SIMATIC S7-1500 TM NPU	Возможность подключения ИИ: нет	Возможность подключения ИИ: модуль Sysmac NY5 или NX7 со встроенным ИИ с библиотекой Sysmac Library for AI Controller

Анализируя характеристики представленных устройств, выбор остановим на контроллере модели Omron CP2E по совокупности технико-экономических характеристик.

Серия CP2E представляет собой микроПЛК для управления компактным оборудованием, позволяет обмениваться данными между устройствами, в том числе по сети Ethernet.

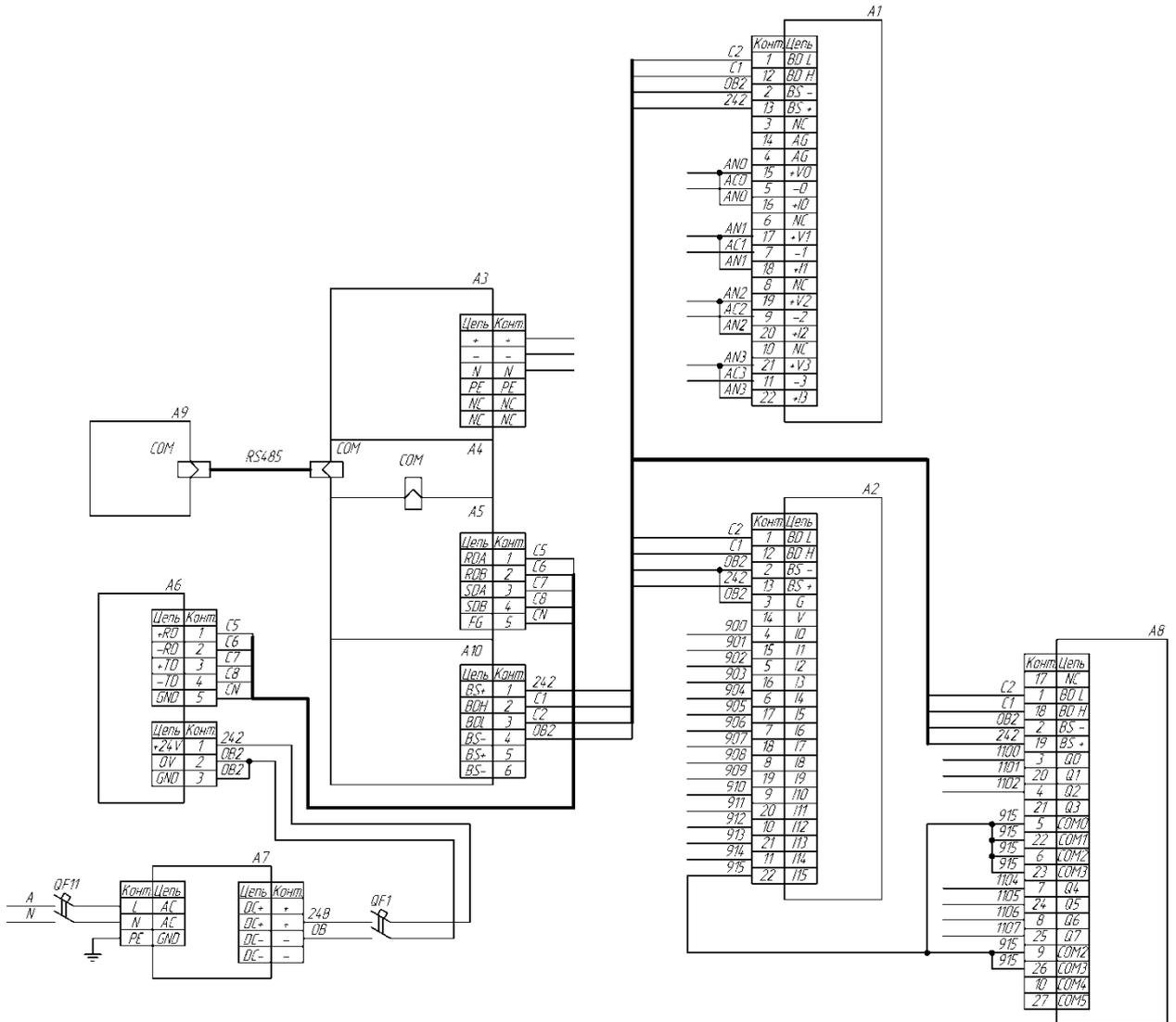


Рисунок 5.12 – Пример подключения контроллера Omron CP2E: A1 –Блок аналоговых входов, A2 –Блок дискретных входов, A3 – Модуль центрального процессора, A4, A5–Модули связи, A6– Программируемый терминал, A7 – Блок питания, A8 – Блок релейных выходов, A9 – ПК, A10 – Модуль питания контроллера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анцев А.В. Обеспечение эффективной эксплуатации лезвийного инструмента /А.В. Анцев. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – 180 с.
2. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с., ил.
3. Безъязычный В.Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин / В.Ф. Безъязычный // Инженерный журнал. Справочник.– 2000. – №4.
4. Безъязычный В.Ф. Назначение режимов резания по заданным параметрам качества поверхностного слоя / В.Ф. Безъязычный. – Ярославль, 1978. – 86 с.
5. Бендат Дж. Измерение и анализ случайных данных: Пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с., ил.
6. Божокин С.В. Фракталы и мультифракталы / С.В. Божокин, Д.А. Паршин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.
7. Бокс Дж. Анализ временных рядов / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М.: Мир, 1974.
8. Брандт З. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров: Пер. с англ. / З. Брандт – М.: Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. – 686 с., ил.
9. Бржозовский Б.М. Стабилизация динамического состояния станка как основа решения задач повышения точности механической обработки деталей / Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова, В.В. Мартынов, И.Н. Янкин // Вестник СГТУ (Надежность машин). – 2006. – №3(14). – С. 61-70.
10. Вальков В.М. Контроль в ГАП / В.М. Вальков. – Л.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
11. Васильков Ю.В. Компьютерные технологии вычислений в математическом моделировании / Ю.В. Васильков, Н.Н. Василькова. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 256 с., ил.

12. Винарский М.С. Планирование экспериментов в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – Киев, Техника, 1975. – 168 с.
13. Виттенберг Ю.Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки / Ю.Р. Виттенберг. – Л.: Судостроение, 1971. – 98 с.
14. Гисматулин А.Р. Моделирование формообразования шероховатости поверхности на операции плоского шлифования / А.Р. Гисматулин, О.М. Сидоренко // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – №4.– С. 850-855.
15. Губанов В.Ф. Основы вибродиагностики объектов в машиностроении: учеб. пособие / В.Ф. Губанов, В.Н. Орлов, А.Г. Схиртладзе. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2004. – 151 с.
16. Губанов В.Ф. Программирование в среде Delphi: учеб. пособие / В.Ф. Губанов, В.Н. Орлов, А.Г. Схиртладзе. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2005. – 66 с.
17. Дебюк Г. Анализ финансовых данных с помощью самоорганизующихся карт: Пер. с англ. / Г. Дебюк, Т. Кохонен. – М.: Издательский Дом "АЛЬПИНА", 2001. – 317 с.
18. Демкин А.М. Контактное шероховатых поверхностей / Н.Б. Демкин. – М.: Машиностроение, 1975. – 233 с.
19. Демкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
20. Дунин-Барковский И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.И. Карташова. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
21. Дьяченко П.Е. Качество поверхности при обработке металлов резанием / П.Е. Дьяченко. – М.: Машгиз, 1951. – 350 с.
22. Дьяченко П.Е. Методы контроля и стандартизации волнистости поверхности / П.Е. Дьяченко. – М.: Стандартгиз, 1962. – 96 с.

23. Егоров В.А. Оптические и щуповые приборы для измерения шероховатости поверхности / В.А. Егоров. – М.: Машиностроение, 1965. – 223 с.
24. Елизаветин М.А. Повышение надежности машин / М.А. Елизаветин. – М.: Машиностроение, 1973. – 430 с.
25. Елизаветин М.А. Технологические способы повышения долговечности машин / М.А. Елизаветин, Э.А. Сатель. – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.
26. Заковоротный В.Л. Системный синергетический синтез управления динамикой металлорежущих станков с учётом эволюции связей / В.Л. Заковоротный. - Ростов-на-Дону: Изд. центр Дон. гос. техн. ун-та, 2008. — 324 с.
27. Исаев А.И. Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием / А.И. Исаев. – М.: Машгиз, 1950. – 354 с.
28. Кабалдин Ю.Г. Повышение надежности процессов механообработки в автоматизированном производстве / Ю.Г. Кабалдин, А.М. Шпилев – Владивосток: Дальнаука, 1996. –264 с.
29. Калан Р. Основные концепции нейронных сетей: Пер. с англ. / Р. Калан. - М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 291 с., ил.
30. Качество машин: Справочник: В 2 т.: Т. 1/ А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с., ил.
31. Кибальченко А.В. Контроль состояния режущего инструмента / А.В. Кибальченко. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 44 с.
32. Кибальченко А.В. Применение метода акустической эмиссии в условиях гибких производственных систем / А.В. Кибальченко. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 56 с.
33. Козочкин М.П. Виброакустическая диагностика технологических процессов / М.П. Козочкин. – М.: ИКФ "Каталог", 2005. – 196 с.
34. Козочкин М.П. Виброакустические методы оценки состояния режущего инструмента на станках с ЧПУ / М.П. Козочкин, В.В. Смирнов. – Рук. деп. НИИ Маш, 23.11.1983, №338-МШ-Д38.

35. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, Н.М. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 526 с.
36. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
37. Крагельский И.В. Узлы трения машин: Справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
38. Лукьянов В.С. Параметры шероховатости поверхности / В.С. Лукьянов. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 162 с.
39. Макеев А.М. Анализ современных методов исследования шероховатости поверхности деталей / А.М. Макеев, В.С. Айрапетян // Вестник СГГА. – 2014. – №4. – С. 80-86.
40. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
41. Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А.А. Маталин. – М.-Л.: Машгиз, 1956. – 252 с.
42. Маталин А.А. Технологические основы повышения долговечности деталей машин / А.А. Маталин. – Киев: Техника, 1971. – 144 с.
43. Ольшевский А.А. Решение контактных задач с учетом микронеровностей поверхностей контакта с использованием трехмерных базовых конечноэлементных схем / А.А. Ольшевский, В.И. Сакало, Л.В. Винник, А.М. Фридберг // Динамика и прочность транспортных машин. – Брянск, 2000. – С. 109–118.
44. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации: Пер. с польского И.Д. Рудинского / Осовский С. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с., ил.
45. Остапчук А.К. Автоматическое обеспечение шероховатости поверхности при чистовой обработке в условиях ГПС и отдельных технологических модулях с ЧПУ: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения»: дис. ... канд. техн. наук / А.К. Остапчук. – Курган., 1988. – 231 с.

46. Остапчук А.К. Применение теории фракталов в математическом моделировании и технике: учеб. пособие / А.К. Остапчук, В.Е. Овсянников. – Курган: Изд-во КГУ, 2009. – 76 с.
47. Приходько В.М. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: монография / В.М. Приходько, И.А. Меделяев, Д.С. Фатюхин. – М.: МАДИ, 2015. – 264 с.
48. Петрешин Д.И. Технологическое обеспечение шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей машин на основе адаптивного управления: спец. 05.02.08«Технология машиностроения»: дис. канд. техн. наук / Д. И. Петрешин. – Брянск, 2001. – 166 с.
49. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. – Киев: Наук. Думка, 1984. – 272 с.
50. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с., ил.
51. Сато Ю. Обработка сигналов. Первое знакомство / Ю. Сато. – М.: Додэка-XXI, 2002. – 176 с.
52. Синюк В.Г. Гибкие нейро-нечеткие системы вывода и программная реализация для решения задач аппроксимации / В. Г. Синюк, Е. Л. Бакшеева // Молодой ученый. — 2014. — № 8 (67). – С. 108-112.
53. Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения / А.П. Соколовский. – М.-Л.: Машгиз, 1955. – 515 с.
54. Соколовский А.П. Точность механической обработки и пути ее повышения / А.П. Соколовский. – М.-Л.: Машгиз, 1951. – 457 с.
55. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
56. Суслов А.Г. Выбор, назначение и технологическое обеспечение параметров шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-73 / А.Г. Суслов. – Брянск, 1983. – 83 с.

57. Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Сулов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
58. Сулов А.Г. Нормирование параметров шероховатости поверхностей деталей машин / А.Г. Сулов // Вестник машиностроения. – 1984. – №8. –С. 3-6.
59. Сулов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Сулов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
60. Табенкин А.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та,2007. – 136с.
61. Телков И.А. Устойчивость индентора при выглаживании цветных металлов / И.А. Телков // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2012.– № 4. – С. 62-65.
62. Тугенгольд А.К. Принципы концептуального подхода к созданию подсистемы "ИНСТРУМЕНТ" в Смарт-паспорте многооперационного станка / А.К. Тугенгольд, А.И. Изюмов // Вестник ДГТУ. – 2014. –№ 2. –С. 33-41.
63. Хрущов М.М. Исследования приработки подшипниковых сплавов и цапф / М.М. Хрущов. - М.-Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1946.
64. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Виттенберг, В.А. Пальмов. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
65. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю.Г. Шнейдер. – Л.: Машиностроение, 1972. – 240 с.
66. Шредер М. Фракталы, хаос и степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая / М. Шредер. – Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 528 с.
67. Ausloos M. and Berman D.H., Proc. R. Soc. London. Ser. A 400. 1985. 331 p.

68. Bardaro C., Musielak J., Vinti G. *Nonlinear Integral Operators and Applications*. – Walter Gruyter Berlin-New York, 2003. 199 p.
69. Bergmann M. *An Introduction to Many-Valued and Fuzzy-Logic. Semantics, Algebras and Derivation Systems*. Cambridge University Press, 2008. 329 p.
70. Costa M.A. Fractal description of rough surfaces for haptic display // url: http://www-cdr.stanford.edu/DML/publications/costa_thesis.pdf (дата обращения: 07.03.2024).
71. Delsanto P.P., Iordache D., Pusca S. Study of the correlations between different effective fractal dimensions used for fracture parameters descriptions// url: https://www.researchgate.net/publication/240706458_STUDY_OF_THE_CORRELATIONS_BETWEEN_DIFFERENT_EFFECTIVE_FRACTAL_DIMENSIONS_USED_FOR_FRACTURE_PARAMETERS_DESCRIPTIONS (дата обращения: 07.03.2024).
72. Dutschke W., Kiessling W. D., Rau W. Oberflächen sensor zur Rauheitsmessung beim Aussenrund — Einstechschleifen. *Z. ind. Fertig*, 1975, № 65.P. 697-703.
73. Ganti S., Bhushan B. Generalized fractal analysis and its applications to engineering surfaces/ *Wear*, Vol. 180. 1995, pp. 17-34.
74. Goltz C. *Fractal and chaotic properties of earthquakes/ Christian Goltz*. - Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo; Springer, 1998. 164 p.
75. Hwang Jin-Tsong and Shin Tian-Yuan. On the characteristics of simulated terrain using the successive random addition midpoint displacement method // url: <http://nhmrc.cv.nctu.edu.tw/People/tyshih/Publications/Emid-sub2.pdf>(дата обращения: 28.12.2023).
76. Inamura T., Senda T., Sata T. Computer control of chattering in turning operation. *Annals of the CIRP*. Vol125/I, 1977, pp. 181-186.

77. Liu R.; Wu S.; Yang L.; Yue C.; Liu X. A prediction method of milling chatter stability for complex surface mold. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, Vol. 89, pp. 2637–2648
78. Majumdar A., Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces. *J. Tribology*, 113: 1-11, 1991.
79. Majumdar A., Bhushan B. Role of fractal Geometry in Roughness Characterization and Contact Mechanics of Surfaces/ *ASME J. of Tribology*, Vol. 112, 1990, pp. 205-216.
80. Mandelbrot B. *Multifractals and 1/f noise*. Springer. New-York, 1997.
81. Mandelbrot B. *Fractal geometry of nature*. Computer science. *Mathematical Art.*, 1984. 954 p.
82. Oppenheimer P.E. Real time design and animation of fractal plants and trees. *Computer Graphics*, 20, pp. 55-64.
83. Peklenik J. Investigation of the Surface Topology. *Annals of the CIRP*. Vol XV, 1967, pp. 381-385.
84. Pynn R., Riste T., eds.. *Scaling Phenomena in Disordered systems*. Springer New York, NY, 1986. 580 p.
85. Roberts J.N. (1986). Comment about fractal and stone pores. *Phys. Rev. Lett.* 56, 2111. Published 12 May 1986
86. Roethel F., Dobovsek M., Grabes I. Acoustic Emission of Grinding. *Strojniski vestnik Vechnical journal*, Ljubljana. Vol 23. №11-22, 1977, pp 1-5.
87. Ross S.M. *Stochastic Processes*. Second Edition. New York : Wiley. 1983. 544 p.
88. Ruelle D. *Chance and Chaos*. Princeton University Press, 1991. 195 p.
89. Shaked M., Shatnikumar J.G. *Stochastic Orders*. Springer Science+Business Media. 1994. 473 p.
90. Tabor M. *Chaos and Integrability in nonlinear dynamics an introduction*. – Columbia University New York, New York. 1989. 364 p.

91. Tas K., Tenreiro-Machado J.A., Baleanu D. *Mathematical methods in engineering*. - Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo; Springer. 2007. 470 p.
92. Voss R.F. (1984), The fractal dimension and animation of percolation cluster hulls. *J. Phys.*, A17, L373-377.
93. Zhang, J.Z., Chen, J.C. The development of an in-process surface roughness adaptive control system in end milling operations. *Int J Adv Manuf Technol* 31, 877–887 (2007) // url: <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0262-z>
94. Моделирование фрактальной кривой с использованием генератора высот на основе закона распределения Накагами : свид. о регистрации электронного ресурса с оценкой новизны / Овсянников В.Е., Кузнецова Е.М., Губенко А.С.; – № 25334; дата рег. 03.06.2024.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Для расчета окупаемости за величину дохода от внедрения устройства примем отсутствие затрат на доработку условной детали. Рассчитаем величину затрат. Составляющая затрат, связанная с заработной платой, определяется следующим образом [1]:

$$C_{ЗП} = C_{ч}(t_{ПОД} + t_{ПР} + t_{СВ}) + C_{Д} + C_{ОТЧ},$$

где $C_{ч}$ – часовая тарифная ставка рабочего;

$t_{ПОД}$ – трудоемкость подготовительных работ;

$t_{ПР}$ – трудоемкость процесса;

$t_{СВ}$ – трудоемкость подготовительных работ;

$C_{Д}$ – доплата за внеурочную работу;

$C_{ОТЧ}$ – величина отчислений по заработной плате.

Затраты на электроэнергию:

$$C_{ЭЭ} = C_{кВтч}(t_{ПР} \cdot N_{ст}),$$

где $C_{кВтч}$ – стоимость электроэнергии; $N_{ст}$ – мощность станка.

Составляющие затрат приведены в Таблице 1. Трудоемкость процесса упрочнения по данным, полученным в главе 4, из расчета на одну деталь.

Таблица 1 – Составляющие дополнительных затрат на изготовление втулки с диффузионным слоем

$C_{\text{мат}}$, руб	$C_{ч}$, руб	$C_{ЭЭ}$, руб	$C_{ЗП}$, руб
10	150	25	85

Величину затрат на изготовление и доработку определим по формуле:

$$C = K_{\text{НАКЛ}}(C_{ЗП} + C_{РМ} + C_{ЭЭ}) = 1.25 \times 120 = 150 \text{ руб},$$

где $K_{\text{НАКЛ}}$ – коэффициент, который учитывает накладные расходы;

$C_{ЗП}$ – расходы на заработную плату рабочих;

$C_{РМ}$ – затраты на расходные материалы;

$C_{\text{ЭЭ}}$ – затраты на электроэнергию.

Определим количество деталей, которое необходимо изготовить для окупаемости затрат.

$$N = C_{\text{внедр}} / C = 700000 / 150 = 4666 ,$$

где $C_{\text{внедр}}$ – стоимость внедрения системы мониторинга и прогнозирования, принята по аналогии с стоимостью нейромодуля фирмы Omron.

Анализируя полученное количество условных деталей, можно сделать вывод о том, что окупаемость не превышает 1 года.