

Министерство образования и науки Украины
Сумский государственный университет

На правах рукописи

Нагорный Владимир Вячеславович

УДК 621.9.012/.014 (043.5)

**КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ РЕСУРСА**

Специальность 05.02.09 – динамика и прочность машин

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель -
Залога Вильям Александрович
доктор технических наук, профессор

Сумы – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ РЕСУРСА	13
1.1 Динамическое поведение обрабатывающей системы и влияющие на нее факторы.....	16
1.2 Влияние на динамическое поведение обрабатывающей системы технического состояния режущего инструмента.....	19
1.2.1 Виды и кривые изнашивания инструмента	19
1.2.2 Нестабильность свойств режущего инструмента	20
1.2.3 Распространенные методы контроля технического состояния обрабатывающей системы и способы их реализации	24
1.2.3.1 Измерение силы резания	26
1.2.3.2 Измерение вибрации	26
1.2.3.3 Измерение высокочастотных сигналов.....	27
1.2.3.4 Измерение температуры, сигнала термо - ЭДС и параметров других физических явлений.....	29
1.3 Контроль параметров шероховатости поверхности детали.....	30
1.4 Способы реализации действующих методов определения ресурса обрабатывающих систем	31
1.5 Системы контроля динамического поведения и определения ресурса обрабатывающих систем	37
Выводы и постановка задач исследования.....	42
РАЗДЕЛ 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ СИСТЕМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ.....	46
2.1 Выбор информационного сигнала для контроля динамического поведения обрабатывающих систем и метод его регистрации.....	46
2.1.1 Метод контроля информационного сигнала	46

2.1.2	Выбор звука, как физического явления, используемого для контроля динамического поведения обрабатывающей системы.....	49
2.1.3	Регистрация параметров звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающей системы.....	51
2.1.4	Помехи, возникающие при регистрации звуковой волны, генерируемой при работе обрабатывающей системы	54
2.2	Основные подходы к моделированию динамики обрабатывающей системы.....	59
2.3	Цель исследований динамики обрабатывающих систем	61
2.4	Предмет исследований	61
2.4.1	Токарно-винторезный станок.....	61
2.4.2	Вертикально – фрезерный станок.....	63
2.5	Методика исследований.....	63
2.5.1	Расчет параметров звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающей системы.....	64
2.5.2	Моделирование влияния изменяющихся динамических параметров обрабатывающей системы на ее динамическое поведение	65
2.5.2.1	Моделирование влияния износа режущего инструмента на динамическое поведение обрабатывающей системы.....	68
2.5.2.1.1	Участок нормального износа инструмента	71
2.5.2.1.2	Участок катастрофического износа (разрушения) инструмента.....	74
2.5.2.2	Моделирование влияния разрушения режущего инструмента на динамическое поведение обрабатывающей системы.....	79
2.5.3	Определение параметров моделей	81
2.5.4	Динамические модели обрабатывающих систем типового металлообрабатывающего оборудования.....	84
2.5.5	Описание динамической модели обрабатывающей системы токарного станка 16К20Т1.....	84
2.5.6	Описание динамической модели обрабатывающей системы фрезерного станка.....	85

2.6 Результаты исследований	87
Выводы	89
РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА ОБРАБАТЫВАЮЩИХ СИСТЕМ	92
3.1 Особенности определения ресурса обрабатывающих систем	92
3.1.1 Разработка аналитического выражения модели тренда.....	95
3.1.1.1 Участок приработочного износа инструмента.....	96
3.1.1.2 Участок нормального и катастрофического износа (выкрашивания) инструмента.....	98
3.2 Алгоритм определения ресурса обрабатывающих систем	102
3.2.1 Компенсация неустойчивости определения ресурса.....	102
3.2.2 Достоверность определения ресурса обрабатывающих систем.....	106
Выводы	109
РАЗДЕЛ 4 РАЗРАБОТКА И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ СИСТЕМ	110
4.1 Основные положения метода контроля динамического поведения обрабатывающих систем	110
4.2 Определение степени критичности динамического поведения обрабатывающих систем	113
4.2.1 Показатель качества обработки детали.....	115
4.2.1.1 Показатель точности обработки $a_{точ}$	115
4.2.1.2 Показатель шероховатости обработанной поверхности $a_{ш}$	117
4.2.2 Показатель состояния режущего инструмента.....	120
4.2.3 Контроль динамического поведения станочного оборудования.....	125
4.2.3.1 Шарикоподшипниковые опоры.....	126
4.2.3.1.2 Зубчатые передачи.....	126
4.2.3.2 «База знаний».....	128
4.3 Метод адаптивного управления работой обрабатывающих систем	132

4.4 Разработка программного продукта для автоматизации контроля динамического поведения обрабатывающих систем и адаптивного управления их работой.....	139
Выводы.....	146
РАЗДЕЛ 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	148
5.1 Цель, предмет и методика эксперимента.....	148
5.2.1 Закономерности поведения тренда звука и определение ресурса обрабатывающих систем	152
5.3 Аprobация автоматизированной системы контроля динамического поведения обрабатывающих систем	155
5.3.1 Оценка качества обработки детали	156
5.3.2 Контроль технического состояния конструктивных узлов токарного станка.....	160
Выводы.....	161
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	162
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	165
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	188
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	200
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	204
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	211
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	221

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроение призвано играть ведущую роль в мировом научно - техническом прогрессе. Характерными чертами его развития является автоматизация технологических процессов, широкое внедрение робототехники, высокая производительность труда. Однако существенным фактором, сдерживающим темп этого развития, является так до конца и не решенная проблема определения ресурса поднадзорного промышленного оборудования. Причем степень решения этой задачи для разнообразного оборудования различна.

Так, например, для роторных машин она в определенной степени решена, так как для них разработаны «Нормы виброактивности» и библиотеки прогнозирующих функций. Вычислив по результатам имеющихся замеров информационного сигнала (уровня вибрации машин) параметры прогнозной модели, строят ее график, называемый трендом. Тренд описывает изменение за время работы машины величины информационного сигнала, в том числе и до момента достижения предельно допустимого по «Нормам...» уровня колебаний машины. Нарботка машины до этого момента рассматривается в качестве ее искомого ресурса.

Для технологических металлообрабатывающих систем (далее по тексту обрабатывающих систем), занимающих значительное место среди промышленного оборудования, эта проблема разработана в меньшей степени, в частности отсутствуют «Нормы...», регламентирующие в процессе работы степень критичности их динамического поведения. Проблема усложняется еще и тем, что обрабатывающее оборудование относится к сложным динамическим системам, основные элементы которой (станок, режущий инструмент и заготовка) находятся в непрерывном взаимодействии и взаимовлиянии. Взаимодействие данных элементов происходит на фоне высоких локальных температур и давлений, являющихся причиной интенсивного износа и последующего разрушения наиболее слабого звена обрабатывающих систем – режущего инструмента. Поэтому динамическое поведение систем непрерывно изменяется, что существенно затрудняет его оперативный контроль, приводя к ошибкам в

определении их ресурса.

Следует отметить, что в металлообработке имеется достаточно надежная и внесенная в справочники статистика по нормам износа режущего инструмента. Руководствуясь этими данными по аналогии с применением «Норм виброактивности...» для роторных машин, можно было бы оценивать степень критичности состояния инструмента, а на основании этого и ресурс обрабатывающих систем. Однако в данный момент измерение износа режущего инструмента непосредственно в процессе его работы не представляется возможным.

По этой причине пытаются использовать косвенные методы оценки степени критичности технического состояния обрабатывающих систем, основанные на контроле, по аналогии с роторными машинами, их динамического поведения.

Однако использованию косвенных методов контроля препятствует в данном случае отсутствие упоминавшейся выше нормативной документации, регламентирующей предельно допустимые амплитуды колебаний обрабатывающих систем, что не позволяет оценивать степень критичности технического состояния данных систем по степени близости амплитуды их колебаний к ее предельно допустимому по нормам значению.

Актуальность темы. Из изложенного следует, что имеется научно-техническая задача косвенной оценки степени критичности технического состояния обрабатывающих систем по результатам контроля их динамического поведения в условиях, когда необходимые для этого нормы отсутствуют.

Для решения данной задачи необходимо разработать метод определения ресурса обрабатывающих систем по результатам контроля их динамического поведения, что позволит в условиях, когда нормы, регламентирующие амплитуду колебаний данных систем отсутствуют, перейти от сравнения нормируемых и фактических амплитуд колебаний к сопоставлению интервалов времени, характеризующих текущую наработку и наработку обрабатывающих систем до отказа.

Процедура контроля должна быть автоматизирована с привлечением аппаратных и программных средств, отвечающих современным требованиям

информационных технологий.

Таким образом, контроль динамического поведения металлообрабатывающих технологических систем и разработка метода, определения их ресурса в данной постановке является важной и актуальной научно-практической задачей, решение которой и определило направление проведенных в данной диссертации исследований.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена на кафедре технологии машиностроения, станки и инструменты СумГУ в период с 2011г. по настоящее время в соответствии с координационным планом Министерства образования и науки Украины (Приказ № 37 от 13.02.13 г.) на конкурсной основе (протокол № 1 от 24.12.13 г. научной экспертного Совета № 43) и в рамках ежегодных госбюджетных работ в соответствии с тематическими планами СумГУ, утвержденных Министерством образования и науки Украины: «Підвищення вібростійкості процесів фрезерування та точіння складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів на основі керування і оптимізації геометрії різальної частини інструментів» (0113U000136).

Цель и задачи исследования.

Целью работы является развитие методов контроля динамического поведения металлообрабатывающих технологических систем и определение на этой основе их ресурса. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- проанализировать литературные данные и расчетно-экспериментальным методом подтвердить и обобщить известные из литературы и практики, данные об изменении во времени под влиянием внешних и внутренних факторов динамического поведения обрабатывающих систем;
- разработать действующий в режиме реального времени алгоритм непрерывного контроля динамического поведения обрабатывающих систем и реализовать его в виде программного продукта;
- разработать метод определения ресурса обрабатывающих систем на основе контроля тренда информационного сигнала, сопровождающего их работу

в течение выполнения заданной технологической операции;

– разработать критериальные параметры, которые при отсутствии норм, регламентирующих степень критичности динамического поведения обрабатывающих систем, позволят применить подобную регламентацию и для данного типа подконтрольного оборудования.

Объектом исследования являются колебания обрабатывающих систем.

Предметом исследования являются динамические процессы, происходящие в обрабатывающих системах при их функционировании, и метод определения их ресурса.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовался комплекс методов, основанных на теории колебаний, механики разрушения, идентификации и математической статистике. Разработка алгоритма контроля динамического поведения обрабатывающей системы и анализ экспериментальных данных осуществлялась на основе методов теории «нечетких множеств», цифровой обработки сигналов, методов оптимизации и теории информации. При параметрической идентификации прогнозной модели были использованы методы случайного поиска.

Научная новизна полученных результатов заключается в дальнейшем развитии научных основ методологии оперативного контроля динамического поведения обрабатывающих систем и разработке метода определения их ресурса, осуществляемого непосредственно в процессе их работы, что основывается на таких новых научных разработках:

– впервые установлено расчетом и экспериментально подтверждено подобие тренда амплитуды колебаний обрабатывающих систем и кривой износа их слабого звена - режущего инструмента, что стало основой для разработки алгоритма контроля динамического поведения этих систем;

– разработан новый метод определения ресурса обрабатывающих систем, численное значение которого вычисляется с помощью параметрической идентификации аналитической зависимости, описывающей наблюдаемый в течение контролируемого периода тренд амплитуды их колебаний;

– оперативный контроль динамического поведения обрабатывающих систем и получаемая на этой основе информация об их фактическом ресурсе позволили впервые целенаправленно выбирать режимы работы обрабатывающих систем, для продолжения в заданных пределах срока их бездефектной работы;

– на основе информации о фактическом ресурсе обрабатывающих систем разработаны показатели их состояния, которые впервые, компенсируя отсутствие необходимых нормативов, позволяют разграничивать динамическое поведение этих системы по степени его критичности.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается теоретическим обобщением выявленных закономерностей и значительным количеством лабораторных экспериментов и испытаний в заводских условиях, результаты которых прошли проверку на точность и достоверность.

Практическая значимость полученных результатов:

1. Разработанный действующий в реальном времени алгоритм контроля динамического поведения обрабатывающей системы, и его программная реализация позволили автоматизировать процесс осуществления в производственных условиях контроля динамического поведения обрабатывающих систем, определение их ресурса и адаптивное управление на этой основе процессом их функционирования;

2. Разработанные в данной работе способы контроля динамического поведения обрабатывающих систем и программный продукт, реализующий эти способы на практике в составе микропроцессорного устройства, являются новаторскими, что подтверждается четырьмя патентами Украины;

3. Результаты работы внедрены в виде микропроцессорного прогнозно-диагностического комплекса на ОАО «Сумское машиностроительное НПО», и ООО "ТРИЗ" ЛТД, что подтверждено соответствующими Актами;

4. Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструменты» СумГУ при проведении исследований магистрантами при выполнении курсовых и дипломных работ.

Личный вклад соискателя. Представленные к защите основные положения диссертационной работы получены соискателем лично.

В публикациях, изданных в соавторстве, соискателю принадлежат следующие научные результаты: разработал научно-технические основы обеспечения качества изделий на основе информации, получаемой методами технической диагностики, разд. 6 монографии [50]; путём математического моделирования, рассмотрел закономерности динамического поведения технологических систем токарного и фрезерного станков в процессе изменения технического состояния (износа и выкрашивания) режущего инструмента, как наиболее слабого элемента обрабатывающих систем [49, 55, 61]; выявлены закономерности изменения тренда звука, сопровождающего работу обрабатывающих систем на протяжении выполнения заданной технологической операции [32, 34, 36, 37, 40, 56, 57]; по результатам сопоставления расчетов и экспериментов, а так же изучения литературных данных предложена прогнозная модель, составленная таким образом, что искомый ресурс обрабатывающей системы является одним из её аргументов [31, 38, 43, 44, 45, 51, 52, 54, 60]; для разработки алгоритма оперативной оценки качества функционирования обрабатывающей системы и реализующего его программного продукта предложен ряд показателей, характеризующих качество обработки детали и техническое состояние режущего инструмента и станка [48, 53, 58]; предложен ряд вариантов адаптивного контроля работы обрабатывающей системы, продлевающего срок бездефектного выполнения заданной технологической операции [33, 35, 42, 47, 59, 62]; разработан алгоритм и реализующий его программный продукт, используемый в микропроцессорном устройстве, позволяющий автоматизировать контроль динамического поведения обрабатывающей системы [39, 41, 63, 64]; разработаны способы, защищенные патентами Украины: *определения шероховатости поверхности детали при металлообработке* [65]; *оценки износа и стойкости лезвийного режущего инструмента* [66]; *вибродиагностики технического состояния металлообрабатывающего станка* [67] и реализующее их в практике производства *устройство для контроля состояния технологической*

металлообрабатывающей системы [68].

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на восьми конференциях: I Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Комп'ютерні науки для інформаційного суспільства» (Луганськ, 2010 р.); Першій міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС-2011» (Вінниця, 2011 р.); II Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (Суми, 2012 р.); III Науково-практичній конференції «Інновації, якість і сервіс в техніці та технологіях» (Курськ, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны» (Пенза, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Машинобудування - очами молодих» (Кременчук, 2013р.); Матеріали XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічній конференції «Машинобудування України очами молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Суми, 2014р); Науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (Суми, 2015 р.); об'єднаному семінарі кафедр «Загальна механіка і динаміка машин» та «Технологія машинобудування, верстати та інструменти» Сумського державного університету (Суми, 2015 р).

Публикации. По результатам проведенных исследований всего опубликовано 27 печатных работ, в том числе: 1 монография (соавтор), 10 статей - в ведущих профессиональных изданиях Украины, 4 статьи - за рубежом (в т.ч. одна статья в издании, индексируемом наукометрической базой Scopus), 8 тезисов докладов на научно-технических конференциях (в том числе 5 - на международных), 4 патента Украины.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и списка использованной литературы. Полный объем диссертации составляет 224 страницы, из них 136 страниц основного текста, 46 рисунков на 26 страницах, 22 рисунка по тексту, 8 таблиц по тексту, 5 приложений на 40 страницах, список использованных источников из 207 наименований на 22 страницах.

РАЗДЕЛ 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ РЕСУРСА

Металлообрабатывающие системы, в соответствии с ГОСТом 27.004-85 [69] относятся к технологическим системам. При этом под технологической системой понимается совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций. Часть системы, условно принимаемая неделимой на данной стадии ее анализа, называется элементом технологической системы. Основными элементами металлообрабатывающей технологической системы являются: станочное оборудование, режущий инструмент и обрабатываемая заготовка детали.

Ключевыми элементами технологической системы являются режущий инструмент и заготовка – будущая деталь, ради которой, собственно и создаётся металлообрабатывающая технологическая система. Эти два элемента обеспечивают «динамическую замкнутость» обрабатывающей системы и кардинально влияют на изменение ее динамического поведения, т.к. характеристики заготовки и инструмента в процессе функционирования системы непрерывно изменяются.

Изменение динамического поведения влечёт за собой постепенный переход обрабатывающей системы из работоспособного состояния, при котором значения показателей качества изготавливаемой продукции и производительности соответствуют требованиям, установленным в нормативно-технической документации [69], в неработоспособное, когда такое соответствие нарушается. Если при этом хотя бы один параметр или показатель качества изготавливаемой продукции не соответствует требованиям, установленным в нормативно-технической и технологической документации, то отказ классифицируется как

отказ технологической системы по параметрам продукции. Если же значение хотя бы одного параметра производительности технологической системы не соответствует требуемым значениям, то отказ классифицируется, как отказ по производительности.

Поэтому сведения о наработке обрабатывающей системы до отказа (сведения о ресурсе) является ключевой информацией, которой руководствуются при эксплуатации данных систем. Для определения ресурса необходимо осуществлять непрерывный контроль динамического поведения обрабатывающей системы в процессе ее работы, упреждая, тем самым, ее отказы.

Изменения динамического поведения происходят по причине износа и последующего разрушения инструмента. Износ инструмента в настоящий момент времени не может быть измерен непосредственно в процессе работы обрабатывающей системы. Поэтому прибегают к косвенным методам его оценки, используя для этого информационные сигналы разнообразных по природе физических процессов, сопровождающих работу обрабатывающих систем.

Проводя подобный контроль необходимо сопоставлять текущее динамическое поведение обрабатывающей системы с некими ее нормативными (критериальными) значениями. Однако в данном случае задача контроля осложняется отсутствием подобных критериев (норм), в отличие, например, от роторных машин, для которых разработаны «Нормы виброактивности».

Одной из причин отсутствия подобных норм является практически бесконечное разнообразие рабочих процессов, наблюдаемых при работе обрабатывающих систем, неподдающихся напрямую какой либо унификации и стандартизации.

В связи с этим ставится задача по разработке метода, позволяющего определять ресурс обрабатывающей системы, а, следовательно, и оценивать качество выполняемой ею технологической операции, исходя из особенностей динамического поведения данной системы, наблюдаемого при выполнении текущего технологического задания.

Следует отметить, что исследования динамического поведения

обрабатывающих систем проводятся давно и имеют большую библиографию. Это, в первую очередь, работы, выполненные под руководством И.С. Амосова, А.И. Бетанели, Н.А. Дроздова, И.И. Ильницкого, А.И. Каширина, В.В. Каминской, В.А. Кудинова, Л.К. Кучмы, Т.Н. Лоладзе, Л.С. Мурашкина, В.А. Остафьева, М.Ф. Полетика, Д.Н. Решетова, А.П. Соколовского, Г.Л. Хаета, М.Е. Эльясберга, а также исследования зарубежных ученых – М. Полачека, И. Тлустого, С. Тобайаса, Х.Б. Меррита и других.

Трудами таких ученых как, Б.М. Бржовский, В.Л. Заковоротный, В.Ц. Зориктуев, В.И. Подураев, А.А. Барзов, О.В. Кретинин, Ю.Г. Кабалдин, А.Д. Макаров, Е.М. Трент и др., разработаны методы контроля динамического поведения обрабатывающих систем на основе сопровождающих их работу разнообразных по физической природе информационных сигналов: акустической эмиссии, вибрации, компонентов сил резания, электрических параметров и др.

Значительный вклад в данную проблематику вносят и отечественные украинские ученые и исследователи: Ю.Н. Внуков и В.А. Залого (влияние процессов, происходящих в рабочей зоне обрабатывающих систем, на их динамику); А.П. Зиньковский и Г.В. Цыбанев (вибрационные и усталостные процессы, сопровождающие работу разнообразных машин и механизмов); В.А. Марцинковский и В.И. Симоновский (динамическое поведение разнообразного промышленного оборудования, в том числе и роторных машин).

Однако, несмотря на значительный объем подобных работ, изучающих различные аспекты динамики машин, в том числе и обрабатывающих систем, многие теоретические и практические проблемы оперативного контроля их динамического поведения и определения на этой основе их ресурса, не нашли еще однозначного решения.

Так, серьезным ограничением проводимых исследований является тот факт, что принятые методы контроля направлены на фиксацию текущего состояния обрабатывающей системы, не учитывающего предысторию ее динамического поведения в сложившихся технологических условиях ее работы. Получаемые при

этом модели, описывающие текущее состояние системы, хорошо работают только в тех условиях ее работы, в которых и проводились исходные исследования. В иных условиях приходится полностью повторять эксперимент, что часто является совершенно неприемлемым для широкого практического использования предлагаемого метода определения ресурса в практике производства.

Для решения задач определения ресурса традиционно используются методы контрольных карт, корреляционный, спектральный анализ и авторегрессия. В последние годы много внимания уделяется нейронным сетям, факторному и кластерному анализу сигналов, методам, основанным на использовании нечетких множеств [22, 25, 29, 206]. Вместе с тем, сложность реальных процессов работы обрабатывающей системы, их нелинейность и катастрофичность приводят к необходимости разработки новых методов и алгоритмов анализа данных и определения ресурса обрабатывающих систем.

Поэтому, несмотря на значительные успехи в области контроля динамического поведения обрабатывающих систем, еще остается проблема повышения точности, быстродействия, надежности, простоты технической реализации и инвариантности к условиям их работы.

Рассмотрим современное состояние проблемы контроля динамического поведения обрабатывающих системы и определения на основе этого их ресурса.

1.1 Динамическое поведение обрабатывающей системы и влияющие на нее факторы

Элементы обрабатывающей системы вибрируют с большей или меньшей интенсивностью практически во всех случаях ее работы. Так, металлорежущий станок можно рассматривать как колебательную систему со многими степенями свободы, в каждой из которых, как в самостоятельном контуре, возникают вибрации определенной интенсивности.

Все колебательные процессы (вибрации), возникающие в обрабатывающей системе, можно разделить на две основные группы: не связанные с рабочим процессом (группа *I*) и вызванные непосредственно рабочим процессом (группа *II*).

К группе *I* относятся:

- вынужденные колебания, передаваемые станку через фундамент от соседних станков и машин, вызванные неуравновешенностью вращающихся частей станка, детали или инструмента, а также погрешностью передач станка;
- параметрические колебания, возникающие вследствие переменной жесткости отдельных деталей привода.

К группе *II* относятся:

- вынужденные колебания, вызываемые переменным сечением стружки и особенностями процесса стружкообразования;
- автоколебания (самовозбуждающиеся колебания), возникающие при отсутствии каких-либо внешних возмущающих сил [70]. В этом случае источником энергии колебаний в обрабатывающей системе «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) обычно является приводной электродвигатель, а переменные силы, поддерживающие колебательное движение, создаются и управляются самим движением [70].

В работе В. А. Кудинова установлено, что основной причиной возникновения вибрации является неоднозначность толщины среза и, следовательно, силы резания по перемещению [71, 72]. Исследовано движение системы с упругой связью между двумя взаимно перпендикулярными звеньями с учетом нелинейной зависимости силы резания от скорости. Рассматривалась динамическая система станка как замкнутая многоконтурная система, включающая взаимодействие упругой системы СПИЗ со всеми рабочими процессами, протекающими в ее подвижных соединениях.

А.П. Соколовским [73] показано, что часть силы резания ΔP_y представляет собой функцию скорости относительных колебаний между инструментом и обрабатываемой деталью.

В своих работах И.С. Штейнберг [74] доказывает, что причиной возникновения вибраций, происходящих с частотой собственных колебаний детали, является периодический срыв наростов. Частота установившихся вибраций будет приближаться к частоте собственных колебаний детали, хотя

частота первичного возмущения (срыва нароста) и не совпадает с частотой собственных колебаний детали.

В опытах Л.К. Кучмы [75], выяснено влияние режимов работы обрабатывающей системы токарного станка, геометрических параметров режущего инструмента и жесткости системы СПИЗ на интенсивность вибраций и на основании этого намечены пути для наиболее целесообразного выбора условий работы системы.

И.С. Амосов [76] исследовал колебания обрабатываемой детали и инструмента в горизонтальном и вертикальном направлениях, и изменение горизонтальной и вертикальной составляющих силы резания по времени, и показал, что при точении чистой поверхности резец режет поверхность, свободную от следов, оставленных инструментом при предварительной обработке, а при точении по следу, резец срезает вибрационные волны, оставленные на поверхности детали инструментом на предыдущих оборотах.

В работах А.Е. Кобринского [77] рассмотрен принцип действия виброгасителя Д.И. Рыжкова и на основе гипотезы об уменьшении силы при увеличении скорости резания дано объяснение причин возникновения колебаний в системе СПИЗ.

Основной причиной возникновения вибраций, как считает Ю.Т. Межевой [78], является неоднозначность зависимости площади сечения среза от перемещения резца.

Значительное внимание уделяется специфическому и не до конца изученному явлению – автоколебаниям, различные аспекты которого рассматривали следующие исследователи: Н.А. Дроздов [79], А.И. Каширин [80], Г.А. Манжос [81], И.И. Ильницкий [82], А.Л. Воронов [83], Л.С. Мурашкин [84], В.В. Заре [86], М.Э. Эльясберг [87], В.Л. Вейц [88], В.Н. Подураев [89,69] и др. Эти работы позволяют достаточно качественно и достоверно описать динамические явления, возникающие в обрабатывающей системе.

Ключевыми элементами обрабатывающей системы, ради которых она, собственно, и создана, являются режущий инструмент и заготовка – будущая деталь.

Эти два элемента обеспечивают «динамическую замкнутость» обрабатывающей системы и кардинально влияют на изменение ее динамики, т.к. характеристики заготовки и инструмента в процессе функционирования системы непрерывно изменяются.

Изменение динамики инструмента влечет за собой его постепенный переход от работоспособного состояния к неработоспособному. При этом нарушается соответствие показателей качества изготавливаемой продукции и производительности требованиям, установленным в нормативно-технической документации [69].

Для обеспечения качества изготавливаемой продукции необходимо осуществлять непрерывный контроль функционирования инструмента, упреждая, тем самым, его отказы. Рассмотрим принятые в настоящее время способы контроля динамического поведения обрабатывающих систем.

1.2 Влияние на динамическое поведение обрабатывающей системы технического состояния режущего инструмента

1.2.1 Виды и кривые изнашивания инструмента

В зависимости от материалов заготовки и инструмента, режима работы обрабатывающей системы, геометрических параметров инструмента и других условий обработки резцы изнашиваются по-разному (рис. 1.1) [1, 3 и др.].

С увеличением высоты фаски износа по задним поверхностям (при полусточковой и чистовой обработках) фактическое положение вершины резца из-за радиального износа смещается от оси заготовки (рис. 1.1 α), приводя к изменению размеров формируемой (обработанной) поверхности. Например, при обтачивании, т.е. при формировании цилиндрической поверхности, фактический диаметр обработанной поверхности становится больше расчетного. В этом случае величину размерного износа в зоне вершины лезвия h_r [1, 2, 3] принято называть радиальным износом, являющимся одной из характеристик, так называемой, размерной ресурса инструмента.

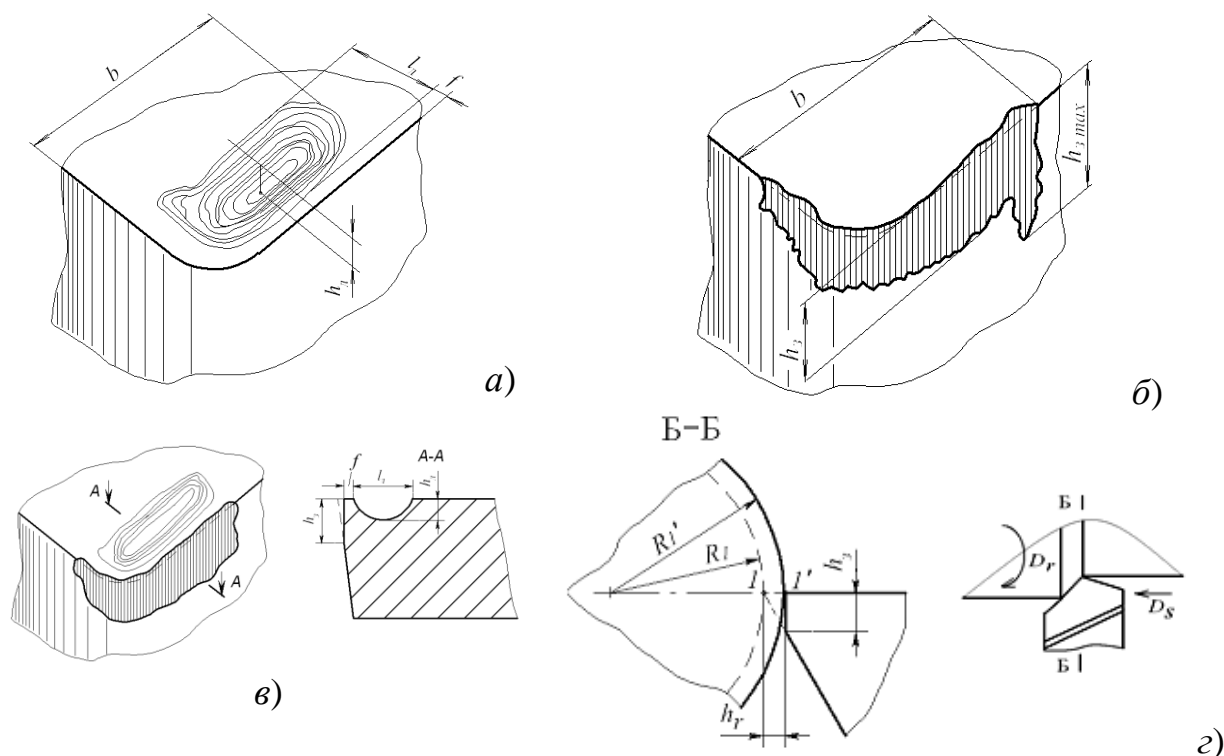


Рисунок 1.1 – Износ реза по передней (а), задней (б) поверхности; сбалансированный износ реза (в); радиальный износ реза (г)

При чистовых операциях допустимое смещение вершины h_r (радиальный износ) ограничивается точностью обработки. Период (время) размерного износа (ресурс) инструмента особенно важен в автоматических линиях, нормальная работа которых возможна при условии стабильной работы режущего инструмента в течение заданного периода времени его работы до отказа – периода ресурса T [1, 2, 3].

1.2.2 Нестабильность свойств режущего инструмента

Статистика отказов инструментов показывает, что затраты времени на выявление и ликвидацию преждевременного износа инструмента в среднем составляют 10 % общего времени работы станочного оборудования [90]. Таким образом, создаются предпосылки нерациональной эксплуатации инструмента и повышенного его расхода, так как типичной становится ситуация, при которой происходит замена инструмента, хотя он еще находится в рабочем состоянии [91]. По исследованиям А.Л. Плотникова на практике часто оказывается так, что заданный ресурс режущего инструмента (отечественного производства) может быть больше действительного ресурса на 5–60 и более процентов [92]. Работа

обрабатывающих систем протекают в динамическом характере с возникновением вибраций [1, 70, 196].

Динамический характер процесса их работы [93] объясняется протеканием с различной скоростью процессов вибраций, износа инструмента, распределения тепла между компонентами системы резания. В работе [94] обрабатывающее оборудование рассматривается как сложные динамические системы, где протекают нелинейные процессы, характерными особенностями которых являются изменения во времени свойств обрабатываемого и инструментального материалов. Известно также [95, 96], что при силовом взаимодействии обрабатываемого и инструментального материалов в зоне их контакта имеют место деформационные процессы, приводящие к колебаниям контактирующих тел – инструмента и заготовки – и, соответственно, к вибрациям. Возникающие в системе вибрации в значительной мере влияют на интенсивность изнашивания инструмента и, соответственно, работоспособность обрабатывающей системы [1, 20].

В работах [97 и 98] экспериментально установлено, что интенсивность процесса изнашивания инструмента находится в сложной зависимости от контактных процессов, происходящих на поверхностях инструмента. Усложняет использование режущего инструмента, в автоматическом производстве существующее различие физико-механических свойств режущих частей инструмента одной марки как внутри партии, так и между партиями одного завода-изготовителя или разных заводов, которые могут достигать двукратного уровня и более [99]. При этом все партии твердосплавных инструментов укладываются в допуски, установленные нормативно-технической документацией.

По данным [100], «...ТУ или ГОСТ на режущие свойства твердого сплава допускает 1.5 – 2 - кратное изменение режущих свойств внутри марочного состава из-за изменения качества связующей кобальтовой фазы (количество растворенного в ней вольфрама) ...», причем «...между партиями спекания эти изменения достигают 2 – 3 - кратной величины...». Разброс физико-механических

свойств обрабатываемых сталей так же, как и разброс свойств твердого сплава, порожден технологическими особенностями металлургического производства. На рис. 1.2 приведены данные о разбросе химического состава, а, соответственно, и свойств стали 40X. Представленные кривые (гистограммы и теоретические кривые) были получены обработкой результатов химического анализа по углероду и хрому тридцати пяти плавок стали. Изменение содержания углерода находится в пределах 0.36–0.44 %, хрома 0.8–1.14 %, что соответствуют ГОСТ 4543-71, но, вместе с тем, порождает изменение физико-механических свойств и обрабатываемости в той или иной партии стали [101].

Для автоматизированного станочного оборудования неоднородность режущих свойств твердосплавного инструмента и изменение физико-механических свойств обрабатываемых сталей приводят к вынужденным простоям для замены изношенного раньше времени инструмента, а при отсутствии активного размерного контроля даже к появлению брака [7,8,15,100, 101 и др.].

В работе [102] указывается, что в производственных условиях формирование сочетания свойств в паре, например, «сталь – твердый сплав» происходит не организованно, случайно (рис. 1.3).

При назначении режимов резания технологи, как правило, принимают средние или наиболее вероятные значения параметров обрабатываемого и инструментального материалов (пунктирная линия), хотя в реальных условиях могут «состыковываться» абсолютно любые пары (штрихпунктирные линии). Худшим вариантом для выполняемого процесса резания на автоматизированном станочном оборудовании является самое

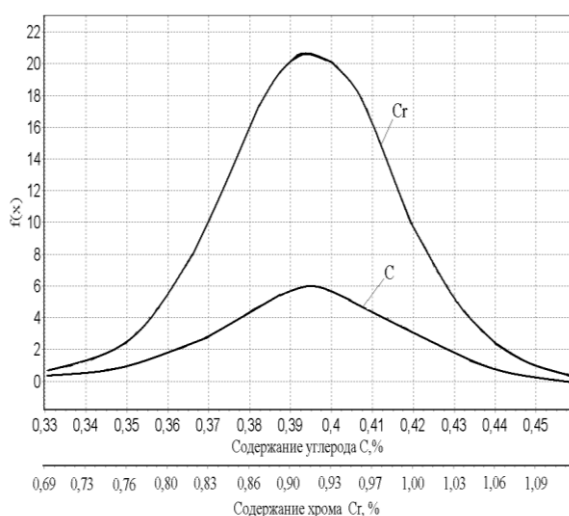


Рисунок 1.2 – Плотность распределения химического состава стали 40X по углероду и хрому [101]

неблагоприятное сочетание низких режущих свойств инструмента ($K_{ii} = 0.55$) и наиболее

высокой твердости обрабатываемой стали ($HV = 260$).

Для контактируемой пары «сталь 45 – T5K10» в процессе обработки инструментами с пластинами из разных партий при постоянном режиме работы ($V = 168$ м/мин, $S = 0.34$ мм/об, $t = 2$ мм, $h_3 = 0,8$ мм, резание без СОЖ) и принятом ресурсе 60 мин действительный ресурс обрабатывающей системы находился в диапазоне от 5 до 57 мин [101]. При этом (по данным [101]) все партии испытываемых режущих пластин соответствовали техническим условиям на изготовление и не содержали брака.

Таким образом, исходя из вышесказанного, можно выделить основные причины снижения ресурса обрабатывающих систем:

- неоднородность структуры обрабатываемого и инструментального материалов;

- изменение физико-механических и теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов одной марки как внутри

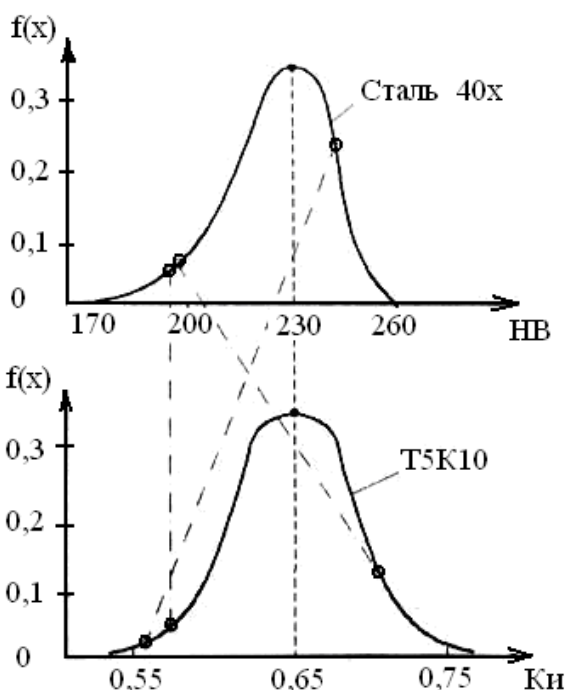


Рисунок 1.3 – Плотности распределения основных свойств Стали 40X и твердого сплава T5K10

- партии, так и между партиями одного завода-изготовителя или разных заводов;

- неоднородность пластической деформации обрабатываемого материала;

- ненормальный характер стружкообразования (формирование

- различных типов стружек, образование нароста, цикличность стружкообразования);

- изменение сил во времени при резании материалов;

- нарастающий во времени износ инструмента;

- колебания (вибрации) в обрабатывающей системе.

Эксплуатация металлообрабатывающих систем позволила установить гранично-допустимые величины (нормы) износа режущего инструмента. Так,

например, для твердосплавных резцов при *черновой обработке* $h_3=1,0-1,4$ мм для стали и $h_3=0,8-1,0$ мм для чугуна, а при *чистовой обработке* $h_3=0,4-0,6$ мм для стали и $h_3=0,6-0,8$ мм для чугуна.

Прямой контроль определяющего параметра технического состояния обрабатывающей системы – износа режущего инструмента, являющегося ее слабым звеном, позволил бы решить задачу управления работой обрабатывающей системы. Однако измерять износ в режиме реального времени пока не удастся, поэтому прибегают к косвенной оценке степени критичности технического состояния обрабатывающей системы по величине разнообразных по физической природе информационных сигналов, сопровождающих их работу. Рассмотрим наиболее распространенные из них

1.2.3 Распространенные методы контроля технического состояния обрабатывающей системы и способы их реализации

В [103] приведены статистические данные, которые позволяют судить о соотношении количества публикаций о применении различных физических явлений и их параметров, используемых для контроля технического состояния обрабатывающих систем (рис. 1.6).

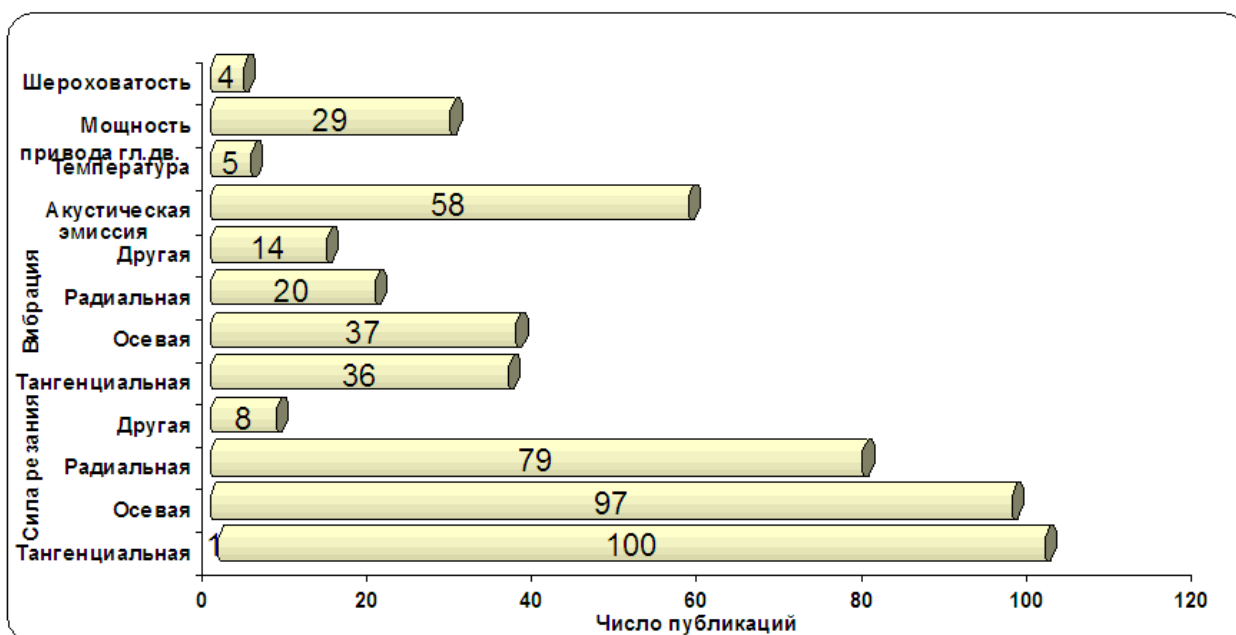


Рисунок 1.4 – Количество публикаций о применении различных физических явлений и их параметров, используемых для контроля технического состояния обрабатывающих систем

Методы контроля технического состояния обрабатывающих систем делятся на прямые и косвенные (табл. 1.1). Прямые методы обеспечивают непосредственное измерение нормируемых в чертежах параметров объекта контроля. Так, износ инструмента может контролироваться опτικο-телевизионными,

Таблица 1.1 – Классификации методов контроля технического состояния обрабатывающих систем

Прямые	
<i>измерение геометрических параметров инструмента:</i>	
1	радиоактивный метод [104,105]
2	метод технического зрения [106]
3	лазерное сканирование [107]
4	электромеханический метод [108]
5	ультразвуковой метод [108]
6	пневматический метод [109]
Косвенные	
<i>силовые измерения:</i>	
1	измерение составляющих сил резания [110]
2	измерение крутящего момента [111]
3	измерение мощности приводных двигателей [112]
<i>акустические, акустоэлектрические и виброакустические измерения:</i>	
1	измерение сигнала акустической эмиссии [113,19,20,21]
2	измерение вибрации [114]
<i>термоэлектрические измерения:</i>	
1	измерение термо - ЭДС [115]
2	измерение электрической проводимости контакта "инструмент – обрабатываемый материал" [116]:
3	измерение инфракрасного излучения стружки [117,118]

Так, износ инструмента может контролироваться опτικο-телевизионными, лазерными, электромеханическими, ультразвуковыми или пневматическими методами. Недостатком прямых методов является то, что в условиях производства их можно применять только после прекращения работы обрабатывающей системы, поэтому не исключается появление брака детали между контрольными операциями. Косвенные методы контроля, используя информационные сигналы ряда сопровождающих работу обрабатывающих систем физических явлений (табл. 1.1), позволяют решать в определенной степени данную задачу.

1.2.3.1 Измерение силы резания

На силы, развиваемые при работе обрабатывающих систем, влияет геометрия инструмента. Исследования [1, 3] показали, что опасные точки, в которых зарождаются трещины, определяющие поверхность скалывания, располагаются на передней поверхности инструмента за пределами контактной зоны. Трещины развиваются под действием растягивающих напряжений и в результате накопления усталости. С износом инструмента особенно сильно изменяется радиальная составляющая силы резания [119, 120, 121, 122-125]. Метод оценки износа инструмента (TWEM - Method for Tool Wear Estimation) на основе измерения силы резания и крутящего момента при торцевом фрезеровании предложили E. Kuljanic, M. Sortino [126]. В работе исследователей H. Shao, H.L. Wang, X.M. Zhao [127] также построена модель зависимости мощности резания от режимов работы обрабатывающей системы, параметров инструмента и заготовки.

Вместе с тем, анализ результатов исследований различных авторов, посвященных косвенному контролю технического состояния обрабатывающей системы по величине силы резания, свидетельствует об его недостаточной эффективности [128].

1.2.3.2 Измерение вибрации

Существенное количество публикаций посвящено косвенному контролю технического состояния обрабатывающих систем по особенностям динамического поведения этих систем, наблюдаемого в процессе их работы. При этом под динамическим поведением обрабатывающих систем будем понимать их динамическую реакцию (разнообразные по частоте и амплитуде вибрации) на действующие на них эксплуатационные нагрузки.

Для оценки степени критичности динамического поведения обрабатывающей системы пользуются замерами параметров механических колебаний системы «станок-приспособление-инструмент-заготовка» (СПИЗ), применяя датчики вибрации [129]. Выделяя из спектра колебаний высокочастотные- и низкочастотные- составляющие, по их отношению

оценивается текущий износ [20, 130]. Для повышения точности измерений контролируют амплитуду резонансных колебаний инструмента [195].

Litao Wang [131] предлагает идентифицировать состояние инструмента по сигналу вибрации, измеренному в направлении подачи с помощью датчика, установленного на державке инструмента. Для повышения информативности сигнала используют его дискретные вейвлет - преобразования [132, 133]. С этой целью фиксируют исходные параметры сигнала, полученные в начале работы обрабатывающей системы, и сравнивают их с параметрами вейвлет - коэффициентов, определяемых при текущем ее состоянии. Совершенствуя данную методику, анализируют распределения энергии сигнала по порядку вейвлет - разложения, далее используя дискретные скрытые Марковские модели [134], создают матрицу распознавания, содержащую по 5 образов для каждого распознаваемого класса. Точность вывода о принадлежности текущего состояния подконтрольной системы к классу «нормальный» или «изношенный» по утверждениям авторов, достигает 97%. К сожалению, в работе не приводятся данные о номенклатуре испытуемых пар инструмент - заготовка и нет данных об объемах проведенных испытаний, а так же отсутствует количественная оценка износа.

C. Scheffer and P.S. Heyns [135] на основе сигнала вибрации и применения нейронной сети на основе самоорганизующейся карты Корхена получили 100% достоверность результатов классификации размерного износа алмазного инструмента при обработке алюминиевого сплава. Недостатком метода является его недостаточное быстродействие [10, 18, 27]. Кроме того метод имеет узконаправленную специализацию, рассчитанную на обработку алюминиевых сплавов алмазным инструментом на линейном участке его износа. Исследование качества метода при обработке других, более твердых материалов, авторы не приводят.

1.2.3.3 Измерение высокочастотных сигналов

В процессе работы обрабатывающей системы заготовка подвергается значительным пластическим деформациям, которые связаны с генерированием волн акустической эмиссии. Износ инструмента вызывает изменение параметров

этого сигнала. Причем, за счет того, что сигнал достаточно высокочастотный по своей природе (занимает полосу частот от 1 кГц до 1 мГц), акустическая эмиссия более чувствительна, чем сила резания, к износу инструмента [136, 19, 20, 21].

Между дисперсией АЭ и износом инструмента, согласно работам Morigaki, Tobito [137] и Richard Y. Chiou, Steven Y. Liang [138], существует тесная корреляция. Коррелируют с износом инструмента и другие параметры акустической эмиссии, такие, например, как время нарастания, частота и темп тактов, а также коэффициенты рядов Фурье [139].

Методы активной диагностики, основанные на измерении акустоэлектрической эмиссии, базируются на теории термофлуктуационного разрушения. В работах [140] указывается, что распад дилатона сопровождается локальной температурной вспышкой и акустической эмиссией. Спектральная обработка сигналов акустоэлектрической эмиссии дает возможность проводить корреляцию с интенсивностью изнашивания режущего инструмента [22].

Таблица 1.2 – Нормы виброактивности ISO 2372

Средне квадратическое значение виброскорости V_e мм/с	Классы машин и виды их состояний				
	К	М	G	T	D,S
0,28	A	A	A	A	A
0,45					
0,71					
1,12	B	B	B	B	A
1,8					
2,8	C	C	C	C	B
4,5					
7,1					
11,2	D	D	D	D	C
18					
26					
45					
					D

Примечание: *A* – хорошее состояние; *B* – удовлетворительное состояние; *C* – требуется улучшение; *D* – недопустимое состояние

Недостатком рассмотренных выше высокочастотных сигналов является их

высокая чувствительность к помехам, вызванным влиянием окружающей среды и работой конструктивных узлов станка. Они зависят от расположения датчика, жесткости станка, материалов и режимов работы обрабатывающей системы, что чрезвычайно усложняет проблему применения данной технологии в производстве.

Преимуществом виброакустических методов контроля является простота, как регистрации информационного сигнала, так и его дальнейшей компьютерной обработки. Однако этот способ контроля имеет существенный недостаток, связанный с отсутствием наподобие разработанных, например, для роторных машин (табл. 1.2), «Норм виброактивности».

Данное обстоятельство вынудило использовать другие физические процессы, сопровождающие работу обрабатывающих систем, с целью использования порождаемых этими процессами информационных сигналов для косвенной оценки технического состояния контролируемого объекта.

1.2.3.4 Измерение температуры, сигнала термо - ЭДС и параметров других физических явлений

В работе [141] описывается способ определения степени критичности технического состояния обрабатывающей системы на основании измерения температуры в ее рабочей зоне.

В работе [142] говорится, что «регистрация переменной составляющей термо - ЭДС может рассматриваться как метод получения информации о темпе изменения динамического поведения обрабатывающей системы». Работы [143] показывают, что спектр переменной составляющей термо - ЭДС имеет коэффициент взаимной корреляции выше 99%. с темпом интенсивности износа инструмента.

Интересным является подход оценки степени критичности текущего динамического поведения обрабатывающей системы путем идентификации параметров геометрической модели текстуры поверхности, основываясь преимущественно на профиле поверхности [144]. При изучении износа инструмента достаточно широко применяются оптические устройства [23], а

также метод радиоактивных изотопов [104, 105].

Для оценки величины фаски износа по задней поверхности предлагается использовать метод измерения электрической проводимости контакта "инструмент - деталь" [116].

Рассмотренные выше методы контроля технического состояния обрабатывающей системы сводятся, в конечном счете, к контролю состояния непосредственно режущего инструмента. Однако основной задачей контроля динамического поведения обрабатывающей системы является попытка косвенным образом оценить качество получаемой в процессе ее работы детали. Одним из параметров, определяющих качество детали, является качество ее поверхности, количественно характеризуемое параметрами ее шероховатости [9, 29]. Выход показателей шероховатости за допустимые пределы, так же классифицируется как отказ обрабатывающей системы по показателям качества выпускаемой продукции [69].

1.3 Контроль параметров шероховатости поверхности детали

Параметр R_a шероховатости (рис. 1.5) определяют двояко. Согласно первому методу параметр R_a рассчитывают, исходя из геометрических соображений, по следующей формуле [5]:

$$R_a = 31.25 \frac{S^2}{r_B}, \text{ мкм}, \quad (1.1)$$

При втором методе параметр R_a определяют на основе предварительно полученных уравнений регрессии между параметром шероховатости и режимами резания [145-156], например, таких:

$$R_a = 0.81 + 0.004 V + 8.64 S - 2.88 t - 2.80 h_3 + 0.005 VS - 0.004 Vt + 0.005 Vh_3 + 3.35 St - 70.30 Sh_3 + 0.00001 V^2 + 26.70 S^2 + 9.93 t^2 + 27.71 h_3^2, \text{ мкм}, \quad (1.2)$$

где V , S , t – соответственно, скорость в *м/мин*, продольная подача в *мм/об* глубина резания в *мм*; h_3 – износ по задней поверхности в *мкм*.

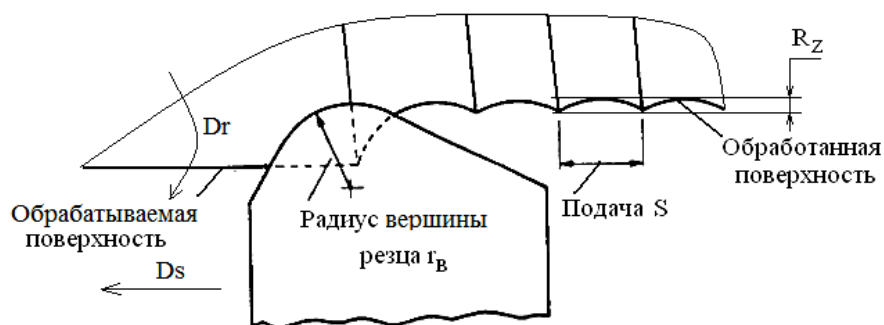


Рисунок 1.5 – Образование шероховатости поверхности при металлообработке

Наряду с прямыми расчетными методами широко используются и косвенные способы контроля шероховатости, осуществляемые непосредственно в процессе работы обрабатывающей системы [157].

$$R_a = 1.33 V^{0.1} \lambda^{0.16} S^{0.4} K_{ond}^{-0.04}, \text{ мкм}, \quad (1.3)$$

где V и S – соответственно, скорость, $м/мин$, и продольная подача, $мм/об$;
 λ – теплопроводность инструментального материала ($\lambda = 11 - 50 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$);
 K_{ond} – коэффициент опережающего пластического деформирования ($K_{ond} = 0.001 - 3.2$ при $V = 90 - 180 \text{ м/мин}$ и $S = 0.083 - 0.256 \text{ мм/об}$).

Так, согласно [158] шероховатость обработанной поверхности определяют с использованием сигнала акустической эмиссии. В [159] предлагается способ контроля параметра шероховатости поверхности R_a по корреляционной связи между этим параметром и вибрациями в СПИЗ. В [160] шероховатость поверхности определяют путем выделения переменной составляющей огибающей виброакустического сигнала, характеризующего динамику системы СПИЗ.

1.4 Способы реализации действующих методов определения ресурса обрабатывающих систем

Действующие в настоящее время методы определения ресурса обрабатывающих систем реализуются способами, которые можно разделить на три группы.

В первую группу входят способы, основанные на измерении некоторых характеристик физических процессов, происходящих в рабочей зоне обрабатывающих систем и ограничивающих их ресурс. Для реализации этих способов необходимо предварительное кратковременное проведение рабочего

процесса в условиях, близких к эксплуатационным. Существенным недостатком этой группы способов реализации принятых методов определения ресурса являются затраты времени, трудовых и материальных ресурсов, связанных с необходимостью проведения экспериментальных работ, которые, тем не менее, не всегда обеспечивают требуемый уровень достоверности получаемого при этом результата.

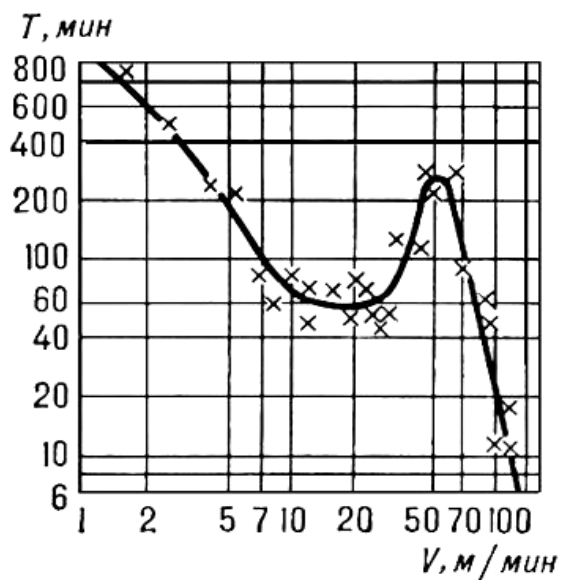


Рисунок 1.6 – Зависимость ресурса инструмента от линейной скорости вращающейся заготовки

Ко второй группе относятся способы, основанные на различных теоретических моделях изнашивания режущих инструментов, например, представленных в [11, 12, 21, 24, 25, 26, 27, 28]. Аналитические методы определения ресурса лишены недостатков, присущих первой группе, но, как правило, формулы для расчета ресурса имеют трудноопределимые параметры, что затрудняет их внедрение в практику металлообработки.

В третью группу входят способы, основанные на связи ресурса обрабатываемой системы с каким-либо физическим свойством инструментального материала, количественные характеристики которого могут быть измерены без проведения пробной работы обрабатываемой системы. Способы третьей группы достаточно легко и быстро реализуются с помощью универсальной или специальной аппаратуры, однако среднестатистический характер этой связи практически сводит на нет особенности основанных на них

методов определения ресурса, в результате чего не обеспечивается их надежность и достоверность.

Рассмотрим некоторые из указанных способов определения ресурса с использованием для этого эмпирических зависимостей. Исторически первым предложил подобную эмпирическую зависимость Ф. Тейлор [1, 161].

$$T = \frac{C_T}{V^{1/m}}, \text{ мин}, \quad (1.4)$$

где C_T – константа; m – показатель степени; V – линейная скорость вращающейся заготовки, м/мин.

Экспериментально установлено, что в общем случае ресурс обрабатываемой системы, ограничиваемый ресурсом режущего инструмента, сложным образом зависит от линейной скорости вращающейся заготовки (рис. 1.6). В [161] график функции $T(V)$ предлагается аппроксимировать следующей экспериментальной зависимостью:

$$T = C_T V^b e^{-cV}, \text{ мин} \quad (1.5)$$

где C_T , b , c – эмпирические параметры, определяемые методом наименьших квадратов (МНК) при аппроксимации экспериментально получаемого графика $T(V)$.

В [162] при обработке результатов экспериментальных исследований работы обрабатывающих систем предлагается использовать следующее эмпирическое уравнение для выражения исследуемых функциональных зависимостей:

$$Y = a X^b e^{cX}, \quad (1.6)$$

где a , b , c – эмпирические параметры, получаемые при обработке экспериментальных данных.

Применение уравнения (1.6) при обработке результатов экспериментальных исследований позволило автору [162] получить следующее выражение:

$$T = 18t^{-1.25} S^{-1.25} V^{(3S^{0.6} e^{-0.35S})} e^{-(0.25S^{0.86} e^{-0.95S})} V^{-2.8S}, \text{ мин} \quad (1.7)$$

В [163] получено уравнение регрессии, позволяющее для заданного режима работы обрабатываемой системы и заданной величины износа рассчитывать ее ресурс при использовании режущего инструмента из *КНТ16* при чистовом

точении детали из сплава прецизионного магнитно - мягкого марки 50Н (пермаллой).

$$\begin{aligned}
 T = & -18.21 + 0.099 V + 1100.062 S - 405.06 h_3 - 0.00031 V^2 - 5367.63 S^2 + 6405.19 h_3^2 \\
 & -13.4 VS + 2.56 Vh_3 - 23872 Sh_3 + 0.034 V^2 S - 0.0064 V^2 h_3 + 76.59 VS^2 + 104536.3 S^2 h_3 \\
 & -0.19 V^2 S^2 + 219,53 VSh_3 - 1254.44 VS^2 h_3 - 0.55 V^2 Sh_3 + 3.14 V^2 S^2 h_3
 \end{aligned} \quad (1.8)$$

Уравнение подтверждает общеизвестный факт доминирующего влияния скорости вращения заготовки V и подачи S на ресурс обрабатывающей системы. Как видим, эмпирические формулы, аргументами которых являются режимы работы обрабатывающей системы, имеют, порой, весьма сложный характер. Для упрощения их выражений, и, соответственно, для повышения надежности определения ресурса обрабатывающих систем предлагается использовать характеристики физических процессов, сопровождающих процесс их работы. Так, в [164] искомое значение ресурса определяют по следующей зависимости.

$$T = T_{эм} \frac{V}{V_{эм}}, \text{ мин}, \quad (1.9)$$

где T – среднее ожидаемое время безаварийной работы обрабатывающих систем, в которых используются твердосплавные режущие инструменты из текущей партии образцов; $T_{эм}$ – средний ресурс обрабатывающих систем, в которых используются твердосплавные режущие инструменты из эталонной партии твердого сплава; $V_{эм}$ и V – средние величины скорости вращения заготовки, полученные по результатам измерения характеристики поверхностной полиоксидной структуры у твердосплавных режущих инструментов, соответственно, в эталонной и контролируемой партиях твердосплавных пластин;

Согласно [165] прогноз ресурс определяют по следующей зависимости

$$T = \frac{h_{np} - h_{npup}}{K}, \quad (1.10)$$

где h_{np} , h_{npup} – оценка величины износа, соответственно, в текущий момент времени и смещение линейной функции аппроксимации (рис.1.7); K – коэффициент наклона линейной функции аппроксимации ($K = tg(\alpha_{ср})$).

Коэффициент K (угол наклона линейного уравнения регрессии) определяется по данным износа инструмента, полученным при обработке n

предыдущих деталей. Остаточный ресурс $T_{ост}$ определяют следующим образом

$$T_{ост} = T - \tau, \quad (1.11)$$

где τ - текущая наработка инструмента.

Рассчитанное значение $T_{ост}$ должно превышать время следующего технологического перехода $T_{маш}$, т.е. должно выполняться условие $T_{ост} \geq T_{маш}$.

В [22, 167] прогнозирование ресурса инструмента предлагается осуществлять по величине сигнала акустической эмиссии, регистрируемого в два характерных момента поведения кривой, описывающей изменение амплитуды сигнала в зависимости от времени (рис.1.8). Расчет ресурса проводится по следующей формуле:

$$T = \tau_n + \frac{\tau_n - \tau_n}{A_n - A_n} (A_k - A_n), \quad (1.12)$$

где τ_n - время первого замера на втором экстремуме графика сигнала акустической эмиссии (тчк. 3); τ_n - время второго замера (тчк. 4); A_n - амплитуда сигнала акустической эмиссии в точке второго экстремума графика акустической эмиссии (тчк. 3); A_n - амплитуда сигнала акустической эмиссии в точке второго замера амплитуды акустической эмиссии (тчк. 4); A_k - амплитуда сигнала акустической эмиссии, соответствующая критическому износу инструмента (тчк. 5).

Следует отметить, что рассмотренные выше методы определения ресурса применимы в лабораторных условиях с научно-исследовательской целью. Условия лаборатории, естественно, весьма далеки от реального производства, что существенно затрудняет перенос получаемых там результатов в заводские условия.

Применяемые в настоящее время косвенные способы оценки степени критичности состояния обрабатывающих систем ориентированы в основном на оценку степени износа режущего инструмента. При этом упускается из виду, что не меньшее влияние на качество выпускаемой продукции оказывает динамическое поведение станочного оборудования, эффективный контроль которого возможен по виброакустическому сигналу. Все это в совокупности свидетельствуют о том, что в условиях реального производства наиболее

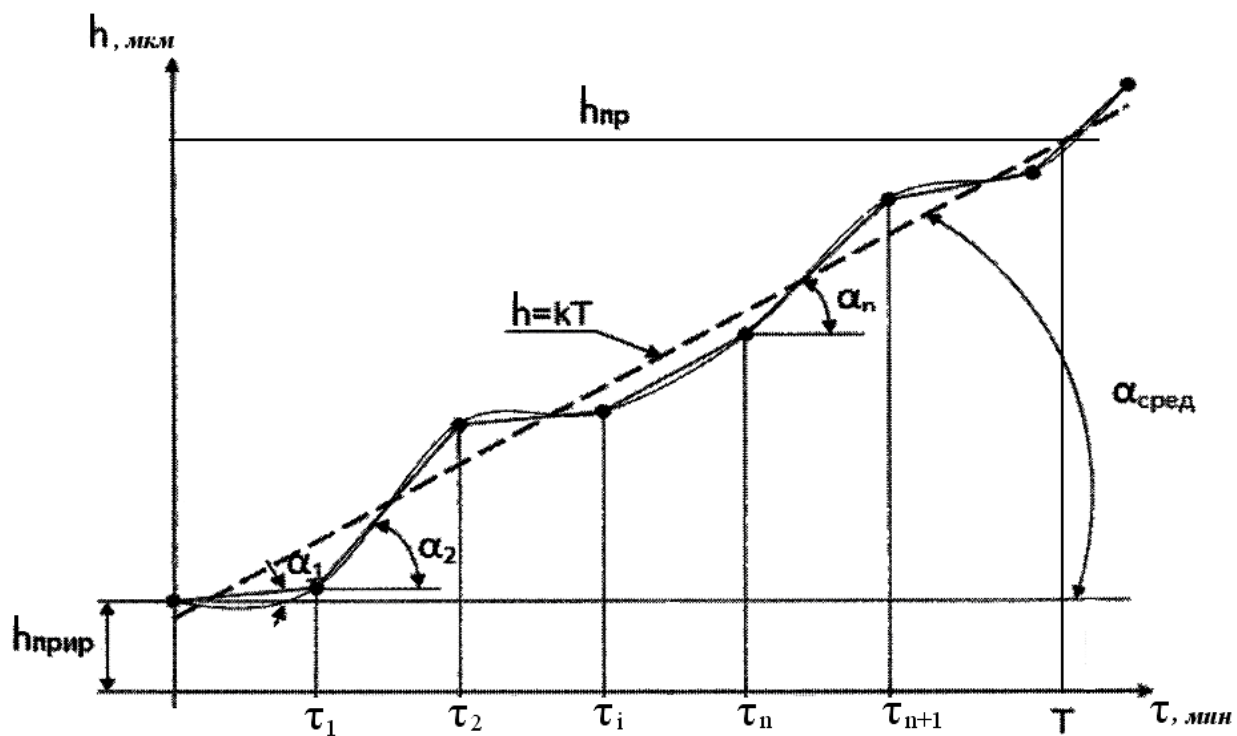


Рисунок 1.7 – Определение уравнения регрессии для оценки величины износа инструмента

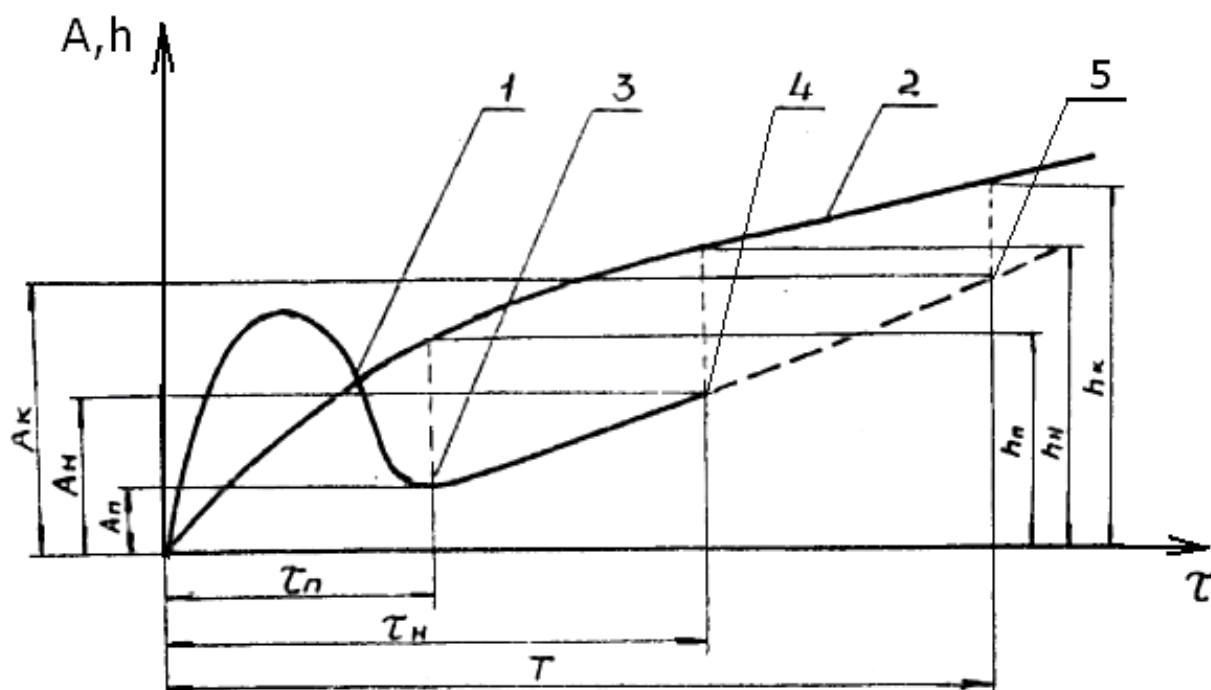


Рисунок 1.8 Изменение амплитуды акустической эмиссии (кр.1) и износа инструмента (кр.2)

приемлемы методы контроля, основанные на измерениях виброакустических по природе информационных сигналов, порождаемых работой обрабатывающих систем.

Ниже рассмотрены действующие в настоящее время информационно-измерительные системы, предназначенные для оперативного контроля динамического поведения обрабатывающих систем по результатам измерения данного вида информационных сигналов.

1.5 Системы контроля динамического поведения и определения ресурса обрабатывающих систем

Активная диагностика и определение ресурса обрабатывающих систем по результатам контроля их динамического поведения, осуществляемая на основе измерения параметров физических процессов, сопровождающих работу этих систем, должна достоверно оценивать степень критичности динамического поведения подконтрольного оборудования. Система так же должна определять в каждый момент времени, постоянно уточняемые в режиме реального времени сведения о ресурсе обрабатывающей системы и формировать сигналы для принятия решения. В конечном итоге это позволит осуществлять оптимальное управление работой обрабатывающей системы, что выявит резервы ее производительности и технологической надежности. Общая структура системы контроля динамического поведения обрабатывающей системы представлена на рис 1.9.

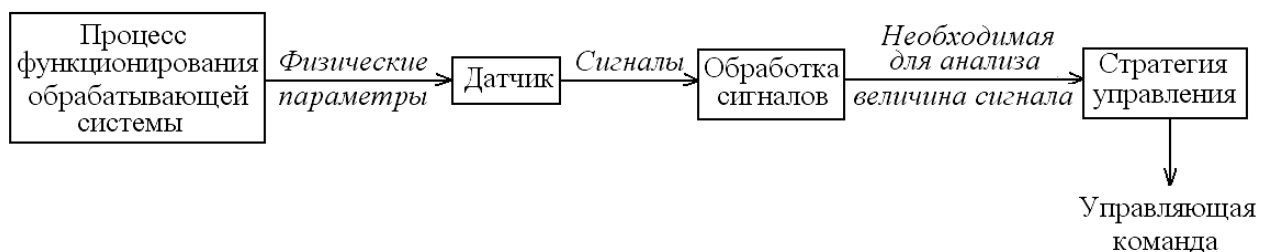


Рисунок 1.9 – Общая структура системы контроля динамического поведения обрабатывающей системы

К первоочередным задачам таких систем относятся [3]:

- определение периода бездефектной работы обрабатывающей системы;
- диагностика качества обработки (величины шероховатости и размера

поверхности);

– диагностика состояния станочного оборудования.

Обрабатывающая система относится к сложным многоканальным объектам управления с наличием взаимно коррелированных входных и выходных переменных [168]. Ее сложность, как объекта управления, проявляется в значительном числе параметров, определяющих течение процесса ее работы, в большом числе внутренних связей между параметрами, в частности, в таком их взаимном влиянии, при котором изменение одного параметра вызывает нелинейное изменение других. Отмеченная сложность усиливается возникновением обратных связей между параметрами, изменяющими процесс работы обрабатывающих систем.

В общем виде систему управления работой обрабатывающих систем с ЧПУ структурно можно представить состоящей из *объекта управления* и *устройства управления*, связанных между собой каналами прямой и обратной связи (рис. 1.10).

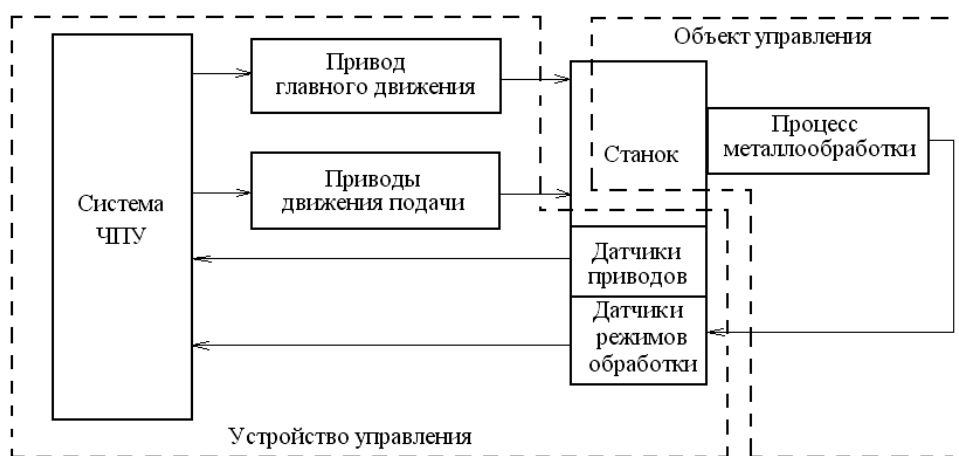


Рисунок 1.10 – Структурная схема обрабатывающей системы, как объекта автоматического управления

Металлорежущий станок с ЧПУ совместно с процессом, происходящим в его рабочей зоне, и установленными на станке двигателями рабочих механизмов является объектом управления. В устройство управления входят приводы рабочих механизмов и система ЧПУ, датчики механических перемещений рабочих органов станка и режимов его работы.

Станок с выполняемым на нем процессом обработки называют

динамической системой станка, которая образуется совокупностью упругой системы механизмов и рабочих процессов в их взаимодействии.

Носителем информации о состоянии процесса является диагностический сигнал, получаемый посредством измерения в фиксированный момент времени параметров, контролируемых информационных сигналов. Диагностический сигнал может быть получен в результате измерения и параметра одного информационного сигнала, но в различные моменты времени.

Устройства для автоматического поиска неисправностей называются диагностическими системами. Диагностические системы при контроле состояния сложных объектов являются частью информационно-измерительных систем, осуществляющих обработку и анализ информации о динамическом поведении обрабатываемых систем.

Большинство диагностических систем в металлообработке решают задачу только в узком диапазоне для оценки степени критичности динамического поведения, как правило, только одного элемента обрабатываемой системы (детали, резца, станка), одного вида обработки и материала и одних заданных режимов работы обрабатываемой системы.

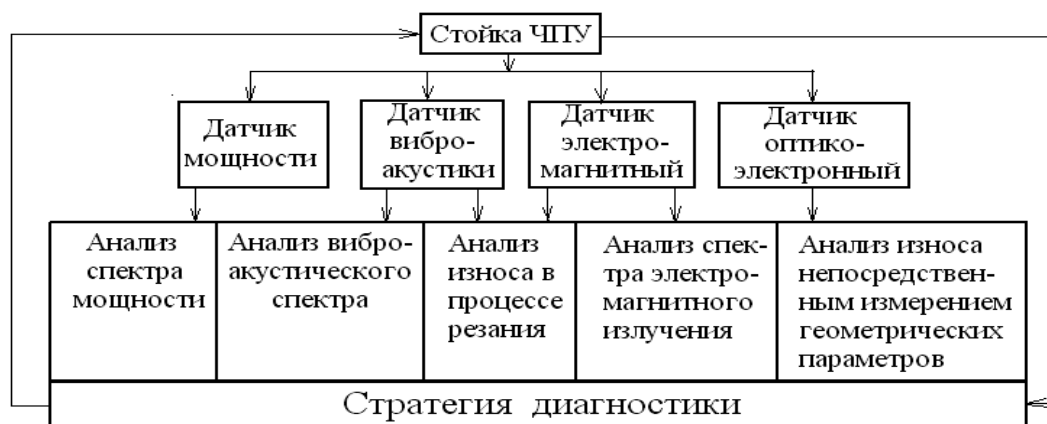
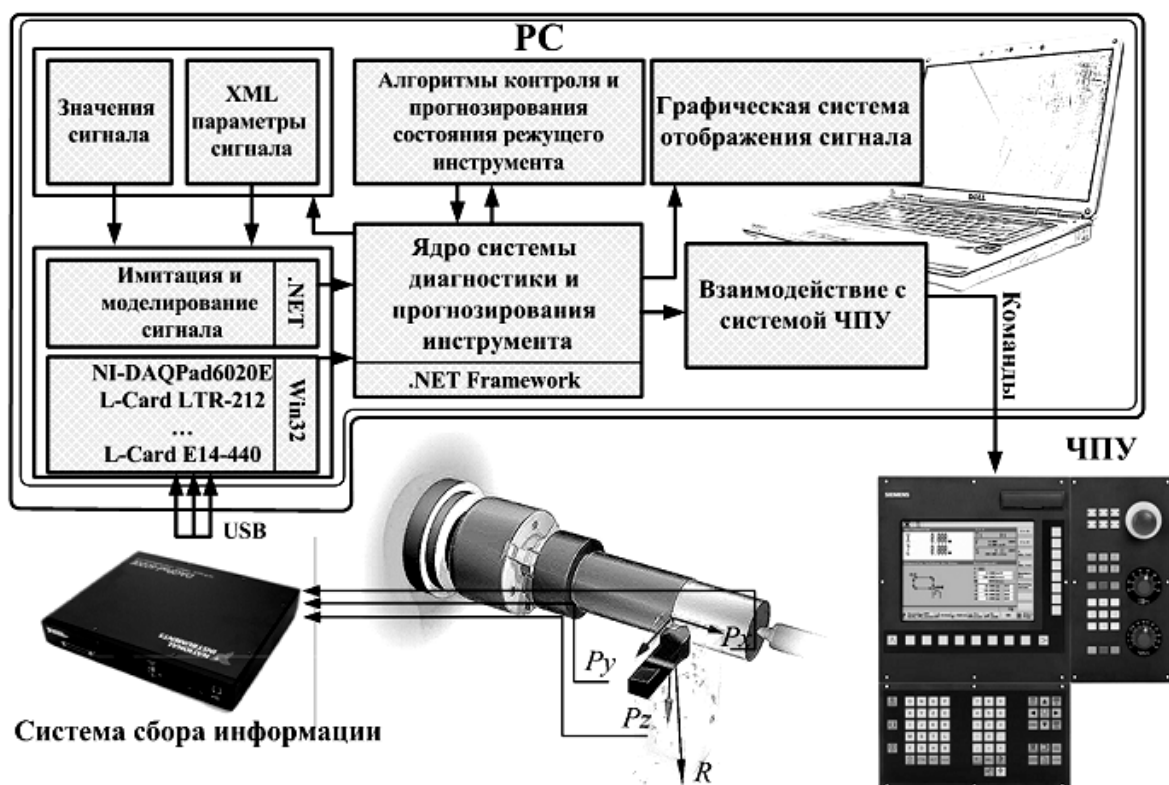
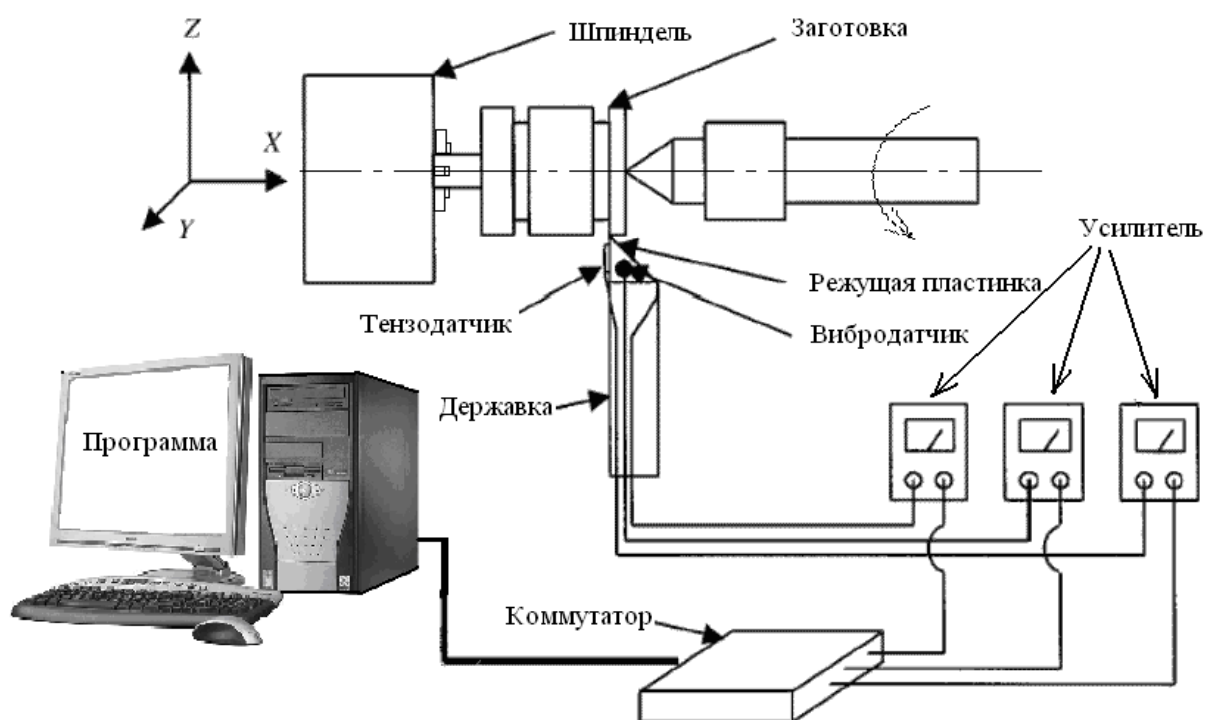


Рисунок 1.11 – Многоканальная контрольно - диагностическая система

Для расширения функциональных возможностей современные системы контроля должны быть оснащены несколькими датчиками, формирующими сигналы о динамическом поведении всех элементов контролируемой обрабатываемой системы на всех режимах ее работы. Это существенно усложняет систему контроля и делает ее менее надежной. Структурная схема подобной системы приведена на рис. 1.11 [169].

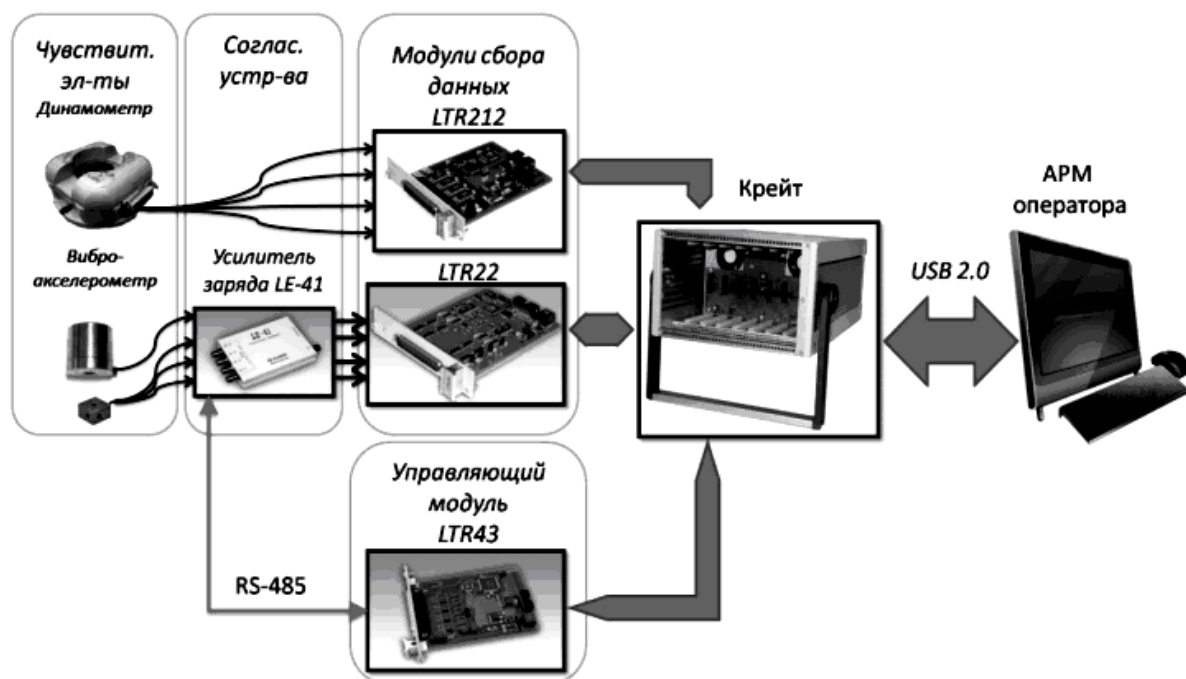


а)

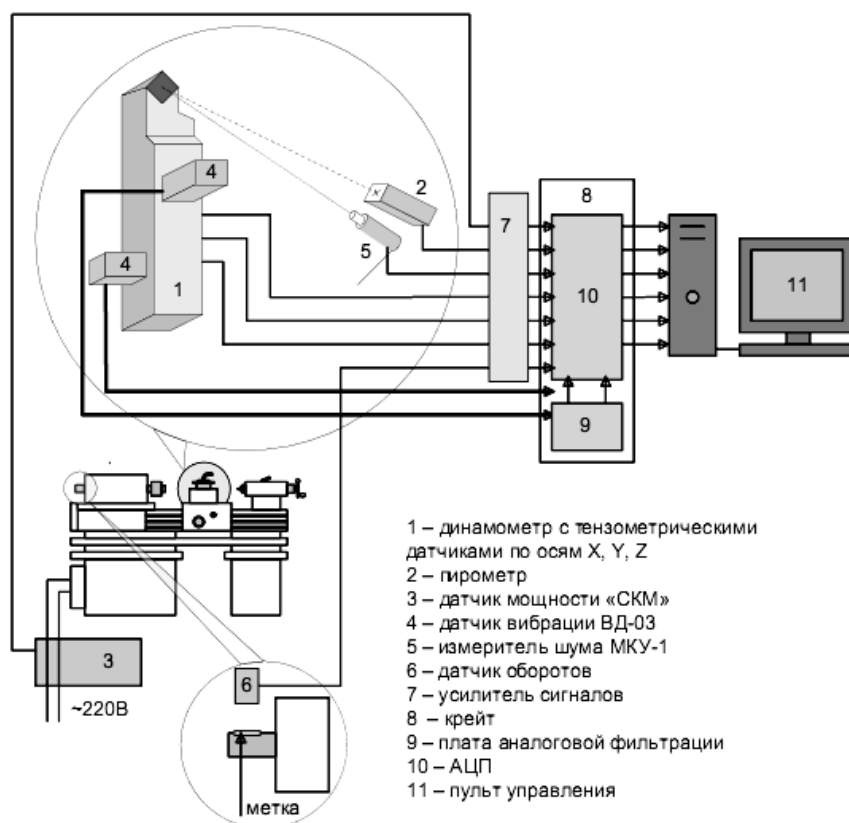


б)

Рисунок 1.12 – Характеристики диагностических систем: типовой схеме измерений при диагностическом контроле (а); архитектура подсистемы диагностики (б)



а)



б)

Рисунок 1.13 – Структурная схема переносного универсального модульного диагностического комплекса (а); компьютерный центр комплексной диагностики процесса резания (б)

Методы контроля и диагностирования состояния обрабатывающей системы требуют применения специально разрабатываемых с этой целью микропроцессорных диагностических комплексов. В настоящее время уже существует ряд диагностических систем, отвечающих за надежность и контроль работы обрабатывающих систем в автоматизированном производстве, например, такие, как СТМ (рис. 1.12 *а*), PROMETEC (рис. 1.12 *б*), NORDMANN (рис. 1.13 *а*), OMATIVE (рис. 1.13 *б*) и др. [171-174].

Эти комплексы либо встраиваются в существующую систему ЧПУ станка (рис. 1.12 *а*), либо дополняют ее, функционируя параллельно (рис. 1.12 *б*, 1.13 *а*, *б*). Однако, действующие комплексы автоматизации и управления процессом работы обрабатывающей системы имеют ограниченные возможности по определению ее ресурса. Чаще всего они направлены только на контроль текущего динамического поведения данной системы и не могут одновременно с этим контролировать качество изготавливаемой детали и техническое состояние конструктивных узлов станка.

Выводы и постановка задач исследования

Проведенный выше анализ литературных данных показал, что разработка методов определения ресурса металлообрабатывающих технологических систем является весьма актуальной проблемой, причем, по мере развития микропроцессорной техники и все возрастающих требований к автоматизации производственных процессов их актуальность будет только возрастать.

1. При разработке методов контроля динамического поведения обрабатывающих систем основное внимание уделяется поиску различных по своей физической природе информационных сигналов, сопровождающих их работу, позволяющих наиболее точно, хотя и косвенным образом, оценивать степень критичности их технического состояния. При этом, как правило, предлагаются весьма сложно методически и аппаратурно реализуемые методы контроля, которые порой совершенно не пригодны для применения в производственных условиях.

2. Показано, что наиболее эффективными для контроля динамического поведения машин, в том числе и обрабатывающих систем, признаны методы, основанные на анализе параметров виброакустических сигналов. Эти параметры наиболее просто поддаются измерению и дальнейшей компьютерной обработке, что является неременным и ключевым условием оперативного контроля машин, проводимого в режиме реального времени. Однако общим недостатком, действующих в настоящее время методов контроля, является то, что контролю подлежит только текущее состояние объекта контроля, рассматриваемое в отрыве от предыстории его динамического поведения в прошлом, что существенно снижает достоверность контроля. Контроль динамического поведения обрабатывающих систем осложняется так же отсутствием нормативной документации, позволяющей оценивать степень критичности этого поведения.

3. Показано, что в значительном числе проанализированных работ, для определения ресурса машин используются эмпирические зависимости, устанавливающие аналитическую или корреляционную взаимосвязь ресурса объекта контроля с множеством факторов, сопровождающих их функционирование. Общим недостатком этих работ, во-первых, является весьма сложный и во многом искусственный характер этих зависимостей, требующих регистрации множества исходных для расчета данных и, во-вторых, они не позволяют учесть индивидуальные особенности, складывающиеся при эксплуатации данного подконтрольного образца машины, что часто приводит к существенным погрешностям при определении их ресурса. Эмпирические формулы требуют значительного количества исходной информации и поэтому, как правило, рассчитаны на применение в лабораторных условиях, весьма далёких от реалий промышленного производства. И даже в этом случае они только с определенной долей вероятности находят подтверждение при воспроизведении тех же условий эксплуатации, при которых эти зависимости были получены.

4. Показано, что оперативный контроль динамического поведения обрабатывающих систем требуют применения специально создаваемых для

получения исходных данных информационно-измерительных систем. Эти комплексы могут либо встраиваться в существующую систему ЧПУ, либо дополнять её, функционируя параллельно. Существенным недостатком действующих информационно-измерительных систем является их односторонность: они направлены только на контроль текущего состояния обрабатывающего оборудования и не позволяют определять период его бездефектной работы. Рассмотренные в обзоре методы определения ресурса зачастую не применимы в условиях оперативного контроля и не дают возможности при определении ресурса обрабатывающих систем одновременно контролировать и качество изготавливаемой детали.

Таким образом, обзор литературных данных показал, что задача определения ресурса является важной и едва ли не ключевой, а на сегодняшний день так до конца и не решенной проблемой эксплуатации разнообразного промышленного оборудования, значительное место среди которого занимают металлообрабатывающие технологические системы.

Причем, в последнем случае при решении этой задачи приходится сталкиваться с двумя проблемами, первая из которых связана с тем, что измерение износа режущего инструмента – определяющего параметра технического состояния обрабатывающих систем – непосредственно в процессе их работы не представляется возможным. По этой причине применяют косвенные методы контроля технического состояния, наиболее эффективные из которых заключаются в контроле динамического поведения (тренда амплитуды колебаний) обрабатывающих систем при выполнении ими определенной технологической операции.

При этом приходится сталкиваться со второй проблемой – отсутствие нормативной документации, регламентирующей степень критичности динамического поведения обрабатывающих систем, вследствие чего не удастся обоснованно определять и период их бездефектной работы, именуемый ресурсом.

В связи с этим целью настоящей работы является развитие методов контроля динамического поведения металлообрабатывающих технологических систем и определение на этой основе их ресурса.

Определяемый при этом ресурс должен характеризовать период бездефектной работы обрабатывающих систем, отвечающий фактически складывающимся индивидуальным условиям их эксплуатации и проявляющийся внешне в поведении тренда информационного сигнала (тренда амплитуды колебаний, регистрируемой в информационной точке обрабатывающей системы).

Для достижения указанной цели в настоящей работе необходимо выполнить следующие исследования:

- проанализировать литературные данные и расчетно-экспериментальным методом подтвердить и обобщить известные из литературы и практики, данные об изменении во времени под влиянием внешних и внутренних факторов динамического поведения обрабатывающих систем;

- разработать действующий в режиме реального времени алгоритм непрерывного контроля динамического поведения обрабатывающих систем и реализовать его в виде программного продукта;

- разработать метод определения ресурса обрабатывающих систем на основе контроля тренда информационного сигнала, сопровождающего их работу в течение выполнения заданной технологической операции;

- разработать критериальные параметры, которые при отсутствии норм, регламентирующих степень критичности динамического поведения обрабатывающих систем, позволят применить подобную регламентацию и для данного типа подконтрольного оборудования.

РАЗДЕЛ 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ СИСТЕМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В настоящем разделе изложена методология получения исходной информации о колебаниях обрабатывающих систем и последующего использования этой информации для исследования с помощью математических моделей закономерностей динамического поведения обрабатывающих систем при изменении их технического состояния. В качестве динамических моделей рассматривались упруго-массовые расчетные схемы с сосредоточенными параметрами. По результатам расчета определялся ряд характеристик динамического поведения основных элементов обрабатывающей системы, в том числе и тренд амплитуды звуковой волны, возникающей в рабочей зоне обрабатывающей системы.

2.1 Выбор информационного сигнала для контроля динамического поведения обрабатывающих систем и метод его регистрации

2.1.1 Метод контроля информационного сигнала

Динамическое поведение обрабатывающих систем, под которым будем понимать их реакцию (отклик) на действующие на них эксплуатационные нагрузки, наиболее информативно описывается посредством звукового информационного сигнала. При этом звук будем рассматривать в широком понимании этого термина, как физическое явление, представляющее собой распространение в виде упругих волн механических колебаний в твёрдой и газообразной среде.

В данном случае твердой средой является конструкция обрабатывающей системы, в которой образуется *вибрационное* поле, а газообразной – окружающее обрабатывающую систему воздушное пространство, в котором возникает *акустическое* поле. Из-за пренебрежительно малой инерционности воздушной

среды динамические характеристики обоих полей, практически, одинаковы.

Динамическое поведения обрабатывающей системы и характеристики, сопровождающих ее работу волновых полей, зависят от физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрии инструмента, динамических характеристик станка и режимов его работы.

Изменение этих факторов приводит к изменению динамического поведения обрабатывающей системы. Так, износ инструмента является причиной изменения силы трения между инструментом и обрабатываемой деталью и, как следствие, силы резания, температуры в зоне резания, вибраций станка, что, в конечном счете, приводит к изменению вибрационного и акустического полей. Характер этих изменений выявляется при компьютерной обработке результатов регулярного (желательно, непрерывного) контроля динамических параметров этих волновых полей.

Параметры вибрационного поля регистрируются, как правило, контактным методом, подразумевающим механическую связь датчика с исследуемым объектом, что вынуждает решать две трудные задачи: выбора на подконтрольном объекте информативной точки, где возможно разместить датчик, и исключения помех, как правило, сопутствующих подобным измерениям.

Для обрабатывающих систем информационной точкой является размещенная на границе двух сред (и двух волновых полей) точка соприкосновения инструмента с заготовкой. Именно в этой точке зарождается полезный сигнал, несущий информацию о поведении основных элементов данных систем: детали и инструмента. Установить датчик вибраций в эту точку, естественно, невозможно.

Выбор иной контрольной точки, самая близкая из которых, например, для токарного станка, размещена на державке резца, требует исключения из результатов измерения существенной по величине помехи. Помеха в данном случае представляет собой вибрацию, генерируемую работающими конструктивными узлами станка. Выделить на фоне этой интенсивной по уровню и сложной по частотному составу паразитной вибрации полезный сигнал, без

существенного его искажения, практически, невозможно.

Данное обстоятельство и является, в частности, одной из причин неустанного поиска и применения различных по физической природе информационных сигналов, сопровождающих процесс взаимодействия инструмента с деталью с целью обойти данное, в общем-то, напрямую не преодолимое препятствие.

Решение этой проблемы возможно за счет применения бесконтактных методов измерения. Самым простым, и в тоже время эффективным, является измерение посредством микрофона параметров окружающего эту точку акустического (звукового) поля (п. 2.1.2), основным из динамических параметров которого, является величина амплитуды звуковой волны $E_{зв}$. Это амплитуда, измеряемая в Паскалях, рассчитывается через амплитуду колебания частиц воздушной среды A [176].

$$E_{звi} = 2\pi f \cdot \rho c A_i, \text{ Па} \quad (2.1)$$

где f – частота колебаний частицы воздушной среды в i -той точке звукового поля, $\Gamma\text{ц}$; c – скорость распространения звуковой волны в воздушной среде, м/с ; ρ – плотность воздушной среды, кг/м^3 ; A_i – амплитуда колебания частицы воздушной среды в i -той точке звукового поля, м .

Амплитуда колебания частиц воздушной среды A включает в себя амплитуды паразитных колебаний конструктивных узлов станка и амплитуду полезного сигнала (амплитуду воздушной волны). Однако, в данном случае, в отличие от измерения контактным датчиком, амплитуда полезного сигнала преобладает. Это объясняется тем, что полезный сигнал проходит значительно меньшее расстояние от точки его возникновения до точки его регистрации микрофоном (10-15мм) по сравнению с расстоянием, исчисляемым в десятках и сотнях сантиметров, которое приходится преодолевать сигналу помехи. При этом существенное уменьшение уровня помехи происходит на последнем «воздушном» отрезке пути ее распространения, где рассеяние энергии звуковой волны на несколько порядков больше, чем в металле.

Однако при применении микрофона окружающий объект контроля

звуковой фон можно рассматривать в качестве источника помех, поэтому степень искажающего влияния окружающего звукового фона на полезный сигнал следует оценить.

2.1.2 Выбор звука, как физического явления, используемого для контроля динамического поведения обрабатывающей системы

На поверхности детали, обработанной токарным резцом, образуются неровности в виде винтовых выступов и винтовых канавок (рис. 2.1), называемые шероховатостью. Причиной шероховатости является след, оставляемый инструментом на обработанной поверхности вследствие взаимных колебаний инструмента и обрабатываемой детали. Данное явление взаимодействия резца с обрабатываемой деталью послужило 135 лет назад основой звукозаписи, в процессе которой резец оставлял след (фонограмму) на боковой поверхности воскового валика, а, затем, и на поверхности плоской грампластинки [201].

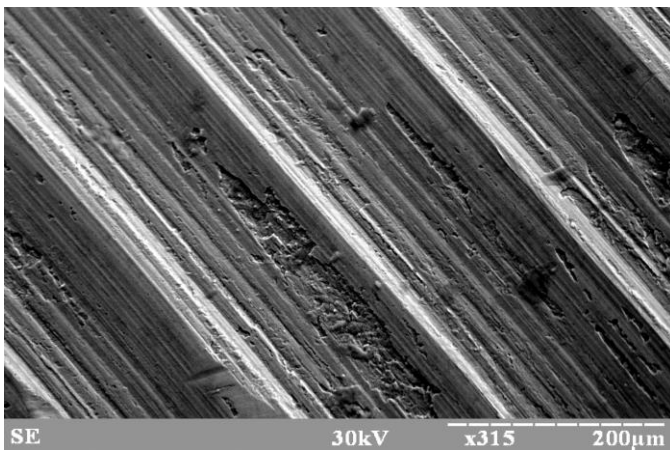


Рисунок 2.1 – Увеличенная под микроскопом шероховатость обработанной поверхности

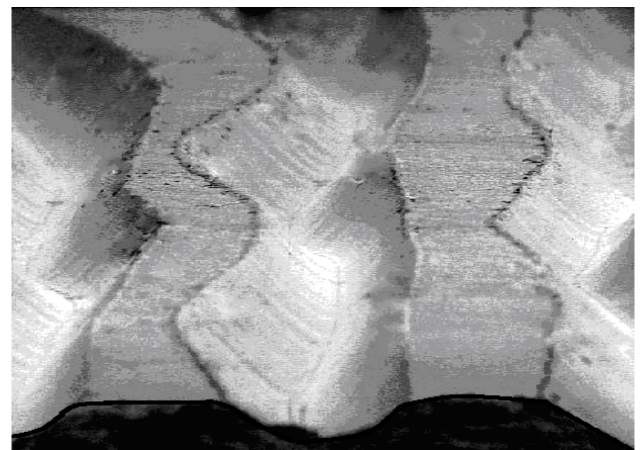


Рисунок 2.2 – Увеличенная под микроскопом поверхность грампластинки

На рис. 2.2 приведена увеличенная в 1000 раз часть звуковой дорожки грампластинки, представляющую собой часть зафиксированной на грампластинке фонограммы. Подобной фонограммой как раз и является образующаяся при работе обрабатывающей системы шероховатость обработанной поверхности детали. Шероховатость, наподобие фонограммы, содержит информацию о степени затупления инструмента и неразрывно связанным с этим качестве обработанной поверхности детали. Эта информация, в свою очередь, как раз и характеризует качество работы обрабатывающей системы и содержит сведения о ее ресурсе.

Таблица 2.1 – Условия экспериментов

Вид обрабатывающей системы	Режим резания			Материал	
	обороты шпинделя n , об/мин	глубина резания t , мм	подача S , мм/об; мм/зуб	резец, фреза	заготовка
Обрабатывающая система токарного станка	125	1.0	0.15	P 25	сталь 12X18H10T
Обрабатывающая система фрезерного станка	800	3.0	0.08	P6M5	сталь Ст45

На рис. 2.3 и 2.4 приведена информация о корреляционной зависимости между кривой износа h_3 режущего инструмента и трендом амплитуды звуковой волны $\bar{E}_{3в}$, сопровождающей работу обрабатывающих систем токарного (рис. 2.3) и фрезерного (рис.2.4) станков на режимах, приведенных в табл. 2.1.

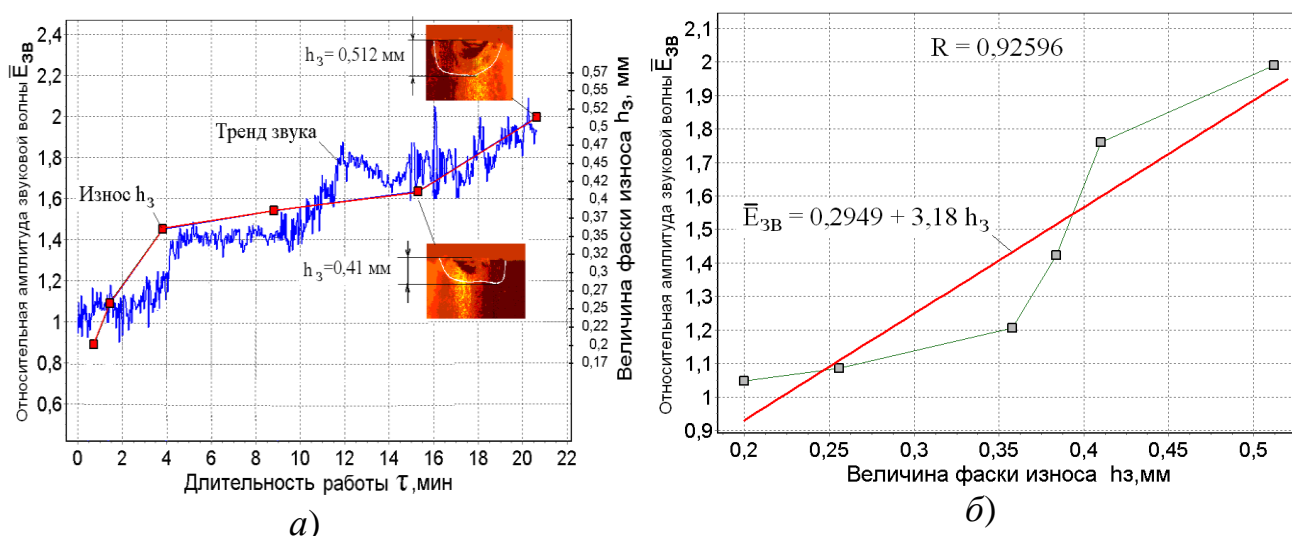


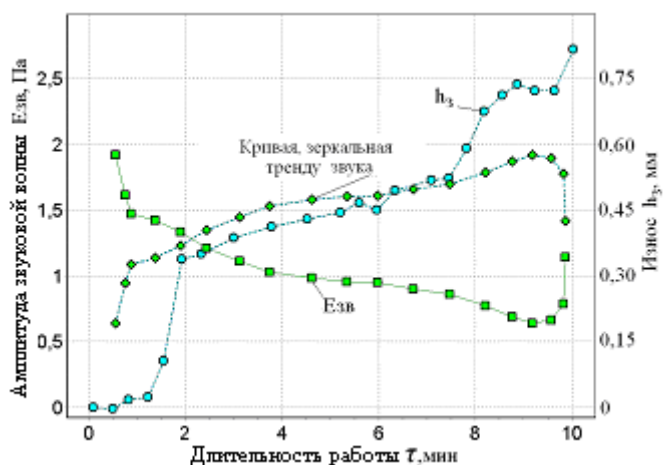
Рисунок 2.3 – Корреляция между износом инструмента и амплитудой звуковой волны, наблюдаемая при работе обрабатывающей системы токарного станка:

а) кривая износа h_3 и тренд звука $\bar{E}_{3в}$; б) регрессионная зависимость между относительной амплитудой звуковой волны $\bar{E}_{3в}$ и износом h_3

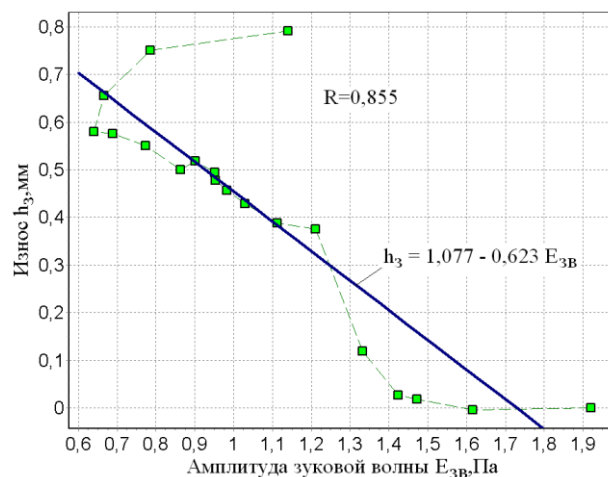
В последнем случае для наглядности представления информации на рис. 2.4 а) приведено так же и зеркальное отображение тренда звука. Как видим, зеркальная кривая изменяется эквидистантно изменению участка кривой износа, соответствующего участку нормального износа фрезы. Согласованность изменения тренда звука и кривой износа подтверждают приведенными на

рис. 2.3 б) и 2.4 б) регрессионные зависимости между амплитудой звуковой волны и величиной износа. Коэффициент корреляции R между этими параметрами, определенный при работе обрабатывающей системы:

- токарного станка равен 0,92596;
- фрезерного станка равен - 0,855.



а)



б)

Рисунок 2.4 – Корреляция между износом инструмента и амплитудой звуковой волны, наблюдаемая при работе обрабатывающей системы фрезерного станка:

а) кривая износа $h_з$ и тренд звука $E_{зв}$; б) регрессионная зависимость между амплитудой звуковой волны $E_{зв}$ и износом $h_з$

Высокая степень корреляции износа и звуковой волны явилось определяющим при выборе звука в качестве физического явления, параметры которого (амплитуда звуковой волны и ее частотный состав) используются для объективного контроля бесконтактным методом динамического поведения обрабатывающей системы.

Рассмотрим процесс регистрации параметров звуковой волны более подробно.

2.1.3 Регистрация параметров звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающей системы

Звуковая волна (звук) характеризуется следующими параметрами:

- **амплитуда звукового давления** $E_{зв}$ (рис. 2.5) – максимальное дополнительное к атмосферному давление, возникающее в среде при прохождении звуковых волн, выражаемое в Паскалях ($Pa = \frac{1N}{1M^2}$).

– **интенсивность звука** \bar{I} – это векторная величина, характеризующая энергию, переносимую за одну секунду звуковыми волнами через расположенную перпендикулярно их направлению площадь в 1 м^2 пространства, окружающего источник звука (рис. 2.6).

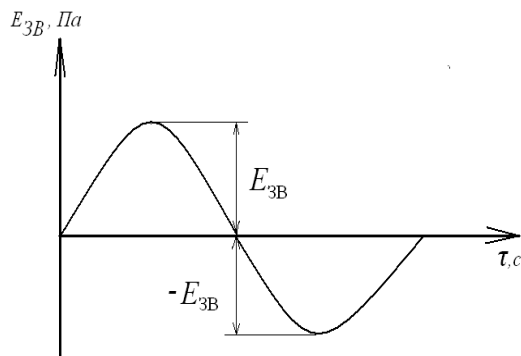


Рисунок 2.5 – Звуковая волна

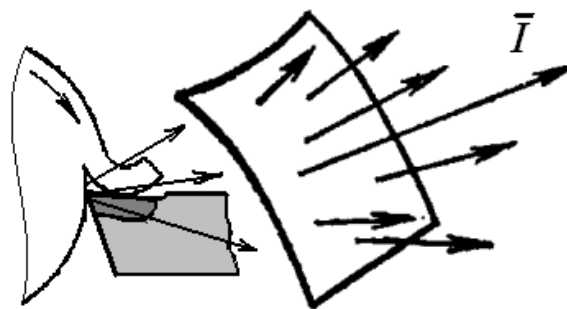


Рисунок 2.6 – Интенсивность звука

Вектор интенсивности звука \bar{I} равен:

$$\bar{I} = E_{зв} \cdot \bar{V}, \quad (2.2)$$

где \bar{V} – вектор скорости изменения звукового давления, м/с .

Модуль интенсивности звука равен:

$$I = \frac{E_{зв}^2}{\rho \cdot C}, \quad (2.3)$$

где: $E_{зв}$ – звуковое давление, Н/м^2 ; C – скорость звука в воздухе, м/с ; ρ – плотность воздушной среды, кг/м^3 (Удельное акустическое сопротивление $\rho \cdot C = 415 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$)).

В дальнейшем в работе рассматривалась амплитуда звуковой волны $E_{зв}$, как параметр, непосредственно характеризующий звуковую волну, в отличие от интенсивности звука I , представляющей результат математической обработки предварительно измеренного давления $E_{зв}$ (2.2), (2.3).

Амплитуда звуковой волны, генерируемой в процессе работы обрабатывающей системы, есть переменное давление в среде, окружающей ее рабочую зону. В качестве датчика, регистрирующего параметры звуковой волны, как уже выше упоминалось, применяется, как правило, электретный по типу микрофон [201] (рис. 2.7).

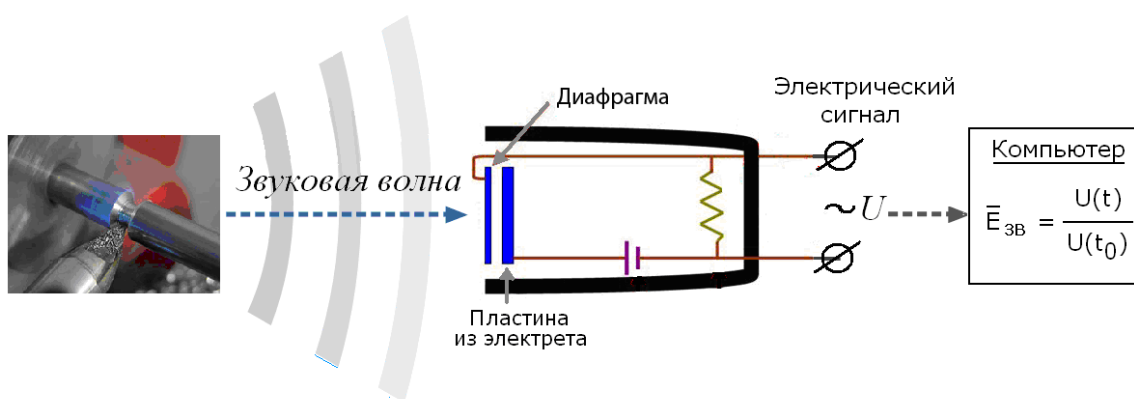


Рисунок 2.7 – Схема регистрации посредством микрофона звуковой волны, возникающей в рабочей зоне обрабатывающей системы

Принцип работы микрофона заключается в том, что звуковая волна, действуя на его мембрану, приводит к изменению ёмкости конденсатора, составляющего конструктивную основу данного типа микрофонов, вследствие чего на конденсаторе появляется изменение напряжения, соответствующее изменению звуковой волны (рис. 2.7).

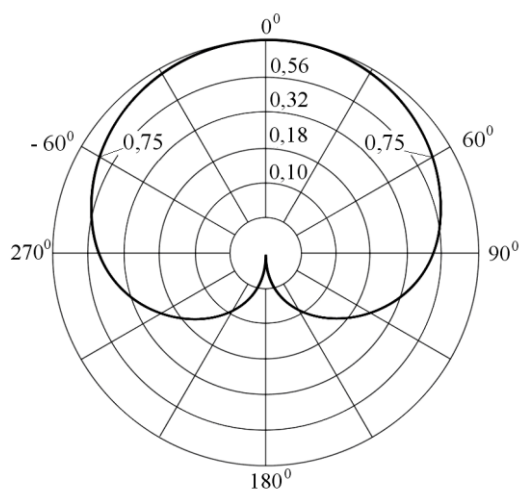


Рисунок 2.8 – Годограф чувствительности микрофона

Важным свойством микрофона, особенно измерительного, является зависимость чувствительности микрофона от направления падения звуковой волны по отношению к оси микрофона. Эту зависимость называют направленностью микрофона, которая определяется отношением чувствительности M_α при падении звуковой волны под углом α относительно акустической оси микрофона к его осевой чувствительности M_0 :

$$\varphi = \frac{M_\alpha}{M_0}. \quad (2.4)$$

Годограф направленности, называемый кардиоидой, приведен на рис. 2.8 [201]. Из графика видно, что чувствительность микрофона зависит от угла, и источник звука должен располагаться в пространственном угле $\pm 60^\circ$, в пределах которого чувствительность микрофона изменяется от 1 до 0,75.

При измерении звуковой волны, генерируемой в рабочей зоне обрабатывающей системы, необходимо исключать искажающее влияние (помеху) от звуков (звукового фона), создаваемого окружающими источниками звука.

2.1.4 Помехи, возникающие при регистрации звуковой волны, генерируемой при работе обрабатывающей системы

Помехи, возникающие при регистрации звуковой волны, делятся на мультипликативные и аддитивные. Первые действуют в измерительной цепи, что не критично для компьютерных измерительных сетей, где подобные помехи, практически, отсутствуют. Причиной аддитивной помехи является окружающий рабочую зону контролируемой обрабатывающей системы звуковой фон, создаваемый при работе расположенного рядом оборудования.

Для исключения мультипликативных помех при контроле динамического поведения обрабатывающих систем следует переходить к относительным величинам \bar{E}_{3B} , равным отношению измеряемой величины амплитуды звуковой волны E_{3Bi} к её величине E_{3B1} , зарегистрированной при первом измерении.

$$\bar{E}_{3B} = \frac{E_{3Bi}}{E_{3B1}}. \quad (2.5)$$

При наличии мультипликативной помехи $\varepsilon(\tau)$ дробь (2.4) позволяет ее исключить:

$$\bar{E}_{3B} = \frac{E_{3Bi} \cdot \varepsilon(\tau)}{E_{3B1} \cdot \varepsilon(\tau)} = \frac{E_{3Bi}}{E_{3B1}}. \quad (2.6)$$

При наличии аддитивной помехи дробь (2.4) примет следующий вид:

$$\bar{E}_{3B} = \frac{\sqrt{\hat{E}_{3Bi}^2 + \hat{\varepsilon}^2(\tau)}}{\sqrt{\hat{E}_{3B1}^2 + \hat{\varepsilon}^2(\tau)}} = \frac{\hat{E}_{3Bi} \sqrt{1 + \hat{\varepsilon}^2(\tau) / \hat{E}_{3Bi}^2}}{\hat{E}_{3B1} \sqrt{1 + \hat{\varepsilon}^2(\tau) / \hat{E}_{3B1}^2}}, \quad (2.7)$$

где \hat{E}_{3B} , $\hat{\varepsilon}(\tau)$ – соответственно среднеквадратическая величина полезного сигнала и помехи ($\hat{E}_{3B} = \frac{E_{3B}}{\sqrt{2}}$, $\hat{\varepsilon}(\tau)_{3B} = \frac{\varepsilon(\tau)}{\sqrt{2}}$).

Степень искажений, вносимых аддитивной помехой была специально изучена. Так, на рис. 2.9 приведена временная реализации звуковой волны, включающая фоновый участок и участок работы обрабатывающей системы токарного станка (станок 16K20T1) под нагрузкой. Эксперименты проводились

при чистовой обработке заготовки на режимах, приведенных в табл. 2.1.

Фон включал в себя суммарную звуковую волну, состоящую из волны, генерируемой при работе на холостом ходу станка 16K20T1, а также из волн, генерируемых при работе под нагрузкой окружающего его аналогичного обрабатывающего станочного оборудования.

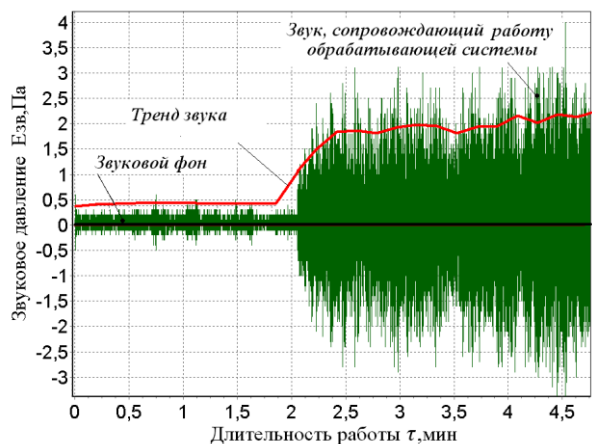


Рисунок 2.9 – Временная реализация звуковой волны

План размещения станков при проведении экспериментов показан на рис. 2.10. План размещения станков и расстояний между ними соответствует «Правилам охраны труда и удобства эксплуатации станков» [202]. Степень влияния помехи от работающего рядом оборудования оценивается в соответствии с известным в акустике «Правилом шести

децибел» [203], согласно которому изменение величины амплитуды звуковой волны (давления звука) прямо пропорционально изменению расстояния от

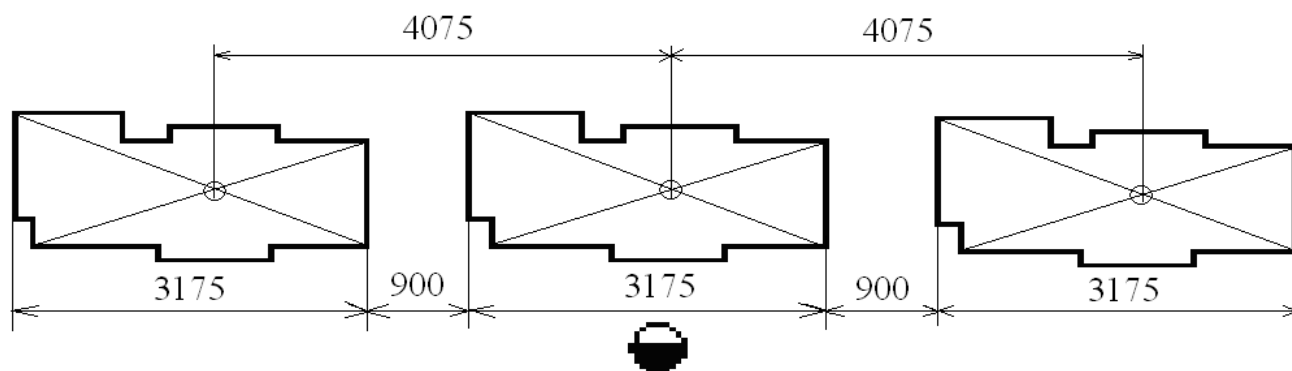


Рисунок 2.10 – План размещения станочного оборудования при проведении эксперимента

источника волны до точки ее контроля.

Как следует из рис. 2.10 расстояние от центрального станка, где проводились измерения, до окружающих его станков округлённо равно четырем метрам. В этом случае среднеквадратическая величина звукового давления $\hat{E}_{ЗВ}^{СУМ}$ в точке контроля определяется из следующего выражения

$$\hat{E}_{3B}^{СУМ} = \sqrt{\hat{E}_{3B}^2 + \left(\frac{\hat{E}_{3B}}{4}\right)^2 + \left(\frac{\hat{E}_{3B}}{4}\right)^2} = \hat{E}_{3B} \sqrt{\frac{18}{16}} = 1.06 \cdot \hat{E}_{3B}, \text{ Па}, \quad (2.8)$$

где $\hat{E}_{3B} = \frac{E_{3B}}{\sqrt{2}}$ – среднеквадратическая величина давления звука, генерируемого в рабочей зоне каждой из обрабатывающих систем (полезный не зашумленный сигнал).

При вычислениях по формуле (2.8) полагалось, что в процессе работы три обрабатывающие системы генерируют одинаковую по амплитуде звуковую волну E_{3B} , Па.

Как видим, помеха от работы окружающего оборудования приводит к завышению результатов измерений по отношению к истинному значению контролируемой величины амплитуды звуковой волны всего на 6%.

Поэтому расположение микрофона в непосредственной (сантиметровой) близости от контролируемой рабочей зоны обрабатывающей системы, практически (рис. 2.11), исключает искажающее влияние аддитивной помехи. Это объясняется тем, что звуковая волна помехи претерпевает существенное затухание на пути ее распространения, измеряющемся в метрах, от источника ее возникновения до контролируемой рабочей зоны (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Размещение микрофона в непосредственной близости от зоны резания

Оценим влияние аддитивной помехи на оценку поведения тренда звука, что в свою очередь может привести к ложному заключению о степени критичности динамического поведения обрабатывающей системы и, как следствие, к ошибочному определению величины их ресурса.

На рис. 2.12 приведены совместно графики изменения в процессе работы обрабатывающей системы: амплитуды звуковой волны фона (помехи $\varepsilon(\tau)$); амплитуды суммарной звуковой волны ($E_{зв}^{сум}$); амплитуды звуковой волны, очищенной от помехи ($E_{зв}$).

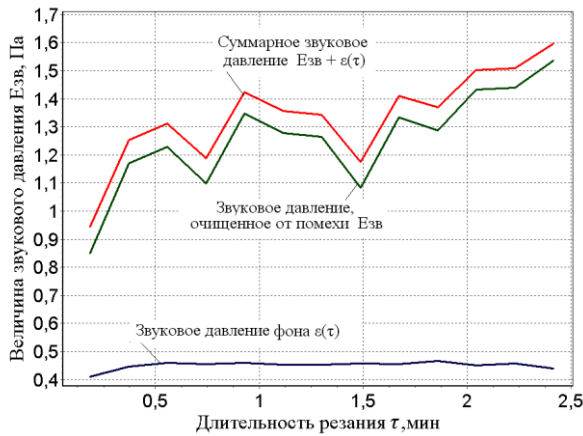


Рисунок 2.12 – Соотношение между амплитудами звуковых волн полезного и суммарного сигнала, а так же сигнала помехи

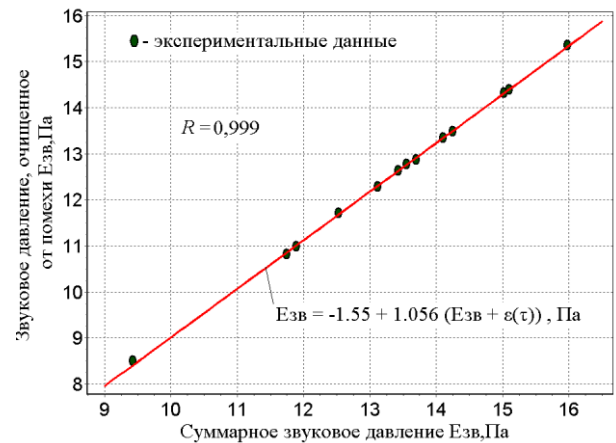


Рисунок 2.13 – Регрессионная зависимость между амплитудами звуковых волн полезного и суммарного (зашумленного) сигналов

Как видим график суммарной («зашумленной» помехой) амплитуды звуковой волны и график амплитуды полезного сигнала (волны, «очищенной» от помехи) эквидистантны. Степень корреляции этих амплитуд наглядно показана на рис. 2.13, где приведено уравнение и график их регрессионной зависимости. Коэффициент корреляции R между ними высокий и составляет величину 0,999.

Таким образом, эксперименты позволили установить, что аддитивная помеха приводит только к незначительному изменению (возрастанию) величины амплитуды звуковой волны, контролируемой вблизи от рабочей зоны обрабатывающей системы, не влияя одновременно на поведение ее тренда.

К разряду аддитивной помехи относятся так же помехи, *носящие импульсный (ударный) характер*, причиной которых являются несанкционированные механические по своей природе удары, возникающие в окружающей станочное оборудование среде. Импульсные нагрузки во временной области их представления характеризуются двумя параметрами: уровнем $E_{yд}$ и длительностью $\tau_{уд}$ (рис. 2.14).

При поступлении аналогового сигнала, в том числе и импульсного, в

компьютер, он подвергается «оцифровке», т.е. дискретному считыванию с определенным шагом по времени $\Delta\tau$.

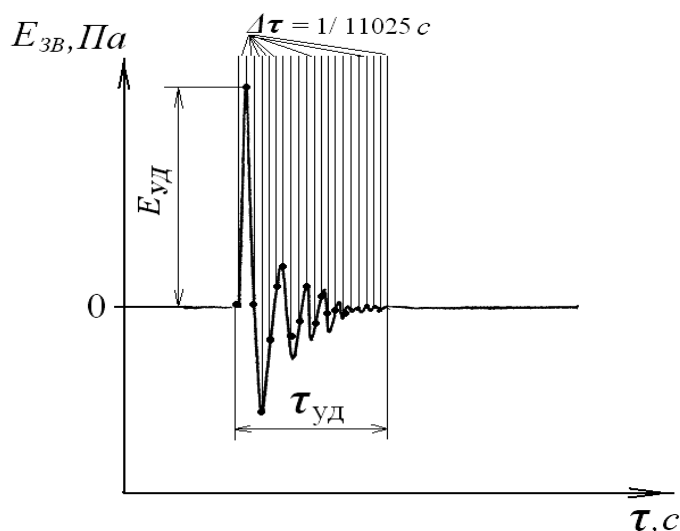


Рисунок 2.14 – Импульс звуковой волны и схема его оцифровки

Шаг по времени равен $1/11025$ с, где цифра 11025 равна стандартной частоте дискретизации $f_{\text{дис}}$, применяемой при цифровой обработке аналоговых сигналов. Число считываемых значений сигнала $n_{\text{шт}}$ совпадает с числом шагов по времени, которое определяется из следующего выражения

$$n_{\text{шт}} = \frac{\tau_{\text{уд}}}{\Delta\tau} = 11025 \cdot \tau_{\text{уд}}, \text{ шт.} \quad (2.9)$$

Число шагов, как следует из (2.8), зависит от частоты дискретизации и длительности импульса $\tau_{\text{уд}}$, определяемой по следующей формуле [204]

$$\tau_{\text{уд}} = \frac{2L}{C}, \quad (2.10)$$

где L – длина стержня в м, эквивалентного по динамическим характеристикам металлическому предмету генерирующему, например, при падении на пол, импульс звука; C – скорость распространения продольных колебаний в металле, м/с ($C = 5170$ м/с).

В табл. 2.2 приведены длительности импульса и соответствующие им числа считываемых значений, рассчитанных, соответственно, по формулам (2.8) и (2.9) для длины стержня, изменяющейся от 0,1 до 1,0 метра.

Оценим вклад импульса звуковой волны в регистрируемую в процессе измерений суммарную амплитуду звуковой волны. Пусть при отсутствии импульсной помехи амплитуда звуковой волны (полезный сигнал) составляет $E_{\text{зс}}$, Па. При наличии помехи величина суммарной амплитуды $E_{\text{зс}}^{\text{Сум}}$, Па находится, как векторная сумма уровня помехи $E_{\text{зд}}$ и уровня полезного сигнала $E_{\text{зс}}$. Допустим,

что уровень помехи в 10 раз превышает уровень полезного сигнала ($E_{\text{ш}} = 10 E_{\text{сг}}$).

Таблица 2.2 – Изменение длительности удара $\tau_{\text{уд}}$ и числа считываемых значений звукового импульса $n_{\text{шт}}$ в зависимости от длины стержня L

$L, м$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\tau_{\text{уд}} 10^{-4}, с$	0,77	1,16	1,55	1,93	2,32	2,71	3,10	3,48	3,67
$n_{\text{шт}}$	$0,85 \approx 1$	$1,27 \approx 2$	$1,7 \approx 2$	$2,13 \approx 2$	$2,55 \approx 3$	$2,98 \approx 3$	$3,4 \approx 4$	$3,8 \approx 4$	4

Примем с существенным запасом, что длительность импульса $\tau_{\text{уд}}$ такова, что на нее приходится до 100 отсчетов по времени (из табл. 2.2 следует, что их почти на два порядка меньше). В процессе контроля звука для повышения достоверности измерений и борьбы с помехами определяется 3072 значения сигнала (считывание осуществляется три раза по 1024 отсчета). Считываемые значения складываются и усредняются, делением образующейся при этом суммы на число слагаемых – 3072 шт.

Для определения модуля векторной суммы полезного сигнала и помехи, перейдем от амплитудных значений давлений к их среднеквадратическим величинам и определим суммарный уровень полезного сигнала и помехи:

$$\hat{E}_{\text{сг}}^{\text{сум}} = \sqrt{\left(\hat{E}_{\text{сг}} \frac{2972}{3072}\right)^2 + \left(10 \hat{E}_{\text{ш}} \frac{100}{3072}\right)^2} = 1,02 \hat{E}_{\text{сг}}, \text{ Па}$$

Как видим, даже при **10-ти кратном** превышении помехой полезного сигнала, вклад её в суммарный сигнал не превышает **2%**.

2.2 Основные подходы к моделированию динамики обрабатывающей системы

Динамическое поведение обрабатывающей системы определяются взаимодействием ее упругих элементов с рабочими процессами, протекающими при ее работе: силовыми и тепловыми взаимодействиями между заготовкой, инструментом и элементами станка, электромагнитными, гидравлическими и другими процессами в элементах станочной системы. Поэтому при исследовании динамики обрабатывающей системы необходимо учитывать следующее [175]:

– задача исследования динамики обрабатывающей системы является комплексной физической задачей;

– динамические параметры обрабатывающей системы изменяются в широком диапазоне и, при моделировании, а еще в большей степени при оптимизации процессов ее работы, необходимо четко определить границы варьирования этих параметров применительно к конкретным видам обрабатывающих систем и условиям их применения (режимам их работы).

Целью исследования динамики обрабатывающей системы является повышение её динамических и эксплуатационных качеств.

К числу основных показателей динамических качеств обрабатывающей системы можно отнести [176]:

– амплитуду взаимных колебаний инструмента и детали по нормали к обрабатываемой поверхности;

– звуковая волна и колебания станка и основания, на котором установлен станок, возникающие при его функционировании;

– наибольший допускаемый режим динамической устойчивости режимов работы обрабатывающей системы, выше и ниже которых система неустойчива.

При исследовании динамики обрабатывающей системы узлы станка, инструмент и заготовка объединяют, в так называемую, упругую систему. Объединение может быть полным, то есть рассматривается весь станок, или поузловым, когда, например, заготовка и инструмент могут быть объединены в собственную упругую систему. При этом математическое описание упругой системы должно иметь связь с процессами, происходящими в рабочей зоне обрабатывающей системы [13, 14, 17, 28].

При математическом описании динамических процессов происходящих в самой упругой системе, необходимо иметь ввиду, что, вследствие неуравновешенности вращающихся узлов, погрешностей заготовок и других причин, их воздействия условно рассматривают как внешние. Износ режущего инструмента оказывают влияние на упругие характеристики обрабатывающей системы, что должно быть также отражено в её математическом описании.

Исходными данными для разработки динамической модели являются техническая документация: сборочные и рабочие чертежи, кинематическая и другие схемы, результаты выполненных исследований аналогичных обрабатывающих систем и другие материалы. Для упрощения динамической модели не учитывают факторы, которые мало влияют на результаты решения поставленной задачи. Поэтому любая динамическая модель имеет относительно ограниченную область применения.

Каждой принятой динамической модели однозначно соответствует соответствующая система дифференциальных уравнений, описывающая ее поведение. Эти уравнения можно рассматривать как математическую модель динамической системы. В зависимости от вида дифференциальных уравнений математические модели могут быть линейными и нелинейными [177].

В линейной динамической модели упругие силы пропорциональны деформациям, силы вязкого трения – скоростям, а силы инерции – ускорениям. Ниже рассматриваются подобные линейные динамические модели двух типовых металлообрабатывающих технологических систем токарного и фрезерного станков.

2.3 Цель исследований динамики обрабатывающих систем

Целью данных исследований являлось установление закономерностей динамического поведения обрабатывающей системы по мере изменения технического состояния (износа и разрушения) режущего инструмента и характер проявления этих закономерностей в тренде амплитуды звуковой волны, сопровождающей работу данной системы.

2.4 Предмет исследований

Предметом исследований были динамические модели технологических металлообрабатывающих систем типового станочного оборудования: токарного и фрезерного станков.

2.4.1 Токарно-винторезный станок

Токарный станок модели 16К20Т1 (рис. 2.14) является станком повышенной

точности. Он снабжён ЧПУ и предназначен для обработки деталей типа тел вращения по программе, вводимой вручную или записанной на жёстком диске.

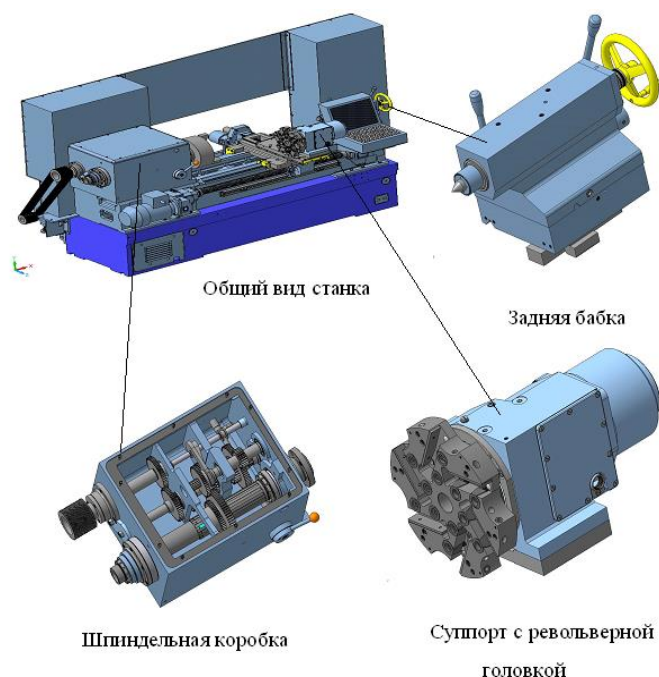


Рисунок 2.14 – Токарный станок модели 16К20Т1

Основание станка представляет собой жесткую отливку, на которой устанавливаются: станина, электродвигатель главного движения, станции смазки направляющих каретки шпиндельной бабки, насос подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Средняя часть основания служит сборником для стружки и СОЖ, отсек в нижней правой части основания – резервуаром для СОЖ.

Станина станка имеет коробчатую форму с поперечными ребрами П – образного профиля, на которой закреплены закаленные шлифованные направляющие. На станине устанавливаются шпиндельная бабка, каретка, привод продольной подачи, задняя бабка. Для базирования каретки на станине передняя направляющая имеет форму неравнобокой призмы, задняя направляющая – плоская. Задняя бабка базируется на станине по малой задней призматической направляющей и по плоскости – на передней направляющей.

Для обработки заготовок на станке применяются различные виды резцов (проходные, подрезные, отрезные) с механическим креплением режущих пластин. Многогранные твердосплавные пластины закрепляют прихватами, винтами, клиньями и т. д. Материалы режущей части также различны и зависят от обрабатываемого материала.

2.4.2 Вертикально – фрезерный станок

Вертикально-фрезерный станок 6P13 является типичным представителем парка фрезерного станочного оборудования (рис. 2.15). Он предназначен для фрезерования, сверления и выполнения расточных работ заготовок любых форм и из любых материалов - от чугуна до сплавов цветных металлов, пластмасс.

Шпиндельная головка вертикально-фрезерного станка оснащена механизмами поворота и ручного осевого перемещения шпинделя. Это позволяет производить обработку отверстий, расположенных под углом до $\pm 45^\circ$ к поверхности стола.

Высокая жесткость вертикально-фрезерного станка 6P13 в сочетании с мощным приводом позволяет использовать фрезы как из быстрорежущей стали, так и с пластинами из твердых сплавов и сверхтвердых материалов.

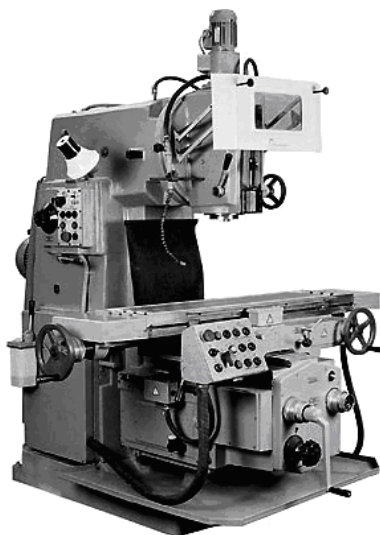


Рисунок 2.15 – Внешний вид вертикально-фрезерного станка 6P13

2.5 Методика исследований

Методика исследований заключалась:

- в компьютерном моделировании колебаний обрабатывающей системы при изменении, вследствие износа и разрушения режущего инструмента, ее жесткостных и демпфирующих характеристик;
- в сопоставлении результатов моделирования и поверочных экспериментов для подтверждения достоверности расчетов и выявления закономерностей проявления изменения динамики обрабатывающей системы в поведении тренда амплитуды звуковой волны, сопровождающей ее работу.

2.5.1 Расчет параметров звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающей системы

Амплитуда звуковой волны является ее основным параметром, измерение которого позволяет следить за динамическим поведением обрабатывающей системы. В расчетах данная амплитуда определялась как модуль векторной суммы векторов звуковых волн $\bar{E}_{3\theta}^{сум}$, генерируемых в процессе работы обрабатывающей системы каждым из ее моделируемых конструктивных узлов. Модуль каждого из слагаемых векторов определялся по формуле (2.1). При этом полагалось, что колебания частицы воздушной среды с амплитудой A_i на границе вибрационного (колебания твердой среды) и акустического (колебания воздуха) полей вызываются колебаниями с амплитудой ξ_i прилегающей к воздушной частице поверхности обрабатывающей системы.

Поверхности обрабатывающей системы в процессе ее работы совершают пространственные колебания, при моделировании которых использовалась упруго-массовая модель с сосредоточенными параметрами. В качестве обобщенной координаты, описывающей эти пространственные колебания, рассматривался комплексный радиус – вектор $\bar{\xi}_i$, характеризующий положение центров масс моделируемых элементов в пространстве XYZ :

$$\bar{\xi}_i = \bar{i} \cdot x_i + \bar{j} \cdot y_i + \bar{k} z_i, \quad (2.11)$$

где x_i , y_i и z_i – проекции радиус-вектора $\bar{\xi}_i$ на соответствующие оси используемые, обычно, при описании динамики станков [70].

Поскольку экспериментальные данные, в сравнении с которыми оценивалась достоверность математического моделирования, представляли собой графики изменения в зависимости от длительности работы обрабатывающей системы амплитуды звуковой волны (тренды звука), подобные тренды определялись и в расчетах.

В расчетах амплитуда звуковой волны представляла собой модуль вектора суммарной амплитуды звуковых волн $\bar{E}_{3\theta}^{сум}$ и определялась по следующей формуле:

$$E_{зв}^{сум}(τ) = ρ C \sqrt{\sum_{i=1}^{n/2} [\xi_{сум}(f_i, τ) \cdot (2\pi f_i)]^2}, \text{ Па}, \quad (2.12)$$

где $\xi_{сум}(f_i, \tau)$ – модуль векторной суммы радиус – векторов $\vec{\xi}_i$, характеризующих положение центра масс моделируемых элементов обрабатывающей системы в момент времени τ ; f_i – частота i -той спектральной составляющей звука ($f_i = \frac{f_k}{n} \cdot i$), где f_k – частота Котельникова ($f_k = 11025 \text{ Гц}$); n – число дискретных составляющих звукового сигнала, подвергавшихся анализу ($n = 2^{12} = 4096$); $n/2$ – количество спектральных составляющих звуковой волны, уровни которых подвергались суммированию.

Модуль векторной суммы определялся по следующей формуле:

$$|\xi_{сум}(f, \tau)| = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^6 \xi \text{Re}_i(f, \tau)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^6 \xi \text{Im}_i(f, \tau)\right)^2}, \text{ м}, \quad (2.13)$$

где $\xi \text{Re}_i(f, \tau)$, $\xi \text{Im}_i(f, \tau)$ – соответственно, действительная и мнимая части частотной характеристики колебаний центра масс i -того элемента моделируемой системы в рассматриваемый момент времени τ , мин;

Для изучения характера изменения параметров звуковой волны в зависимости от изменения жесткостных и демпфирующих характеристик обрабатывающей системы в расчетах определялась функция $E_{зв}(f, \tau)$, характеризующая изменение с течением времени амплитуды звуковой волны и ее частотного спектра. Эта функция рассчитывалась по формуле (2.1), принявшей в данном случае следующей вид:

$$E_{зв}(f, \tau) = 2\pi f \cdot \rho c |\xi_{сум}(f, \tau)|, \text{ Па}, \quad (2.14)$$

где c – скорость звука в воздухе ($c = 340 \text{ м/с}$); ρ – плотность воздуха ($\rho = 2.2 \text{ кг/м}^3$).

Результаты расчета по формуле (2.14) представлялись для наглядности в виде трехмерной «амплитудно-частотно-временной» диаграммы.

2.5.2 Моделирование влияния изменяющихся динамических параметров обрабатывающей системы на ее динамическое поведение

Наибольшее влияние на динамическое поведение обрабатывающих систем оказывает быстро протекающее во времени изменение ее жесткостных и

демпфирующих характеристик, обусловленное износом и последующим разрушением режущего инструмента.

Изменение износа инструмента во времени проходит в соответствие с кривой износа, приведенной на рис. 2.16 а [1-3]. В точке A кривой износа заканчивается участок приработки инструмента, где его износ характеризуется величиной $h_{зпр}$ и начинается участок нормального (практически линейного) износа. Этот участок заканчивается в точке B , где инструмент достигает оптимального по технологическому критерию износа $h_{зон}$. На кривой износа предлагается выделять переходный участок BB_1 , предшествующий участку катастрофического износа B_1C , где градиент кривой начинает существенно изменяться, что свидетельствует об интенсификации процесса изнашивания инструмента. На этом участке в результате интенсификации износа его величина достигает предельно допустимого значения $h_{знд}$, что требует прекращения процесса резания (рис. 2.16 а, точка B_1), так как дальше начинается участок, на котором (например, в точке C) степень износа инструмента, т.е. величина $h_{знд}$, становится либо недопустимо большой, либо происходит разрушение инструмента (рис. 2.16 а). В соответствии с изменением кривой износа, как показывает практика резания [19 - 21] и корреляционная зависимость между трендом звука и кривой износа, рассмотренная в п. 2.1 (рис. 2.3 и 2.4), изменяется и тренд звука, сопровождающего процесс резания (рис. 2.16 б).

Так, на участке нормального износа амплитуда звуковой волны относительно стабильная, в то время как на участке катастрофического износа она начинает заметно изменяться (как правило, увеличиваться).

Такое поведение тренда звука можно объяснить следующим образом:

– во-первых, на участке нормальной работы инструмента площадка износа на задней поверхности лезвия, увеличиваясь (до некоторой величины), играет демпфирующую роль, уменьшая уровень вибрации инструмента и обрабатываемой системы в целом и, следовательно, амплитуду звуковой волны (рис. 2.16 б). Этому способствует образование при обработке сталей лунки на передней поверхности, что сопровождается кинематическим увеличением

переднего угла γ и, следовательно, адекватным уменьшением силы резания (участок нормального износа);

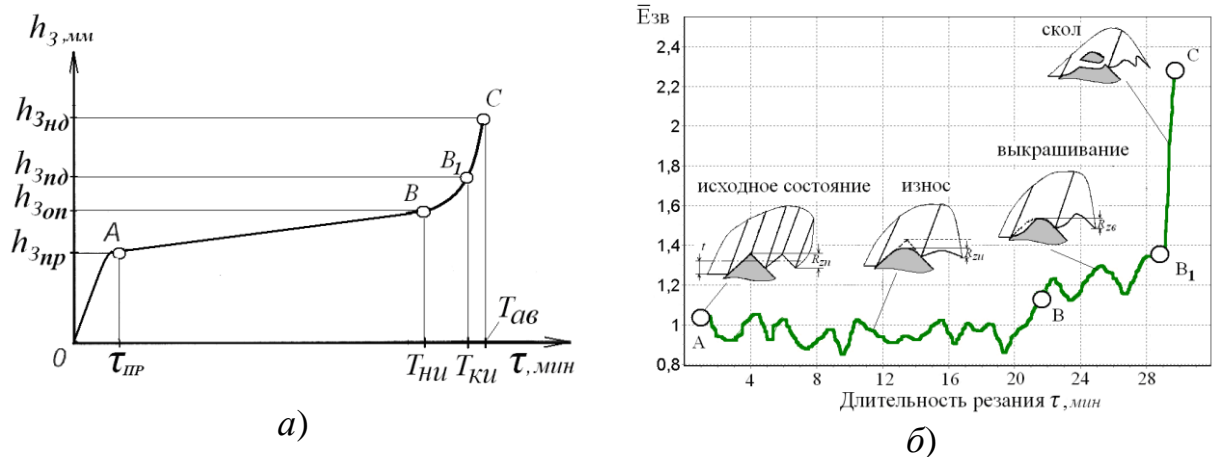


Рисунок 2.16 – Кривая износа режущего инструмента (а) и соответствующий ей тренд звука, сопровождающего работу обрабатываемой системы (б)

– во-вторых, по мере наработки инструмента происходит его «затупление» (увеличивается радиус округления режущей кромки ρ), что вызывает рост силы резания и, при определенных условиях, возникновение выкрашивания и сколов (рис. 2.16 б). В результате протекания этих процессов ухудшается динамическое состояние системы, которое проявляется в росте амплитуды звуковой волны (участки предкатастрофического BB_1 и катастрофического B_1C износов (рис. 2.16 а, б)).

Получим расчетные зависимости, описывающие количественно приведенные выше феноменологические характеристики поведения тренда звука по мере изменения технического состояния элементов обрабатываемой системы.

Так, влияние износа инструмента на динамическое поведение обрабатываемой системы опишем посредством установления зависимости между изменяющейся при износе геометрии режущего лезвия инструмента и изменением вследствие этого величины контактного усилия, действующего в точке сопряжения инструмента и детали.

Влияние разрушения (скола лезвия) инструмента опишем посредством уменьшения от исходной величины до нуля моделируемых в расчетной схеме обрабатываемой системы жесткости и демпфирования лезвия инструмента, что имитирует в расчете развитие в лезвии усталостной трещины.

2.5.2.1 Моделирование влияния износа режущего инструмента на динамическое поведение обрабатывающей системы

Нагрузки, действующие на обрабатывающую систему, подразделяются на постоянную (сила резания) и переменные составляющие. Источником переменных составляющих является вибрация. Причины вибраций, как уже говорилось выше, разнообразны и изменяются от простых (вибрация привода и редуктора) до сложных (изменение толщины стружки, резание по следу и автоколебания).

Для исследования динамики обрабатывающей системы ее необходимо разомкнуть, т.к. в действительности она является замкнутой динамической системой, и приложить к ней данные нагрузки. Система «замыкается» в точке контакта режущего инструмента с обрабатываемой поверхностью детали. Для «размыкания» системы необходимо ввести в точке контакта действующее там контактное усилие, которое соответствует по интенсивности и частотному составу указанным внешним нагрузкам.

Разные по природе внешние нагрузки одинаковы в одном – они оставляют вибрационный след на обработанной поверхности, периодически изменяя радиус следа на поверхности детали r_d . Данный след представляет собой отпечаток режущей части лезвия инструмента, характеризующейся радиусом вершины резца (зуба фрезы) r_e (рис. 2.17 а).

Образно выражаясь, заготовка, например, при работе обрабатывающей системы токарного станка, играет роль своеобразного «воскового валика», на котором записывается «мелодия» (фонограмма) звуковой волны, сопровождающей работу данной системы. Эта фонограмма, называемая в данном случае шероховатостью (поперечной, винтовой, рис. 2.17 б), стандартизирована под названием профиль шероховатости (рис. 2.18 [182]).

Данную фонограмму так же, как и при звуковоспроизведении, можно «считывать», поменяв местами причину и следствие. В науке данный подход к исследованию динамики систем носит название «принцип обратимости» [183]. «Принцип обратимости» позволяет рассматривать колебания обрабатывающей

системы, абстрагируясь от причин этих колебания, которые могут быть весьма сложными и до конца не изученными. Профиль шероховатости с точки зрения теории колебаний является не чем иным, как графиком, описывающим

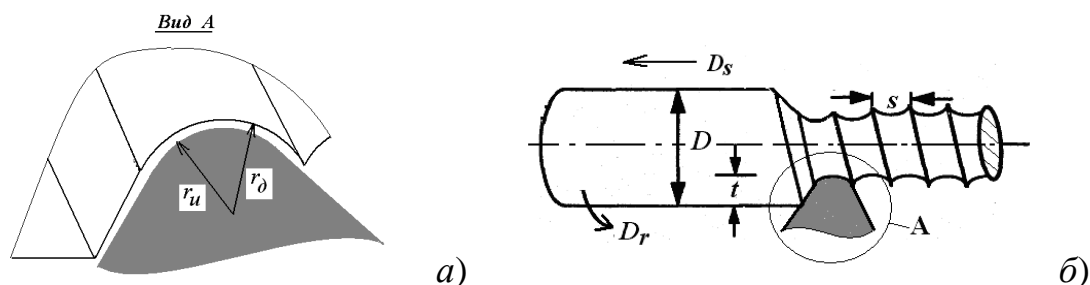


Рисунок 2.17 – Вибрационный след на обработанной поверхности детали

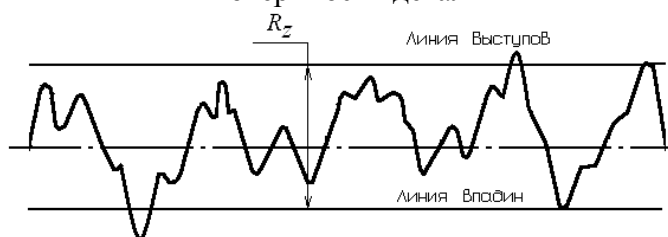


Рисунок 2.18 – Профиль шероховатости

механические колебания обрабатывающей системы во временной области. Данный график содержит информацию об уровне и частотном составе колебаний системы. В процессе этих колебаний заготовка и лезвие инструмента (резца, фрезы и др.) осуществляют контактное взаимодействие, характеризующееся контактным усилием $P_{кон}$.

Амплитуда контактного усилия определяется в соответствии с теорией Герца по следующей формуле [181]:

$$P_{кон} = \lambda \Delta^{1,5}, Н \quad (2.15)$$

где λ – постоянная, зависящая от геометрии соприкасающихся поверхностей и характеристик материала; Δ – расстояние, на которое сближаются инструмент и заготовка при их контактном взаимодействии.

$$\lambda = \frac{4}{3} \left(\frac{E_\delta E_u}{(1-\mu_\delta^2)E_u + (1-\mu_u^2)E_\delta} \right) \sqrt{\frac{-r_\delta r_\epsilon}{-r_\delta + r_\epsilon}}, \quad (2.16)$$

где E_δ и E_u – модуль упругости, соответственно, материала заготовки ($E_\delta = 2.1 \cdot 10^{11}$ МПа) и инструментального материала ($E_u = 6.3 \cdot 10^{11}$ МПа); μ_δ и μ_u –

коэффициент Пуассона соответственно, материала заготовки и инструментального материала (в расчетах было принято, что они равны величине 0,28); r_δ и r_ϵ – радиус, соответственно, следа от резца на обрабатываемой поверхности заготовки и радиус вершины инструмента ($r_\epsilon = 0,4 \dots 2,4$ мм [1]).

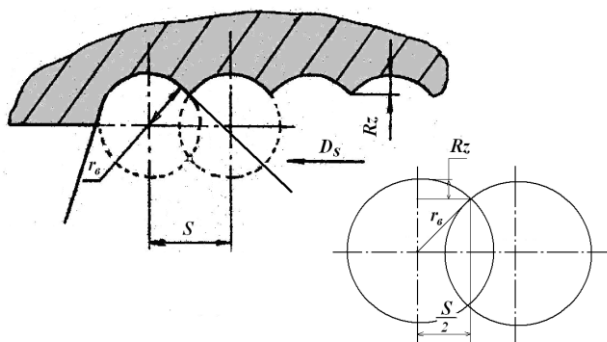


Рисунок 2.19 – Схема образования профиля

Радиус следа от резца r_δ имеет знак минус, т.к. он характеризует вогнутую поверхность. В расчете было принято, что его величина на 10 % превышает радиус при вершине резца r_δ ($r_\delta = -1,1r_\epsilon$). Таким образом, были учтены взаимные колебания

инструмента и заготовки, исключающие точное копирование следом инструмента геометрии его режущей части. С учетом этого допущения, а так же, полагая, что коэффициенты Пуассона материалов заготовки и режущей пластины примерно равны, выражение (2.16) примет следующий вид:

$$\lambda = \frac{4}{3(1-\mu^2)} \left(\frac{E_\delta E_u}{E_u + E_\delta} \right) \sqrt{11r_\epsilon}. \quad (2.17)$$

В качестве параметра Δ в расчётах рассматривался высотный параметр шероховатости R_z [182].

Шероховатость и радиус при вершине инструмента связаны между собой следующим выражением [5].

$$R_z = 125 \cdot \frac{S^2}{r_\epsilon}, \text{ мкм} \quad (2.18)$$

где S – подача, мм/об.

Эта формула получена из совместного решения уравнений двух окружностей радиусом, который равняется радиусу вершины лезвия резца, смещенных на величину подачи S (рис. 2.19) и последующим разложением её в ряд Тейлора с удержанием первого линейного члена ряда.

$$R_Z = r_\epsilon - r_\epsilon \sqrt{1 - \frac{S^2}{4r_\epsilon^2}} \approx \frac{S^2}{8r_\epsilon}, \quad (2.19)$$

где R_Z – расчетная величина неровностей, мм.

Радиус вершины инструмента r_ϵ в процессе его износа изменяется, в соответствии с этим изменяется и контактное усилие $P_{кон}$. Получим аналитическое описание этих изменений для каждого из участков кривой изнашивания.

Рассмотрим моделирование износа инструмента на каждом из участков кривой изнашивания.

2.5.2.1.1 Участок нормального износа инструмента

Длительность участка нормального износа инструмента связана с его износостойкостью I . Износостойкость режущего инструмента обратная по величине интенсивности износа J ($I = 1/J$).

$$J = \frac{h}{L} = \frac{V_h}{v} \cdot 10^{-3}, \quad (2.20)$$

где h – величина износа, мм; L – путь, который проходит инструмент в процессе механической обработки, мм; V_h – скорость износа, мм/мин; v – скорость резания, м/мин.

Здесь и далее под износом понимается размерный износ поверхности инструмента h_r . В период нормального износа (участок AB , рис. 2.16 а) выражение (2.20) можно представить в следующем виде:

$$J = \frac{h_i - h_{np}}{(\tau_i - \tau_{np}) \cdot v} = \frac{h_{on} - h_i}{(T_{ни} - \tau_i) \cdot v}, \quad (2.21)$$

где: h_i, h_{np}, h_{on} – величины абсолютного износа, соответственно, текущая, наблюдаемая в момент времени τ_i , исходная (начальная), фиксируемая после приработки инструмента в течение времени τ_{np} , максимальная, соответствующая оптимальному износу инструмента в конце участка нормального износа, при наработке, равной $T_{ни}$.

Во временном интервале $\tau_{np} - T_{ни}$, соответствующем времени бездефектной эксплуатации инструмента на участке нормального износа, интенсивность износа

постоянна по величине ($J=const$) и кривая на этом участке (участке AB) приближается к прямой. Поэтому на этом участке выражение (2.21) можно переписать следующим образом:

$$\frac{h_i - h_{np}}{h_{on} - h_i} = \frac{\tau_i - \tau_0}{T_{ни} - \tau_i}. \quad (2.22)$$

Преобразуем данное равенство относительно текущей величины износа h_i :

$$h_i = h_{np} \frac{T_{ни} - \tau_i}{T_{ни} - \tau_{np}} + h_{on} \frac{\tau_i - \tau_0}{T_{ни} - \tau_0}. \quad (2.23)$$

Если пренебречь незначительным по величине исходным износом h_{np} , или принять эту величину за точку отсчета, то выражение (2.23) можно упростить:

$$h_i = h_{on} \frac{\tau_i - \tau_0}{T_{ни} - \tau_0}. \quad (2.24)$$

Износ, как правило, сопровождается увеличением радиуса $r_с$ вершины лезвия инструмента (рис.2.20, выноска B):

$$r_{ei} = r_{e0} + (h_i - h_{np}) \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{1 - \sin \frac{\beta}{2}}, \quad (2.25)$$

где r_{e0} – исходное значение радиуса вершины резца.

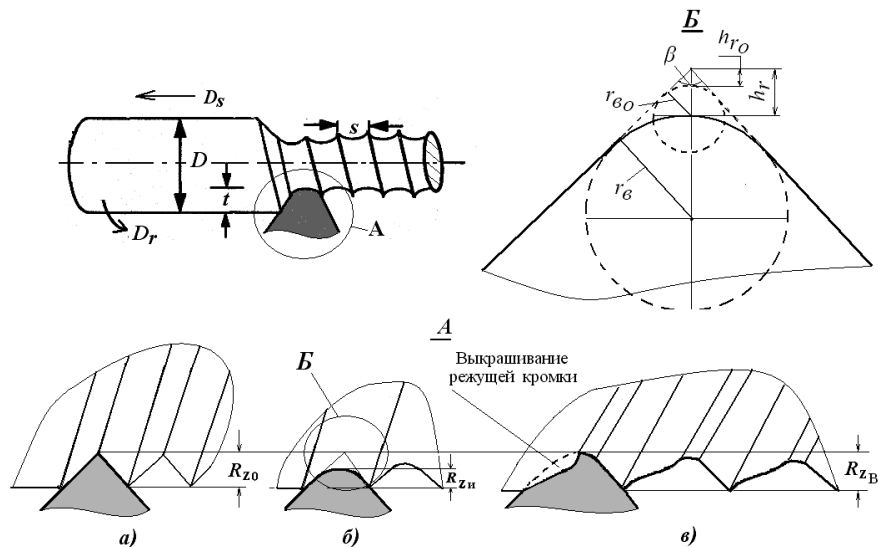


Рисунок 2.20 – Изменение геометрии лезвия инструмента по мере его износа:
 а) острозаточенный инструмент; б) инструмент на участке нормального износа;
 в) инструмент на участке катастрофического износа

Перейдем в выражении (2.25) от изменения радиального

износ непосредственно к изменению радиуса вершины резца, учитывая геометрическую зависимость между этими изменениями

$$\left(r_{ei} - r_{e0} = (h_i - h_{np}) \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{1 - \sin \frac{\beta}{2}} \right);$$

$$r_{ei} = r_{e0} + (r_{e\max} - r_{e0}) \frac{\tau_i - \tau_{np}}{T_{ни} - \tau_{np}}. \quad (2.26)$$

Параметр $r_{e\max}$ удобно выразить через радиус вершины лезвия остро заточенного инструмента r_{e0} при $\tau = \tau_{np}$, т.е.

$$r_{e\max} - r_{e0} = \gamma r_{e0} - r_{e0} = (\gamma - 1) r_{e0}. \quad (2.27)$$

где $\gamma = 1.1; 1.2; 1.3; \dots 2 \dots, 3$.

С учетом (2.27) выражение (2.26) запишется в следующем виде:

$$r_{ei} = r_{e0} + (\gamma - 1) r_{e0} \frac{\tau_i - \tau_{np}}{T_{ни} - \tau_{np}}. \quad (2.28)$$

Данное выражение получено для идеализированного случая, когда трущаяся пара не испытывает какого-либо внешнего воздействия. Эта модель применима для слабонагруженных узлов сухого трения, но не для экстремальных условий резания, где износ инструмента происходит при очень больших давлениях (до 2000-5000 МПа), высоких температурах, достигающих до температур плавления, и значительных истинных площадях контакта.

Величина износа в основном зависит от скорости резания (скорости нагружения), толщины среза и величины переднего угла режущего клина. Износ происходит при сложном взаимном влиянии вибраций и вида трения, приводящих к появлению наростов и интенсивному разрушению поверхностных слоев рабочих поверхностей лезвия инструмента.

Кроме этого процесс трения при резании протекает между двумя относительно чистыми поверхностями: ювенальной, только, что образованными поверхностями резания и стружки, и поверхностями инструмента, непрерывно «очищающимися»: сходящей стружкой (передней) и поверхностями резания и обработанной (задними – главной и вспомогательной). Трущиеся поверхности скользят относительно друг друга с большой скоростью.

Таким образом, модель износа инструмента при резании является достаточно сложной и многопараметрической. Однако в рассматриваемом случае интерес представляет не количественные, а качественные трендовые характеристики износа инструмента. Для решения данной задачи можно ограничиться упрощенной моделью (2.28), являющейся функцией времени. Для учета нелинейного характера поведения износа во времени введем в функцию (2.28) показатель степени.

$$r_{ei} = r_{e0} + (\gamma - 1) r_{e0} \left(\frac{\tau_i - \tau_{np}}{T_{nu} - \tau_{np}} \right)^\alpha. \quad (2.29)$$

2.5.2.1.2 Участок катастрофического износа (разрушения) инструмента

На участке катастрофического износа (участок B_1C , рис. 2.16 *a*) начинают сказываться результаты выкрашивания лезвия, изменяющего его микрогеометрию. Выкрашивание приводит к искажению микрогеометрии режущей кромки и, в частности, может вызывать и уменьшение радиуса вершины резца, (рис. 2.19 *в*). Все это происходит на фоне продолжающегося износа, оказывающего противоположное воздействие на радиус вершины, т.е. увеличивающего его. Эти два процесса можно описать следующим образом:

$$r_e = (r_{e0} + \Delta r_u) - \Delta r_e, \quad (2.30)$$

где $\Delta r_u, \Delta r_e$ – изменение радиуса, соответственно, вследствие износа и выкрашивания.

Выражение в скобках характеризует увеличение радиуса вследствие износа лезвия (формула (2.29)). Запишем выражение для параметра Δr_e , характеризующего уменьшение радиуса вершины лезвия инструмента вследствие выкрашивания:

$$\Delta r_e = \Delta r_{e \max} \left(\frac{\tau_i - \tau_{np}}{T_{ku} - \tau_{np}} \right)^\beta. \quad (2.31)$$

При этом параметр $\Delta r_{e \max}$ представляет собой разницу между величиной радиуса, реализуемой вследствие износа резца $(r_{e0} + \Delta r_u)$ и его минимальной

величиной, реализуемой при наступлении предельно допустимой степени выкрашивания лезвия $r_{\text{выкр}}^{\min}$. Выразим этот параметр в долях η от величины радиуса инструмента, подвергающегося износу $(r_{\text{e0}} + \Delta r_u)$ и запишем выражение для параметра $\Delta r_{\text{e max}}$.

$$\Delta r_{\text{e max}} = (r_{\text{e0}} + \Delta r_u) - r_{\text{выкр}}^{\min} = (r_{\text{e0}} + \Delta r_u) - \eta (r_{\text{e0}} + \Delta r_u) = (r_{\text{e0}} + \Delta r_u) \cdot (1 - \eta). \quad (2.32)$$

Запишем равенство (2.30) с учетом (2.31) и (2.32).

$$r_{\text{ei}} = (r_{\text{e0}} + \Delta r_u) \left[1 - (1 - \eta) \left(\frac{\tau_i - \tau_{\text{np}}}{T_{\text{ки}} - \tau_{\text{np}}} \right)^\beta \right]. \quad (2.33)$$

Выражение в круглых скобках, характеризующее увеличение радиуса вследствие износа, заменим соотношением (2.29).

$$r_{\text{ei}} = \left[r_{\text{e0}} + (\gamma - 1) r_{\text{e0}} \left(\frac{\tau_i - \tau_{\text{np}}}{T_{\text{ни}} - \tau_{\text{np}}} \right)^\alpha \right] \cdot \left[1 - (1 - \eta) \left(\frac{\tau_i - \tau_{\text{np}}}{T_{\text{ки}} - \tau_{\text{np}}} \right)^\beta \right]. \quad (2.34)$$

Выражение (2.34) описывает изменение с течением времени из-за комбинации процессов размерного износа и выкрашивания режущей кромки радиуса вершины резца. При этом параметры $T_{\text{ни}}$ и $T_{\text{ки}}$ представляют собой наработку инструмента до его замены из-за предельно допустимого размерного износа на участке нормального износа AB (рис. 2.16 а) и выкрашивания режущей кромки на участке предкатастрофического BB_1 и катастрофического износа B_1C (рис. 2.16 а), соответственно.

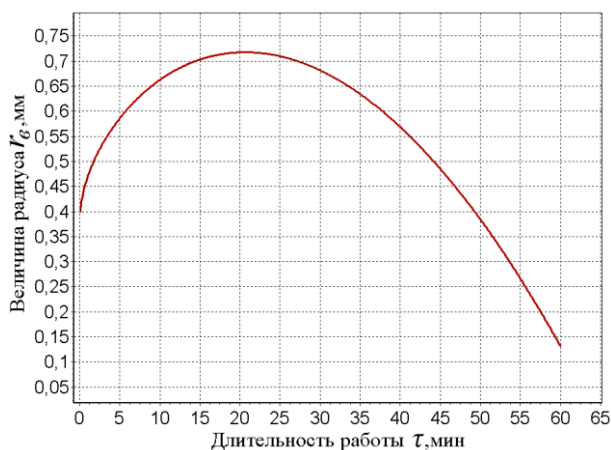


Рисунок 2.21 – Изменение радиуса вершины лезвия резца

На рис. 2.21 приведен характер изменения радиуса r_e , рассчитанный для случая, когда: $T_{\text{ни}} = 150$ мин, $T_{\text{ки}} = 60$ мин, $\gamma = 5$, $\eta = 0,1$, $\alpha = 0,5$, $\beta = 1,5$.

Из рис. 2.21 следует, что к 20 мин резания радиус вершины лезвия инструмента вследствие его износа достигает максимума. Затем, в процессе

выкрашивания, радиус начинает уменьшаться и на 60 мин резания составляет величину, порядка, 0.1 от исходного r_{B0} . На практике, из-за разнообразного сочетания 6-ти параметров модели (2.34), отражающих в определенной мере разнообразие, как режимов работы обрабатывающей системы, так и сочетаний материалов заготовки и инструмента, характер данной кривой может быть так же весьма разнообразным.

С учетом (2.34) выражение (2.18) примет следующий вид:

$$R_Z = 125 \cdot \frac{S^2}{\left[r_{e0} + (\gamma - 1) r_{e0} \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{ни} - \tau_0} \right)^\alpha \right] \cdot \left[1 - (1 - \eta) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{ки} - \tau_0} \right)^\beta \right]}, \text{ мкм.} \quad (2.35)$$

Проанализируем изменение с течением времени, шероховатости, обусловленное износом и изменением геометрии из-за выкрашивания режущей части лезвия. Для общности получаемых результатов перейдем к относительной величине шероховатости \bar{R}_Z , равной отношению текущего значения шероховатости R_Z к ее исходной величине ($R_{Z0} = 125 \cdot \frac{S^2}{r_{e0}}$), избавившись одновременно от коэффициента размерности 125, величин подачи S и радиуса r_{e0} .

$$\bar{R}_Z = \frac{1}{\left[1 + (\gamma - 1) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{ни} - \tau_0} \right)^\alpha \right] \cdot \left[1 - (1 - \eta) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{ки} - \tau_0} \right)^\beta \right]}. \quad (2.36)$$

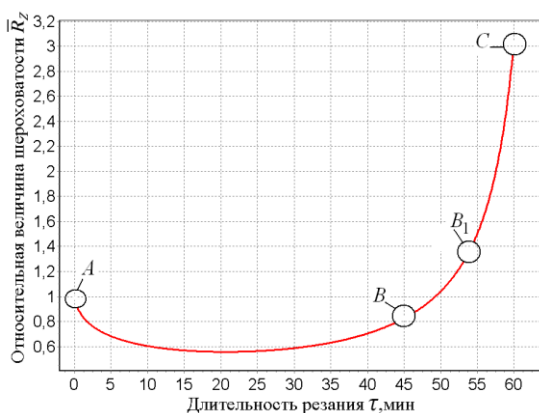


Рисунок 2.22 – Изменение шероховатости с течением времени по мере изменения состояния режущего инструмента

График изменения функции (2.36) показан на рис. 2.22. Расчет проводился для следующих параметров: $T_{ни} = 150$ мин, $T_{ки} = 60$ мин, $\gamma = 5$, $\eta = 0.1$, $\alpha = 0.6$, $\beta = 1.5$. Как следует из графика, шероховатость вначале до 20 мин, по мере увеличения радиуса вершины резца, уменьшается, а потом, по мере выкрашивания лезвия, начинает возрастать, достигая к 50 мин исходного значения. К 60 мин шероховатость в

три раза превышает свое исходное значение, имевшее место при остро заточенном резце.

На тренде шероховатости можно так же выделить характерные участки, согласующиеся с одноименными участками кривой износа инструмента.

С учетом (2.16) и (2.18) выражение (2.15) примет следующий вид:

$$P_{\text{кон}} = \frac{1}{5(1-\mu^2)} \left(\frac{E_\delta E_u}{E_u + E_\delta} \right) \frac{S^3}{r_\delta}, H. \quad (2.37)$$

Из (2.37) следует, что контактное усилие в сильной степени зависит от подачи S . Подставим в (2.37) выражение (2.34), учитывающее изменение радиуса вершины резца в процессе его эксплуатации.

$$P_{\text{кон}} = \frac{1}{5(1-\mu^2)} \left(\frac{E_\delta E_u}{E_u + E_\delta} \right) \frac{S^3}{\left[r_{\delta 0} + (\gamma - 1) r_{\delta 0} \left(\frac{\tau_i - \tau_0}{T_{\text{ни}} - \tau_0} \right)^\alpha \right] \cdot \left[1 - (1 - \eta) \left(\frac{\tau_i - \tau_0}{T_{\text{ки}} - \tau_0} \right)^\beta \right]}, H. \quad (2.38)$$

Разделив (2.38) на (2.37), полагая в (2.37), что $r_\delta = r_{\delta 0}$, получим выражение для безразмерной величины контактного усилия $\bar{P}_{\text{кон}}$.

$$\bar{P}_{\text{кон}} = \frac{1}{\left[1 + (\gamma - 1) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{\text{ни}} - \tau_0} \right)^\alpha \right] \cdot \left[1 - (1 - \eta) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{\text{ки}} - \tau_0} \right)^\beta \right]} \quad (2.39)$$

Как видим, выражения (2.36) и (2.39) идентичны, следовательно, контактное усилие и шероховатость изменяются идентично (рис. 2.22) по мере изменения состояния режущего лезвия инструмента.

Выше было показано, что контактное усилие является функцией времени, т.к. его величина изменяется с течением времени по мере изменения состояния лезвия инструмента. Однако если его рассматривать в виде динамического воздействия на обрабатываемую систему, то его необходимо рассматривать и как функцию частоты.

Другими словами, входное воздействие, обозначим его величиной P , является одновременно функцией исходной величины контактного усилия, частоты и времени:

$$P(P_{кон0}, \tau, \omega) = P_{кон0} \cdot K_{\tau} \cdot K_{\omega}, \quad (2.40)$$

где: $P_{кон0} = \frac{1}{5(1-\mu^2)} \left(\frac{E_{\delta} E_u}{E_u + E_{\delta}} \right) \frac{S^3}{r_{e0}}$ – исходное значение контактного усилия,

фиксируемого при острозаточенном резце ($r_e = r_{e0}$);

$$K_{\tau} = \bar{P}_{кон} = \frac{1}{\left[1 + (\gamma - 1) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{ни} - \tau_0} \right)^{\alpha} \right] \cdot \left[1 - (1 - \eta) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{ки} - \tau_0} \right)^{\beta} \right]} - \text{временной множитель,}$$

равный безразмерному контактному усилию (2.39), где: $\gamma, T_{ни}, \eta, T_{ки}, \alpha, \beta$ – параметры временного множителя, определяемые при идентификации параметров звуковой волны (рис. 2.23), сопровождающего работу обрабатывающей системы;

$$K_{\omega} = \frac{\omega_i^2}{\sqrt{(\omega_{ш}^2 - \omega_i^2)^2 + \frac{\omega_{ш}^2}{Q^2} \omega_i^2}} - \text{частотный множитель, где: } \omega_i - \text{переменная}$$

круговая частота возмущающего воздействия; $\omega_{ш}$ – постоянная круговая частота возмущающего воздействия, генерируемая оборотами шпинделя; Q – степень усиления возмущающего воздействия на частоте колебаний $\omega_{ш}$, $Q = 1, 2, 3 \dots 15$.

Период колебаний $T_{ш}$ равен:

$$T_{ш} = \frac{60}{n}, \text{ с,} \quad (2.41)$$

где: n – число оборотов, об/мин.

Соответственно частота колебаний $\omega_{ш}$ будет равна величине, обратной периоду:

$$\omega_{ш} = 2\pi \cdot \frac{n}{60}, \text{ 1/с,} \quad (2.42)$$

На рис. 2.23 приведены полученные в эксперименте тренды звука, сопровождающего работу обрабатывающей системы токарного и фрезерного станков на режимах, приведенных в разд. 5. Тренды звука, сопровождающего работу разных обрабатывающих систем, на которых обрабатывались заготовки из отличающихся марок сталей, практически идентичны, что свидетельствует об

идентичном влиянии контактного усилия на поведение тренда звука вне зависимости от типа обрабатывающей системы и марки обрабатываемого материала.

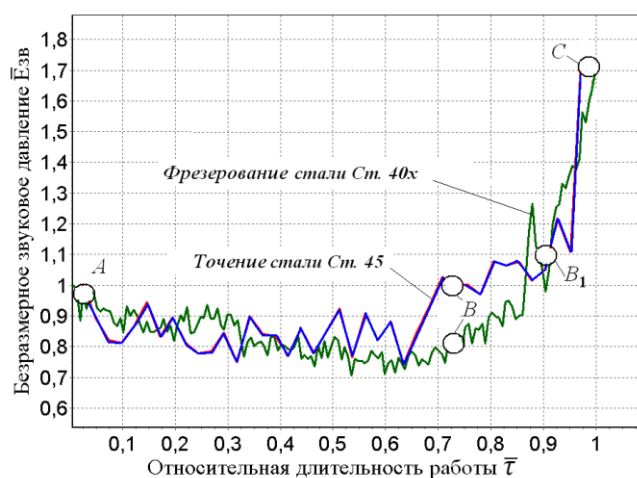


Рисунок 2.23 – Тренды звука, сопровождающего работу обрабатывающей системы токарного и фрезерного станков

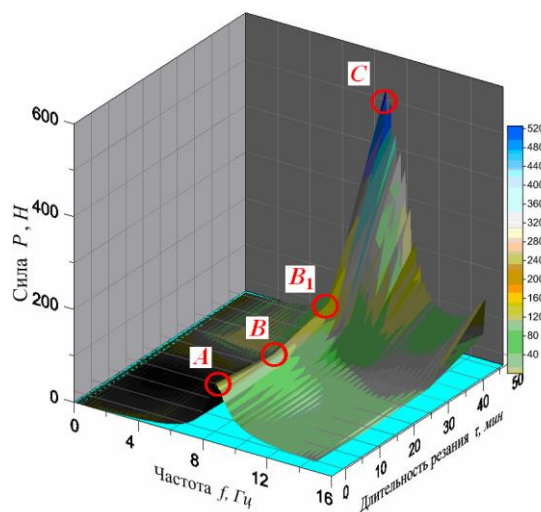


Рисунок 2.24 – Трехмерная диаграмма, иллюстрирующая изменение амплитуды возмущающего усилия P по частоте и по времени

На рис. 2.24 показана трехмерная диаграмма иллюстрирующая изменение возмущающего усилия P по частоте и по времени, рассчитанная по формуле (2.50) для следующих параметров: $\gamma = 4$, $\eta = 3$, $T_{ни} = 112$ мин, $T_{ки} = 104$ мин, $\alpha = 0.6$, $\beta = 1.5$, $\omega_{ш} = 8,8 \cdot 2\pi = 55,3$ с⁻¹. Из рис.2.24 следует, что пик возмущающего усилия, приходящийся на частоту, генерируемую шероховатостью, с течением времени, по мере изменения состояния режущего лезвия инструмента, возрастает. На диаграмме, так же, как и на плоских графиках, выделяются участки, коррелирующие с участками классической кривой износа режущего инструмента.

Полученные выше выражения для возмущающего усилия (2.40) были использованы при разработке и анализе колебаний рассмотренных ниже динамических моделей обрабатывающих систем.

2.5.2.2 Моделирование влияния разрушения режущего инструмента на динамическое поведение обрабатывающей системы

В качестве причины разрушения режущего инструмента, проявляющегося в сколе его режущего лезвия (зуба фрезы) будем рассматривать усталостное разрушение. В процессе эксплуатации инструмента исходные микротрещины объединяются в одну магистральную трещину. Увеличение длины трещины приводит к уменьшению «строительной высоты» лезвия H_0 (рис. 2.25), что влечет

за собой уменьшение жесткости лезвия $K_L(\tau)$.

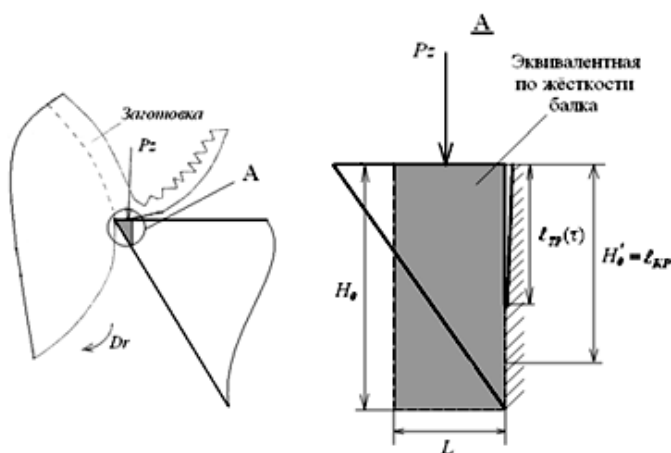


Рисунок 2.25 – Расчетная схема лезвия инструмента при наличии у него трещины

Лезвие вблизи его режущей кромки представлялось в виде эквивалентной по жесткости консольной балки (рис. 2.25), исходная жесткость которой (K_{KB}) равнялась жесткости лезвия $K_L(0)$ при отсутствии в нем трещины. Жесткость эквивалентной консольной балки можно описать следующим известным выражением [177]:

$$K_{KB} = \frac{E \cdot B \cdot H_0^3}{4 L^3}, \text{ Н/м}, \quad (2.43)$$

где E – модуль упругости твердого сплава ($E = 6,1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$); параметр B – ширина эквивалентной балки, H_0 – строительная высота балки, эквивалентной по жесткости лезвию при отсутствии в нем трещины; L – длина балки (рис. 2.25).

Для определенности в расчетах параметр H_0 принимался равным максимально допустимому износу по задней поверхности резца (h_3). При моделировании полагали, что развитие трещины ($l_{Tp}(\tau)$) приводит к уменьшению строительной высоты балки ($H(\tau) = H_0 - l_{Tp}(\tau)$), что в свою очередь уменьшает ее жесткость. Изменение жесткости лезвия $K_L(\tau)$ во времени описывалось следующим выражением:

$$K_L(\tau) = K_L(0) \cdot \left(\frac{H(\tau)}{H_0} \right)^3 = K_L(0) \cdot \left(\frac{H_0 - l_{Tp}(\tau)}{H_0} \right)^3 = K_L(0) \cdot \left(1 - \frac{l_{Tp}(\tau)}{H_0} \right)^3, \quad (2.44)$$

где $K_L(0)$ – исходная жесткость лезвия при отсутствии в нем трещины

($K_L(0) = K_{KB}$), Н/м ; $l_{Tp}(\tau)$ – текущая длина трещины ($l_{Tp}(\tau) = H_0' \cdot e^{\ln 1000 \cdot \left(\frac{\tau}{T_c} - 1 \right)}$, мм , [30]); H_0' – величина скола, равная критической длине трещины l_{KP} (рис. 2.25), при которой происходит неконтролируемое развитие трещины и разрушение режущей кромки [44] (в расчете полагалось, что $H_0' = H_0$); T_c – ресурс режущего

инструмента, равная его наработке до скола лезвия, мин.

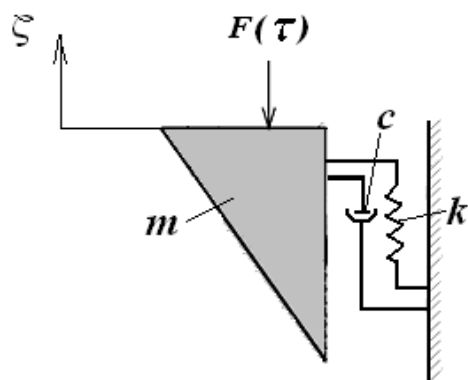


Рисунок 2.26 – Динамическая модель, откалывающейся части лезвия, описывающая поведение лезвия по мере развития в нем трещины

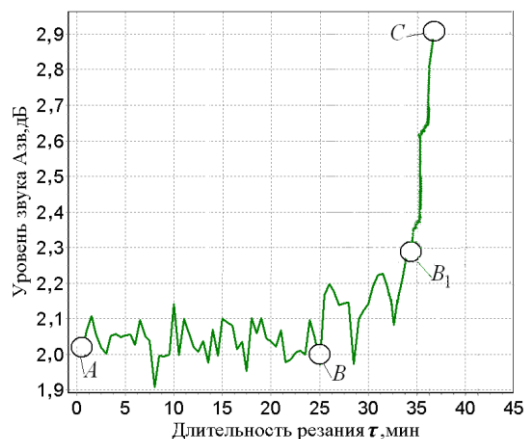


Рисунок 2.27 – Изменение уровня звука, генерируемого лезвием по мере развития в нем трещины

Динамическая модель, описывающая колебания откалывающейся части лезвия (зуба фрезы), показана на рис. 2.26. На рис. 2.27 приведен характер изменения с течением времени уровня звука ($A_{зв} = 20 \lg \left(\frac{E_{зв}}{2 \cdot 10^{-5}} \right)$, дБ), генерируемого нагружаемой частью лезвия (рис. 2.28) по мере развития в нем трещины.

Колебания модели откалывающейся части лезвия описывались дифуравнением (2.45).

$$m\ddot{\zeta} + c\dot{\zeta} + k\zeta = F(t). \quad (2.45)$$

Изменение жесткости модели во времени происходило в соответствии с уравнением (2.44).

Масса m , коэффициент вязкого сопротивления c и коэффициент жесткости k приведены в Приложении А в табл. А.1 и А.2. Колебания нагружаемой части лезвия рассматривалось до момента ее отделения от резца, т.е. до момента скола.

2.5.3 Определение параметров моделей

Взаимное расположение инерционных и упругодемпфирующих элементов моделей определялось конструктивно - компоновочной схемой моделируемых обрабатывающих систем токарного и фрезерного станков. Численные значения указанных динамических элементов находились путем параметрической идентификации математической модели обрабатывающих систем по результатам

экспериментально определенных в эксперименте их частотных характеристик [178].

Эти параметры характеризовали исходное динамическое состояние модели при отсутствии, каких либо дефектов. Исключение составляла масса m_1 части режущего лезвия, прилегающей к режущей кромке инструмента, которая

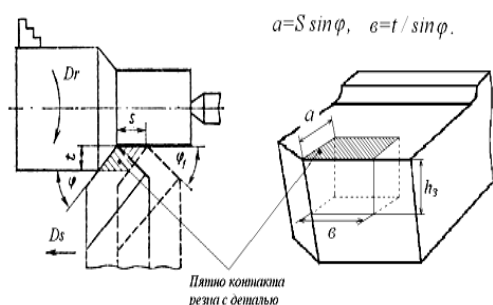


Рисунок 2.28 – Объем лезвия, испытывающий силовое воздействие

определялась расчетным методом. При этом величина m_1 принималась равной массе параллелепипеда (рис. 2.28), основанием которого является площадь пятна контакта лезвия со срезаемым слоем заготовки, а высота, равняется предельно допустимой величине износа по задней поверхности инструмента h_3 .

При этом принималось, что (в первом приближении) площадь пятна контакта равна площади поперечного сечения срезаемого слоя заготовки.

В соответствии с этим масса m_1 определялась по следующей формуле:

$$m_1 = (t \cdot S \cdot h_3 \cdot \rho), \text{ кг}, \quad (2.46)$$

где t - глубина резания, мм; S - величина подачи, мм/об; h_3 - величина износа по задней поверхности мм; ρ - удельная плотность, кг/мм³.

Масса державки резца m_2 определялась по следующей формуле:

$$m_2 = L \cdot H \cdot B \cdot \rho, \text{ кг}, \quad (2.47)$$

Оценка частоты собственных (парциальных) колебаний лезвия вблизи режущей кромки f_1 проводились в предположении, что оно представляет собой упругое тело объемом v . В этом случае низшая частота колебаний, которая может возникнуть в данном объеме, определялась по следующей формуле [179]:

$$f_1 = c_{3B} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{2\pi \cdot v}}, \text{ Гц}, \quad (2.48)$$

где c_{3B} – скорость распространения упругих поперечных волн в твердом сплаве

($c_{3B} = 3230 \text{ м/с}$ [179]); v – объем лезвия вблизи режущей кромки ($v = t \cdot S \cdot h_3$).

Парциальная частота колебаний державки резца f_2 , определялась, как частота колебаний стержня по следующей формуле [177].

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \left(k + \frac{1}{2} \right) \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{E F}{\mu L^2}}, \text{Гц}, \quad (2.49)$$

где k – число узлов (для консольного закрепления $n=1$); μ – погонная масса стержня, кг/м ; F – площадь поперечного сечения ($F = H \cdot B$, м^2); E – модуль упругости стали ($E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$).

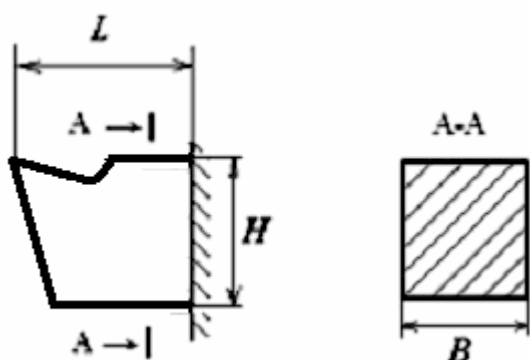


Рисунок 2.29 – Расчетная схема стержня модели.

Параметры B , H и L указаны на рис. 2.29. Значения приведенных масс, парциальных частот и добротностей Q_i парциальных резонансов остальных моделируемых узлов токарного станка (Приложение А табл. А.1), уточнялись, как уже было сказано выше, методом идентификации параметров динамической

Процедура идентификации заключалась в минимизации невязки между фактическим $E_{3B}^{\phi}(\omega)$ и расчетным $E_{3B}^p(\omega)$ спектрами звуковой волны.

$$U = \sum_{i=1}^n \left(E_{3B}^{\phi}(\omega_i) - E_{3B}^p(\omega_i) \right)^2 \quad (2.50)$$

где n – число частот фактического и расчетного спектров, на которых осуществлялось их сравнение ($n = 4096 \text{ шт}$).

Для идентификации использовался фактический спектр, характеризовавший звуковую волну, сопровождавшую работу моделированных обрабатывающих систем при отсутствии у них дефекта, т.е. при острозаточенном инструменте. Фактические спектры определялись в экспериментах, описанных в разд. 5.

Полученные выше численные значения параметров жесткости и демпфирования были использованы при разработке и анализе колебаний

рассмотренных ниже динамических моделей обрабатывающих систем токарного и фрезерного станков.

2.5.4 Динамические модели обрабатывающих систем типового металлообрабатывающего оборудования

Масса, жесткость и демпфирующие свойства моделируемых узлов обрабатывающих систем обозначаются на приведенных ниже схемах моделей, соответственно, через m , k и c . Эти параметры характеризуют пространственные парциальные колебания каждого из моделируемых узлов обрабатывающих систем. Дифуравнения посредством метода комплексных амплитуд, использующего подстановку: $\xi(\tau) = \xi_A \cdot \exp(i\omega\tau)$, где ξ_A – амплитуда колебаний центра масс моделируемого конструктивного элемента обрабатывающей системы преобразовывались в систему алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами [182]. Данная система алгебраических уравнений решалась методом Гаусса, для чего была разработана специальная компьютерная программа.

2.5.5 Описание динамической модели обрабатывающей системы токарного станка 16К20Т1

Схема модели приведена на рис. 2.30. Ее колебания описывались посредством шести дифуравнений (2.51).

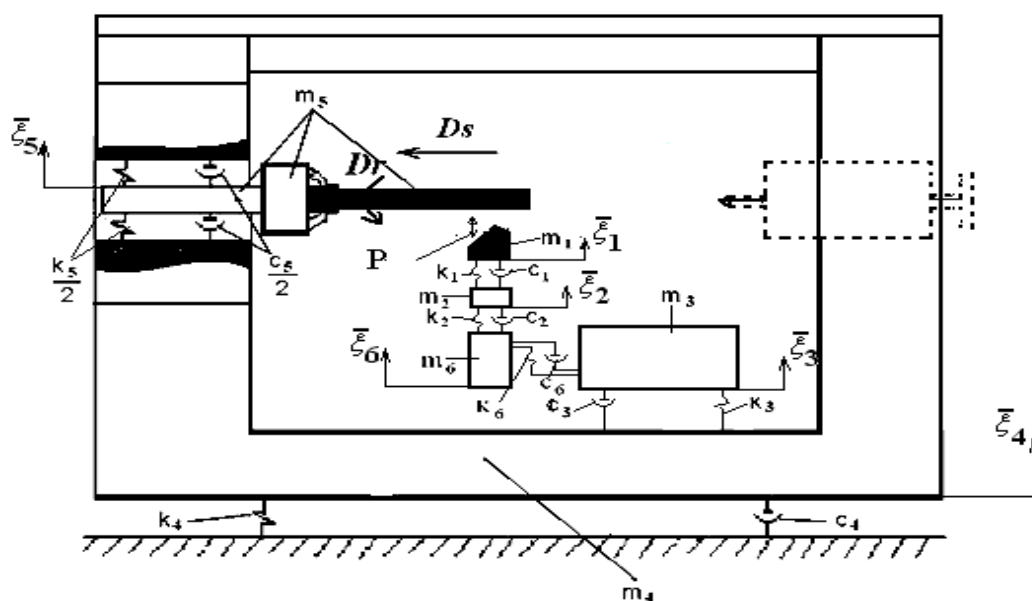


Рисунок 2.30 – Динамическая модель обрабатывающей системы токарного станка 16К20Т1

Моделировались колебания следующих элементов обрабатывающей системы: лезвия инструмента (m_1, k_1, c_1); державки резца (m_2, k_2, c_2); суппорта (m_3, k_3, c_3); резцедержателя (револьверной головки) (m_6, k_6, c_6); станины станка с передней и задней бабками (m_4, k_4, c_4); шпинделя вместе с патроном и обрабатываемой заготовкой (m_5, k_5, c_5). Параметры модели приведены в Приложении А в табл. А.1. Амплитуда возмущающей силы $P_0 = 107 \text{ Н}$.

Дифференциальные уравнения:

$$\begin{aligned}
 1) & m_1 \ddot{\zeta}_1 + c_1(\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_2) + k_1(\zeta_1 - \zeta_2) = P(t); \\
 2) & m_2 \ddot{\zeta}_2 - c_1(\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_2) - k_1(\zeta_1 - \zeta_2) + c_2(\dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_6) + k_2(\zeta_2 - \zeta_6) = 0; \\
 3) & m_3 \ddot{\zeta}_3 - c_6(\dot{\zeta}_6 - \dot{\zeta}_3) - k_6(\zeta_6 - \zeta_3) + c_3(\dot{\zeta}_3 - \dot{\zeta}_4) + k_3(\zeta_3 - \zeta_4) = 0; \\
 4) & m_4 \ddot{\zeta}_4 - c_3(\dot{\zeta}_3 - \dot{\zeta}_4) - k_3(\zeta_3 - \zeta_4) + c_5(\dot{\zeta}_4 - \dot{\zeta}_5) + k_5(\zeta_4 - \zeta_5) \\
 & + c_4 \dot{\zeta}_4 + k_4 \zeta_4 = 0; \\
 5) & m_5 \ddot{\zeta}_5 - c_4(\dot{\zeta}_4 - \dot{\zeta}_5) - k_4(\zeta_4 - \zeta_5) = -P(t); \\
 6) & m_6 \ddot{\zeta}_6 - c_6(\dot{\zeta}_3 - \dot{\zeta}_6) - k_6(\zeta_3 - \zeta_6) - c_2(\dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_6) + k_2(\zeta_2 - \zeta_6) = 0.
 \end{aligned} \tag{2.51}$$

Алгебраические уравнения:

$$\begin{aligned}
 1) & -m_1 \omega^2 \zeta_1 + i \omega c_1(\zeta_1 - \zeta_2) + k_1(\zeta_1 - \zeta_2) = P(t, \omega); \\
 2) & -m_2 \omega^2 \zeta_2 - i \omega c_1(\zeta_1 - \zeta_2) - k_1(\zeta_1 - \zeta_2) + i \omega c_2(\zeta_2 - \zeta_6) + k_2(\zeta_2 - \zeta_6) = 0; \\
 3) & -m_3 \omega^2 \zeta_3 - i \omega c_6(\zeta_6 - \zeta_3) - k_6(\zeta_6 - \zeta_3) + i \omega c_3(\zeta_3 - \zeta_4) + k_3(\zeta_3 - \zeta_4) = 0; \\
 4) & -m_4 \omega^2 \zeta_4 - i \omega c_3(\zeta_3 - \zeta_4) - k_3(\zeta_3 - \zeta_4) + i \omega c_5(\zeta_4 - \zeta_5) + k_5(\zeta_4 - \zeta_5) - \\
 & i \omega c_4 \zeta_4 - k_4 \zeta_4 = 0; \\
 5) & -m_5 \omega^2 \zeta_5 - i \omega c_4(\zeta_4 - \zeta_5) - k_4(\zeta_4 - \zeta_5) = -P(t, \omega); \\
 6) & -m_6 \omega^2 \zeta_6 - i \omega c_6(\zeta_3 - \zeta_6) - k_6(\zeta_3 - \zeta_6) - i \omega c_2(\zeta_2 - \zeta_6) - k_2(\zeta_2 - \zeta_6) = 0.
 \end{aligned} \tag{2.52}$$

2.5.6 Описание динамической модели обрабатывающей системы фрезерного станка

Модель (рис. 2.31) посредством пяти дифуравнений (2.53) описывает пространственные колебания следующих элементов обрабатывающей системы фрезерного станка: консоль со станиной (m_1, k_1, c_1); шпиндель с закреплённой в нём фрезой (m_2, k_2, c_2); часть зуба фрезы, участвующая в процессе резания (m_3, k_3, c_3); салазки с установленной на них заготовкой (m_4, k_4, c_4); стол (m_5, k_5, c_5). Параметры модели приведены в Приложении А в табл. А.2.

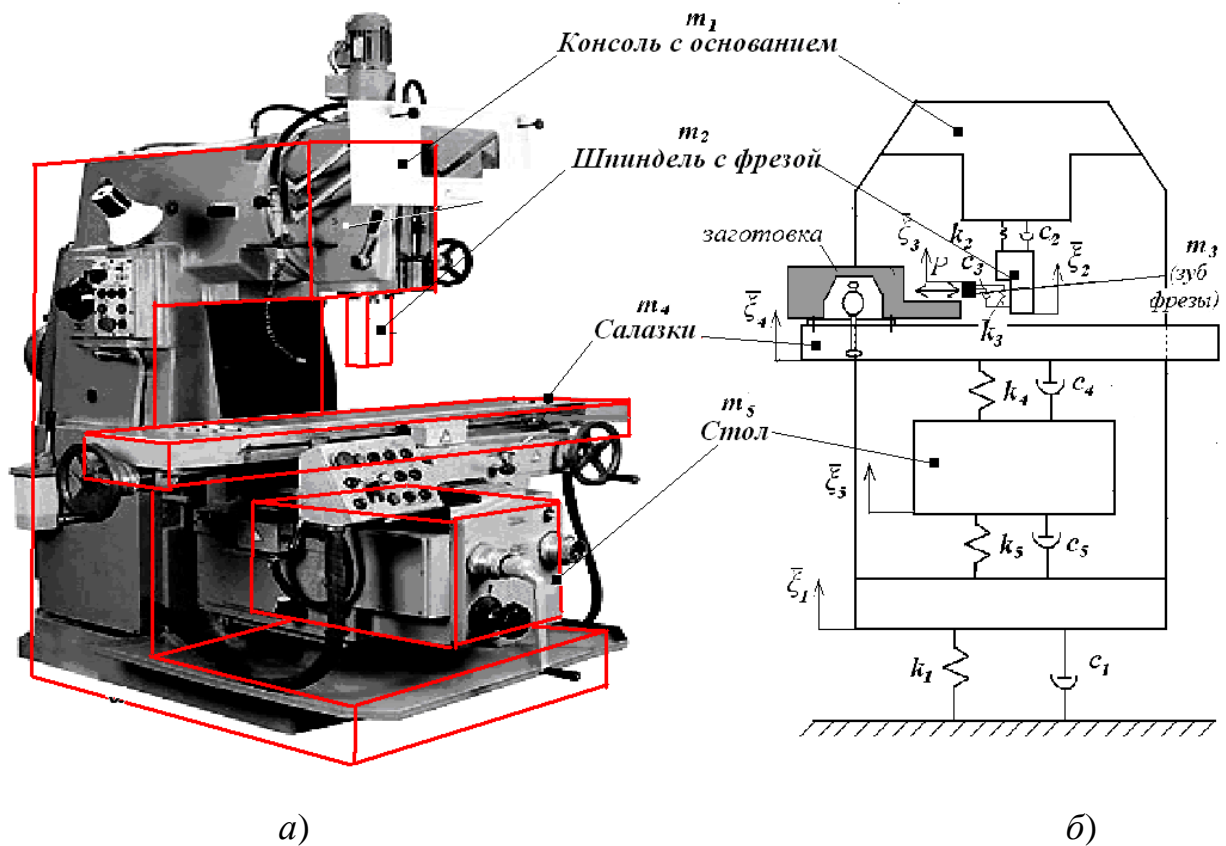


Рисунок 2.31 – Моделируемые узлы обрабатывающей системы фрезерного станка *а*) и его динамическая модель *б*)

Дифференциальные уравнения:

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{\zeta}_1 + c_1 \dot{\zeta}_1 + k_1 \zeta_1 - c_2 (\dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_1) - k_2 (\zeta_2 - \zeta_1) + c_5 (\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_5) + k_5 (\zeta_1 - \zeta_5) &= 0; \\
 m_2 \ddot{\zeta}_2 + c_2 (\dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_1) + k_2 (\zeta_2 - \zeta_1) &= 0; \\
 m_3 \ddot{\zeta}_3 + c_3 (\dot{\zeta}_3 - \dot{\zeta}_2) + k_2 (\zeta_3 - \zeta_2) &= -P(t); \\
 m_4 \ddot{\zeta}_4 + c_4 (\dot{\zeta}_4 - \dot{\zeta}_5) + k_4 (\zeta_4 - \zeta_5) &= P(t); \\
 m_5 \ddot{\zeta}_5 - c_4 (\dot{\zeta}_4 - \dot{\zeta}_5) - k_4 (\zeta_4 - \zeta_5) - c_5 (\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_5) - k_5 (\zeta_1 - \zeta_5) &= 0;
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

Алгебраические уравнения:

$$\begin{aligned}
 [(k_1 + k_2 + k_5 - \omega^2 m_1) + i\omega(c_1 + c_2 + c_5)] \zeta_1 - (k_2 + i\omega c_2) \zeta_2 - (k_5 + i\omega c_5) \zeta_5 &= 0; \\
 -(k_2 + i\omega c_2) \zeta_1 + [(k_2 - \omega^2 m_2) + i\omega c_2] \zeta_2 &= 0; \\
 [k_2 + i\omega c_2] \zeta_2 - [(k_{3X} - \omega^2 m_2) + i\omega c_{3X}] \zeta_3 &= -P(t, \omega); \\
 [(k_4 - \omega^2 m_4) + i\omega c_4] \zeta_4 - (k_4 + i\omega c_{4Z}) \zeta_5 &= P(t, \omega); \\
 -(k_5 + i\omega c_5) \zeta_1 - (k_4 + i\omega c_4) \zeta_4 + [(k_5 + k_4 - \omega^2 m_5) + i\omega(c_5 + c_4)] \zeta_5 &= 0;
 \end{aligned} \tag{2.43}$$

Для достижения цели моделирования решение системы уравнений (2.43) и (2.45) проводилось неоднократно при изменении времени резания от 0 до T с шагом по времени $\Delta\tau = 1$ с. Одновременно на каждом временном шаге определялись частотные характеристики колебаний модели при

последовательном изменении частоты от 0 до 2500 Гц с шагом по частоте $\Delta f = 10 \text{ Гц}$.

В дополнение к основной цели моделирования, заключающейся в определении характера изменения тренда звука по мере изменения динамических параметров обрабатывающих систем для оценки достоверности разработанных моделей в расчете исследовался так же:

- характер изменения с течением времени временной реализации звуковой волны;
- профиль шероховатости и тренд шероховатости;
- трёхмерные диаграммы изменения по частоте и по времени спектра звуковой волны и спектра шероховатости.

2.6 Результаты исследований

Результаты экспериментально-расчётных исследований представлены в Приложении А на рис. А.1 – А.4 для обрабатывающих систем токарного (рис. А.1 – А.4) и – фрезерного (рис. А.5 – А.8) станков.

На рис. А.1 а) и А.5 а) приведены фактический и расчётный спектры звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающих систем, которые визуально достаточно хорошо совпадают друг с другом. Об этом же свидетельствует и количественная оценка степени их совпадения, описываемая коэффициентом их корреляции, равным 0.684 для обрабатывающей системы токарного и равным 0.623 для – фрезерного станков. Линия регрессии между фактическим и расчётным спектрами звуковой волны приведена на рис. А.1 б) для обрабатывающей системы токарного и на А.5б) для фрезерного станков.

Из А.1 в) и А.5 в) следует, что максимальный вклад в суммарную амплитуду звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающих систем, вносит звуковая волна, генерируемый режущим лезвием (зубом фрезы).

На следующих рисунках приведена дополнительная информация, так же характеризующая хорошее качество моделирования. Так, на рис. А.2 и А.6 приведены расчётные и полученные в эксперименте временные реализации

звукового сигнала и трёхмерные «амплитудно-частотно-временные» диаграммы звука. На этих графиках частота f измерялась в Герцах, длительность резания τ в минутах, амплитуда звуковой волны в Паскалях.

Эта информация показывает, что модель достаточно хорошо воспроизводит не только частотное наполнение звуковой волны, но и близко к реальному описывает характер изменения частотных составляющих во времени.

На рис. А.3 и А.7 приведены расчётные параметры шероховатости, на рис. А.4 и А.8 представлена информация о величине напряжения в лезвии близи от режущей кромки (рис. А.4 а) и А.8 а)) и величине контактного усилия (рис. А.4 б) и А.8 б)). Данная информация показывает, что модель достаточно хорошо воспроизводит не только частотное наполнение звука, но и близко к реальному описывает нагруженность конструктивных элементов обрабатывающих систем в процессе их работы.

В конечном итоге это позволило получить в расчёте адекватное реальному описание тренда звуковой волны, позволяющей судить о динамическом поведении обрабатывающих систем (рис. А.4 в) и А.8 в)). Корреляция между расчётными и полученными в эксперименте трендами звука:

- для обрабатывающей системы токарного станка равна 0.993 (рис. А.4 з);
- для обрабатывающей системы фрезерного станка равна 0.965 (рис. А.8 з).

Важным результатом расчётов является установление факта, практически, идентичности трендов звука, контактного усилия и шероховатости.

Результаты исследований показывают, что на участке нормального (постепенного) износа инструмента, а также стационарного (до критического) развития трещины, тренд звука изменяется незначительно, а далее, на участке катастрофического износа и развития трещины тренд звука начинает резко возрастать. Для эффективного контроля на каждом из этих участков динамического поведения обрабатывающих систем рассмотренные выше динамические модели не применимы из-за своей громоздкости (многопараметричности).

По этой причине необходимо разработать математическую модель,

содержащую меньшее число параметров, но в то же время, не менее точно описывающей динамическое поведение обрабатывающей системы на каждом из указанных участков звукового тренда.

Для реализации данной модели в практике эксплуатации обрабатывающих систем необходимо использовать программируемые микропроцессорные устройства. Программное обеспечение этих устройств должно формализовать работающий в режиме реального времени алгоритм определения ресурса обрабатывающих систем по результатам непрерывного контроля их динамического поведения, осуществляемого на протяжении всего периода выполнения текущей технологической операции.

Выводы

1. Исследования доказали целесообразность выбора звуковой волны в качестве информационного сигнала, позволяющего эффективно контролировать динамическое поведение обрабатывающих систем. Доказательство основывается на следующих положениях:

- параметры звуковых волн, сопровождающих работу обрабатывающих систем, тесно коррелируют с износом режущего инструмента, определяющим образом влияющего на их динамическое поведение и ресурс;

- в отличие от вибрационных сигналов, подверженных воздействию помех, генерируемых механическими колебаниями станка, звуковые волны, регистрируемые микрофоном, расположенным вблизи от их источника (точки контакта режущего инструмента и детали), помехоустойчивы по отношению как к мультипликативным, так и к аддитивным по природе помехам, а так же к помехам, носящим импульсный характер;

- регистрация звуковой волны в непосредственной близости от зоны ее образования существенно снижает искажающее влияние звуковой помехи, генерируемой окружающим оборудованием, что приводит к существенному уменьшению уровня помехи, т.к. согласно известному в акустике правилу «шести децибел» звуковая помеха затухает прямо пропорционально расстоянию от ее

источника, измеряемому в данном случае в метрах (2–3 м), что существенно превышает расстояние микрофона от контролируемой зоны образования звука, измеряемое в сантиметрах (1–1,5 см);

– экспериментально установлено подобие тренда звука и кривой износа режущего инструмента, о чем свидетельствуют величины коэффициентов их взаимной корреляции, равные 0,925 и 0,855, соответственно для обрабатывающих систем токарного и фрезерного станков.

2. Разработка математической модели динамического поведения типовых обрабатывающих систем токарного и фрезерного станков позволили подтвердить и обобщить известные из практики эксплуатации закономерности их динамического поведения, обусловленные влиянием постоянно действующего внутреннего фактора – изменения динамических параметров этих систем вследствие износа и разрушения их слабого элемента – режущего инструмента. Достоверность моделирования подтверждается высокой степенью корреляции между полученными в эксперименте и расчетными трендами звука, сопровождающего работу данного оборудования, составившими величины 0,993 и 0,965, соответственно, для обрабатывающих систем токарного и фрезерного станков.

3. На основе математического моделирования выявлен следующий характер изменения параметров, характеризующих техническое состояние элементов обрабатывающих систем:

– изменение радиуса вершины лезвия и выкрашивание его режущей кромки приводит к изменению шероховатости обрабатываемой поверхности и изменению силы контакта инструмента с деталью, эта сила знакопеременна и представляет переменную часть силы резания, частотный состав и величина этой силы определяется динамическими характеристиками обрабатываемой системы и режимами ее работы;

– по мере нормального износа инструмента контактная сила уменьшается за счет увеличения, вследствие износа, радиуса вершины лезвия резца (зуба фрезы) соответственно уменьшается шероховатость и глубина проникновения

лезвия в поверхность детали, в результате этого, в соответствии с теорией Герца, уменьшается контактное усилие и, как следствие, уменьшаются колебания обрабатываемой системы, что сопровождается незначительным изменением тренда звука;

– возрастание износа и переход его в стадию выкрашивания режущей кромки (катастрофический износ) приводит к искажению геометрии инструмента, в частности, к уменьшению радиуса вершины резца (зуба фрезы) и повышенному износу рабочих поверхностей инструмента, в результате этого увеличивается площадь его контакта с деталью, растет их силовое взаимодействие и, соответственно, растут амплитуды колебаний элементов обрабатываемой системы и амплитуда звуковой волны, что является предвестником отказа инструмента и появления брака детали;

4. Для эффективного контроля динамического поведения обрабатываемых систем необходимо разработать математическую модель, которая, располагая по сравнению с динамическими моделями, меньшим числом параметров, должна не менее точно описывать характерные участки тренда звука, сопровождающего работу данных систем.

5. Необходимым условием для реализации этой модели в практике эксплуатации обрабатываемых систем является использование программируемых микропроцессорных устройств. Программное обеспечение этих устройств должно формализовать работающий в режиме реального времени алгоритм определения параметров модели по результатам непрерывного контроля динамического поведения обрабатываемых систем, осуществляемого на протяжении всего периода выполнения заданной технологической операции.

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА ОБРАБАТЫВАЮЩИХ СИСТЕМ

В данном разделе на примере обрабатывающих систем разработан метод определения ресурса машин по результатам контроля тренда звука, сопровождающего их работу и отражающих особенности динамического поведения подконтрольного оборудования на протяжении всего срока его эксплуатации.

Отличительной особенностью метода является то, что впервые искомый ресурс машины включен в виде численного значения непосредственно в математическую структуру модели тренда и определяется при идентификации модели, по результатам контроля тренда информационного параметра, сопровождающего работу машины.

В развитие метода определения ресурса обрабатывающих систем так же разработаны:

- метода оценки степени критичности динамического поведения обрабатывающих систем;
- метода изменения (корректирования) режима работы обрабатывающих систем с целью продления периода их работоспособности.

3.1 Особенности определения ресурса обрабатывающих систем

При разработке метода определения ресурса обрабатывающих систем приходится сталкиваться с дилеммой: с одной стороны, процесс изменения динамического поведения обрабатывающих систем, обусловленный изнашиванием и последующим разрушением режущего инструмента, носит весьма сложный, трудно поддающийся математическому описанию характер [2,3], с другой стороны, для оперативности определения ресурса, выполняемого непосредственно в процессе работы обрабатывающих систем, необходима модель тренда с минимумом параметров.

Попытки уменьшить погрешность определения ресурса, путем учета как можно большего числа факторов в составляемых при этом уравнениях регрессии, окончательно запутывает проблему, т.к. общеизвестно, чем больше параметров у модели, тем она менее надежна. Особенно актуально это утверждение для обрабатывающих систем, где число факторов, влияющих на их динамику и ресурс весьма велико.

Таким образом, мы имеем дело с ситуацией, когда динамическое поведение объекта наблюдения и отражающий это поведение информационный сигнал формируются под воздействием большого количества факторов, оперативно учесть которые в полном объеме в режиме реального времени невозможно. Тем более, это неосуществимо в обстановке реального производства, весьма далекого от лабораторных условий.

В этом случае ход изменения информационного сигнала следует связывать не с факторами, а с течением времени. При этом говорят о некой тенденции развития наблюдаемого явления. Однако понятие тенденции развития не имеет достаточно четкого определения, обычно под тенденцией развития понимают некоторое общее направление развития, долговременную эволюцию. Обычно тенденцию стремятся представить в виде более или менее гладкой траектории. Предполагается, что такая траектория, которую можно описать в виде некоторой функции времени, характеризует основную закономерность движения во времени и, в некоторой мере (но не полностью), свободна от случайных воздействий. Данную траекторию называют трендом [205].

Тренд описывает фактическую усредненную для периода наблюдения тенденцию развития изучаемого процесса во времени, его внешнее проявление. Предполагается, что через временной параметр можно выразить влияние всех основных факторов, механизм влияния каждого из которых в отдельности в явном виде трудно учесть. По существу, линия тренда выполняет ту же функцию для последовательных во времени наблюдений, что и средняя величина в законе распределения статистического набора каких либо числовых данных.

В нашем случае тренд должен описывать динамическое поведение

обрабатывающих систем в период выполнения ими заданного технологического процесса. Тренд составляется из амплитуд звуковой волны, генерируемой в рабочей зоне этих систем, и наблюдаемых на протяжении выполнения обрабатывающей системой определенного технологического процесса.

Определение параметров аналитической зависимости, описывающей тренд, составляет предмет анализа временного ряда в задаче определения ресурса любой механической системы, в том числе и обрабатывающей. Оценку членов ряда обычно делают по прогнозной модели. В данном случае прогнозная модель – это модель, график которой аппроксимирует тренд [182], поэтому в дальнейшем для определенности прогнозную модель будем называть моделью тренда.

Традиционно, прогнозы – это оценки будущих уровней ряда (числовых значений), а последовательность прогнозов для различных периодов упреждения составляет оценку тренда.

Согласно общепринятой методологии определение ресурса складывается из двух этапов, на первом из которых на основе имеющихся данных о поведении объекта идентифицируется собственно модель тренда, а на втором – осуществляется ее экстраполяция до момента достижения объектом предельного для него состояния, характеризуемого нормируемым предельным значением определяющего параметра.

Определяющим параметром для обрабатывающих систем является величина износа режущего инструмента, которая пронормирована и приведена в соответствующей справочной литературе. Однако износ не поддается непосредственному измерению в режиме реального времени и требует прерывания процесса работы обрабатывающей системы.

По этой причине прибегают к косвенной оценке износа по результатам контроля величины разнообразных по природе информационных сигналов, сопровождающих работу поднадзорного оборудования, и последующего сравнения их с нормативными значениями. Наличие подобных норм сводит процесс определения ресурса к тривиальной процедуре: выбору из заранее известной библиотеки подходящей модели тренда, определения ее параметров и

экстраполяции значений модели до момента достижения нормируемого предельно допустимого уровня информационного сигнала.

В данном случае из-за отсутствия норм, регламентирующих предельно допустимые значения амплитуд колебаний обрабатывающих систем, равно, как и амплитуд звуковых волн, сопровождающих их работу, экстраполяция теряет смысл.

Данное обстоятельство вынуждает переходить от сравнения фактической и нормируемых амплитуд колебаний к сопоставлению интервалов времени, соответствующих текущей наработке и ожидаемому ресурсу подконтрольного объекта, определяемому по результатам контроля его динамического поведения.

Необходимым условием, обеспечивающим выполнение данного перехода, является применение модели тренда, в перечень параметров которой включено численное значение искомого ресурса обрабатывающей системы. В этом случае ресурс будет определяться на этапе аппроксимации при параметрической идентификации модели тренда по результатам контроля динамического поведения обрабатывающей системы.

Оценивание параметров модели должно проводиться в режиме реального времени, без прерывания работы обрабатывающих систем. Для выполнения этого условия модель должна иметь минимум параметров, но в тоже время, не менее точно, по сравнению с рассмотренными в разд.2 динамическими моделями, описывать характерные участки тренда звука.

Получим аналитические выражения модели тренда, описывающих каждый из этих участков.

3.1.1 Разработка аналитического выражения модели тренда

Кривая, описывающая механический износ режущего инструмента, являющегося слабым звеном обрабатывающих систем, приведена на рис. 2.16 а. Эта кривая, как уже говорилось в разд. 2, характеризуется тремя периодами: периодом приработки (участок OA), периодом нормального износа (участок AB) и периодом катастрофического износа (участок BC).

Рассмотрим каждый из участков отдельно.

3.1.1.1 Участок приработочного износа инструмента

На участке приработочного износа инструмента амплитуда звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающей системы, возрастает. Это подтверждается практикой эксплуатации данных систем [1,2,3] и их

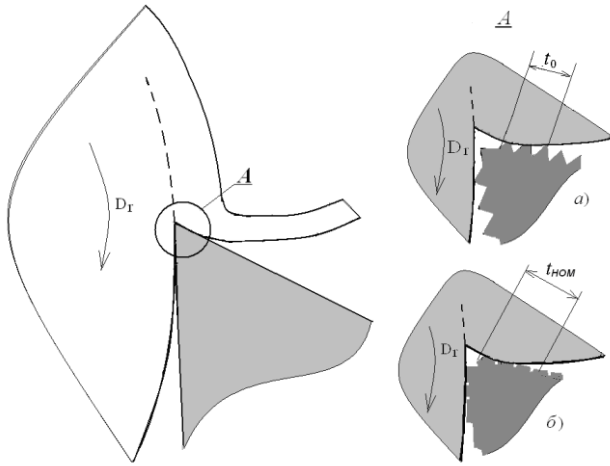


Рисунок 3.1 – Схема взаимодействия лезвия инструмента, имеющего микронеровности, с обрабатываемой деталью: а – резец до приработки; б – резец после приработки

математическим моделированием (разд. 2). Образование площадки приработочного износа в значительной мере определяется уровнем шероховатости рабочих поверхностей лезвия после заточки. Микро выступы как на главной, так и на вспомогательной задних поверхностях (рис. 3.1) за счет малой площади контакта (только по вершинам выступов (рис. 3.1 а), а, следовательно, больших нормальных

давлений, контактируя с поверхностями на обрабатываемой детали (заготовке), начинают интенсивно разрушаться. В этот период фактическая глубина резания t_0 несколько меньше заданного, требуемого по техпроцессу, $t_{ном}$.

Далее, за счет уменьшения высоты микронеровностей, а, следовательно, увеличения площади контакта (рис. 3.1 б), давление и интенсивность изнашивания уменьшаются (рис. 2.16 а, зона около точки А), изменение величин площадок в зонах контакта лезвия со стружкой и поверхностями на заготовке стабилизируются и начинают приближаться к своим номинальным значениям $l_{ном}$ (рис. 3.1 б) и период приработки практически заканчивается.

Изменение глубины резания на участке приработки можно описать следующим образом:

$$t = t_0 + v_{np} \cdot \tau, \quad (3.1)$$

где t_0 – исходная (фактическая) глубина резания, определяющая величину фактической площади срезаемого слоя; v_{np} – скорость изменения радиального

износа инструмента, характерная для данного сочетания материалов пар трения «заготовка - инструмент»; τ – текущее время механической обработки, с.

При окончании периода приработки (точка A на рис. 2.16 a) длительность работы обрабатываемой системы равна времени приработки ($\tau = \tau_{np}$), а скорость последующего износа в радиальном направлении на участке нормального износа инструмента (участок AB , рис. 2. 16 a) можно определить следующим образом:

$$v_{np} = \frac{t_{норм} - t_0}{\tau_{np}}, \quad (3.2)$$

Учитывая, что в этот момент величина радиального износа еще пренебрежимо мала, можно принять текущее значение глубины резания t равным нормативной величине $t_{норм}$.

На участке AB (рис. 2.16 a) интенсивность изнашивания стабилизируется и за счет некоторого, хоть и менее интенсивного, чем на участке OA , возрастания износа, текущее значение глубины резания t уменьшается, что можно описать следующим образом:

$$t = t_{норм} - v_{np} \cdot (\tau - \tau_{np}). \quad (3.3)$$

С учетом (3.2) выражение (3.2) переписывается следующим образом:

$$t = t_{норм} - \frac{t_{норм} - t_0}{\tau_{np}} \cdot (\tau - \tau_{np}). \quad (3.4)$$

Все указанные изменения этого параметра режима работы обрабатываемой системы (t) на участках кривой изнашивания (рис. 2.16 a) OA и AB сопровождаются изменением и ее динамического поведения, а, следовательно, и амплитуды звуковой волны. Возрастание амплитуды звуковой волны на участке приработки OA можно описать уравнением:

$$E_{зв} = E_{зв0} + \mathcal{G}_{np} \cdot \tau \quad (3.5)$$

где $E_{зв0}$ - величина амплитуды звуковой волны Pa , регистрируемая в начале периода приработки инструмента (точка O на рис. 2.16 a), τ - время резания; \mathcal{G}_{np} - скорость изменения амплитуды звуковой волны на участке приработки инструмента (участок OA , рис. 2.16 a):

$$\mathcal{G}_{np} = \frac{E_{зв}^{np} - E_{зв0}}{\tau_{np}}, \text{ Па/с}, \quad (3.6)$$

где $E_{зв}^{np}$ – амплитуда звуковой волны, достигаемая в конце участка

приработки инструмента, $Па$ (рис. 2. 16 *a*, точка *A*).

Функциональная зависимость (3.6) позволяет получить оценку среднего значения скорости изменения амплитуды звуковой волны на участке приработки. На самом же деле изменение скорости носит более сложный характер (рис. 2.16 *a*), поэтому это изменение предлагается определять по следующей зависимости:

$$\vartheta = \vartheta_{np} \cdot \frac{\tau}{\sqrt{\vartheta_{np}^2 \cdot (\tau_{np}^2 - \tau^2)^2 + \tau^2}}, Па/с. \quad (3.7)$$

С учетом (3.5) зависимость (3.7) преобразуется в следующий вид:

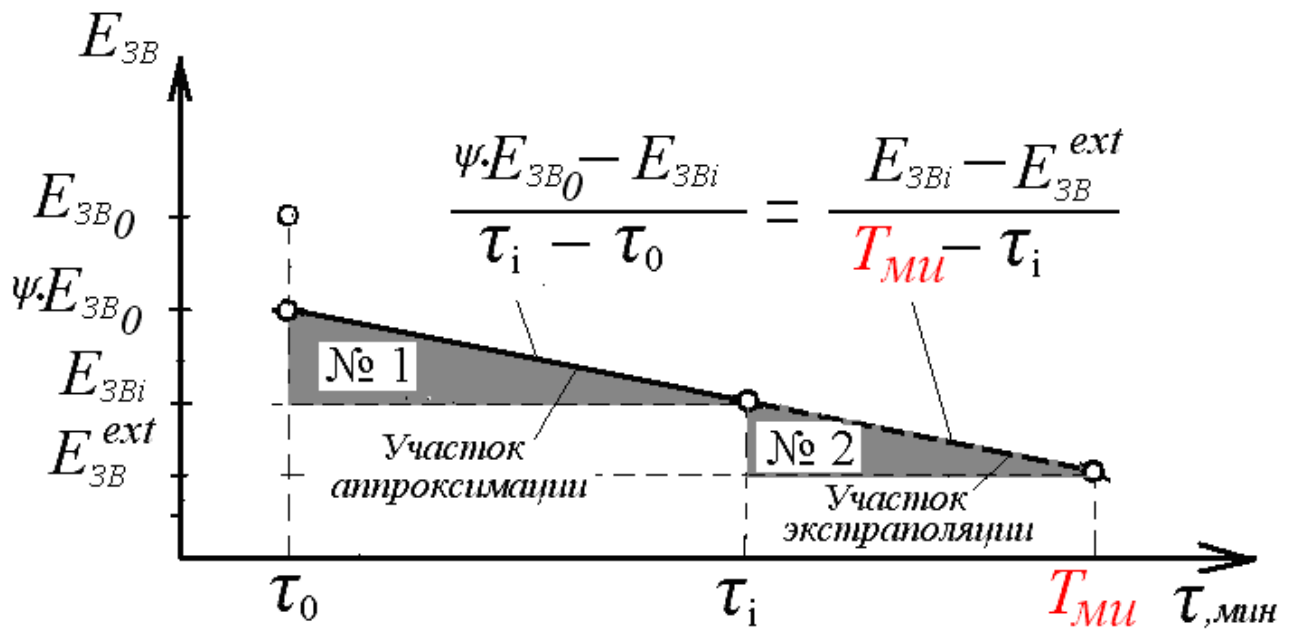
$$E_{зв} = E_{зв0} + \vartheta_{np} \cdot \frac{\tau}{\sqrt{\vartheta_{np}^2 \cdot (\tau_{np}^2 - \tau^2)^2 + \tau^2}} \cdot \tau, Па. \quad (3.8)$$

3.1.1.2 Участок нормального и катастрофического износа (выкрашивания) инструмента

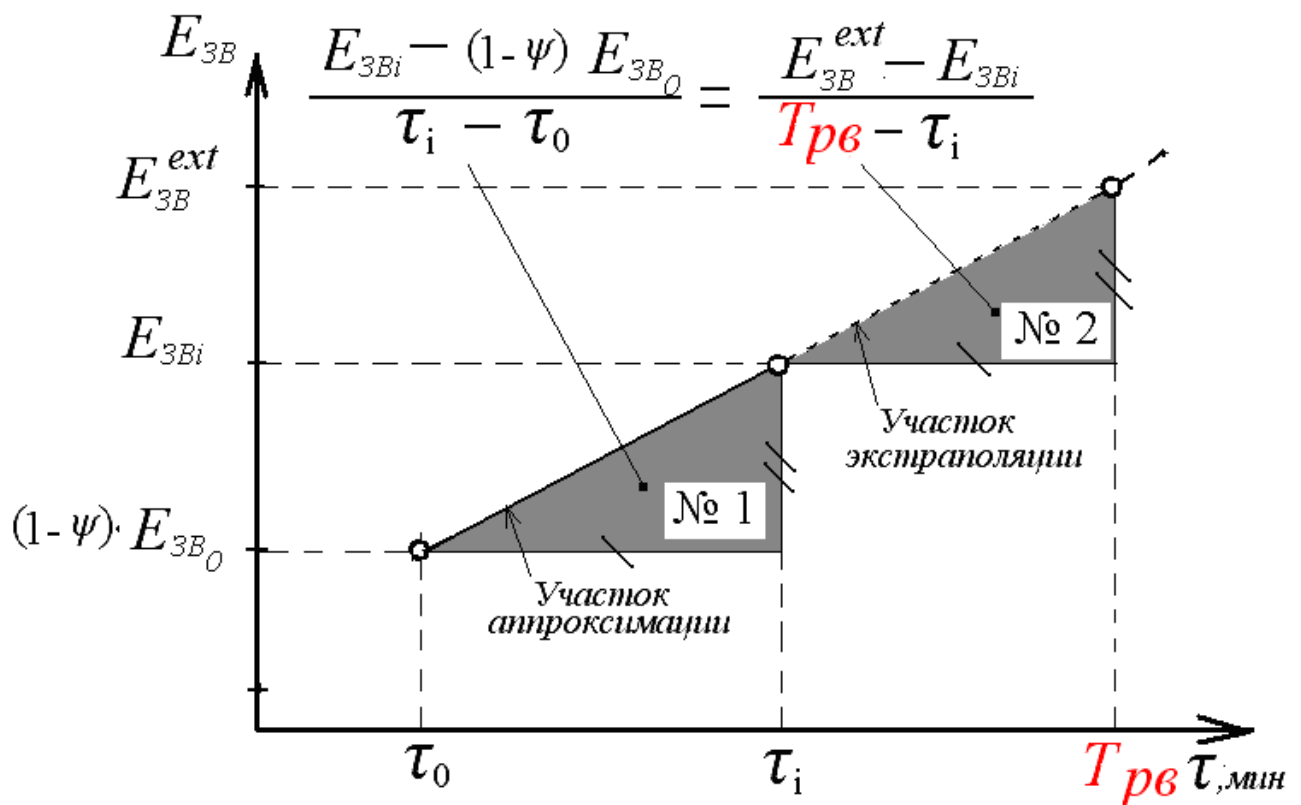
Как показывает практика, расчеты и литературные данные, приведенные в разд. 2, тренд звука, сопровождающего работу обрабатывающих систем, складывается из участка медленного изменения (спада) при нормальном износе инструмента и участка резкого подъема при катастрофическом износе (выкрашивание, разрушение инструмента).

Опишем аналитически подобное поведение звукового тренда (рис. 3.2). Для этого отдельно рассмотрим участки медленного изменения (рис. 3.2 *a*) и участок резкого изменения (возрастания) (рис. 3.2 *б*) амплитуды звуковой волны. При этом за начало отсчета примем момент прекращения приработки инструмента ($\tau_0 = \tau_{np}$). На обоих участках серым цветом выделены геометрически подобные треугольники (№1 и №2).

Следует отметить, что их подобие имеет и физическое обоснование. Так, в соответствии с постулатом физики, сформулированным К. Шенноном: «*основные закономерности, наблюдавшиеся в прошлом, будут сохранены и в будущем*» [184]. На данном утверждении основываются традиционно применяемые методы экстраполяции определения ресурса. Преобразуем приведенные на рисунке пропорции в уравнения (3.9) – для участка медленного изменения тренда звука и



а)



б)

Рисунок 3.2 – Тренд звука, сопровождающего работу обрабатывающих систем: участок медленного изменения (а); участок резкого изменения (б)

(3.10) – для участка его резкого изменения. При этом одновременно перейдем к безразмерной амплитуде звуковой волны, поделив левую и правую части записываемых уравнений на исходное значение амплитуды звуковой волны $E_{3\theta 0}$, зафиксированное в начале отсчета по времени ($\tau = \tau_0$). Введем также показатель степени, позволяющий учитывать нелинейность динамического поведения механической системы, что существенно повысит точность описания моделью фактического тренда звука, а, следовательно, повышает и точность определения параметров модели, в том числе и параметров $T_{ми}, T_{рв}$.

$$\bar{E}_{3\theta i} = \psi \cdot \left(1 - \gamma \cdot \left(\frac{\tau_i - \tau_0}{T_{ми} - \tau_i} \right)^\eta \right), \quad (3.9)$$

где $\gamma = (E_{3\theta i} - E_{3\theta}^{ext}) / E_{3\theta 0}$.

$$\bar{E}_{3\theta i} = (1 - \psi) \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{\tau_i - \tau_0}{T_{рв} - \tau_i} \right)^\beta \right), \quad (3.10)$$

где $\alpha = (E_{3\theta}^{ext} - E_{3\theta i}) / E_{3\theta 0}$.

Модель, описывающая тренд звука на участках его медленного изменения и резкого возрастания объединяет выражения (3.9) и (3.10). При этом из-за особенностей математического построения модели тренда она описывает одновременно и участок приработки, где уровень колебаний на протяжении незначительного промежутка времени возрастает.

$$\bar{E}_{3\theta} = \psi \left(1 - \gamma \cdot \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{ми} - \tau} \right)^\eta \right) + (1 - \psi) \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{рв} - \tau} \right)^\beta \right) \quad (3.11)$$

где $T_{ми}, T_{рв}$ – параметры модели, используемые для расчета ресурса обрабатывающих систем, *мин*; $\psi, \alpha, \beta, \gamma, \eta, \vartheta_{np}$ – опытные параметры, определяемые при идентификации модели.

Модель тренда (3.11) состоит из суммы двух дробно-рациональных функций. Данный тип функций используется для аппроксимации экспериментальных данных (восстановления параметров аппроксимирующей функции), характеризующихся резкими изменениями. В этот момент дробно-рациональная функция терпит разрыв, т.к. её знаменатель обращается в ноль.

Данное свойство рациональной функции использовано в модели тренда (3.11) путём введения в знаменатель представленных в ней дробей параметров $T_{ми}$ и $T_{рв}$. При равенстве длительности работы обрабатывающей системы τ какому либо из этих параметров ($\tau = T_{ми}$ или $\tau = T_{рв}$), модель тренда претерпевает разрыв. Данное свойство дробей обеспечивает высокую чувствительность модели к поведению тренда аппроксимируемых данных, позволяя заранее прогнозировать момент разрыва функции. В практике работы обрабатывающих систем это означает, что модель тренда обеспечивает прогноз момента резкого возрастания звука, сопровождающего процесс их работы, свидетельствующего о недопустимом состоянии данных систем.

Искомый ресурс обрабатывающей системы $T_{пр}$ определяется в результате суммирования повреждаемости, получаемых слабым звеном обрабатывающих систем – режущим инструментом – на участке его нормального износа $\left(\frac{1}{T_{ми}}\right)$ и на участке его катастрофического износа $\left(\frac{1}{T_{рв}}\right)$.

$$\frac{1}{T_{пр}} = \frac{1}{T_{ми}} + \frac{1}{T_{рв}}. \quad (3.12)$$

Окончательно выражение для искомого ресурса обрабатывающей системы запишется в следующем виде:

$$T_{пр} = \frac{T_{ни} \cdot T_{ки}}{T_{ки} + T_{ни}}, \quad (3.13)$$

Параметрическая идентификация модели (3.11) осуществляется путем минимизации функции невязки (3.14) фактически зарегистрированных амплитуд звуковой волны и их расчетных значений, полученных с помощью (3.11) в результате итеративных расчетов (см. п. 3.5). Итеративные расчеты, объемом в 30 000 итераций, выполняются методом Монте-Карло.

$$U = \sum_i^m \left[E_{звi}^{\Phi} - E_{звi}^P \right]^2, \quad (3.14)$$

где: m – количество измерений амплитуды звуковой волны, проведенных за все время контроля работы обрабатывающей системы; $E_{зв}^{\Phi}$ – измеренная амплитуда звуковой волны; $E_{зв}^P$ – расчетное значение амплитуды звуковой волны.

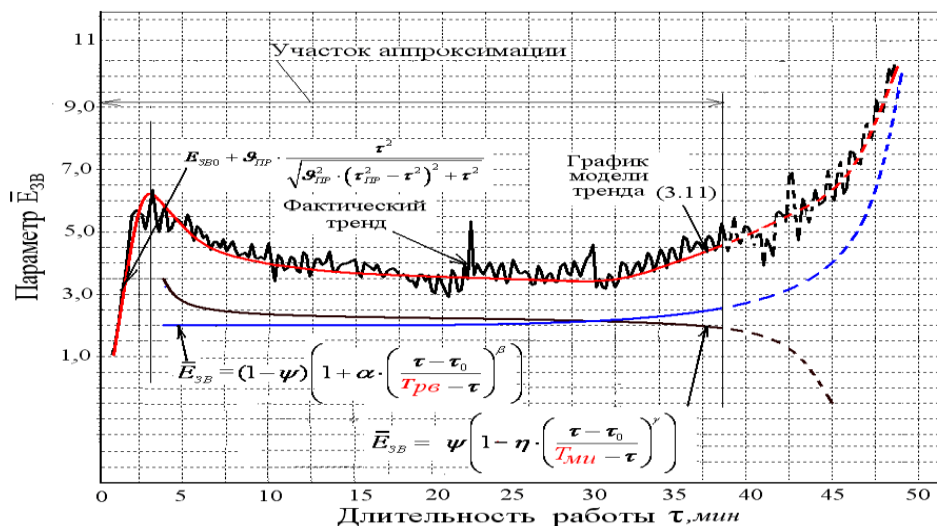


Рисунок 3.3 – Фактический тренд звука и графики слагаемых модели тренда, полученные при контроле динамического поведения обрабатывающей системы фрезерного станка

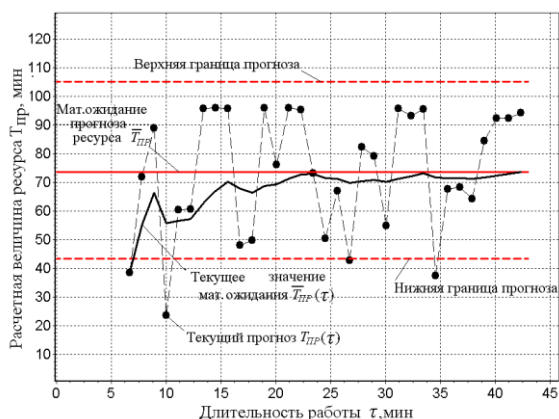
Применение модели тренда (3.11) проиллюстрировано на рис. 3.3 на примере данных, полученных при работе обрабатывающей системы фрезерного станка на режимах, приведенных в табл. 5.1.

3.2 Алгоритм определения ресурса обрабатывающих систем

На практике при определении параметров прогнозной модели $T_{ин}$ и $T_{ки}$ приходится сталкиваться с одним неприятным обстоятельством – нестабильностью их прогнозной оценки. Для изучения данного вопроса был проведен ряд экспериментов на обрабатывающих системах токарного и фрезерного станков (табл. 5.1 и 5.2). Целью экспериментов был поиск возможных путей повышения точности определения ресурса данных систем. В экспериментах инструмент доводился либо до разрушения, либо до предельно допустимой степени износа. Процесс металлообработки сопровождался непрерывной записью на компьютер параметров звуковой волны, сопровождавшей работу подконтрольного оборудования.

3.2.1 Компенсация нестабильности определения ресурса

Одной из существенных причин нестабильности величины определяемого ресурса является неоднородность структуры материала обрабатываемой заготовки. Так, например, локальное повышение твердости вызывает рост нагрузки и, соответственно, локальный рост градиента амплитуды звуковой



Рисуноу 3.4 – Изменение в процессе работы обрабатывающей системы токарного станка статистических параметров расчетной величины его

волны. Рост градиента нагрузки влечет за собой увеличение скорости повреждения инструмента и, соответственно, более пессимистический прогноз ресурса обрабатывающей системы. Пример подобной нестабильности определяемой величины ресурса, отмечавшейся при работе обрабатывающей системы токарного станка (табл.5.1), приведен на рис. 3.3.

Статистический анализ расчетных величин ресурса, приведенных на рис. 3.4,

дал следующее:

- математическое ожидание ресурса $\bar{T}_{np} = 73 \text{ мин}$;
- среднее квадратическое отклонение величины ресурса $\sigma_T = 10 \text{ мин}$;
- коэффициент вариации $\nu = \frac{\sigma_T}{\bar{T}_{np}} = 0.136$;
- верхняя граница расчетной величины ресурса при доверительной вероятности $P_{доп} = 0.997$ $T_{np}^{6\sigma} = \bar{T}_{np} + 3\sigma_T = 103 \text{ мин}$;
- нижняя граница расчетной величины ресурса при доверительной вероятности $P_{доп} = 0.997$ $T_{np}^{н2} = \bar{T}_{np} - 3\sigma_T = 43 \text{ мин}$.

Результаты статистического анализа показывают, что разброс текущего значения прогноза ресурса $T_{np}(\tau)$ достаточно велик (43...103 мин). Классический метод борьбы с этим явлением – ориентация на определение математического ожидания обрабатываемой статистики. Выше рассмотрено математическое ожидание всех статистических данных в целом \bar{T}_{np} , собранных за 43 минуты работы обрабатывающей системы. На практике объем статистики меняется (пополняется), начиная с первого замера и заканчивая последним замером. В соответствии с изменением объема статистики следует пересчитывать ее математическое ожидание, т.е. определять ее текущее значение $\bar{T}_{np}(\tau_n)$:

$$\bar{T}_{np}(\tau_n) = \frac{[\bar{T}_{np}(\tau_{n-1})(n-1) + T_{np}(\tau_n)]}{n}, \text{ мин}, \quad (3.15)$$

Пример подобного пересчета показан на рис. 3.4. В соответствии с законами статистического анализа текущее значение математического ожидания $\bar{T}_{np}(\tau)$ изменяется в пределах:

$$T_{np}(\tau_1) \leq \bar{T}_{np}(\tau_n) \leq \bar{T}_{np} \quad (3.16)$$

где $T_{np}(\tau_1)$ – первое численное значение ресурса; \bar{T}_{np} – математическое ожидание численного значения ресурса, рассчитанного по полной статистике.

Математическое ожидание в соответствии с его свойствами характеризуется меньшей вариацией (средним квадратическим отклонением $\bar{\sigma}_\tau$), по сравнению с вариацией текущего численного значения ресурса (средним квадратическим отклонением σ_τ):

$$\bar{\sigma}_\tau = \frac{\sigma_\tau}{\sqrt{n}}, \quad (3.17)$$

где n – количество расчетных значений ресурса.

Существенно меньшая изменчивость (непостоянство) текущего значения математического ожидания $\bar{T}_{np}(\tau)$ наглядно показана на рис. 3.5. Это можно показать и чисто математически, представив выражение (3.15) в следующем виде:

$$\bar{T}_{np}(\tau_n) = \frac{(n-1)}{n} \bar{T}_{np}(\tau_{n-1}) + \frac{1}{n} T_{np}(\tau_n). \quad (3.18)$$

Коэффициенты, стоящие перед слагаемыми в (3.35), являются по своей сути весовыми коэффициентами. Первый коэффициент при увеличении

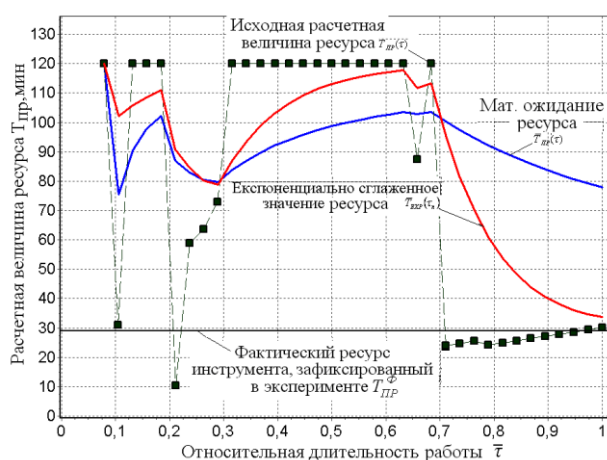


Рисунок 3.5 – Сравнение различных статистических данных о численном значении ресурса

порядкового номера текущего измерения (увеличении количества статистических данных) стремится к единице, а второй – к нулю. По этой причине влияние вновь поступающих данных на математическое ожидание статистического ряда уменьшается. Это свойство математического ожидания решает проблему непостоянства определяемой

величины ресурса обрабатывающей системы.

Однако уменьшение вариации математического ожидания автоматически приводит к уменьшению его чувствительности к текущей расчетной величине ресурса. Данный недостаток математического ожидания наглядно показан на рис. 3.5. Из рисунка следует, что, в рассматриваемом примере, после исчерпания обрабатывающей системой 70 % наработки до истечения ее ресурса, численное значение ресурса стабилизировалось, изменяясь от 20 до 30 мин. В то же время математическое ожидание давало завышенное значение ресурса минимум на 50 мин.

Для устранения данного недостатка был использован метод «скользящего среднего» (экспоненциального сглаживания), при котором текущее численное значение ресурса определяется по следующей формуле [186]:

$$\bar{T}_{\text{exp}}(\tau_n) = (1 - \alpha)\bar{T}_{\text{exp}}(\tau_{n-1}) + \alpha T_{np}(\tau_n), \quad (3.19)$$

где α – параметр сглаживания ($\alpha = 0.2$).

Сравнение (3.18) и (3.19) показывает, что при экспоненциальном

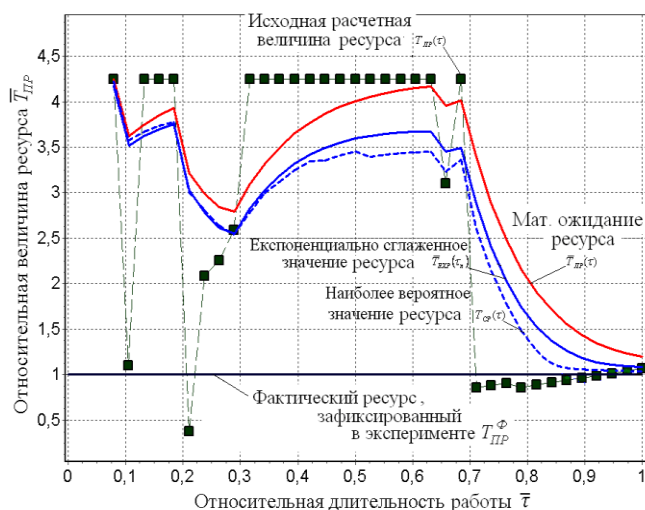


Рисунок 3.6 – Сравнительный анализ различных оценок ресурса

сглаживании весовые коэффициенты слагаемых неизменны и не зависят от порядкового номера измерения. По этой причине статистический ряд одинаково реагирует на текущие измерения и не зависит от количества его членов (длительности работы обрабатывающей системы). Результат экспоненциального сглаживания показан на рис. 3.6.

Как видим, скользящее среднее, сохраняя свойства математического ожидания (незначительная вариация), более точно описывает текущую величину рассчитываемого ресурса $T_{np}(\tau)$ на самом ответственном завершающем участке выполнения технологической операции.

Как уже выше указывалось, на ресурс обрабатывающих систем оказывает влияние множество факторов, в результате чего определяемый ресурс является случайной величиной. Поэтому, ресурсу, как случайной величине, надо давать интервальную оценку. В качестве верхней границы интервала предлагается принять скользящую среднюю $\bar{T}_{\text{exp}}(\tau_n)$, а нижней - наиболее вероятное значение ресурса $T_{\text{cp}}(\tau)$.

Это значение находится как математическое ожидание текущей наработки τ_n и скользящей средней $\bar{T}_{\text{exp}}(\tau_n)$:

$$T_{\text{cp}}(\tau) = \tau_n Q(\tau) + \bar{T}_{\text{exp}}(\tau_n) P(\tau), \quad (3.20)$$

где $Q(\tau)$ – текущее значение вероятности отказа обрабатывающей системы ($Q(\tau) = 1 - P(\tau)$); $P(\tau)$ – текущее значение надежности обрабатывающей системы $\left(P(\tau) = \exp\left(-\frac{\tau_n}{\bar{T}_{\text{exp}}(\tau_n)}\right) \right)$

Интервальная оценка ресурса проиллюстрирована на рис. 3.6. Там же для сравнения показано изменение в процессе эксперимента величины ресурса T_{np}^{ϕ} , математическое ожидание величины ресурса $\bar{T}_{\text{np}}(\tau_n)$, экспоненциально сглаженная величина ресурса $T_{\text{exp}}(\tau)$ и наиболее вероятное значение ресурса $T_{\text{cp}}(\tau)$. Все расчетные величины пронормированы фактическим значением ресурса T_{np}^{ϕ} .

Из рис. 3.6 следует, что на заключительном этапе эксплуатации обрабатывающей системы разные прогнозные оценки ее ресурса практически совпадают по величине с фактически реализованной в эксперименте:

$$T_{\text{cp}}(\tau) \approx T_{\text{np}}^{\phi} \approx T_{\text{exp}}(\tau) \quad (3.21)$$

Оценим статистическую значимость (достоверность) прогноза ресурса обрабатывающей системы.

3.2.2 Достоверность определения ресурса обрабатывающих систем

Точность определения параметров модели тренда, включая и численное значение искомого ресурса обрабатывающей системы, графически иллюстрируется степенью соответствия фактического тренда звука и графика модели тренда. Это соответствие количественно характеризуется величиной коэффициента корреляции R между трендом и графиком модели.

Причем, наиболее показательным является текущее значение коэффициента корреляции $R(\tau)$ между фактически реализовавшимся при работе обрабатывающей системы трендом звука на участке упреждения и экстраполяционной частью графика модели тренда. Текущее значение коэффициента корреляции $R(\tau)$ определяется по следующему выражению:

$$R(\tau) = \frac{(m-n) \sum_{i=m-n-3}^{m-n} E_{3\phi}^p E_{3\phi}^\phi - \sum_{i=m-n-3}^{m-n} E_{3\phi}^p \sum_{i=m-n-3}^{m-n} E_{3\phi}^\phi}{\sqrt{\left[(m-n) \sum_{i=m-n-3}^{m-n} (E_{3\phi}^p)^2 - \left(\sum_{i=m-n-3}^{m-n} E_{3\phi}^p \right)^2 \right] \left[(m-n) \sum_{i=m-n-3}^{m-n} (E_{3\phi}^\phi)^2 - \left(\sum_{i=m-n-3}^{m-n} E_{3\phi}^\phi \right)^2 \right]}}, \quad (3.22)$$

где: $E_{3\phi}^p, E_{3\phi}^\phi$ – соответственно, расчетная и фактическая амплитуда звуковой волны; m – общее число замеров амплитуды звуковой волны, проведенных за время работы обрабатывающей системы; n – число замеров, выполненных на текущий момент определения ресурса (идентификации модели); $(m-n)$ – число измерений, приходящихся на участок упреждения (экстраполяции графика модели тренда).

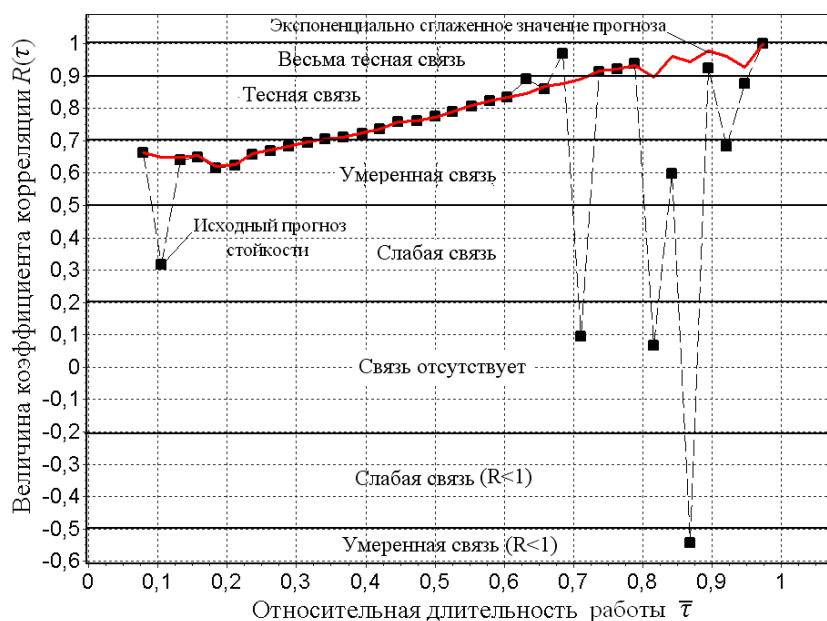


Рисунок 3.7 – Изменение текущей величины коэффициентов корреляции $R(\tau)$ графиков модели тренда и фактического тренда звука на участке упреждения

На рис. 3.7 приведены графики коэффициентов корреляций фактического тренда звука и графиков модели тренда (3.11), рассчитанные с использованием в качестве коэффициента модели исходной величины ресурса T_{np} (пунктир), рассчитанной по формуле (3.14) и его экспоненциально сглаженного значения $\bar{T}_{EXP}(\tau_n)$, найденного по формуле (3.19) (сплошная кривая).

Из рисунка следует, что график коэффициента корреляции фактической и расчетной кривых, где в качестве параметра T используется экспоненциально сглаженное значение прогноза $\bar{T}_{EXP}(\tau_n)$, характеризуется меньшим непостоянством и находится в зоне высоких значений корреляционной связи.

Следовательно, и параметр T (численное значение искомого ресурса) модели тренда, определяемое в процессе ее идентификации, имеет те же качества нормальности и достоверности своей величины. Собственно, подобный вывод следует и из информации, приведенной на рис. 3.6.

Экспериментальная проверка метода определения ресурса обрабатывающих систем посредством использования модели тренда (3.11) подтвердила его эффективность [55,56,57]. Результаты статистического анализа представлены в разд. 5 и в Приложение Г. Оценка статистической значимости модели тренда, проведенная для типовых металлообрабатывающих систем токарного и фрезерного станков при их работе на режимах, приведенных в табл. 5.1 и 5.2, показала, что коэффициенты модели согласно F - критерию Фишера статистически значимые, коэффициент корреляции R между фактическим трендом звука и графиком его модели составил:

– на участке медленного изменения тренда звука при работе обрабатывающих систем:

- токарного станка - 0,852;
- фрезерного станка - 0,993;

– на участке резкого изменения тренда звука при работе обрабатывающих систем:

- токарного станка - 0,903;
- фрезерного станка - 0,992.

Знание фактической величины ресурса обрабатывающей системы позволяет определять степень критичности динамического поведения обрабатывающих систем и на основе этого целеустремленно регулировать режимы их работы.

Методики и алгоритмы контроля динамического поведения обрабатывающих систем и управления их работой, а так же реализующий их программный продукт рассмотрены в следующем разделе.

Выводы

1. Отсутствие норм, регламентирующих предельно допустимые значения амплитуд колебаний обрабатывающих систем, равно, как и амплитуд звуковых волн, сопровождающих их работу, делает невозможным применение традиционно используемой, например, для машин, у которых подобные нормы имеются, двух этапной процедуры определения их ресурса. В связи с этим предложен новый одноэтапный метод определения ресурса, заключающийся в параметрической идентификации прогнозной модели по результатам контроля тренда звука, сопровождающего работу обрабатывающей системы на протяжении всего контролируемого периода выполнения ею заданной технологической операции.

2. Аналитическое выражение модели тренда собой сумму двух степенных дробно-рациональных функций, в число коэффициентов которых как раз и включено числовое значение искомого ресурса обрабатывающей системы.

3. Непрерывность контроля динамического поведения обрабатывающих систем обеспечивает необходимую статистическую достоверность идентифицируемых параметров модели тренда, включая и искомый ресурс, оценка статистической значимости которых показала, что коэффициенты модели согласно F -критерию Фишера статистически значимые, коэффициент корреляции R между фактическим и расчетным значениями звука:

– на участке медленного изменения тренда звука равен 0,852 и 0,993, соответственно для обрабатывающих систем токарного и фрезерного станков;

– на участке резкого изменения тренда звука равен 0,903 и 0,992, соответственно для обрабатывающих систем токарного и фрезерного станков.

РАЗДЕЛ 4

РАЗРАБОТКА И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ СИСТЕМ

В настоящем разделе представлены результаты разработки и программная реализация методов и алгоритмов контроля динамического поведения и управления работой ресурса обрабатывающих систем. Алгоритмы описывают последовательность выполнения, в соответствии с разработанными методами, оперативного звукового и вибрационного контроля динамического поведения обрабатывающих систем с целью определения их ресурса, расчета показателей состояния их основных элементов и принятия на основе этого управляющего решения о целесообразности продолжения работы оборудования на заданных режимах или же о необходимости их коррекции для продления периода их работоспособности.

Программная реализация алгоритмов выполнена на алгоритмическом языке JAVA и предназначена для микропроцессорных устройств (планшет и смартфон), разработанных на платформе Android.

4.1 Основные положения метода контроля динамического поведения обрабатывающих систем

При разработке метода контроля динамического поведения обрабатывающих систем полагалось, что он должен обеспечивать оперативное определение их ресурса и, исходя из этого, обеспечивать непрерывный контроль качества функционирования а, при необходимости, и коррекции режима работы поднадзорного оборудования.

Метод разработан с учетом основных положений ГОСТа [69], нормирующего показатели технического состояния металлообрабатывающих технологических систем (рис. 4.1):

- обрабатывающая система имеет два вида отказов: «параметрические отказы» и «функциональные отказы»;

- «параметрические отказы» наблюдаются при чистовой обработке на участке AB кривой износа инструмента (рис.2.16,4.1). Чистовая обработка прекращается в точке B . В этой точке, согласно «технологическому критерию», износ лезвия достигает величины, при которой точность и шероховатость обработанной поверхности перестают удовлетворять техническим условиям на деталь $h_{3оп}$;
- точность чистовой и получистовой (достаточно часто) обработки косвенно характеризуется размерным (радиальным) износом лезвия инструмента, а качество поверхности описывается величиной ее шероховатости;
- «функциональные отказы» происходят при черновой (чаще всего) или получистовой (реже) видах обработки, когда процесс резания не останавливается в точке B кривой износа, а может продолжаться до точки C , где износ лезвия достигает недопустимой величины $h_{3нд}$ (рис. 2.16, 4.1). К функциональным отказам также относят сколы и выкрашивание режущей кромки, приводящие, в конечном счете, к выходу инструмента из строя и его замене;
- наряду с отказами инструмента возможен также отказ обрабатываемой системы из-за дефектов станочного оборудования, что также требует постоянного контроля его состояния.

Структурно–логическая схема методики контроля динамического поведения обрабатывающих систем представлена на рис. 4.2. Как следует из схемы, контроль в соответствии с методикой начинается с измерения и первоначальной обработки исходных данных. В качестве исходных данных используются амплитуды звуковой волны, сопровождающей процессы, происходящие в рабочей зоне обрабатываемой системы, и уровни вибрации станка.

Для исключения искажающего влияния на полезный сигнал (амплитуду звуковой волны) звукового фона, окружающего обрабатываемую систему, абсолютное значение амплитуды, в соответствии с рекомендациями, рассмотренными в п. 2.1, приводится к безразмерному виду, путем деления

текущей величины амплитуды $E_{36}(\tau)$ на ее первоначальное значение $E_{36}(\tau_0)$, измеренное при первом контроле динамического поведения обрабатывающей системы $\left(\bar{E}_{36}(\tau) = \frac{E_{36}(\tau)}{E_{36}(\tau_0)} \right)$.

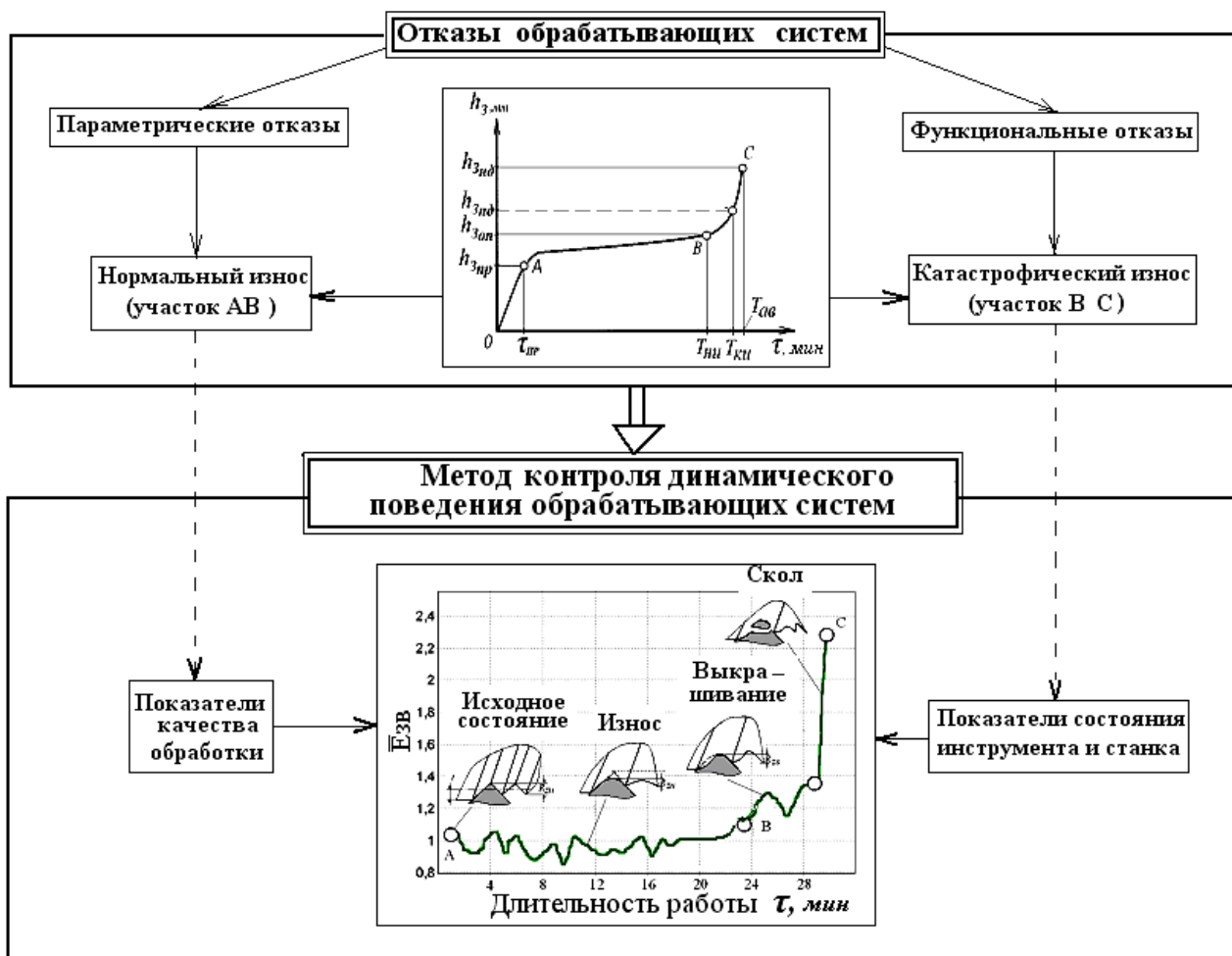


Рисунок 4.1 – Основные положения методики контроля динамического поведения обрабатывающих систем

Далее, по методу, изложенному в разд. 3, определяется ресурс обрабатывающей системы. Аналогичным образом находится наработка станка до остановки его на ремонт (осмотр, подладку).

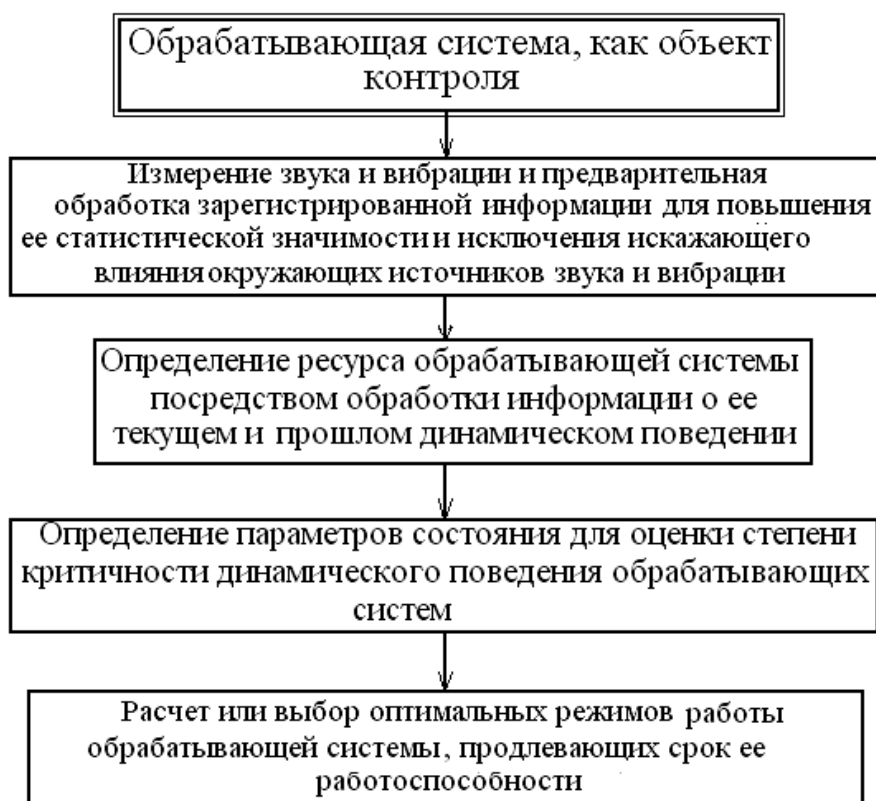


Рисунок 4.2 – Структурно–логическая схема метода контроля динамического поведения обрабатывающих систем

По результатам определения ресурса обрабатывающей системы, в соответствии с рассмотренной ниже методом, оценивается степень критичности ее динамического поведения.

4.2 Определение степени критичности динамического поведения обрабатывающих систем

Степень критичности динамического поведения обрабатывающих систем оценивается по вектору (набору) показателей состояния. Набор показателей состоит из показателя качества обработки детали и показателей технического состояния режущего инструмента и станка. Эти показатели численно описывают критичность состояния данных основных элементов обрабатывающих систем. Функции, посредством которых рассчитываются численные значения этих показателей, в теории «нечетких множеств» называются «функциями принадлежности» [206]. «Функция принадлежности» трансформирует исходные физические значения входных параметров (амплитуду звуковой волны $E_{зв}$,

уровень вибрации узлов станка A_6 , текущую наработку инструмента τ и численного значения ресурса обрабатывающей системы T_{IP}) в значения лингвистических переменных «термов». «Термы» лингвистической переменной, называемой в данном случае «показатель динамического поведения обрабатывающей системы», связывают вербальное и количественное описание степени критичности текущего динамического поведения обрабатывающих систем. Используемый в данном случае (табл. 4.1) набор вербальных величин, описывает постепенно ухудшающееся динамическое поведение обрабатывающей системы. В табл. 4.1 приведены так же значения интервалов, в которых изменяются количественные значения «термов». Границы интервалов представляют нормализованный ряд предпочтительных чисел $R5$. Предпочтительные числа являются геометрической прогрессией с корнем $q = \sqrt[5]{10} \approx 1,56$ [190].

Таблица 4.1 – Базовая шкала лингвистической переменной «показатель динамического поведения обрабатывающей системы»

Вербальные значения «термов»				
Хорошее состояние	Приемлемое состояние	Допустимое состояние	Требуется подналадка	Недопустимое состояние
0 – 0.41	0.41 – 0.63	0.63 – 0.9	0.9 – 1.0	> 1.0

Процедура контроля заключается в преобразовании при помощи «функции принадлежности» физических значений входных параметров в значения лингвистических переменных. Далее, в зависимости от значения лингвистической переменной, текущее динамическое поведение объекта контроля относится к тому или иному «терму», т.е. дается та или иная характеристика степени его критичности.

Получим выражения для «функций принадлежности», описывающих показатели состояния основных элементов обрабатывающих систем: обрабатываемой детали, режущего инструмента детали и станочного оборудования. Эти показатели, в свою очередь, являются составляющими вектора, описывающего степень критичности динамического поведения обрабатывающей системы в целом.

4.2.1 Показатель качества обработки детали

Получим аналитическое выражение для «функции принадлежности», описывающей показатель качества обработки детали на примере работы обрабатывающей системы токарного станка. Качество обработки детали характеризуется точностью ее изготовления и шероховатостью обработанной поверхности (степенью соответствия этих параметров требованиям чертежа). В соответствие с этим качество обработки детали (качество работы обрабатывающей системы) описывается лингвистической переменной под названием «показатель качества обработки» $a_{\text{кач}}$. Эта переменная определяется посредством следующей «функции принадлежности»:

$$a_{\text{кач}} = \varphi \cdot a_{\text{точ}} + (1 - \varphi) \cdot a_{\text{ш}}, \quad (4.1)$$

где $a_{\text{точ}}$ – лингвистическая переменная «показатель точности обработки»;

$a_{\text{ш}}$ – лингвистическая переменная «показатель шероховатости поверхности»;

φ – весовой коэффициент ($\varphi = 0,1 \dots 0,9$).

Величина весового коэффициента выбирается в зависимости от приоритетов (что важнее геометрическая точность или же чистота поверхности), которыми руководствуются при оценке качества работы обрабатывающей системы. При равнозначных требованиях, как к точности, так и к чистоте поверхности, величина весового коэффициента принимается равной 0,5.

Рассмотрим порядок получения аналитических выражений для каждого из слагаемых «функции принадлежности» (4.1).

4.2.1.1 Показатель точности обработки $a_{\text{точ}}$

Причиной ухудшения точности обработки из-за нарушения геометрии детали является размерный износ режущего инструмента h_r , равный по модулю и противоположный по знаку изменению радиуса обработанной поверхности детали (рис. 4.3). Для получения аналитического выражения для «функции принадлежности», описывающей показатель точности обработки $a_{\text{точ}}$, воспользуемся методами теории подобия и размерности. Согласно этой теории считаем, что этот показатель описывается следующим набором определяющих

параметров: исходным износом $h_r(\tau_0)$, текущим износом $h_r(\tau)$, текущей наработкой инструмента τ , численным значением ресурса инструмента \bar{T}_{exp} .

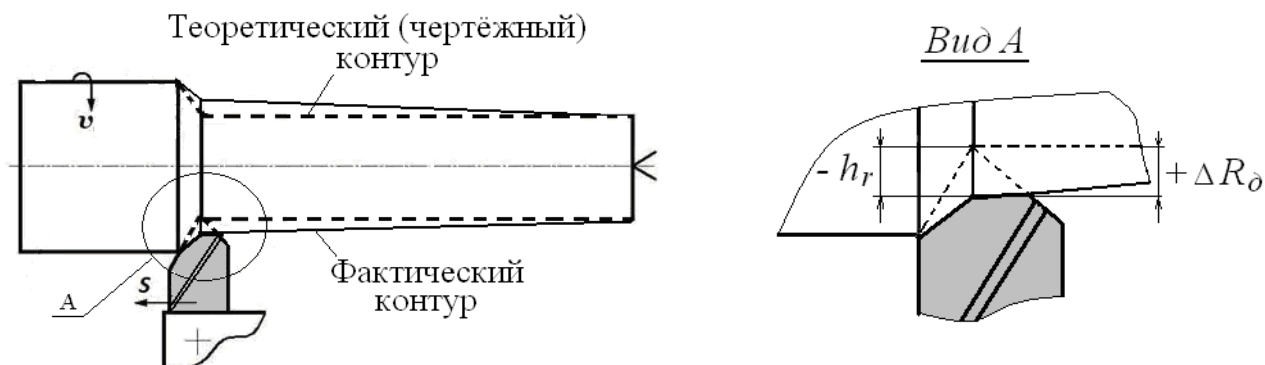


Рисунок 4.3 – Ухудшение точности обработанной поверхности из-за размерного износа лезвия инструмента

Эти параметры имеют две размерности: длины L ($[h_r(\tau_0)] = L$, $[h_r(\tau)] = L$) и времени T ($[\tau] = T$, $[\bar{T}_{exp}] = T$). Искомый показатель $a_{точ}$ представим, как функцию произведения этих определяющих параметров, каждый из которых возведен в свою степень:

$$a_{точ} = f(h_r(\tau_0), h_r(\tau), \tau, \bar{T}_{exp}) = h_r^\alpha(\tau_0) \cdot h_r^\beta(\tau) \cdot \tau^\gamma \cdot \bar{T}_{exp}^\lambda. \quad (4.2)$$

Далее определяем значения показателей степени. Для этого заменяем величины, стоящие в выражении, их размерностями и подставляем в формулу (4.2):

$$1 = L^\alpha L^\beta T^\gamma T^\lambda = L^{\alpha+\beta} T^{\gamma+\lambda}. \quad (4.3)$$

Поскольку искомый показатель – безразмерная величина, то ее размерность, согласно положениям теории размерностей, равна единице. Согласно этому должны выполняться следующие условия для показателей степеней:

$$\alpha + \beta = 0, \gamma + \lambda = 0. \quad (4.4)$$

Дополняем данную систему двух уравнений с четырьмя неизвестными до 4 - х уравнений условиями: $\beta = 1, \gamma = 1$. Совместное решение получающихся при этом четырех уравнений приводит к такому результату: $\alpha = -1, \beta = 1, \gamma = 1, \lambda = -1$. Таким образом, формула для показателя точности обработки может быть записана так:

$$a_{точ} = \frac{h_r(\tau)}{h_r(\tau_0)} \frac{\tau}{\bar{T}_{exp}}. \quad (4.5)$$

Используя определенную в разд. 2 тесную корреляционную зависимость между кривой износа инструмента и трендом звука, перепишем соотношение (4.5) в следующем виде:

$$a_{точ} = \frac{E_{зв}(\tau)}{E_{зв}(\tau_0)} \frac{\tau}{\bar{T}_{exp}} = \bar{E}_{зв}(\tau) \frac{\tau}{\bar{T}_{exp}}. \quad (4.6)$$

Выражение (4.6) представляет собой искомую «функцию принадлежности», изменяющуюся в соответствии с теорией «нечетких множеств», от нуля до единицы [206]. Проверим правомерность этого утверждения по отношению к показателю $a_{точ}$.

Степень изменения геометрии детали вследствие износа инструмента можно оценить по следующей зависимости:

$$\delta = \frac{D_{\phi} - D_n}{D_n^{+\Delta B} - D_n}, \quad (4.7)$$

где D_n – номинальный (чертёжный) размер детали; D_{ϕ} – фактический размер детали ($D_{\phi} = D_n + 2 \cdot h_r$); h_r – радиальный износ инструмента; ΔB – верхняя граница допуска.

Перепишем выражение (4.6) в следующем виде:

$$\delta = \frac{D_n + 2 \cdot h_r - D_n}{D_n + \Delta B - D_n} = \frac{2 \cdot h_r}{\Delta B}. \quad (4.8)$$

Выражение (4.8) изменяется от нуля при остро заточенном инструменте ($h_r \approx 0$) до единицы, когда величина радиального износа инструмента h_r достигает предельно допустимой величины $\Delta B/2$, превышение которой ($\delta > 1$) приводит к появлению брака.

Таким образом, показатель точности изготовления детали $a_{точ}$, изменяясь от нуля до единицы, адекватно описывает степень изменения геометрии детали по мере затупления режущего инструмента.

4.2.1.2 Показатель шероховатости обработанной поверхности $a_{ш}$

Для получения аналитического выражения для «функции принадлежности», описывающей показатель шероховатости обработанной поверхности $a_{ш}$, были специально проведены эксперименты для установления корреляционной связи

между амплитудой звуковой волны и высотным параметром шероховатости ($E_{3\sigma}(\tau) \sim R_z(\tau)$) на примере работы обрабатывающей системы токарного станка.

Методика эксперимента заключалась в периодическом (через каждые пять проходов инструмента) измерении посредством профилометра типа 283 (рис. Б.1 Приложения Б) высотного параметра шероховатости. Дополнительно сигнал с профилометра записывался на ноутбук (рис. Б.1). Результаты измерений фиксировались посредством стрелочного индикатора прибора и дополнительно записывались на ноутбук.

Сигнал, зарегистрированный на ноутбук, подвергался дальнейшей обработки с целью определения спектра и профиля шероховатости. Получаемые при этом данные сравнивались со спектром и временной реализаций звуковой волны, возникающей в рабочей зоне обрабатывающей системы.

Результаты экспериментов, приведенные в Приложении Б на рис. Б.2-Б.7, позволили установить тесную корреляцию амплитуды звуковой волны $E_{3\sigma}$ и параметра шероховатости R_a (рис. Б.2, Б.3, коэффициент корреляции $R = 0,964$).

Подтверждением этого так же явилось:

- хорошее соответствие между фактическим трендом параметра R_a и трендом этого параметра, рассчитанным по уравнению регрессии между ним и амплитудой звуковой волны (рис. Б.4);

- корреляционная зависимость спектров шероховатости и звуковой волны (рис. Б.5, Б.6, коэффициент корреляции $R = 0.783$);

- совпадение, как по уровню, так и по шагу следования пиков профиля шероховатости и временной реализации звуковой волны (рис.Б.7).

Таким образом, результаты экспериментов наглядно свидетельствуют о тесной корреляционной связи шероховатости обработанной поверхности и характеристик звуковой волны, в частности, ее амплитуды $E_{3\sigma}$ и высотного параметра, что позволило составить следующую пропорцию, характеризующую, согласованное развитие этих параметров за время работы обрабатывающей системы:

$$\frac{R_Z(\tau)}{R_Z(\tau_0)} \approx \frac{E_{3\phi}(\tau)}{E_{3\phi}(\tau_0)}, \quad (4.9)$$

где $R_Z(\tau_0), R_Z(\tau)$ – высотный параметр шероховатости, имевший место, соответственно, в начале работы обрабатывающей системы и в текущий момент времени.

Если принять дробь, стоящую в левой части пропорции (4.9), в качестве аналитического выражения для искомой «функции принадлежности», то получим следующую формулу для расчета численного значения показателя шероховатости $a_{ш}(\tau)$:

$$a_{ш}(\tau) = \frac{E_{3\phi}(\tau)}{E_{3\phi}(\tau_0)}. \quad (4.10)$$

Если пропорцию (4.9) разрешить относительно текущего значения высотного параметра $R_Z(\tau)$, то получим выражение для показателя шероховатости, имеющем размерность длины (мкм).

$$a_{ш}(\tau) = R_Z(\tau_0) \frac{E_{3\phi}(\tau)}{E_{3\phi}(\tau_0)} = R_Z(\tau_0) \bar{E}_{3\phi}(\tau), \text{ мкм}. \quad (4.11)$$

Исходное значение параметра шероховатости $R_Z(\tau_0)$ в зависимости от величины радиуса вершины резца r_ϕ определяется следующим образом:

– при $r_\phi = 0$

$$R_Z = \frac{S \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \operatorname{tg} \phi_1}{\operatorname{tg} \phi + \operatorname{tg} \phi_1} = \frac{S \cdot \sin \phi \cdot \sin \phi_1}{\sin(\phi + \phi_1)}, \text{ мкм}, \quad (4.12)$$

где ϕ, ϕ_1 – соответственно, главный и вспомогательный углы лезвия резца в плане;

– при $r_\phi \neq 0$

$$R_Z = 1000 \left(r_\phi - r_\phi \sqrt{1 - \frac{S^2}{4r_\phi^2}} \right) \approx 1000 \frac{S^2}{8r_\phi}, \text{ мкм}. \quad (4.13)$$

где S – подача, мм/об.

При интерактивном контроле динамического поведения обрабатывающей системы показатель шероховатости удобней рассчитывать по формуле (4.11), сохраняющей размерность шероховатости. При автоматическом контроле, наоборот, удобно применять безразмерную форму его представления (4.10), т.к. она проще поддается формализации при составлении программного продукта,

включаемого в программную среду указанной автоматической системы контроля динамического поведения обрабатывающей системы.

4.2.2 Показатель состояния режущего инструмента

Состояние режущего инструмента в процессе выполнения технологической операции по причине его износа постепенно ухудшается. Соответствующим образом изменяется и динамическое поведение обрабатывающей системы, на которое износ инструмента оказывает доминирующее влияние. По этой причине контроль динамического поведения обрабатывающей системы по тренду, сопровождающего ее работу звука, позволяет косвенно оценивать степень износа инструмента.

Измеренное значение амплитуды звуковой волны можно изобразить в виде точки на плоскости с координатами «амплитуда звуковой волны $E_{36}(\tau_i)$ – время τ_i » (рис. 4.4). Степень изменения амплитуды звуковой волны за время протекания технологического процесса (время износа инструмента) описывается следующей «функцией принадлежности»:

$$\bar{E}_{36}(\tau) = \frac{E_{36}(\tau_i) - E_{36}(\tau_0)}{E_{36}^{kp} - E_{36}(\tau_0)}, \quad (4.14)$$

где: $E_{36}(\tau_i), E_{36}(\tau_0), E_{36}^{kp}$ – текущее, исходное и предельно допустимое (критическое) значение амплитуды звуковой волны.

Функция (4.14) согласно классификации, применяемой в теории «нечетких множеств» [206], относится к разряду « S – линейных функций» и имеет ясный физический смысл. Она характеризует часть допуска ($E_{36}^{kp} - E_{36}(\tau_0)$), которой соответствует разность между текущим значением контролируемого параметра и его исходным значением ($E_{36}(\tau) - E_{36}(\tau_0)$). В момент достижения текущим значением контролируемого параметра границы допуска ($E_{36}(\tau) = E_{36}^{kp}$) «функция принадлежности» (4.14) равна единице.

Для исключения влияния в выражении (4.14) нестабильности измеряемых значений амплитуд звуковой волны $E_{36}(\tau_i)$ на оценку динамического поведения обрабатывающей системы, заменим измеренные величины амплитуд их сглаженными

значениями. Сглаживание осуществляется путём аппроксимации дискретных значений измеряемых величин графиком прогнозной модели (3.11). В этом случае функция (4.13) примет следующий вид:

$$\bar{E}_{зв} = \frac{\left(\frac{\tau_i - \tau_0}{\bar{T}_{exp} - \tau_i} \right)^\alpha}{1 + \left(\frac{\tau_i - \tau_0}{\bar{T}_{exp} - \tau_i} \right)^\alpha}. \quad (4.14)$$

Параметр $\bar{E}_{зв}$ в соответствие со свойствами «функций принадлежности» изменяется от нуля до единицы ($0 < \bar{E}_{зв} \leq 1$), достигая предельной величины к моменту достижения динамическим поведением обрабатывающей системы своей недопустимой стадии (момента замены режущего инструмента). Лингвистическая переменная в данном случае называется: «*степень изменения амплитуды звуковой волны*» и имеет ряд значений «термов». «Термы» этой переменной и их граничные значения приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Базовая шкала лингвистической переменной «степень изменения амплитуды звуковой волны»

Вербальные значения «термов»			
Ниже средней	Средняя	Выше средней	Недопустимая
$0 < \bar{E}_{зв} \leq 0,41$	$0,41 < \bar{E}_{зв} \leq 0,63$	$0,63 < \bar{E}_{зв} < 1,0$	$\bar{E}_{зв} \geq 1,0$

Для эффективного контроля динамического поведения обрабатывающей системы, обусловленного износом режущего инструмента, вводится «терм» «недопустимая степень» характеризующий динамическое поведение обрабатывающей системы, при котором она, из-за предельного износа инструмента, теряет работоспособность, что приводит к разрушению инструмента и появлению брака детали. Рассмотренная лингвистическая переменная характеризует текущее динамическое поведение обрабатывающей системы.

При обработке одним и тем же инструментом длинномерных и крупногабаритных деталей или же крупной партии деталей необходимо учитывать скорость (темп) изменения состояния инструмента в процессе резания. Учет темпа позволяет своевременно принять упреждающее решение о степени критичности

состояния инструмента и осуществить либо его замену, либо коррекцию режимов резания. Темп изменения состояния инструмента характеризуется градиентом тренда звука, сопровождающего процесс резания.

На рис. 4.3 показаны три возможных варианта тренда давления звука, отличающихся, в рассматриваемый момент времени τ_n , углом наклона φ_i . Тангенсы этих углов представляют собой разные градиенты тренда давления звука, что косвенно характеризует разную степень повреждаемости инструмента, т.е. разную скорость изменения износа или развития трещины в его лезвии. Количественные оценки этих скоростей можно получить путем сравнения их с тангенсом угла наклона опорного тренда. Под опорным трендом понимается такая траектория изменения амплитуды давления звука, а, соответственно, и состояния инструмента (рис. 4.3 и 4.4), при которой инструмент достигнет предельно допустимого состояния, отработав нормативное время ($T_{нор} = 60, 90, 120$ мин) без брака детали. Опорная траектория является прямой линией.

Для удобства сравнения реальных криволинейных трендов с опорным целесообразно и реальные криволинейные траектории заменить прямыми. Эти прямые соединяют начальную точку траектории с конечной, где производится замена режущего инструмента. Наклоны этих линеаризованных трендов характеризуются углом γ_i . Тангенсы этих углов и угла наклона опорной траектории соответственно, равны:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\gamma_i) &= \frac{E_{36}^{kp} - E_{36}(\tau_0)}{T_{npi} - \tau_0}, \\ \operatorname{tg}(\gamma_{on}) &= \frac{E_{36}^{kp} - E_{36}(\tau_0)}{T_{нор} - \tau_0}. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Разделим первое выражение на второе и, тем самым, пронормируем фактическую скорость изменения амплитуды звуковой волны V_{36i} (градиент звукового тренда) опорной скоростью V_{36}^{on} (градиентом опорного звукового тренда).

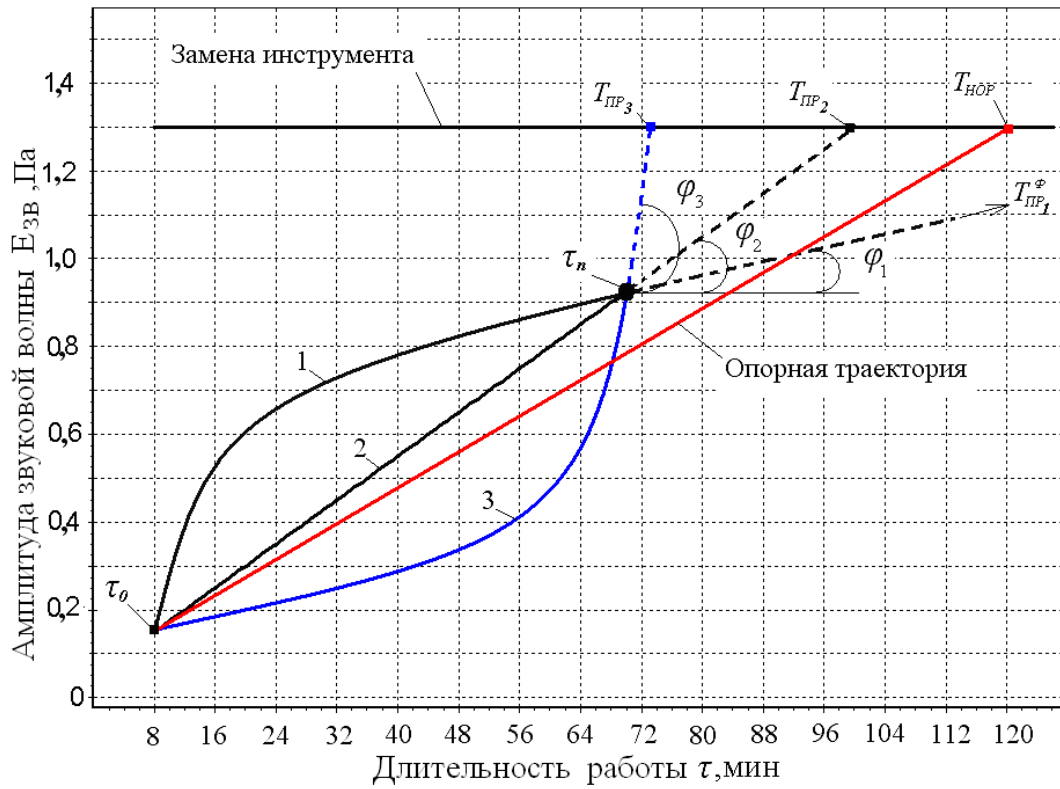


Рисунок 4.3 – Возможные варианты трендов звука, проходящие через точку, описывающую текущее динамическое поведение обрабатывающей системы

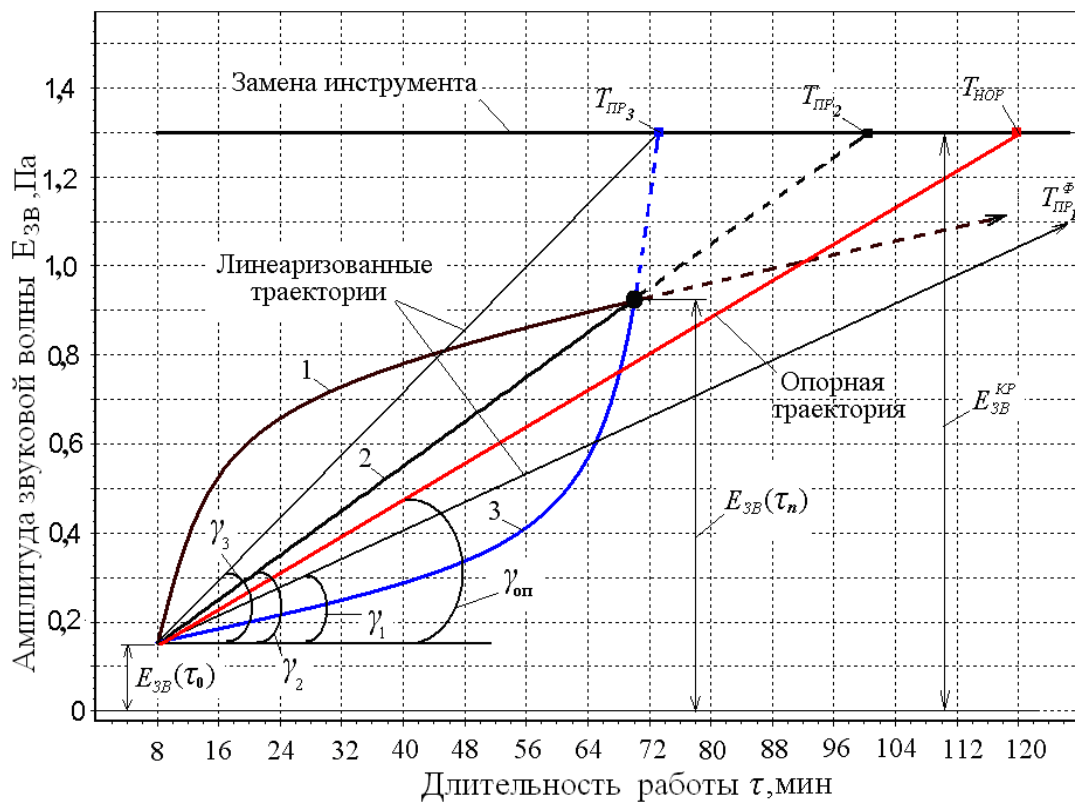


Рисунок 4.4 – Опорный и фактические тренды звука, сопровождающего работу обрабатывающей системы

$$\bar{V}_{36} = \frac{V_{36i}}{V_{36on}} = \frac{T_{нор} - \tau_0}{T_{нрi} - \tau_0}. \quad (4.16)$$

Формула (4.16) представляет собой «функцию принадлежности», которая изменяется от нуля до единицы ($0 < \bar{V}_{36} \leq 1$) и дает количественную оценку градиента тренда звука, а косвенно, и градиента изменения состояния инструмента. Лингвистическая переменная в данном случае называется «*скорость изменения амплитуды звуковой волны*». «Термы» этой переменной и их граничные значения приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3 – Базовая шкала лингвистической переменной «*скорость изменения амплитуды звуковой волны*»

Вербальные значения «термов»			
Медленная	Умеренная	Быстрая	Недопустимая
$0 < \bar{V}_{36} \leq 0,41$	$0,41 < \bar{V}_{36} \leq 0,63$	$0,63 < \bar{V}_{36} < 1,0$	$\bar{V}_{36} \geq 1,0$

Рассмотренные лингвистические переменные \bar{E}_{36} и \bar{V}_{36} объединены в обобщенную лингвистическую переменную $a_{ин}$, именуемую «*техническое состояние режущего инструмента*» (4.17), куда они входят в виде слагаемых с весовыми коэффициентами.

$$a_{ин} = \psi \bar{E}_{36} + (1 - \psi) \bar{V}_{36}. \quad (4.17)$$

где: ψ – весовой коэффициент ($\psi = 0,3 \dots 0,7$).

Весовые коэффициенты определяют степень влияния на оценку состояния инструмента степени и скорости изменения своей косвенной характеристики – тренда звука.

С учетом (4.14) и (4.16) выражение (4.17) примет следующий вид:

$$a_{ин} = \psi \frac{\left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{нр} - \tau} \right)^\alpha}{1 + \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{нр} - \tau} \right)^\alpha} + (1 - \psi) \frac{T_{нор} - \tau_0}{T_{нр} - \tau_0}, \quad (4.18)$$

где $T_{нор}$ – нормативное (заданное в паспорте или каталогах) время эксплуатации инструмента между переточками; $T_{нр}$ – прогноз ресурса инструмента.

Выражение (4.18) является «функцией принадлежности», посредством

которой рассчитываются значения обобщенной лингвистической переменной $a_{ин}$. «Термы» этой лингвистической переменной $a_{ин}$ и их граничные значения приведены в табл. 4.4.

В практике резания лезвие инструмента испытывает комплексное воздействие: износ рабочих поверхностей и выкрашивание режущих кромок. Совместное воздействие этих факторов оценивается следующим показателем состояния:

$$a_{комп} = a_{из} + a_{вк} - a_{из} \cdot a_{вк}, \quad (4.19)$$

где $a_{из}$ и $a_{вк}$ – показатели, описывающие состояние инструмента при нормальном и катастрофическом износе.

Параметры $a_{из}$ и $a_{вк}$ рассчитываются по формуле (4.19) при подстановке в нее вместо параметра $T_{пр}$ прогноза ресурса инструмента на участке нормального ($T_{ни}$) и катастрофического ($T_{ки}$) износов, получаемых посредством прогнозной модели (3.11).

Таблица 4.4 – Базовая шкала лингвистической переменной «техническое состояние режущего инструмента»

Вербальные значения «термов»			
Хорошее	Удовлетворительное	Требуемое подналадки	Требуемое замены
$0 < a_{ин} \leq 0,41$	$0,41 < a_{ин} \leq 0,63$	$0,63 < a_{ин} < 1,0$	$a_{ин} \geq 1,0$

4.2.3 Контроль динамического поведения станочного оборудования

Диагностирование технического состояния станочного оборудования осуществляется с помощью экспертной системы диагностирования, в соответствие с этим она состоит из следующих основных подсистем: «базы данных» и «базы знаний». Рассмотрим последовательно каждую из них.

4.2.3.1 «База данных»

«База данных», приведенная в Приложении В, содержит информацию о контролируемых дефектах станка (табл. В.1) и их диагностических признаках (табл. В.2 и В.3). Конструктивными основными элементами станка, наиболее часто подлежащими диагностированию, являются шарикоподшипниковые опоры

и зубчатые передачи. Рассмотрим каждый из этих элементов отдельно.

4.2.3.1.1 Шарикоподшипниковые опоры

Ключевое влияние на качество изготовления детали оказывает техническое состояние шпинделя, которое, в свою очередь, определяется степенью изношенности его шарикоподшипниковых опор. В табл. В.2 приведен перечень дефектов шарикоподшипников, а в табл. В.3 – информационные частоты, на которых эти дефекты выявляются. На этих частотах, естественно, проявляются дефекты подшипниковых опор и других кинематических пар станка, где они применяются.

4.2.3.1.2 Зубчатые передачи

Наличие значительного количества разнообразных зубчатых передач, является характерной особенностью кинематической схемы металлообрабатывающего станочного оборудования (рис. 4.9).

Работу зубчатой пары сопровождает целый ряд характерных вибраций, вызываемых трением и ударами при обкатывании зуба одной шестерни зубом другой. Анализ этих вибраций в работающем оборудовании позволяет достаточно успешно диагностировать различные дефекты зубозацепления [196].

Использование для диагностики состояния зубчатых передач сигналов в размерности виброскорости повышает информативность операции вибродиагностирования.

Нормально функционирующая зубчатая передача даже при отсутствии дефектов может обладать весьма заметной виброактивностью. Колебания при этом возникают в широком диапазоне частот и могут иметь весьма сложный состав и характер. Возбуждение колебаний в зубчатых передачах, в том числе и нормально функционирующих, вызывается проявлением двух основных факторов – погрешностями изготовления и сборки (монтажа) зубчатых колес и периодическим изменением жесткости зубьев по фазе зацепления.

Погрешности изготовления складываются из постоянных и переменных погрешностей в шаге зубьев. Погрешности монтажа проявляются в виде нарушений соосности валов и перекосе их осей, нарушении боковых зазоров и др.

При работе редуктора возникают шум и удары, динамические нагрузки по мере износа узлов редуктора повышаются. Ситуация усугубляется при износе деталей, когда изменяются отдельные элементы профиля зубьев.

Периодическое изменение жесткости зубьев и постоянная погрешность шага зацепления вызывают появление в вибрации зубчатой передачи колебаний на зубцовой частоте и ее гармониках. Характеристика зубчатых колес, на пример, станка 16К20Т1 приведена в табл. В.5, а информационные частоты, где проявляются эти дефекты, указаны в табл. В.4. Кинематическая схема этого станка показана на рис. В.3.

Переменная погрешность в шаге зацепления и нарушения соосности (перекося осей валов) вызывают вибрацию на частотах вращения валов обоих колес и/или на модуляционных частотах.

Обычно в спектре вибрации зубчатой передачи содержится шумовой компонент, среднеквадратическая величина которого меняется с наработкой, следуя развитию локального износа. Причем, в процессе приработки колес уровень шума уменьшается. При нормальной работе в достаточно длительном интервале времени компонент практически неизменен и растет по экспоненте в процессе интенсивного износа. Шумовой компонент в спектре вибрации может иметь вид белого шума, который, накладываясь на дискретные собственные частоты деталей зубчатой передачи, может вызывать резонанс и появление новых спектральных составляющих. К этому же может приводить, например, возникновение параметрического резонанса в прямозубых передачах, при появлении отрывных виброударных колебательных режимов.

Эксплуатационные дефекты зубчатой передачи условно можно разделить на следующие виды: абразивный износ зубчатого зацепления, выкрашивание зубьев (питтинг) зубчатых колес, трещины и излом зубьев зубчатых колес, и заедание зубчатых колес. Поскольку они являются возмущающими факторами, свойства вибросигнала (форма сигнала и спектр вибрации, в т.ч. особенно спектр огибающей, кепстр и др.) при их наличии всегда меняются. В частности, в спектре могут меняться соотношения между основными частотами возбуждения,

появляться новые спектральные составляющие, значительно изменяется уровень шумового компонента. На временной реализации вибросигнала могут появляться ударные импульсы и изменяться соотношение между периодическими и шумовыми компонентами. В то же время следует учитывать, что существенные изменения формы и спектра сигнала вибрации в основном наблюдаются при развитых повреждениях. На ранней стадии развития дефектов целесообразно использовать другие методы анализа виброакустического сигнала, такие как кепстральный анализ, анализ спектра узкополосной огибающей и др.

4.2.3.2 «База знаний»

Диагноз технического состояния станочного оборудования ставится аналогично постановке диагноза режущего инструмента, т.е. путем вычисления посредством «функции принадлежности» значений лингвистической переменной и сравнения этих значений с граничными значениями «термов», приведенных в табл. 4.1.

При постановке диагноза выдерживается следующий алгоритм:

- определяется частотный спектр вибраций, зарегистрированных в виброактивных точках станка;
- в спектре выделяются информационные частоты и определяются амплитуды колебаний контрольной точки на этих информационных частотах, представляющие собой диагностические параметры, на основе которых оценивается степень развития дефектов рассматриваемого узла станка;
- из амплитуд колебаний, зафиксированных при текущих и всех предыдущих измерениях, составляется временной ряд (тренд);
- по результатам анализа тренда диагностического параметра контролируемых дефектов данного станочного узла определяется ресурс работы каждого из поднадзорных узлов станка, путем параметрической идентификации прогнозной модели (4.20), представляющей модификацию прогнозной модели (3.11):

$$A_j^p(\tau) = A_j^{\phi}(\tau_0) \left\{ \eta \left[1 + \alpha \left(\frac{\tau_i - \tau_0}{T_{уст} - \tau_i} \right)^{\gamma} \right] + (1 - \eta) \left[1 - \beta \left(\frac{\tau_i - \tau_0}{T_{изн} - \tau_i} \right)^{\lambda} \right] \right\}, \quad (4.20)$$

где $\tau_0, T_{уст}, T_{изн}$ – наработка станка, соответственно, на момент первого контроля его технического состояния и прогноз наработки до остановки станка на ремонт, соответственно, по причине усталости и износа его узлов; $A_j^p(\tau)$ – уровень частотной составляющей вибрации станка, реагирующей на j -тый дефектный узел станка;

– определяются величины лингвистических переменных, описывающих степень критичности технического состояния каждого из подконтрольных узлов станка.

Значения этих лингвистических переменных рассчитываются по «функции принадлежности» (4.21), аналогичной функции (4.17).

$$a_{jизн} = \varphi \bar{A}_j + (1 - \varphi) \bar{V}_j, \quad (4.21)$$

где $\bar{A} = \left(\frac{\tau - \tau_0}{\hat{T}_{jуст, jизн} - \tau} \right)^{\beta, \alpha}$ – степень изменения уровня вибрации на j -той информационной гармонике, выраженная через параметры прогнозной модели (3.17); $\bar{V} = \frac{T_{нор}}{\hat{T}_{jуст, jизн}}$ – безразмерная скорость изменения уровня вибрации на j -той информационной гармонике; $\hat{T}_{jуст, jизн}$ – прогноз ресурса j -того узла станка, ограниченный, соответственно, его прогнозируемым разрушением из-за усталости материала и достижением предельной величины износа; $T_{нор}$ – принятый (нормативный) срок службы (наработки до ремонта) диагностируемого узла; φ – весовой коэффициент ($\varphi = 0.1 \dots 0.9$).

При этом, естественно, со стопроцентной исчерпывающей полнотой нельзя контролировать появление и развитие всех возможных дефектов диагностируемого узла станка. Всегда будет иметь место некоторая неоднозначность в определении их количества и вида. Для исключения этой неоднозначности, являющейся «слабым местом» вибродиагностики, введено понятие «прочие дефекты».

Степень развития «прочих дефектов» оценивается по спектру, образуемому при удалении из него информационных гармоник, реагирующих на известные дефекты станочных узлов.

Величина (уровень) вибрации, соответствующая оставшейся части спектра, рассчитывается по следующей формуле:

$$V_{\text{проч}} = \sqrt{V_{\text{сум}}^2 - \sum_{i=1}^k V_{j_i}^2}, \quad (4.22)$$

где $V_{\text{сум}}$ – уровень вибросигнала в мм/с , характеризующий сумму энергий информационных гармоник, реагирующих на известные и неизвестные дефекты станочного узла; V_{j_i} – уровень вибросигнала в мм/с , характеризующий энергию информационной гармоники, реагирующей на j -тый известный дефект станка.

Таким образом, согласно выше изложенному подходу, удастся контролировать 100 % дефектов контролируемых узлов станка и своевременно останавливать его на ремонт, не обращая внимания на категорию, к которой относится доминирующий у станка дефект. Если природа дефекта, из-за которого был остановлен на ремонт станок, неизвестна, то в результате ремонта эта причина будет выявлена и список известных дефектов будет пополнен.

Говоря другими словами, система диагностики по мере ее эксплуатации на данном станке будет «до обучаться», сводя на нет число дефектов неизвестной природы.

Диагноз состояния станочных узлов определяется по результатам сравнения рассчитанных для этих узлов фактических значений показателя состояния $a_{j\text{узл}}$ с его «термами» (диагнозами), приведенными в табл. 4.1.

Говоря другими словами, система диагностики по мере ее эксплуатации на данном станке будет «до обучаться», сводя на нет число дефектов неизвестной природы.

Диагноз состояния станочных узлов определяется по результатам сравнения рассчитанных для этих узлов фактических значений показателя состояния $a_{j\text{узл}}$ с его «термами» (диагнозами), приведенными в табл. 4.1.

Таблица 4.5 – Аналитические выражения «функций принадлежности», используемых при контроле динамического поведения обрабатывающей системы

Элемент обрабатывающей системы	Показатель состояния	
	характеризует	«функция принадлежности»
Деталь	качество обработки	$a_{кач} = \varphi \cdot \bar{E}_{зв}(\tau) \frac{\tau}{T_{exp}} + (1 - \varphi) \cdot \bar{E}_{зв}(\tau)$
Инструмент	износ рабочих поверхностей	$a_{из} = \varphi \frac{(\tau - \tau_0)^n}{(\tau - \tau_0)^n + (T_{ни} - \tau)^n} + (1 - \varphi) \frac{T_{нор}}{T_{ни}}$
	выкрашивание режущих кромок	$a_{вк} = \varphi \frac{(\tau - \tau_0)^\beta}{(\tau - \tau_0)^\beta + (T_{ки} - \tau)^\beta} + (1 - \varphi) \frac{T_{нор}}{T_{ки}}$
	комплексное воздействие износа и выкрашивания	$a_{комп} = a_{из} + a_{вк} - a_{из} \cdot a_{вк}$
Станок	степень развития дефектов станка	$a_{с.т} = \varphi \bar{A} + (1 - \varphi) \bar{V}$

Примечание: $\bar{A} = \frac{A_в(\tau) - A_в(\tau_0)}{A_в(T_{пр}) - A_в(\tau_0)}$; $\bar{V} = \frac{T_{нор}}{T_{пр}}$; $\varphi = 0,1 \dots 0,9$ – весовой коэффициент.

Говоря другими словами, система диагностики по мере ее эксплуатации на данном станке будет «дообучаться», сводя на нет число дефектов неизвестной природы.

Диагноз состояния станочных узлов определяется по результатам сравнения рассчитанных для этих узлов фактических значений показателя состояния a_{juzl} с его «термами» (диагнозами), приведенными в табл. 4.1.

Сводка аналитических выражений для «функций принадлежности» и их назначение приведены в табл. 4.5.

Наличие информации о фактическом ресурсе обрабатывающей системы позволяет целеустремленно регулировать режимы ее работы, напрямую сравнивая требуемую по техпроцессу длительность выполнения заданной технологической операции с фактическим ресурсом, которым «располагает» обрабатывающая система в фактически складывающихся условиях ее эксплуатации.

Методика и разработанный на ее основе алгоритм адаптивного управления работой обрабатывающих систем, использующие информацию о их фактическом ресурсе подконтрольного объекта, рассмотрен ниже.

4.3 Метод адаптивного управления работой обрабатывающих систем

Целью адаптивного управления работой обрабатывающих систем является обеспечение заданного по техпроцессу качества обработки (точности поверхности и заданной величины ее шероховатости). Рассмотрим метод адаптивного управления на примере обрабатывающей системы токарного станка и ЧПУ.

В качестве регулируемых параметров рассматривается скорость V (обороты шпинделя n) и подача S при неизменной глубине t резания.

При составлении целевой функции исходили из того общеизвестного факта, что определяющее влияние на качество обрабатываемой поверхности оказывает величина фаски износа h_3 задней поверхности режущего инструмента. Величина h_3 и ресурс обрабатывающих систем T связаны следующим соотношением:

$$T = \frac{h_3}{\lambda}, \quad (4.23)$$

где λ – скорость износа, мм/мин.

Управление длительностью эксплуатации обрабатывающей системы можно осуществлять только за счет изменения скорости износа λ , так как сама величина износа h_3 регулировке не подлежит. Поэтому алгоритм управления работой обрабатывающей системы основывается на уменьшении скорости износа λ до величины, обеспечивающей реализацию на практике требуемой величины ресурса T_{mp} данных систем. При этом под требуемым ресурсом понимается наработка обрабатывающей системы, обеспечивающая выполнение заданной технологической операции.

Требуемый и фактический ресурсы, учитывая (4.23), связаны между собой следующим соотношением

$$\frac{T_{mp}}{T_{exp}} = \frac{\gamma_{\phi}}{\gamma_{mp}}, \quad (4.24)$$

где γ_{ϕ} , γ_{mp} – соответственно, фактическая скорость износа, определяющая фактический (прогнозируемый) ресурс инструмента, и требуемая скорость, которая обеспечит требуемую продолжительность резания.

Скорость износа λ пропорциональна произведению усилия прижатия P_{np} , действующего в трущейся паре, и скорости их относительного скольжения $V_{ск}$ [189].

$$\gamma \approx P_{np} \cdot V_{ск}. \quad (4.25)$$

В данном случае трущейся парой является «задняя поверхность лезвия – поверхность резания на заготовке», приложенная к площадке износа нормальная сила является составляющей силы резания. Сила резания определяется по следующей формуле:

$$P_{рез} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}, \quad (4.26)$$

где $P_{x,y,z}$ – составляющие силы резания в H , определяемые по следующей эмпирической формуле [1]

$$P_{x,y,z} = 10 \cdot C_p t^x S^y V^n K_p, \quad (4.27)$$

где t - глубина резания, мм; S - подача, мм/об; V - скорость резания, м/мин; C_p - постоянная для данного вида обработки, обрабатываемого и инструментального материалов; K_p – поправочный коэффициент.

Скорость резания V (относительная скорость скольжения $V_{ск}=V$) определяется по эмпирической формуле [1].

$$V = \frac{C_v}{T^m t^\beta S^\alpha}, \quad (4.28)$$

где C_v – поправочный коэффициент.

Значения поправочных коэффициентов и показателей степеней, содержащихся в этих формулах, так же как и рекомендуемые значения ресурса T инструмента, применяемого для данного режима работы обрабатывающей системы, приводятся в соответствующих справочниках, например, в [190].

Для изменения степени износа инструмента необходимо изменять скорость износа γ , следовательно, необходимо изменять величину множителей P_{np} и $V_{ск}$ в (4.25). Это, в свою очередь, требует изменения параметров резания: S , V и t в (4.28).

Скорость, жестко связанная с частотой вращения, и подача зависят от кинематики станка и могут изменяться либо плавно, либо ступенчато. При варьировании этих режимов глубина резания t для сохранения качества обрабатываемой поверхности должна оставаться постоянной по величине

($t(\tau) = t_0$). С целью соблюдения этого условия выразим параметр t через варьируемые величины $S(\tau)$ и $V(\tau)$:

$$t(\tau) = \sqrt[\beta]{\frac{C_v}{T^m V(\tau) S^\alpha(\tau)}}. \quad (4.29)$$

Далее, для того, чтобы избавиться от поправочных коэффициентов, являющихся «коэффициентами неопределенности» в формулах (4.27) и (4.28) перейдем к безразмерным величинам:

$$\bar{P}_{x,y,z} = \left(\frac{t(\tau)}{t_0}\right)^x \left(\frac{S(\tau)}{S_0}\right)^y \left(\frac{V(\tau)}{V_0}\right)^n, \quad (4.30)$$

где t_0 , S_0 , V_0 – исходные значения режима работы обрабатывающей системы, задаваемые традиционным способом [190].

С учетом (4.30) выражение (4.27) представим в следующем виде:

$$\bar{P}_{x,y,z} = \left(\left(\frac{\bar{T}_{EXP}}{T_{TP}} \right)^m \left(\frac{V_0}{V(\tau)} \right) \left(\frac{S_0}{S(\tau)} \right)^\alpha \right)^{\frac{x}{\beta}} \left(\frac{S(\tau)}{S_0} \right)^y \left(\frac{V(\tau)}{V_0} \right)^n, \quad (4.31)$$

или в более компактной форме:

$$\bar{P}_{x,y,z} = \left(\frac{\bar{T}_{EXP}}{T_{TP}} \right)^{\frac{m \cdot x}{\beta}} \left(\frac{S(\tau)}{S_0} \right)^{y - \frac{\alpha \cdot x}{\beta}} \left(\frac{V(\tau)}{V_0} \right)^{n - \frac{x}{\beta}}. \quad (4.32)$$

Алгоритм управления работой обрабатывающей системой имеет следующий вид:

- по принятой методике [190] назначается исходный режим работы (определяются параметры t_0 , S_0 , V_0);
- регулярно по тренду звука $E_{зв}(\tau)$, сопровождающего работу обрабатывающей системы, контролируется ее динамическое поведение;
- по тренду звука $E_{зв}(\tau)$ идентифицируются параметры прогнозной модели (3.11), в результате чего определяется численное значение фактического ресурса инструмента \bar{T}_{EXP} (формула 3.19);
- если параметр \bar{T}_{EXP} превышает требуемую по техпроцессу длительность

работы обрабатывающей системы, т.е. выполняется условие $\bar{T}_{EXP} > T_{TP}$, то возможны два варианта развития событий:

- если металлообработка осуществляется в условиях единичного или мелкосерийного производства дорогостоящих изделий, то работа обрабатывающей системы продолжается на исходном режиме;

- если металлообработка осуществляется в условиях серийного производства недорогостоящих деталей возможно форсирование режимов работы с целью повышения производительности;

– если же выполняется условие $\bar{T}_{EXP} < T_{TP}$, то для обоих типов производств режим работы изменяется таким образом, чтобы выполнялось условие $\bar{T}_{EXP} \geq T_{TP}$.

Требуемый ресурс T_{TP} в условиях единичного и мелкосерийного производства рассчитывается по следующей формуле [190]:

$$T_{mp} = \frac{\pi DL}{1000V_0S_0}. \quad (4.33)$$

В условиях среднего и крупносерийного производства для уменьшения влияния на расчеты вариации ресурса инструмента, в качестве требуемого ресурса T_{TP} следует назначать величину ресурса, рассчитываемую по формуле Тейлора (1.4).

Требуемые параметры режима работы обрабатывающей системы определяются путем минимизации следующего функционала (целевой функции):

$$U = \left(\frac{\bar{T}_{exp}}{T_{mp}} - \bar{\gamma}(\tau) \right)^2, \quad (4.34)$$

где $\bar{\gamma}(\tau) = \bar{P}_{рез} \cdot \bar{V}$ – безразмерная скорость износа; $\bar{P}_{рез} = \sqrt{\bar{P}_x^2 + \bar{P}_y^2 + \bar{P}_z^2}$ –

безразмерная величина силы резания; $\bar{V} = \frac{V(\tau)}{V_0} = \frac{n(\tau)}{n_0}$ – безразмерная скорость

резания, где V_0 , $V(\tau)$, n_0 , $n(\tau)$ – соответственно, исходная и регулируемая скорости резания (исходные и регулируемые обороты шпинделя, которые выбираются в соответствии с кинематикой станка).

На искомые параметры n и S необходимо наложить ограничения. Первым

ограничением может быть качество обработанной поверхности, которое характеризуется высотным параметром шероховатости R_a , связанным с регулируемыми параметрами следующей эмпирической зависимостью [190]:

$$R_a = 1000 \frac{S^2}{8 r_g}, \text{ мкм}, \quad (4.35)$$

где S – подача, мм/об; r_g – радиус вершины резца.

Перейдем к безразмерному виду формулы (4.35):

$$\bar{R}_a = \left(\frac{S(\tau)}{S_0} \right)^2. \quad (4.36)$$

Условием сохранения качества работы обрабатывающей системы является степень приближения выражения (4.36) к единице. С учетом этого целевая функция (4.34) примет следующий вид:

$$U = \left(\frac{\bar{T}_{exp}}{T_{mp}} - \bar{\gamma}(\tau) \right)^2 + \left(1 - \left(\frac{S(\tau)}{S_0} \right)^2 \right)^2. \quad (4.37)$$

Второе ограничение касается производительности работы обрабатывающей системы, согласно которой произведение варьируемых параметров $V(\tau) \cdot S(\tau)$ должно быть максимальным. Это условие можно записать в безразмерном виде:

$$\left(\frac{V(\tau)}{V_0} \right) \cdot \left(\frac{S(\tau)}{S_0} \right) \rightarrow \max. \quad (4.38)$$

С учетом (3.38) целевая функция примет следующий окончательный вид:

$$U = \left[\left(\frac{\bar{T}_{exp}}{T_{mp}} - \bar{\gamma}(\tau) \right)^2 + \left(1 - \left(\frac{S(\tau)}{S_0} \right)^2 \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{V_0}{V(\tau)} \right) \cdot \left(\frac{S_0}{S(\tau)} \right) \quad (4.39)$$

В качестве примера рассмотрим выбор режимов работы обрабатывающей системы токарного станка 16К20Т1. Исходные для компьютерного моделирования данные были получены экспериментально. Кинематическая схема станка позволяет изменять обороты шпинделя n на III режиме его работы от 125 об/мин до 2000 об/мин, подачу S можно изменять с шагом 0,01 мм/об от 0,01 до 2,8 мм/об.

В эксперименте деталь из стали 40X обрабатывается резцом с режущей пластиной из твердого сплава Т15К6 на следующих *исходных* режимах: $V_0=94$ м/мин, ($n=500$ об/мин), $S_0=0.05$ мм/об, $t_0=0.5$ мм.

Показатели степени в формуле (3.32) имели следующие значения: $\beta = 0.2$; $m = 0.2$; $\alpha = 0.35$; $n = -0.4$ (для P_x), -0.3 (для P_y), -0.15 (для P_z); $x = 1.05$ (для P_x), 0.6 (для P_y), 0.9 (для P_z); $y=0.2$ (для P_x), 0.8 (для P_y), 0.9 (для P_z).

Требуемый ресурс обрабатывающей системы T_{mp} принимался равным его средне статистической величине – 120 мин.

Контроль тренда звука осуществлялся на протяжении всего периода выполнения технологической операции с помощью микрофона, установленного вблизи рабочей зоны обрабатывающей системы [35]. Сигнал с микрофона поступал на компьютер, где подвергался оцифровке и дальнейшей обработке (идентификации прогнозной модели) с целью определения фактического ресурса данной системы. Найденное значение ресурса \bar{T}_{exp} сравнивалось с требуемой по техпроцессу длительностью работы обрабатывающей системы T_{mp} и в случае превышения требуемой длительностью фактического значения ресурса ($T_{mp} > \bar{T}_{exp}$) выбирался режим работы обрабатывающей системы, обеспечивающий реализацию следующего условия: $\bar{T}_{exp} \geq T_{mp}$. В понятиях математики процесс выбора режима заключался в минимизации функционала (функции цели) (4.39).

Результаты эксперимента и их компьютерной обработки приведены в Приложении Б рис. Б.1-Б.3. На рис.Б.1 показаны характеристики звука, генерируемые процессом резания на исходном и скорректированном режимах резания. На рис. Б.2 представлено соотношение между требуемой ($T_{mp}=120$ мин) и прогнозной ($T_{np}=20\dots100$ мин) стойкостями инструмента.

Как видим, определяемое значение ресурса нестабильно по величине, что можно объяснить неоднородностью структуры материала обрабатываемой заготовки. Так, локальное повышение твердости вызывает рост нагрузки и, соответственно, локальный рост градиента амплитуды звуковой волны. Рост градиента нагрузки приводит к увеличению скорости износа инструмента и, соответственно, к более пессимистическому прогнозу его ресурса.

Нестабильность величины ресурса, в свою очередь, обуславливает нестабильность величин регулируемых параметров, характеризующих режим работы обрабатывающей системы (рис.3.5 и 3.6).

Данное обстоятельство является совершенно неприемлемым для систем автоматического регулирования. С целью поиска способа борьбы с этим явлением, в расчетах регулируемые параметры находились двумя способами. При первом – использовалось текущее расчетное значение ресурса инструмента T_{IP} (формула 3.14), а при втором – экспоненциально сглаженная по формуле (3.19) величина \bar{T}_{EXP} (рис. Б.2). Как и следовало ожидать, экспоненциальное сглаживание позволило существенно повысить стабильность выбора регулируемых параметров работы обрабатывающей системы (рис. Б.3).

На рис. Б.3 приведена диаграмма режимов работы и показано изменение скорости износа и силы резания, отвечающих данной диаграмме. Как видим, для завершения технологического процесса необходимо уменьшить скорость износа инструмента почти в два раза. Для выполнения этого условия следует уменьшить подачу S на одну ступень (с 0.05 мм/об до 0.04 мм/об), а скорость V снизить до минимума (рис. Б.3 а и Б.3 б).

Внедрение в практику данного метода выбора режимов работы металлообрабатывающих систем может стать основой для осуществления адаптивного управления процессом их работы. Адаптивность в данном случае заключается в гибком изменении, в зависимости от найденного значения их фактического ресурса, режимов работы этих систем, что обеспечивает завершение текущего технологического перехода без потери качества обработки и поломки инструмента.

Рассмотренные методы контроля динамического поведения обрабатывающих систем и управления режимами их работы были автоматизированы с целью внедрения их в практику машиностроительного производства. Для решения данной задачи был разработан программный продукт, формализующий алгоритм работы данных методов и используемый в составе компьютерных устройств.

4.4 Разработка программного продукта для автоматизации контроля динамического поведения обрабатывающих систем и адаптивного управления их работой

Алгоритм контроля динамического поведения обрабатывающих систем, выполняемый непосредственно в процессе их работы, приведен на структурно-логической блок-схеме (см. рис. 4.1 и рис. 4.9б) и обеспечивает: регистрацию, накопление, обработку информации и управление на основе этого работой подконтрольного оборудования.

Блок-схема системы контроля динамического поведения обрабатывающих систем приведена на рис. 4.5. Блок-схема программного продукта, созданного на основе алгоритма контроля (рис.4.9б), показана на рис. 4.8. Сочетание программного продукта и аппаратных средств (рис.4.6) образуют систему контроля динамического поведения металлообрабатывающего оборудования (рис. 4.7).

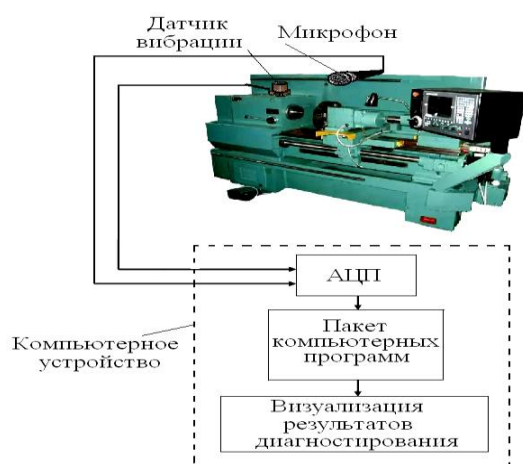


Рисунок 4.5 – Блок-схема системы контроля динамического поведения обрабатывающих систем



Рисунок 4.6 – Аппаратная часть системы контроля динамического поведения обрабатывающих систем

Принципальная схема измерений информационных сигналов показана на рис. 4.9а. В соответствии с алгоритмом (рис.4.1, 4.9б), работа программного продукта начинается с ввода исходных данных: режимов работы обрабатывающей системы и геометрических параметров заготовки и детали, на основе которых рассчитывается требуемая длительность работы обрабатывающей системы (T_{mp}). Далее проводится регистрация параметров звуковой волны и их обработка с целью определения численного значения ресурса (T_{np}). Если расчётное численное значение ресурса превышает требуемое ($T_{np} > T_{mp}$), то осуществляется расчёт показателей состояния обрабатывающей системы, которые выдаются на экран компьютерного устройства (рис. 4.10).

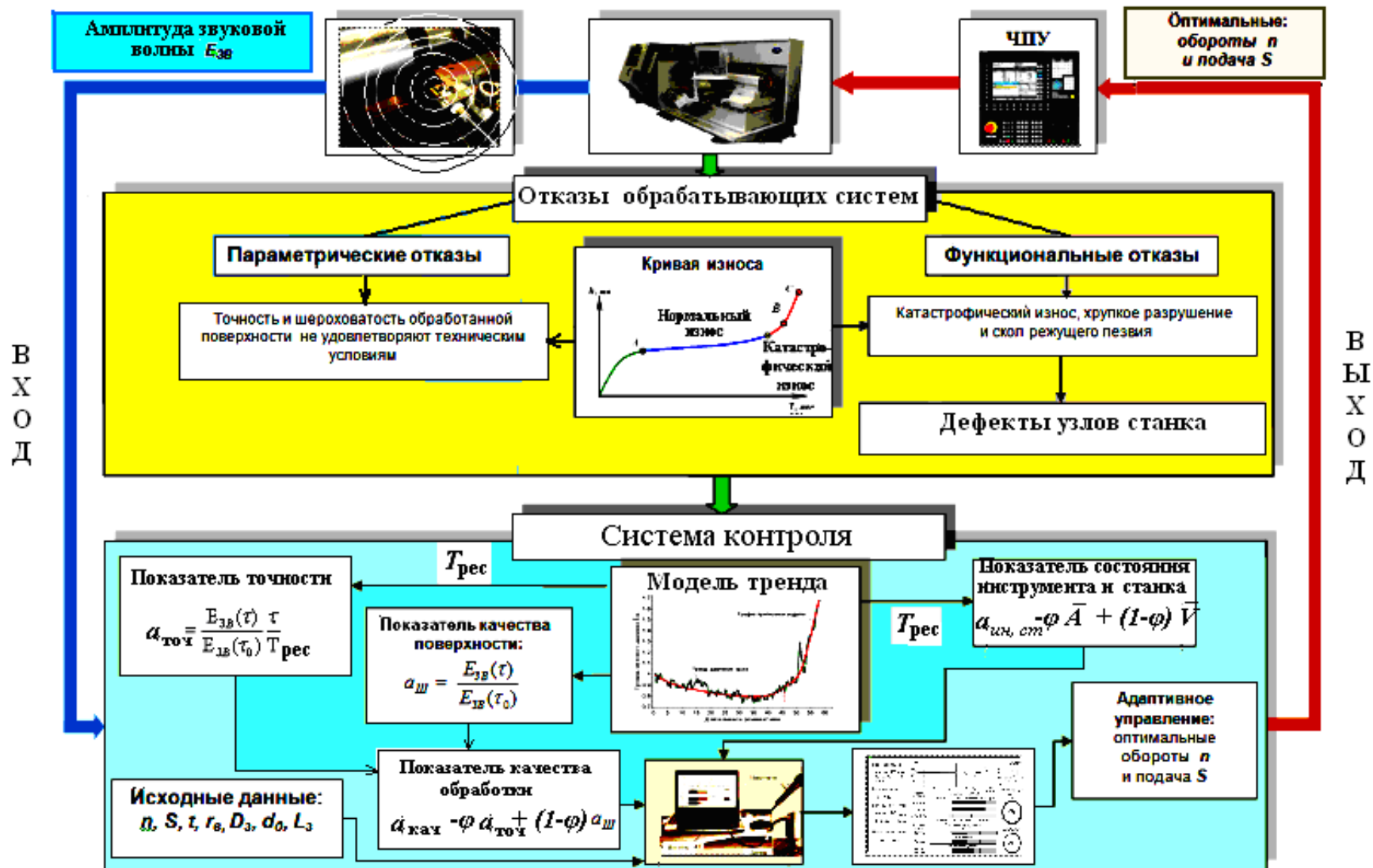


Рисунок 4.7 – Структурно-логическая схема системы контроля динамического поведения металлообрабатывающих систем



Рисунок 4.8 – Блок-схема алгоритма программного продукта

В противном случае рассчитываются режимы работы, обеспечивающие выполнение условия ($T_{np} \geq T_{mp}$).

Работа программного продукта прекращается при выполнении условия, когда текущая наработка обрабатывающей системы ($T_{тек}$) достигает требуемой по техпроцессу (T_{mp}).

Исходная информация, необходимая для контроля динамического поведения обрабатывающих систем, регистрируется следующим образом (рис. 4.9 а): в процессе работы обрабатывающей системы (например, токарного станка) расположенным в его рабочей зоне режущим инструментом 1, установленным в резцедержателе 2, генерируются звуковые волны 3, измеряемые микрофоном 4. Возникающая при этом вибрация станка 5, фиксируется датчиками вибрации 6. Звуковые и вибрационные сигналы, регистрируемые непрерывно в процессе работы обрабатывающей системы, поступают в компьютерное устройство 7, где подвергаются обработке по компьютерной программе, представляющей в формализованном виде алгоритм (рис.4.9 б) рассмотренного выше метода контроля динамического поведения обрабатывающей и метода определения ее ресурса.

Разработанный программный продукт (рис.4.8) позволяет:

- регистрировать изменения звука и вибрации во времени;
- определять тренд звука;
- рассчитывать спектр вибраций станка и выделять из него информационные гармоники;
- определять ресурс обрабатывающей системы, рассчитывать величины показателей состояния и определять на основе этого степень критичности динамического поведения обрабатывающих систем;
- прогнозировать наработку станка до остановки на ремонт или подналадку с указанием причин ремонта или подналадки;
- контролировать в режиме текущего времени качество обработки детали, и степень критичности технического состояния инструмента и станка;
- рассчитывать (выбирать при их ступенчатом изменении)

непосредственно в процессе работы обрабатывающей системы оптимальные режимы ее функционирования, позволяющие завершить текущий технологический переход, исключив тем самым поломку инструмента и появление брака детали;

– отображать результаты контроля в наглядной форме на экране компьютерного устройства;

– генерировать звуковой сигнал при достижении обрабатывающей системой критического состояния, связанного с качеством обработки детали, техническими состояниями режущего инструмента или станка;

– документировать результаты диагностирования в виде «Протокола ...», сохраняемого в текстовом файле.

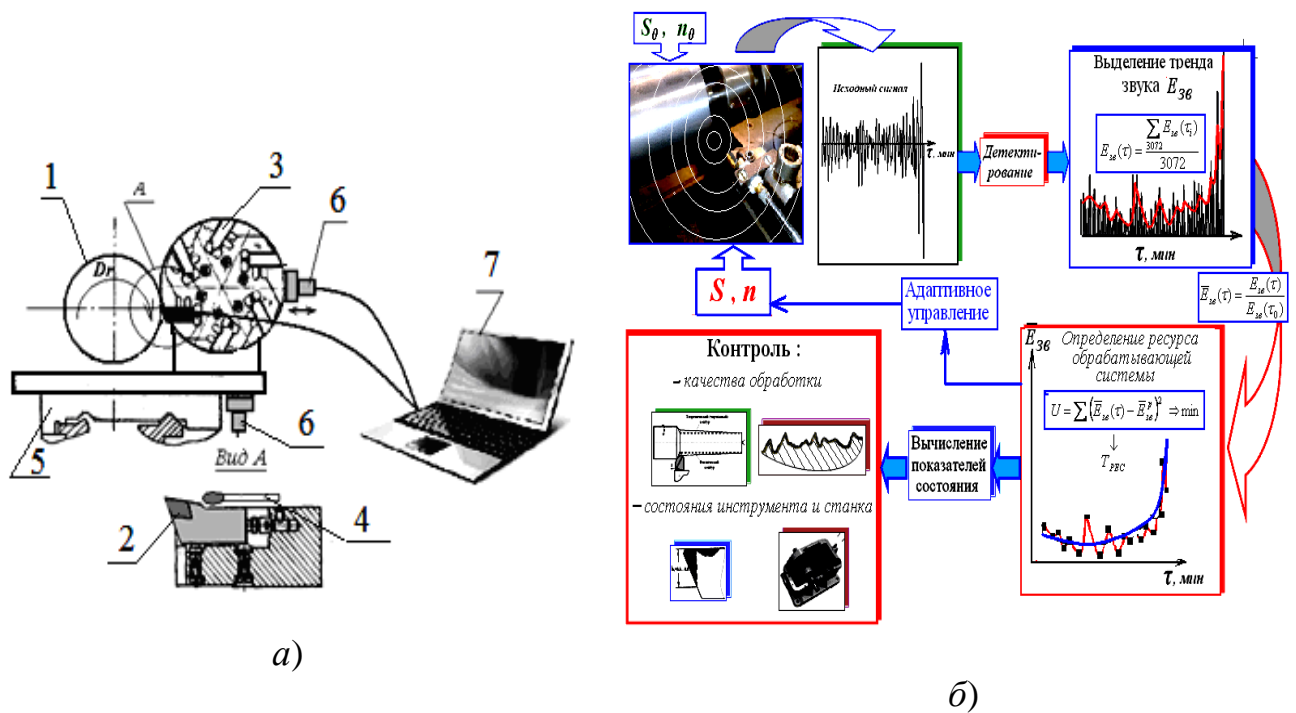


Рисунок 4.9 – Схема измерений (а) и блок - схема алгоритма работы системы автоматизированного контроля динамического поведения обрабатывающей системы (б)

Контроль начинается с оперативной, выполняемой в режиме реального времени ежесекундной регистрации исходной информации, осуществляемой посредством микрофона и датчика вибрации (рис. 4.6, 4.9). Микрофон и датчик вибрации превращают знакопеременные по своей физической природе звуковые волны, появляющиеся в рабочей зоне обрабатывающей системы, и механические колебания узлов станка в электрические сигналы. Измерения проводятся в 1024 точках отсчета с частотой дискретизации 11025 Гц.

Режимы резания

Обороты, n: **125**, об/мин

Подача, s: **0.15**, мм/об

Глубина, t: **1.0**, мм

Время резания

00:15:06

Время до остановки

Обработка: **0,01**, мин

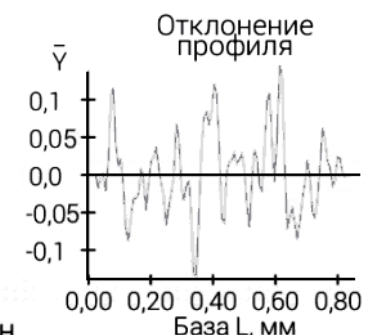
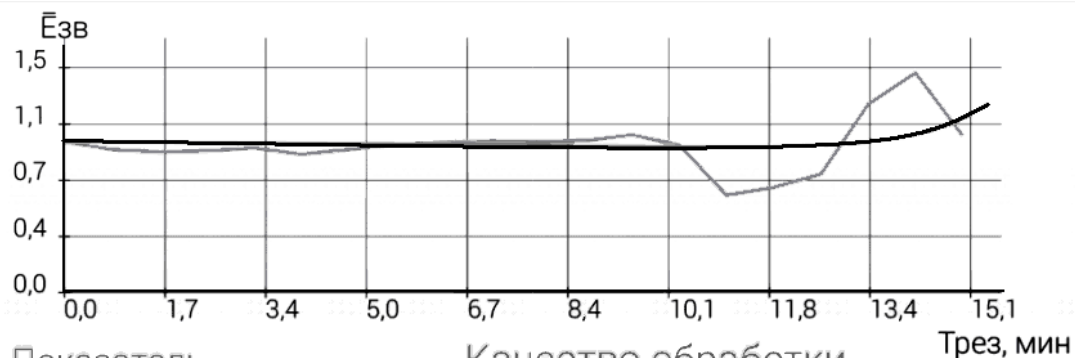
Инструмент: **1,96**, мин

Панель управления

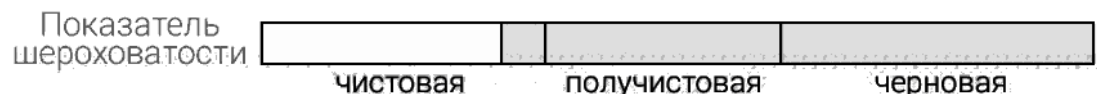
СТАРТ

ПАУЗА

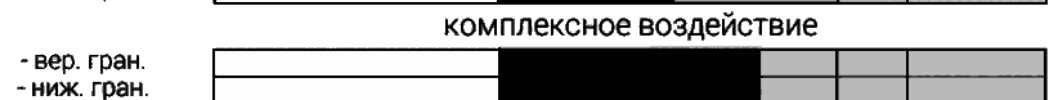
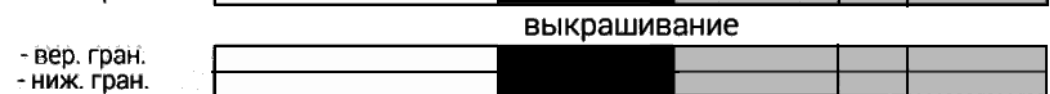
СТОП



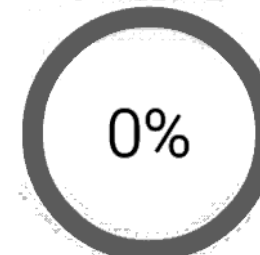
Показатель точности



Причина отказа



Показатель качества



Показатель инструмента

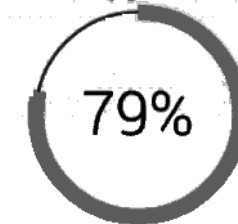


Рисунок 4.10 – Визуализация результатов контроля динамического поведения обрабатывающей системы и определения на этой основе ее ресурса, качества обработки детали и технического состояния режущего инструмента

Причем, измерения, для повышения их статистической достоверности проводятся каждый раз трижды с последующим усреднением результатов измерений (усредняется 3072 измеренных значений).

Усреднение позволяет избежать искажающего влияния окружающих обрабатывающую систему звуковых полей. Аналогично, при диагностировании станочного оборудования, спектр колебаний в контрольной точке определяется так же трижды и далее усредняется. Измеренные сигналы подаются на микропроцессорное устройство, где подвергаются обработке, характер и объем которой отвечает требованиям определения ресурса инструмента и диагностирования технического состояния обрабатывающей системы (табл. 4.2).

Результаты определения ресурса с целью оперативного их использования изображаются на экране компьютерного устройства. Пример подобной визуализации результатов контроля качества обработки детали и состояния инструмента приведен на рис. 4.10. На рисунке показано, как на экран устройства в виде индикаторных линий иллюстрируется изменение во времени рассмотренных выше показателей состояния.

Перемещение индикатора слева направо свидетельствует об ухудшении качества обработки детали и состояния инструмента в соответствие со стандартными состояниями, приведенными в табл. 4.1. Там же приводится тренд звука, сопровождающего работу обрабатывающей системы, график прогнозной модели (3.11) и профиль шероховатости. Вариант визуализации, результатов контроля всех элементов обрабатывающей системы, включая и станочное оборудование, приведен в Приложении В на рис. В.2.

Автоматизация процесса контроля динамического поведения обрабатывающих систем и определения их на основе этого их ресурса является неременным условием внедрения его в практику машиностроения, т.к. иного пути для его практической реализации не существует.

Выводы

1. Разработан метод контроля динамического поведения обрабатывающих систем, алгоритмическую основу, которого составляют лингвистические переменные, разработанные в соответствии с теорией «нечетких множеств», и позволяющие дать вербальную характеристику степени критичности динамического поведения поднадзорного оборудования, оценивая одновременно качество обработки детали, работоспособность режущего инструмента и станочного оборудования.

2. Показатели состояния, рассчитанные посредством полученных в работе «функций принадлежности», позволяют с единых методологических позиций количественно описать разнообразные технологические условия работы обрабатывающих систем и сопоставить их с рядом стандартных (подобных), с точки зрения динамики машин, состояний .

3. Подобие между временными и частотными характеристиками шероховатости обработанной поверхности детали и аналогичными характеристиками звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающих систем, а так же тесная корреляционная зависимость между амплитудой звуковой волны и параметром шероховатости R_a , характеризуемая коэффициентом корреляции R , равным:

– для частотных спектров величине 0,783;

– для параметра звуковой волны \bar{E}_{ω} и параметра шероховатости \bar{R}_a величине 0,964,

что свидетельствует о принципиальной возможности оперативной оценки в режиме реального времени качества выполнения обрабатывающими системами заданных технологических операций посредством разработанных показателей состояния.

4. «Функции принадлежности» составлены таким образом, что обеспечивают одновременный учет при расчете показателей состояния степени и скорости (темпа) изменения динамического поведения обрабатывающих систем, упреждая момент достижения ими своего критического состояния, что исключает их внезапную

аварийную остановку и тем самым существенно повышает эффективность управления работой данных систем.

5. Отличительной особенностью метода адаптивного управления работой обрабатывающих систем является то, что он рассматривает поведение обрабатывающих систем на всем протяжении выполнения ими заданной технологической операции, что дает возможность своевременно корректировать режим работы обрабатывающей системы для продления в требуемых пределах ее работоспособного состояния, обеспечивая, тем самым, выполнение производственного задания с требуемым качеством и в необходимом объеме.

6. Для внедрения разработанных методов и алгоритмов контроля динамического поведения и управления работой обрабатывающих систем в практику производства разработан программный продукт, составленный на алгоритмическом языке JAVA. Продукт предназначен для применения в составе компьютерных устройств (планшет и смартфон), созданных на базе Android, обеспечивающих автоматизацию контроля динамического поведения обрабатывающих систем на уровне, соответствующем требованиям современных информационных технологий.

7. Разработанные методы контроля и управления динамическим поведением обрабатывающих систем и программный продукт, формализующий алгоритм их осуществления, создали предпосылки для реализации на практике одной из важных задач современного производства – его автоматизации. Автоматизированная система контроля динамического поведения обрабатывающих систем позволит:

–расширить функциональность и повысить производительность обрабатывающих систем;

– повысить качество эксплуатации обрабатывающих систем, исключив их незапланированную остановку на замену отказавших элементов;

–улучшить условия работы и повысить безопасность труда и экологическую чистоту обрабатывающих систем, путем оперативного контроля процессов их работы, что является основной целью современного машиностроительного производства.

РАЗДЕЛ 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В разделе приведены результаты экспериментальной проверки эффективности применения на практике разработанных в данной диссертации методов, алгоритмов и реализующего их программного продукта. Программный продукт используется в качестве программного обеспечения компьютерного устройства (планшета), составляющего основу автоматизированной системы оперативного контроля динамического поведения и определения ресурса металлообрабатывающего оборудования.

5.1 Цель, предмет и методика эксперимента

При проведении экспериментов решались следующие задачи:

- проверка эффективности звукового и вибрационного контроля динамического поведения обрабатывающих систем;
- экспериментальное подтверждение установленных посредством математического моделирования (разд. 2), особенностей динамического поведения обрабатывающих систем по мере ухудшения технического состояния их основных элементов;
- проверка эффективности определения ресурса обрабатывающих систем, при использовании с этой целью разработанной в разд. 3 модели тренда;
- экспериментальное подтверждение эффективности применения для оценки степени критичности динамического поведения обрабатывающих систем показателей состояния, рассмотренных в разд. 4;
- проверка функциональных возможностей микропроцессорного вычислительного устройства, содержащего разработанный автором программный продукт, предназначенного для автоматизации процесса контроля динамического поведения обрабатывающих систем.

Экспериментальная проверка теоретических положений, рассмотренных в данной работе, осуществлялась для двух типовых обрабатывающих систем

токарного и фрезерного станков.

Эксперименты проводились при работе обрабатывающей системы токарного станка 16К20Т1 (рис. 5.1, 5.2) на режимах, приведенных в табл. 5.1, а обрабатывающей системы фрезерном станке 6Р13 (рис. 5.3) – на режимах, приведенных в табл. 5.2.

В эксперименте в непосредственной близости от рабочей зоны обрабатывающих систем с помощью микрофона, установленного на державке токарного резца (рис. 5.1, 5.2) и на консоли фрезерного станка (рис. 5.3), регистрировалась звуковая волна, возникающая в рабочей зоне этих обрабатывающих систем.

В экспериментах с обрабатывающей системой токарного станка дополнительно к звуковому контролю осуществлялся и вибрационный контроль. Вибродатчик, устанавливался на револьверной головке (рис. 5.2 б) в направлении, перпендикулярном продольной оси станка.

Таблица 5.1 – Режимы работы обрабатывающей системы токарного станка

Режим резания				Материал	
Обороты шпинделя n , об/мин	Скорость резания V , мм/мин	Глубина резания t , мм	Подача S , мм/об	Резец	Заготовка
970	91	0.3	0.15	T15K6	Сталь Ст 45
970	9	0.3	0.25	T15K6	Сталь 40X

Таблица 5.2 – Режимы работы обрабатывающей системы фрезерного станка

Обороты шпинделя n , об/мин	Глубина резания t , мм	Подача S , мм/зуб	Материал	
			Фреза	Заготовка
800	3.0	0.08	P6M5	Сталь Ст 45

Измеряемые сигналы фиксировались на протяжении всей работы обрабатывающих систем на устройство памяти двух ноутбуков (рис. 5.1, 5.3), где они подвергались дальнейшей обработке, для решения поставленной в эксперименте задачи.



Рисунок 5.1 – Регистрация звукового и вибрационного сигналов в эксперименте

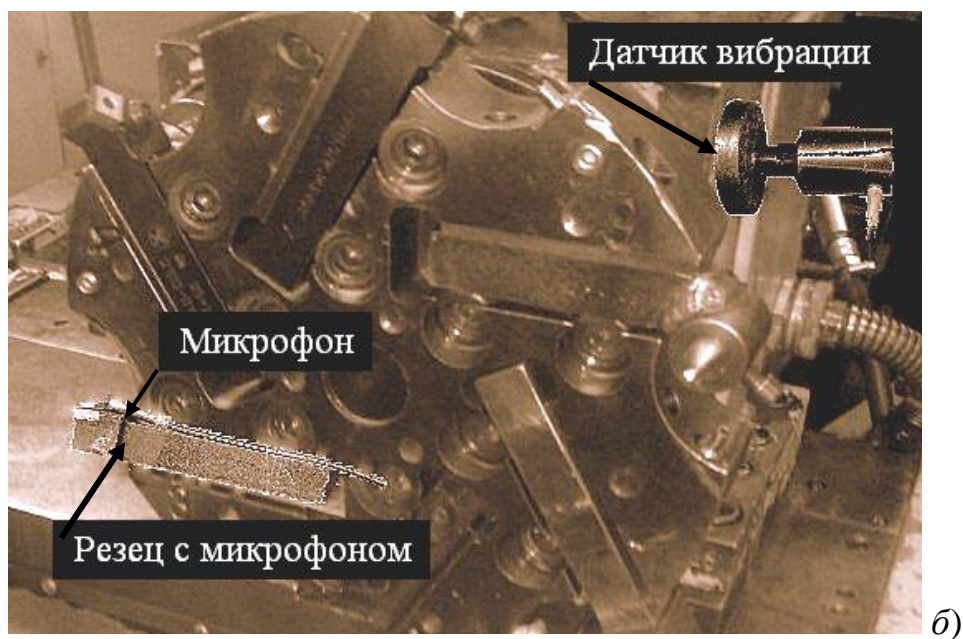


Рисунок 5.2 – Размещение датчиков на револьверной головке: микрофон на резце (а); датчик вибрации (б)



Рисунок 5.3 – Общий вид экспериментальной установки обрабатывающей системы фрезерного станка

5.2 Результаты экспериментов

Типовые временные реализации звукового и вибрационного сигналов, фиксировавшихся в эксперименте, и их спектры приведены в Приложении Г на рис.Г.1. Г.2. Эти исходные данные были подвергнуты дальнейшей обработке с целью получения ниже приведенной информации.

5.2.1 Закономерности поведения тренда звука и определение ресурса обрабатывающих систем

На рис. 5.4 и 5.5 приведены экспериментально зарегистрированные тренды звука, сопровождающего работу обрабатывающих систем токарного (рис. 5.4) и фрезерного (рис. 5.5) станков. На обоих трендах присутствуют участки постепенного (1, 2) и резкого (3) изменения амплитуды звуковой волны, что подтверждает приведенные в разд. 2 результаты математического моделирования динамического поведения обрабатывающих систем, а так же приведенные там же литературные сведения по данной тематике.

На рисунках под № 4 указан так же диапазон, куда укладывается численное значение ресурса обрабатывающей системы. Верхняя граница $T_{вз}$ равна параметру $T_{пр}$, рассчитываемому по формуле (3.14). Исходные данные ($T_{ни}, T_{ки}$) для формулы (3.14) получены при параметрической идентификации прогнозной модели (3.11) по результатам контроля тренда звука $\bar{E}_{зв}$ (рис. 5.4, 5.5). Нижняя граница $T_{из}$ равна экспоненциально среднему значению $\bar{T}_{exp}(\tau_n)$, рассчитываемому по формуле (3.19). Из рисунков следует, что этот диапазон охватывает полностью участок резкого изменения тренда звука и частично захватывает конечный участок медленного изменения тренда звука.

Из рисунков следует, что этот диапазон охватывает полностью участок резкого изменения тренда звука и частично захватывает конечный участок медленного изменения тренда звука.

В практике эксплуатации обрабатывающих систем факт попадания амплитуды звуковой волны в данный диапазон требует принятия решения либо о прекращении работы, либо о корректировке режимов функционирования подконтрольного оборудования.

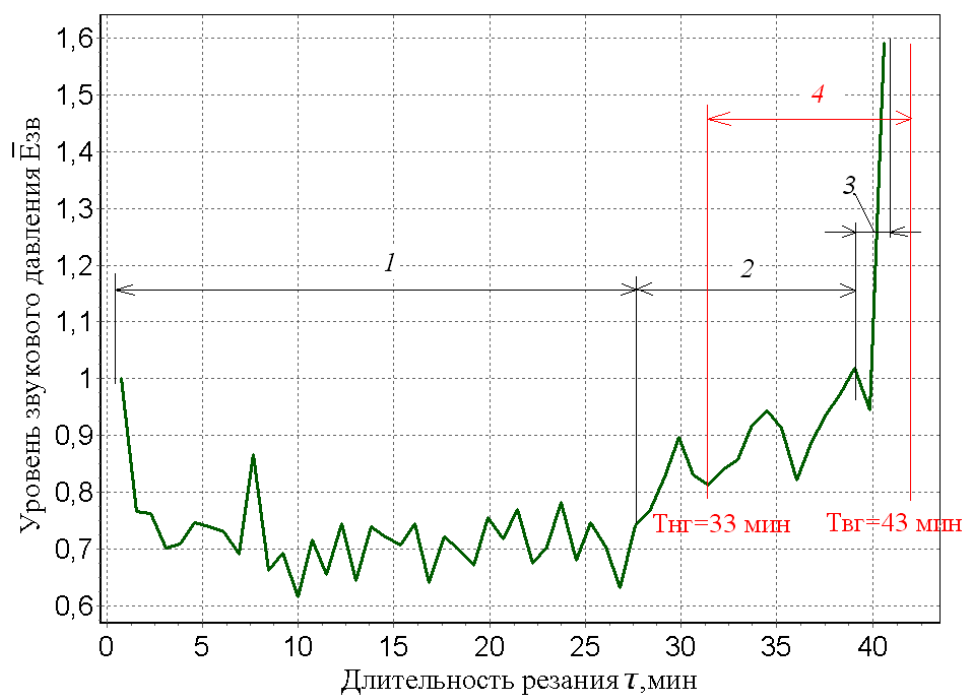


Рисунок 5.4 – Тренд звука, сопровождающего работу обрабатывающей системы токарного станка

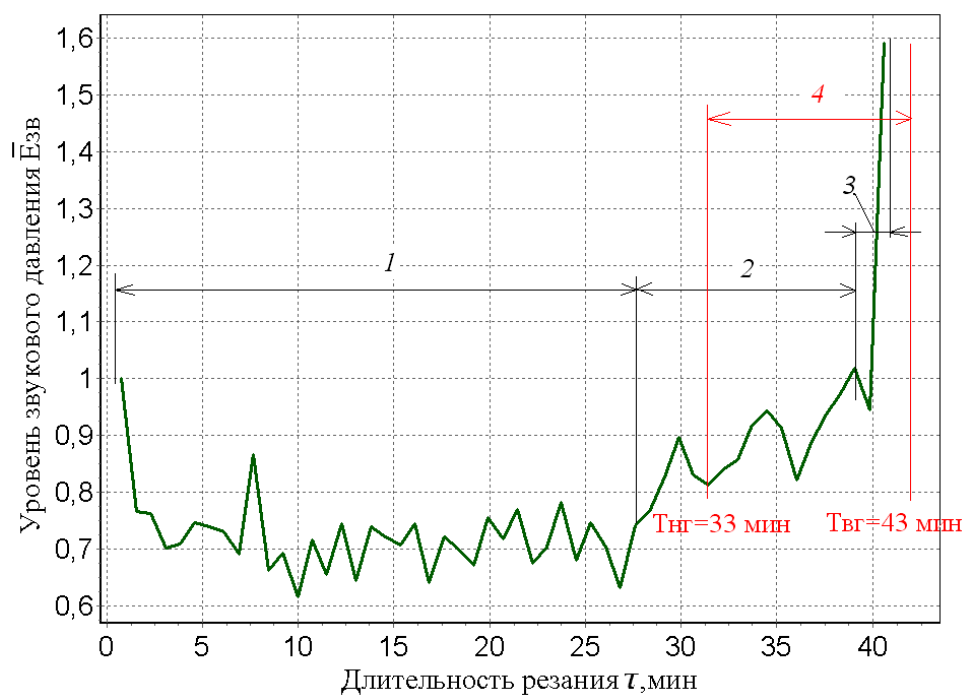


Рисунок 5.5 – Тренд звука, сопровождающего работу обрабатывающей системы фрезерного станка

На рис. 5.6 показано изменение в зависимости от длительности работы обрабатывающей системы токарного станка численной величины ресурса, ее экспоненциально среднего значения и доверительных границ, охватывающих с

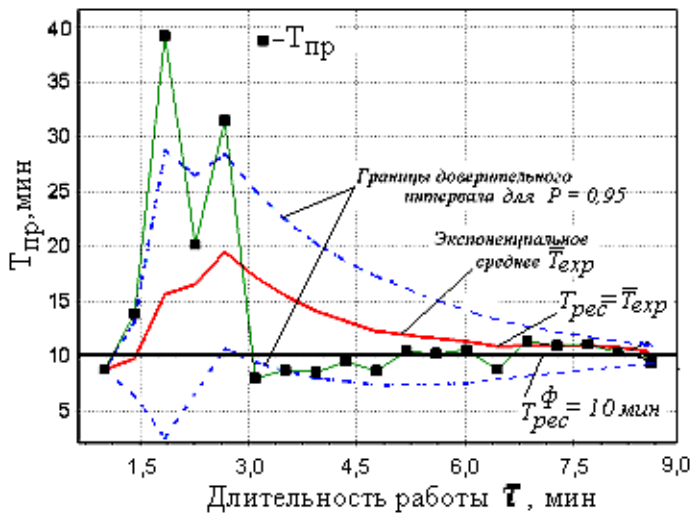


Рисунок 5.6 – Изменение численного значения и доверительных границ ресурса обрабатывающей системы токарного станка

вероятностью 0.95 это значение. Из рисунка следует, что, примерно, с середины периода работы обрабатывающей системы численное значение ее ресурса стабилизируется, соответственно сужаются и границы его изменения.

Результаты апробации прогнозной модели (3.11) при различном поведении тренда приведены в Приложении Г на рис.Г.3-Г.8. На рис. Г.3 и Г.4 Приложения Г приведена аппроксимация графиками модели (3.11) изменения звукового давления на заключительном этапе эксплуатации инструмента – при его выкрашивании и разрушении (участки 2 и 3 на рис. 5.4 и 5.5).

Результаты статистической оценки качества аппроксимации графиком прогнозной модели (3.11) экспериментальных данных, осуществлённой по методике, изложенной в Приложении Г, приведены в этом же приложении в табл. Г.1 и Г.2. Из этих таблиц следует, что остаточная дисперсия меньше общей дисперсии, т.е. разброс расчётных данных относительно экспериментальных меньше, чем рассеяние экспериментальных данных относительно друг-друга. Коэффициенты корреляции и детерминации имеют высокое значение, F – критерий Фишера значительно превышает его табличное значение.

Это говорит о том, что расчетные данные намного лучше, чем это нужно было бы, описывают экспериментальные данные по сравнению с оценкой экспериментальных данных по их среднему значению. Из табличных данных следует, что найденный ресурс обрабатывающих систем токарного и фрезерного станков с доверительной вероятностью $P = 0.95$ является статистически значимым

и надёжным. Об этом свидетельствует незначительное по абсолютной величине отклонение доверительных границ от матожидания, значительное превышение фактическим коэффициентом Стьюдента $\gamma_{ФАКТ}$ его табличного значения $\gamma_{(n-1;P)}^{табл}$ и незначительная величина коэффициента корреляции ν . Высокая точность прогноза наглядно показана на рис. Г.4-Г.8.

5.3 Апробация автоматизированной системы контроля динамического поведения обрабатывающих систем

В соответствии с методикой экспериментов (п. 5.1) в процессе работы обрабатывающих систем осуществлялся непрерывный контроль посредством компьютерного программируемого устройства (планшета, рис. 5.7) звукового и вибрационного сигналов. На базе этой информации по методике, изложенной в разд. 4, оценивалось качество обработки детали и техническое состояние режущего инструмента и станка. Условия эксперимента приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2 – Условия эксперимента, реализованные при работе обрабатывающей системы токарного станка

Материал режущей пластинки	Режимы работы:			D _{заг} , мм	Материал заготовки
	n, об/мин	S, мм/об	t, мм		
P 25	125	0,15	1	98,0	12X18H10T
T15K6	315	0,20	1		

Эксперимент проводился для двух вариантов работы обрабатывающей системы, при первом из которых использовался инструмент с режущей пластинкой из материала P25, а во втором – из материала T15K6.

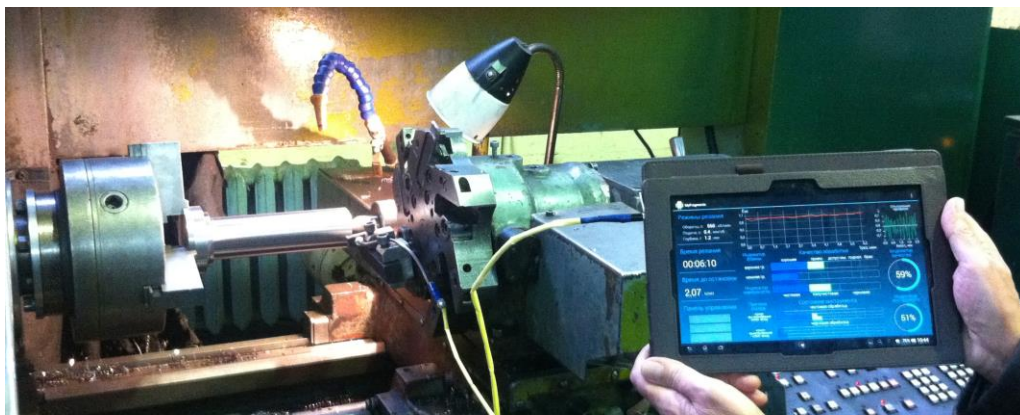


Рисунок 5.7 – Автоматизированный контроль динамического поведения обрабатывающей системы токарного станка

5.3.1 Оценка качества обработки детали

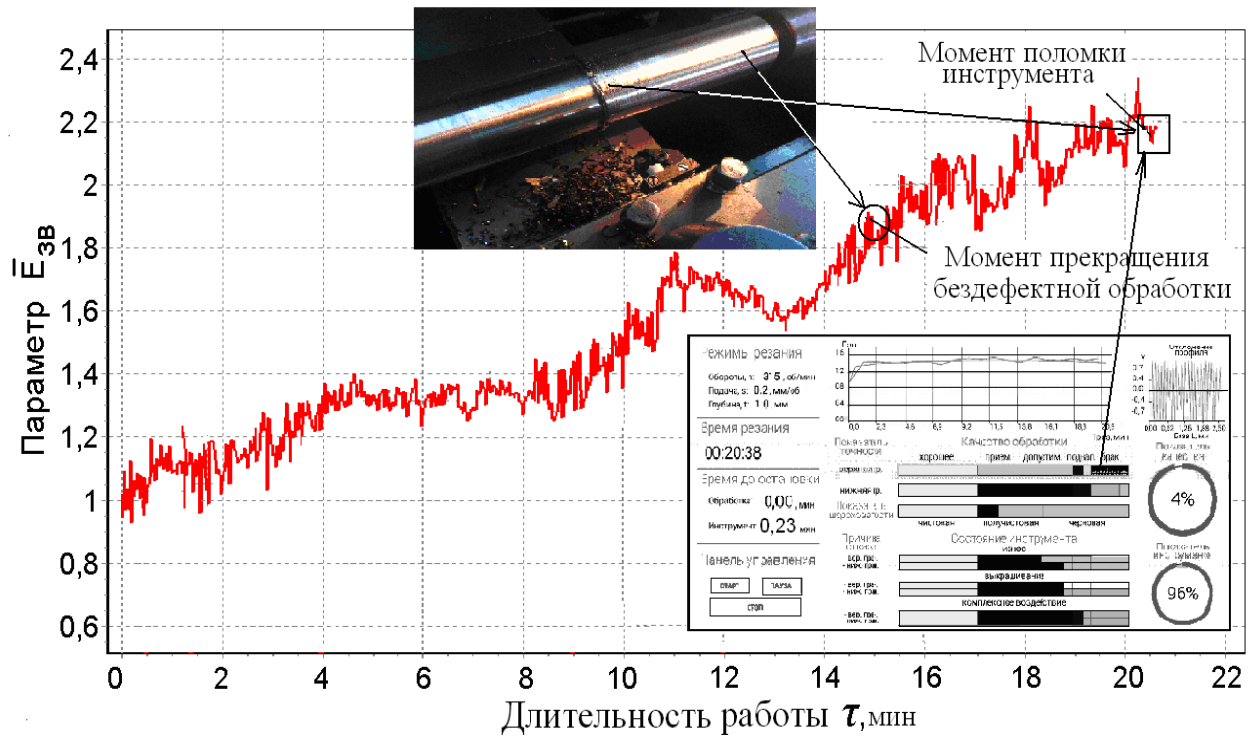
На рис. 5.8 сопоставляются тренды звука $\bar{E}_{зв}$ и скриншоты экрана планшета, зафиксированные на момент отказа обрабатывающей системы по причине достижения предельно допустимой величины износа режущей пластинки из материала P25 (рис. 5.8 а) и – материала T15K6 (рис. 5.8 б). Информация, приведенная на экране, свидетельствует о необходимости принятия решения в первом случае на 15 минуте, а во - втором – на 20 мин работы системы о целесообразности дальнейшей ее эксплуатации на заданных режимах работы. Момент времени, соответствующий переходу от бездефектного функционирования обрабатывающей системы к дефектному состоянию, обозначен на тренде кругом, а момент отказа (появление брака детали) – квадратом.

Момент наступления отказа более детально проиллюстрирован на рис. 5.9 и 5.10. Так, из рис. 5.9 а) следует, что показатель качества $a_{кач}$ для обрабатывающей системы, где применялся инструмент с режущей пластинкой из материала P25, на 15 минуте работы обрабатывающей системы достигает единицы, т.е. своего критического значения, об этом же свидетельствует и определяемое значение ресурса обрабатывающей системы (рис. 5.9 б). Там же показана величина износа инструмента, численно согласующаяся с показателем качества обработки детали.

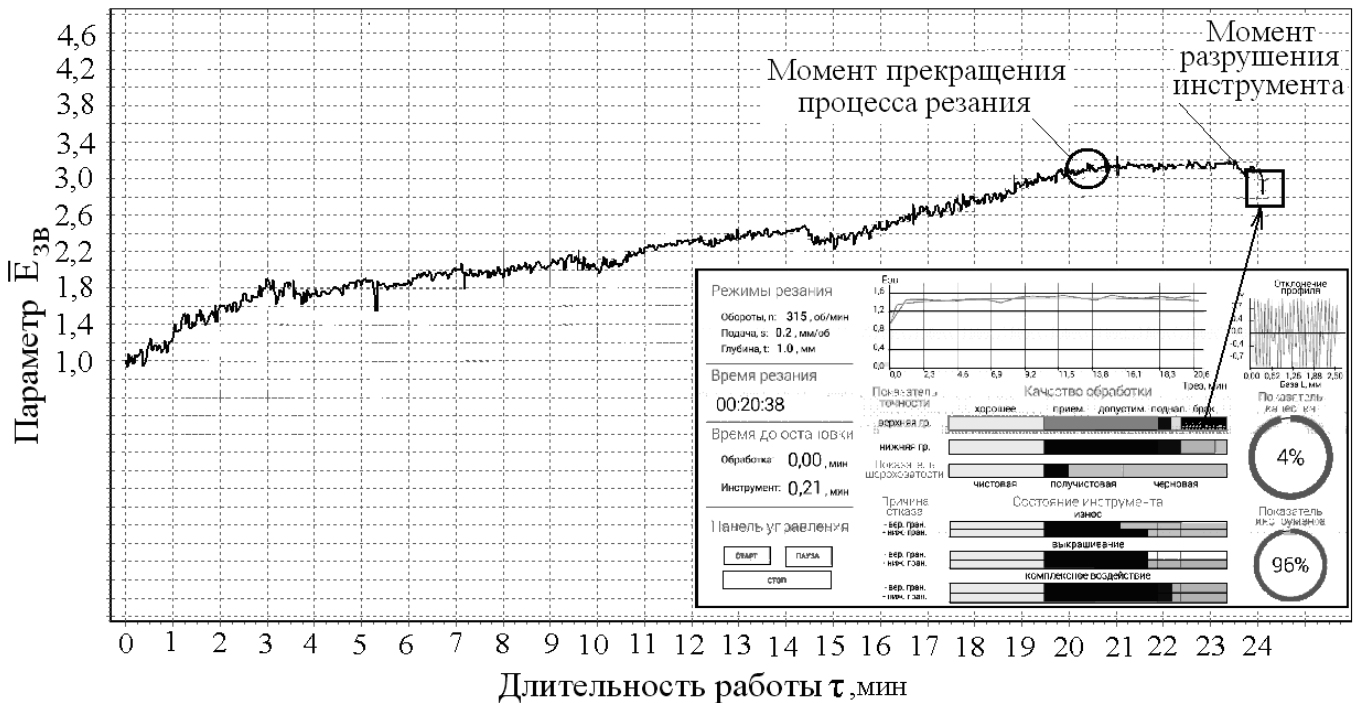
Т.е. результаты экспериментов, приведенных на рис. 5.8 а) и 5.9 не противоречат друг - другу. Аналогичные выводы следуют и из сопоставления информации, представленной на рис. 5.8 б) и 5.10 для случая, когда в режущем инструменте использовалась пластинка из материала T15K6.

Причем в обоих случаях в момент прекращения бездефектной обработки ($\Delta T = 21 - 15.06 = 5.94$ мин в первом случае и $\Delta T = 25 - 21 = 4$ мин – во втором) имеется запас по времени до момента разрушения инструмента.

Таким образом, результаты апробации автоматизированной системы контроля динамического поведения обрабатывающих систем свидетельствует о достоверности получаемой с помощью данной системы информации о фактическом состоянии обрабатывающей системы.

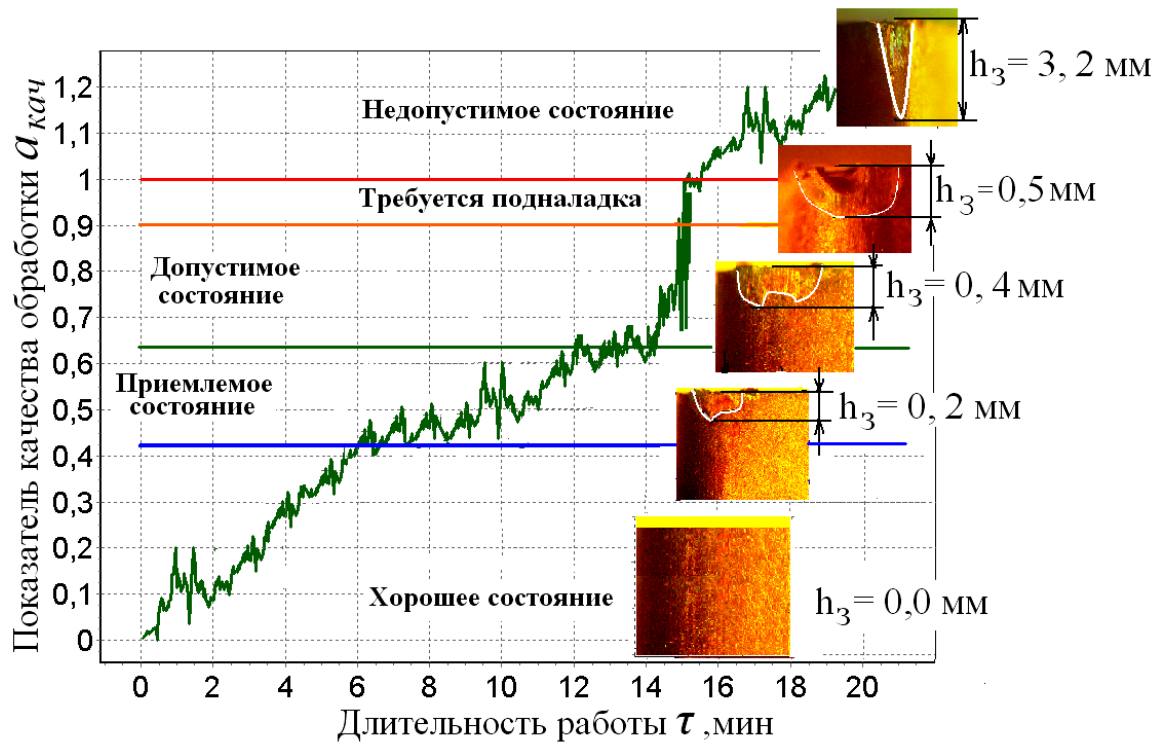


a)

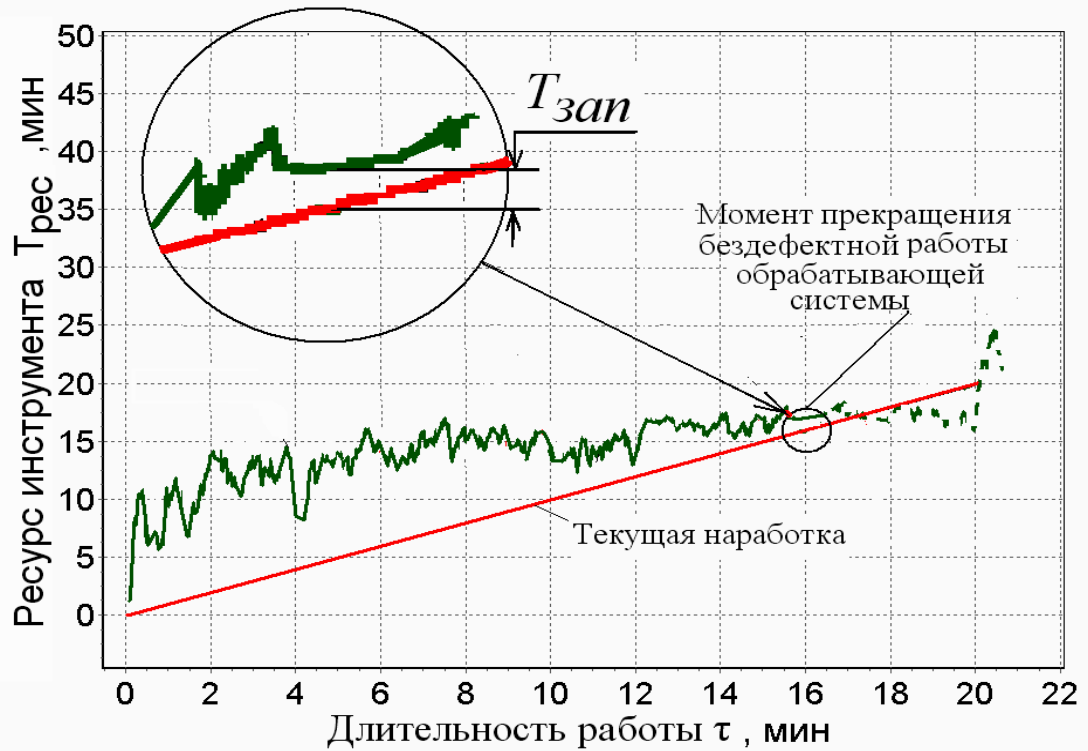


б)

Рисунок 5.8 – Сопоставление скриншота экрана планшета и тренда параметра $\bar{E}_{ЗВ}$:
 а) – инструмент с режущей пластинкой из материала P25; б) инструмент с режущей пластинкой из материала T15K6

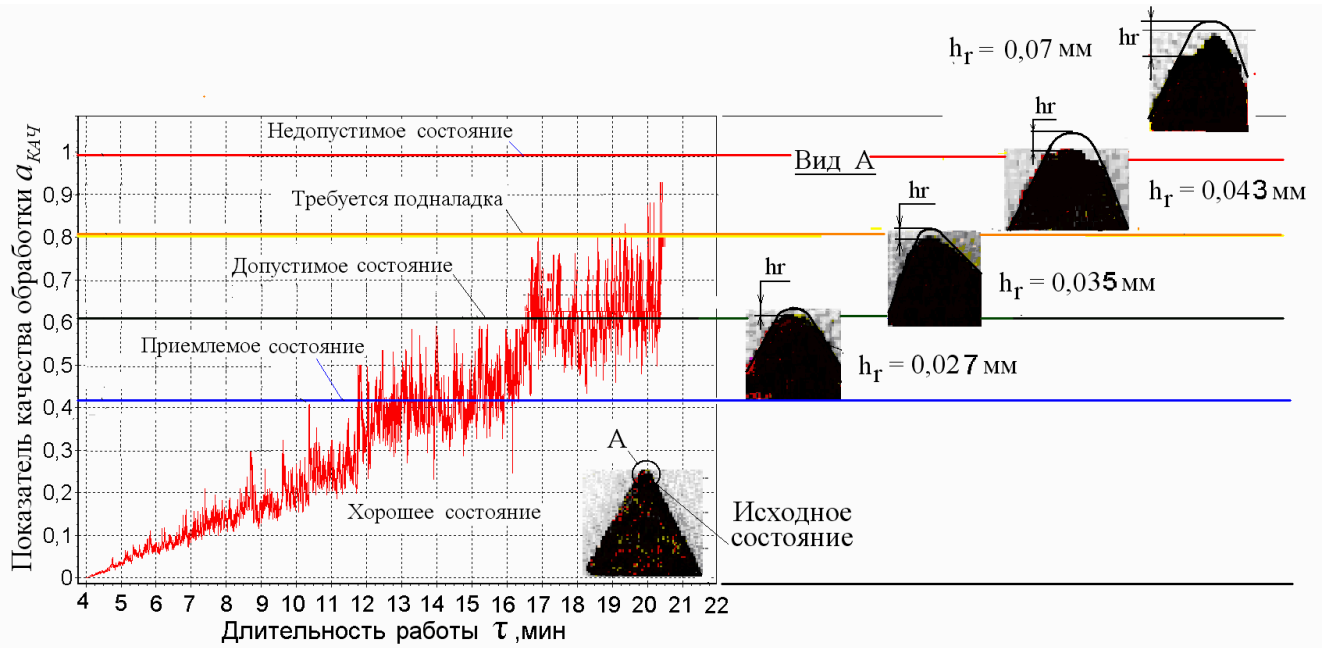


а)

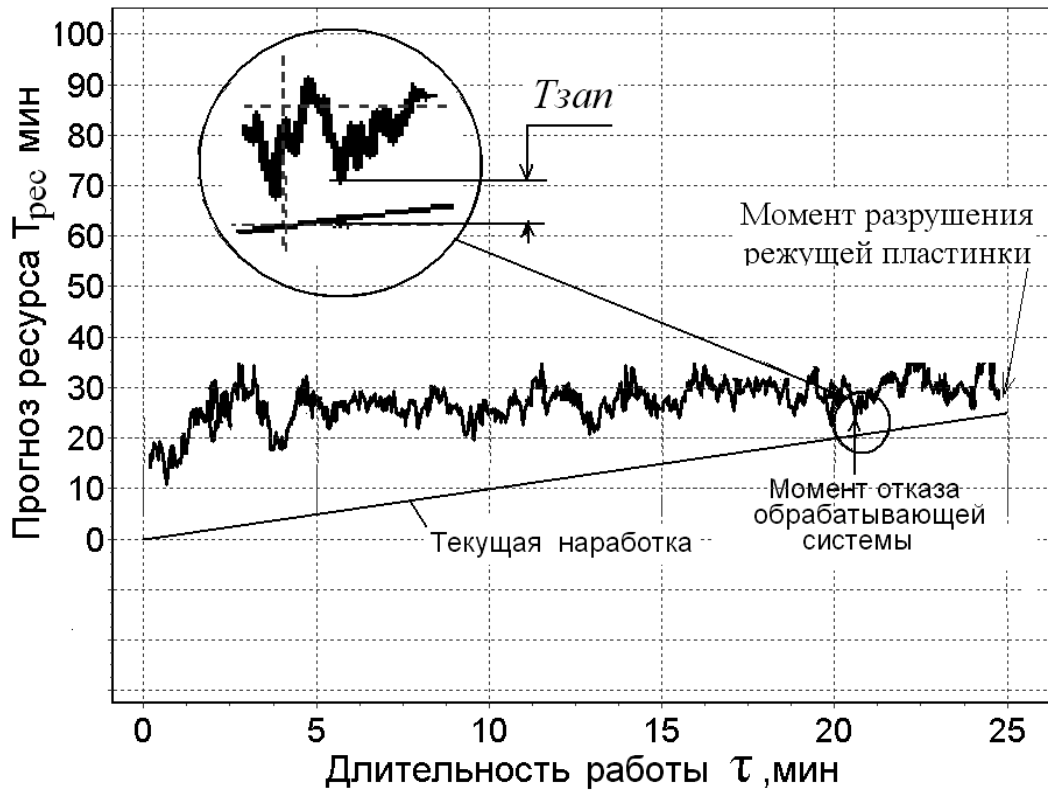


б)

Рисунок 5.9 – Изменение показателя качества обработки и величины износа инструмента (а) и численного значения ресурса обрабатывающей системы (б) при использовании режущей пластинки из материала P25



а)



б)

Рисунок 5.10 – Изменение показателя качества обработки и величины износа инструмента (а) и численного значения ресурса обрабатывающей системы (б) при использовании режущей пластинки из материала Т15К6

5.3.2 Контроль технического состояния конструктивных узлов токарного станка

На рис. 5.11 приведен спектр вибраций токарного станка 16К20Т1, служивший в эксперименте отправной точкой для оценки степени критичности технического состояния узлов и деталей станка.

На спектре указаны источники его основных частотных составляющих. Расчет частоты этих составляющих осуществлялся в соответствии с кинематическими характеристиками станка (рис. Б.3, табл. Б.5).

Результаты анализа непрерывно поступающей информации отображались на экране дисплея и архивировались в виде текстовых файлов.

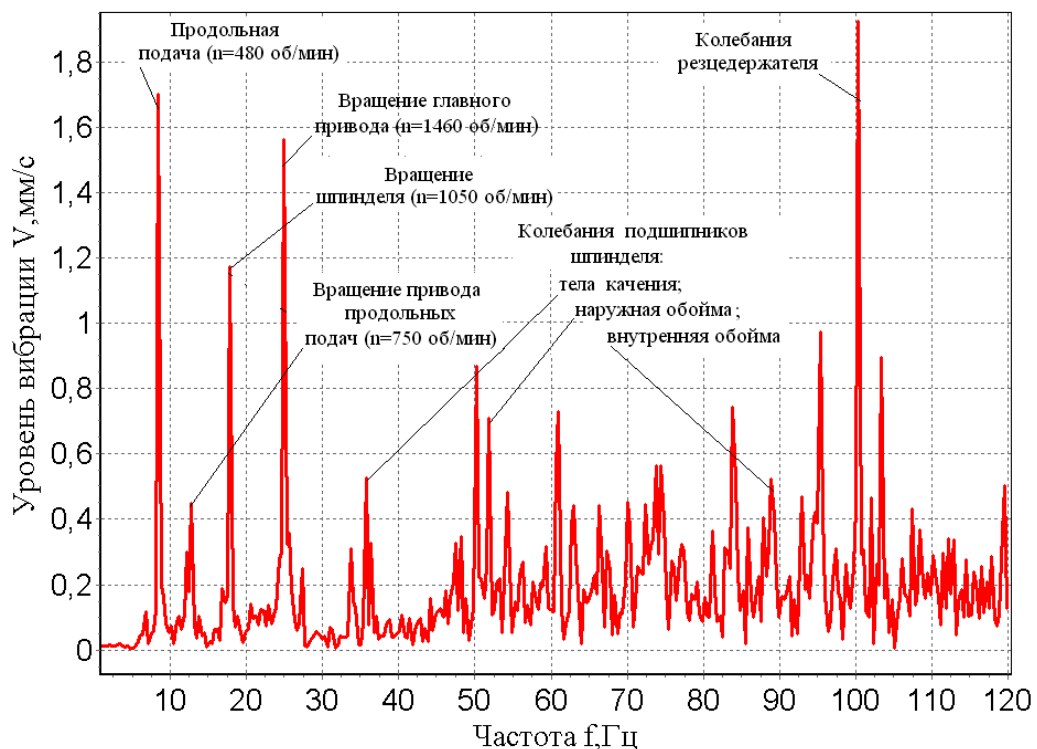


Рисунок 5.11 – Спектр вибрации станка 16К20Т1 в процессе продольного точения на режимах: $V=91$ м/мин, $S=0.25$ мм/об, $t=0.3$ мм

Согласно «Протоколу диагностирования технического состояния станка», приведенному в Приложении Г, состояние станка изменяется в худшую сторону. Правда, процесс этого изменения не так скоротечен, как у инструмента, и растянут во времени на существенно большем интервале.

Выводы

1. Апробация на примере типового станочного оборудования – токарного и фрезерного станков – системы контроля динамического поведения обрабатывающих систем подтвердила правомерность выбора в качестве информационных сигналов звука и вибрации, генерируемых в процессе работы данных систем и косвенным образом характеризующих степень критичности их динамического поведения.

2. Экспериментально подтверждены установленные посредством математического моделирования (разд. 2), особенности динамического поведения обрабатывающих систем по мере ухудшения технического состояния их основных элементов (износа режущего инструмента).

3. Результаты экспериментов показали, что погрешность определения ресурса обрабатывающих систем в соответствие с методом, разработанным в разд. 3, с доверительной вероятностью $P = 0,95$ не превышает 5 %, что свидетельствует об его эффективности.

4. Экспериментально подтверждена эффективность применения для оценки степени критичности динамического поведения обрабатывающих систем показателей состояния, численные значения которых адекватно описывают наблюдаемые в эксперименте изменения динамического поведения обрабатывающих систем и качества их функционирования.

5. Результаты апробации автоматизированной системы контроля динамического поведения обрабатывающих систем, основу которой составляет микропроцессорное устройство, содержащее разработанный автором программный продукт, свидетельствует о достоверности получаемой с помощью данной системы информации о фактическом состоянии обрабатывающей системы и позволяет рекомендовать ее для широкого внедрения в практику современного производства, решая тем самым насущную задачу его автоматизации.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В работе на примере технологических металлообрабатывающих систем решена важная научно-техническая задача определения фактического ресурса механической системы по результатам оперативного контроля тренда информационного сигнала, сопровождающего ее работу и отражающего индивидуальные особенности динамического поведения системы в течение контролируемого срока ее эксплуатации и последующей параметрической идентификации на основе этой информации прогнозной модели, числовые значения одних из коэффициентов которой равны наработке данной системы до ее отказа.

1. Обзор литературных данных показал, что для контроля динамического поведения металлообрабатывающей технологической системы и определения степени его критичности используют косвенные методы наблюдения. Но для обрабатывающих систем нормы, которые бы регламентировали по величине косвенного признака степень критичности их динамического поведения, отсутствуют. Такое положение проблемы обусловило цель проведенных в работе исследований, которые позволили установить высокий уровень корреляции между характеристиками звуковой волны, которая генерируется в рабочей зоне обрабатывающей системы, и характеристиками качества и точности функционирования обрабатывающей системы. Наличие этой корреляции позволила применить, используя микрофон, бесконтактный метод наблюдения за колебаниями обрабатывающей системы и провести на базе этих измерений математическое моделирование динамического поведения обрабатывающей системы для обобщения известных из практики и предыдущих исследований закономерностей поведения этой системы при деградации ее технического состояния.

2. Результаты математического моделирования динамического поведения обрабатывающей системы показали, что тренд информационного параметра (относительной величины звуковой волны) имеет два характерных участка:

участок медленного и участок его резкого изменения. Это дало основание для выбора аналитического выражения для прогнозной модели в виде суммы двух дробно-рациональных степенных функций, дающих математическое описание этих участков тренда, соответствующее реальному динамическому поведению на них обрабатывающей системы. При этом искомый ресурс, включенный в математическую структуру прогнозной модели в виде числового значения одного из ее коэффициентов, рассчитывают при параметрической идентификации модели по результатам контроля тренда информационного параметра. Оценка статистической значимости прогнозной модели показала, что коэффициенты модели согласно F-критерию Фишера статистически значимы. Коэффициент корреляции R между фактическим трендом параметра \bar{E}_{36} , зафиксированного во время работы обрабатывающих систем, и графиком прогнозной модели составил: на участке медленного изменения тренда – 0,852; а на участке его резкого изменения – 0,903. Погрешность определения ресурса обрабатывающей системы при этом с вероятностью 0,95 не превышает 5%.

3. Для формализации процедуры контроля динамического поведения металлообрабатывающих технологических систем разработаны и экспериментально апробированы обобщенные критериальные выражения – показатели состояния. Эти показатели, полученные методами теории «нечетких множеств», позволили количественно описать и отнести с точки зрения динамики различные технологические условия работы обрабатывающих систем к ряду стандартных, что является основой для целенаправленного выбора режима работы обрабатывающих систем для продолжения в заданных пределах срока их бездефектной работы, а упорядоченность числовых значений этих показателей позволяет рассматривать их в качестве норм динамического поведения обрабатывающих систем, компенсируя отсутствие для обрабатывающих систем соответствующей нормативной документации.

4. Для внедрения в практику производства алгоритма контроля динамического поведения металлообрабатывающих технологических систем разработан программный продукт, апробация которого в составе

микропроцессорного устройства, проведенная в лабораторных и производственных условиях, доказала его способность регистрации информационных сигналов в режиме реального времени и осуществления дальнейшей их обработки для непрерывного наблюдения за динамическим поведением обрабатывающих систем, определения их ресурса и оценки на этой основе качества их работы. Опытная эксплуатация микропроцессорного устройства в условиях реального производства на ОАО «Сумское машиностроительное НПО» и в ООО «ТРИЗ» ЛТД показала, что программный продукт в составе этого устройства позволяет в условиях обоих производств:

- экономить до 10% времени работы обрабатывающей системы, традиционно расходуемой на выявление и замену ее отказавших элементов;
- не менее чем на 10%, повысить эффективность функционирования технологической обрабатывающей системы, особенно при изготовлении ответственных деталей, в том числе длинномерных и крупногабаритных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Основы теории резания материалов: учебник / [Н. П. Мазур, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др.]: под общ. ред.: Мазура Н. П., Грабченко А. И. — 2-е изд., перераб. и доп. — Х.: НТУ "ХПИ", 2013. — 534 с
2. Основи теорії різання матеріалів: підручник для вищ. навч. закладів / [М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок та ін.]: під заг. ред. М.П. Мазура. — Львів: Новий Світ. — 2000, 2010. — 422 с.
3. Внуков Ю. М. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів : навч. посіб. / Ю. М. Внуков, В. О. Залого. — Суми: СумДУ, 2010. — 243 с.
4. По материалам сайта «Технология». Методы диагностики состояния режущего инструмента. — Режим доступа: http://technologia.ru/documentation/cutting_of_metals/7.html.
5. Макаров А. Д. Износ и стойкость режущего инструмента / А. Д Макаров. — М.: Машиностроение, 1966.—264с.
6. Кадыров Ж. Н. Диагностика и адаптация станочного оборудования гибких производственных систем/ Ж. Н. Кадыров. — Л.: Политехника, 1991.—144с.
7. Кривоухов В.А. и др. Резание металлов: учебник для машиностроительных вузов и факультетов / [Ч. И. Трановский, П. П. Трудов, В. А. Кривоухов, М. Н. Ларин, А. Я. Малкин]. — М.: Машгиз, 1954.— 471 с.
8. Залого В. А. Материалы для металлорежущих лезвийных инструментов: учеб. пос. / В. А. Залого, В. Д. Гончаров. — Барнаул: АлтГТУ, 2009. — 299 с.
- 9.Кривоухов В.А. и др. Обработка металлов резанием: учебник для авиационных вузов / [В.А. Кривоухов, Б.Е. Бруштейн, С. В. Егоров, Д.Г. Червяков, Н.А. Челобов, М.А. Мякишев, В.Г. Бовин, П.Г. Петруха, П.Д. Беспяхотный]. — М. Оборонгиз, 1958.— 627 с .
10. Ящерицын П.И. и др. Основы резания материалов и режущий инструмент: учебник для машиностроит. спец. вузову / [П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко]. — Минск, Высш. школа, 1975.— 528 с
11. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф Бобров. М.:

Машиностроение, 1975.—344 с.

12. Залога В. А. Диагностика процессов механической обработки с применением искусственных нейронных сетей: состояние вопроса / В. А. Залога, А. В. Гонщик, Р. Н. Зинченко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки, 2012. — № 2. — С. 128-137.

13. Жулидов А. В. О связанности колебаний системы СПИЗ при резании / А. В. Жулидов, В. А. Залога, А. А. Носуленко. – Металлорежущие станки: отв. ред. Бирюков Б.Н. — М.: Машиностроение, 1985. — С. 7-12.

14. Залога В. А. Идентификация режима автоколебаний в обрабатывающей системе при фрезеровании концевыми фрезами / В. А. Залога, Д. В. Криворучко, С. С. Емельяненко // Труды Одесского политехнического университета: Научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам.—Одесса,2008.—Вып.1(29).— С. 73-78.

15. Залога В. А. Инструментальные материалы / В. А. Залога // Курс лекций "Инструментальные материалы для лезвийных инструментов": учеб. пос. — Сумы: СумГУ, 2007. — С. 16-45.

16. Залога В. А. Исследование работоспособности резцов из кубического нитрида бора при точении титанового сплава BT22 / В. А. Залога, К. А. Дядюра, О. О. Розенберг // Резание и инструмент в обрабатывающих системах: международный научно-технический сборник. — Х.: НТУ "ХПИ", 2008. — Вып. 76. — С. 151-160.

17. Залога В. А. Новая структура системы диагностирования состояния режущего инструмента, основанная на использовании правил нечеткой логики и системы искусственного интеллекта / В. А. Залога, Р. Н. Зинченко, А. В. Гонщик // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Технические науки. — 2011. — Вып. 27. — С. 46-52.

18. Залога В. А. Исследование возможности применения метода диагностики по акустическому излучению при чистовом точении титанового сплава. Часть 2 / В. А. Залога, Р. Н. Зинченко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2011. — № 1. — С. 89-93.

19. Залога В. А. Исследование возможности применения метода диагностики по акустическому излучению при чистом точении титанового сплава. Часть 1 / В. А. Залога, Р. Н. Зинченко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2008. — № 4. — С. 118-125.

20. Внуков Ю. Н. Интегрированные генеративные технологии / Внуков Ю.Н., А.И. Грабченко, Ю.Н. Доброскок та ін. —Харків: НТУ «ХПІ», 2011, 512с.

21. Грабченко А. И. Повышение эффективности обработки ПСТМ на основе использования явления периодичности процесса шлифования / Грабченко А.И., Дюбнер Л. Г., Пыжов И. Н. // Сборники научных работ НТУ "ХПИ" : Різання та інструмент в технологічних системах №80 - НТУ "ХПИ"— 2011. — №80. — С. 14-17.

22. Девин Л.Н. Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента / Л.Н.Девин – Киев; Наукова думка, 1992. – 131 с.

23. Деревянченко, А.Г. Совершенствование программного комплекса обработки изображений зон износа и распознавания состояний инструментов / Деревянченко А.Г., Криницын Д.А., Фомина О.В. // Сборники научных работ НТУ "ХПИ" : Високі технології в машинобудуванні №1 - НТУ "ХПИ", 2011. – С. 18-21 с

24. Доброскок В.Л. Система 3D моделирования абразивных инструментов из сверхтвердых материалов/ В.Л. Доброскок // Мат. межд. научн.-техн. конф. "Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение" (СТИМ-2001). – Киев: ИСМ НАН Украины, 2001. – С. 221-222.

25. Залога В. О. Дослідження можливості застосування систем нечіткої логіки у системах діагностики стану різальних інструментів / В. О. Залога, Р. М. Зинченко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2012. — №4. — С. 98-110.

26. Мазур М.П. Розробка прогнозуючої моделі керування точністю процесу контурного фрезерування кінцевим інструментом/ М.П. Мазур, С.А. Крижановський // Вісник Сумського державного університету. □□ Суми:

СумДУ, 2002. – № 2 (35). – С. 61.

27. Новоселов Ю. К. Диагностика операции чистового шлифования по динамике изменения выходных переменных и параметров состояния технологической системы / Ю. К. Новоселов, Э. Э. Ягьяев, Н. Р. Кириенко // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. / Севастоп. нац. техн. ун-т; ред. Ю. К. Новосолов. - Севастополь: Вид-во Севастоп. нац. техн. ун-ту, 2010. – Вып. 107: Машиноприладобудування та транспорт. – С. 170-173

28. Якубов, Ф. Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф. Я. Якубов, В. А. Ким. - Симферополь : Крым. учеб.-пед. гос. издательство, 2005. – 297 с.

29. Зинченко Р.Н. Повышение эффективности точения за счет диагностики износа инструмента по акустическому излучению: Дисс. канд. техн. наук: 05.03.01. – Харьков , 2005.–188 с.

30. Влияние условий обработки на шероховатость поверхности после попутного тангенциального точения: тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. — Сумы: СумДУ, 1998. — С. 85.

31. Нагорный В.В. Определение ресурса и оценка технического состояния промышленного оборудования / Г. И. Красножон, В. В. Нагорный // Вибрация машин. Измерение, снижение, защита. – 2007. – №4(11). – С.38 - 42.

32. Нагорный В. В. Оценка технического состояния объекта диагностирования по относительной величине логарифма величины диагностического признака / В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2007. – №4(10). – С.74 - 77.

33. Нагорный В. В. Оптимизация механической обработки адаптивным управлением на основе анализа шума резанья / К. А. Дядюра, Р. Н. Зинченко, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 3(13). – С.63- 67.

34. Нагорный В. В. Повышение эффективности процесса резания полиграфических материалов на основе диагностики текущего состояния ножа по

акустическому сигналу / В. А. Залого, К. А. Дядюра, В. В. Нагорный // Високі технології в машинобудуванні: зб.наук. пр. НТУ «ХП». – Вип. 2(17). – С. 142-147.

35. Нагорный В. В. Управление процессом резания металлов на основе информации, получаемой методами технической диагностики / В. А. Залого, К. А. Дядюра, В.В. Нагорный // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”: збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ „ХП”, 2008. – №35. – С. 49-55.

36. Нагорный В. В. Математическая модель системы жизненного цикла машиностроительного изделия/ В. А. Залого, К. А. Дядюра, В.В. Нагорный //Современные технологии в газотурбостроении. Материалы I междунар. науч.-техн. конф. – Алушта- Харьков, 7-12 сентября 2009 .– С. 10.

37. Нагорный В. В. К оценке эффективного функционирования бумагорезального оборудования на этапах проектирования и эксплуатации / В. А. Залого, К. А. Дядюра, В. В.Нагорный // Резание и инструмент в обрабатывающих системах. – 2009. – № 76.– С.34 – 47

38. Нагорный В. В. Прогнозирование работоспособности режущего инструмента на основе оценки напряжённого состояния поверхностного слоя обрабатываемого материала / К. А. Дядюра, В. В. Нагорный // Вісник СевНТУ: Машинобудування та транспорт: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – Вип. 111.– С. 66-71.

39. Нагорный В. В. Розробка системи технічного діагностування машин / В.В. Нагорный, Г.Ю. Скоропад // Комп'ютерні науки для інформаційного суспільства. Матеріали міжнар. наук.-техн.конф. студ., аспір. та молод. вчених , (СХУНУ ім. Даля, 23-25 травня 2010 р.). – Луганськ, вид-во «Ноулідж», 2010. – С. 178-180.

40. Нагорный В. В. Моделирование процесса проектирования машиностроительных изделий производственно-технического назначения / В. А. Залого, К. А. Дядюра, В. В.Нагорный // Современные направления и

перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Механообработка. Материалы Всеукраинской научно-технической конференции. – Севастополь, 2010. – С. 13- 20.

41. Нагорный В. В Розроблення системи технічного діагностування машин / В. А. Залога, К. А. Дядюра, В. В.Нагорный // Інформатика,математика,механіка ІММ – 2010.Матеріали IV міжвуз. наук.-техн. конф. викл., співроб., аспір. і студ., (СумДУ, 19-23 квітня 2010 р.). – Суми, 2010. – С. 164.

42. Нагорный В. В Управление качеством механической обработки резанием на основе информации технической диагностики / К. А. Дядюра, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 2 (24). – С. 44-49.

43. Нагорный В. В. Прогнозирование фактического ресурса режущего инструмента / К. А. Дядюра, В. В. Нагорный // Вибрации машин, измерение, снижение, защита. – Донецк, 2011. – № 2 (25). – С. 20 - 25.

44. Нагорный В. В. Оценка степени износа инструмента методом вибродиагностики / В.А. Залога, В. В. Нагорный // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2011. – № 4. – С.88-96.

45. Нагорный В. В. Повышение эффективности эксплуатации промышленного оборудования на основе диагностики и определения ресурса наработки его на от каз / В. А. Залога, К. А. Дядюра, В. В.Нагорный // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС-2011. Матеріали першої міжнар. наук. конф. пам'яті проф. В. Поджаренка . (ВНТУ, 18-20 жовтня 2011 р.). – Вінниця, 2011. – С. 17.

46. Нагорный В. В. Диагностирование технического состояния скважинного оборудования / В. В. Нагорный // Международный форум “НАСОСЫ-2011».Материалы XIII Международной научно-технической конференции “ГЕРВИКОН-2011”, (СумГУ, 6 - 9 сентября 2011). – Сумы, 2011. – С. 6.

47. Нагорный В. В. Определение режимов механообработки на основе вибромониторинга процесса резания / К. А. Дядюра, В. В. Нагорный // Вибрации

машин, измерение, снижение, защита.– Донецк, 2012. – № 1 (28). – С. 19 - 25.

48. Нагорный В. В. Расчёт индикаторов разрушения режущего инструмента/ В.А. Залого, В. В. Нагорный // Вісник СумДУ.Серія Технічні науки. –2012. – № 2. – С.101-111.

49. Нагорный В. В. Дослідження коливань токарного верстата з метою прогнозування моменту своєчасної заміни різального інструмента / В.А. Залого, В. В. Нагорный // Сучасні технології в промисловому виробництві.

Матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції. (СумДУ, 17-20 квітня 2012 р.). – Суми, 2012. – С. 74-75.

50. Нагорный В. В. Спадкові принципи формування якості складних машинобудівних виробів при самоорганізації процесів проектування, виготовлення та експлуатації: монографія / Залого В. О., Дядюра К. О., Нагорный В. В. – Суми: Сумський державний університет, 2012. – 347 с.

51. Нагорный В. В. Залого В. А. Прогноз стойкости инструмента по результатам вибродиагностики / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Вибрации машин, измерение, снижение, защита. – Донецк, 2012. – № 2 (29). – С. 29 - 35.

52. Нагорный В. В. Прогнозирование момента замены режущего инструмента по уровню звука, генерируемого процессом резания / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях. Материалы III научно-практической конференции, (ЮЗГУ, 17-19 мая 2012 г.). – Курск, 2012. – С. 107-111.

53. Нагорный В. В. Расчёт индикаторов разрушения режущего инструмента/ В. А. Залого, В. В. Нагорный // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машінобудування. –2012. – № 66. – С.96-102.

54. Нагорный В. В. Использование вибродиагностики для прогноза стойкости инструмента / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технология. – 2012. – № 2, Часть 1. – С.30-38.

55. Нагорный В. В. Исследование колебаний токарного станка. Часть 1. Исследование закономерностей изменения динамики обрабатывающей системы в зависимости от состояния режущего инструмента / В. А. Залого, В. В. Нагорный //

Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2013. — № 1. — С. 125-136.

56. Нагорний В. В. Диагностирование состояния режущего инструмента по звуку, сопровождающему процесс резания / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Молодёжь и наука: модернизация и инновационное развитие страны. Материалы международной научно-практической конференции, (Пенза, 5-8 июня 2013 г.). — Пенза, 2013. — С. 179-187.

57. Нагорний В. В. Обеспечение качества изготовления продукции посредством вибродиагностики / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2013. — № 1 (31). — С. 12-17.

58. Нагорний В. В. Индикаторы состояния режущего инструмента и качества металлообработки / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2013. — № 3 (33). — С. 46-50.

59. Нагорний В. В. Контроль режимов резания на основе виброакустического мониторинга процесса металлообработки / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2013. — № 4 (34). — С. 52-55.

60. Нагорний В. В. Определение стойкости инструмента и степени его износа по уровню звука, сопровождающего процесс резания / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Металлообработка. — 2013. — №2 (74). — С. 14-22.

61. Нагорний В. В. Исследование колебаний узлов фрезерного станка в зависимости от износа фрезы / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Машиностроение — основа технологического развития России» (ТМ-2013). Материалы V Международной научно-технической конференции — ЮЗГУ, Курск. — 2013. — С. 112 - 115.

62. Нагорний В. В. Управление режимом механообработки на основе виброакустического контроля процесса резания / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Машиностроение — глазами молодых. Материалы Международная научно-техническая конференция . — КНУ, Кременчук. — 2013. — С. 49.

63. Нагорний В. В. Програмно - апаратний комплекс контролю якості

функціонування металообробної технологічної системи / В. А. Залога, В. В. Нагорный // Обработка материалов у машинобудуванні. Матеріали III Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції співроб., аспір. і студ. , (СумДУ, 22–25 квітня 2014 р.). – Суми, 2014. – С. 60.

64. Нагорный В. В. Контроль качества функционирования обрабатывающей системы / В. А. Залога, В. В. Нагорный // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 7. – С. 39-45.

65. Патент UA 91643 U Україна, МПК G01M 7/00 (2014.01). Спосіб вібродіагностики технічного стану металообробного верстата / Залога В. О., Нагорный В. В.; заявитель власник Сумський державний ун-тет. - № u 2014 01692 ; заявл. 21.02.14 ; опубл. 10.07.14, Бюл. № 13

66. Патент UA 91817 U Україна, МПК G01N 3/58 (2006.01). Спосіб оцінки зносу та стійкості лезового різального інструмента / Залога В.О., Нагорный В.В.; заявитель власник Сумський державний ун-тет. - № u 2014 03124 ; заявл. 27.03.14 ; опубл. 10.07.14, Бюл. № 13

67. Патент UA 92424 U Україна, МПК B23B 25/00 (2014.01). Спосіб визначення шорсткості поверхні деталі при металообробці / Залога В.О., Нагорный В.В.; заявитель власник Сумський державний ун-тет. - № u 2014 00000; заявл. 03.04.14 ; опубл. 11.08.14, Бюл. № 15

68. UA Патент 92987 U Україна, МПК B23Q 11/02 Пристрій для контролю стану технологічної металообробної системи / Залога В.О., Нагорный В.В.; Заявник і патентовласник Сумський державний ун-тет. - № u 2014 04238 ; заявл. 22.04.14 ; опубл. 10.09.14, Бюл. № 17/2014–8 с

69. ГОСТ 27.004-85. Надёжность в технике. Системы технологические. Термины и определения. Введ.1986-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 10 с. ил.

70. Подураев В. Н. Обработка резанием жаропрочных и нержавеющей материалов / В. Н. Подураев. – М., «Высшая школа», 1965. – 160 с.

71. Кудинов В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М., «Машиностроение», 1967. – 250 с.

72. Кудинов В. А. Автоколебания при резании с ненормальным наростом / В. А. Кудинов, «Станки и инструмент», 1965. – № 7.
73. Соколовский А.П. Вибрации при работе на металлорежущих станках / А. П. Соколовский // Исслед. колебаний металлорежущих станков при резании металлов: сб. тр. – М.: Машгиз, 1958. – 120 с.
74. Штейнберг В. С. Исследование вибраций при токарной обработке металлов / В. С. Штейнберг // Вестник металлопромышленности. – 1936. – № 12-13. – С. 83 – 87.
75. Исаев А. И. Резание металлов керамическим инструментом / Исаев А. И., Зорев Н. Н., Кучма Л. К. – М.: Машгиз, 1952. – 92 с.
76. Амосов И. С. Осциллографическое исследование вибраций при резании металлов / Амосов И. С. – М.: Машгиз, 1951. – 64 с.
77. Кобринский А. Е. Виброударные / Кобринский А. Е., Кобринский А. А. — М.: Наука, 1973. — 591 с.
78. Межевой Ю. Т. Экспериментальное исследование вибраций при точении в зависимости от условий обработки: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ю. Т. Межевой. – М., 1954. – 135 с.
79. Дроздов Н. А. К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке / Н. А. Дроздов // Станки и инструмент. – 1937. – № 22. – с. 21-25.
80. Каширин А. И. Исследование вибраций при резании / Каширин А. И. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1944. – 262 с.
81. Манжос Г. А. Исследование вибраций в условиях скоростного точения и изыскание методов борьбы с ними / Манжос Г.А. – М.: Машгиз, 1951. – 47 с.
82. Ильницкий И. И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения/ Ильницкий И. И. – М.: Машгиз, 1958. – 141 с.
83. Кривоухов В. А. Высокочастотные вибрации резца при точении / В. А. Кривоухов, А.Л. Воронов. – М.: Оборонгиз, 1956. – 77 с.
84. Мурашкин Л.С. Прикладная нелинейная механика станков / Л. С. Мурашкин, С.Л. Мурашкин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 192 с.
85. Заре В.В. Оценка некоторых механизмов возбуждения вибрации при

точении / В. В. Заре // кн.: Вопросы механики и машиностроения. – Изд. РПИ, Рига: Зинантне, 1971. – Вып. 6. – С. 107-121.

86. Эльясберг М. Е. Автоколебания металлорежущих станков: Теория и практика / Эльясберг М. Е. – СПб: ОКБС, 1993. – 180 с.

87. Вейц В. Л. Вынужденные колебания в металлорежущих станках / Вейц В. А., Дондошанский В. К., Чиряев В.И. – М.-Л.: Машгиз. – 1959. – 288 с.

88. Подураев В. Н., Захаров Ю. Е. Причины возникновения и средства гашения автоколебаний при обработке резанием / В. Н Подураев, Ю. Е.Захаров // кн. «Научные доклады высшей школы», «Машиностроение и приборостроение». – 1959,. № 1.

89. Синопальников В. А. Надежность и диагностика обрабатывающих систем / В. А. Синопальников, С. Н. Григорьев. – М.: Высшая школа, 2005. – 343с.

90. Малафеев Ю. М. Выбор режущего инструмента и прогнозирование его стойкости при обработке пермаллоя 50Н / Ю. М. Малафеев, Д. Н. Приходько // Вестник НТУУ «КПИ», серия «Машиностроение». – 2012. – №64. – С. 15-18.

91. Плотников А. Л. Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ: монография / А. Л. Плотников, А. О. Таубе. – Волгоград: РПК "Политехник": ВолгГТУ, 2003. – 184 с.

92. Точность и надежность станков с числовым программным управлением / Под ред. А. С. Проникова. – М.: Машиностроение. – 1982. – 256 с.

93. Техническая диагностика процессов механообработки в ГАП / Н. В. Дорогова, Л. Н. Петрашина, В. Н. Тисенко [та ін] // Исследование надежности и долговечности деталей машин: Труды ЛПИ. – 1983. – № 396. – С. 92-97.

94. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Лоладзе Т. Н. – М.: Машиностроение, 1982. – 320с.

95. Трусов В. В. Математическая модель вибраций при резании / Трусов В. В.// Производительная обработка и надежность деталей машин: Меж. вуз. сб. тр. Ярославль, 1981. – С. 18-29.

96. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Талантов Н.В. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
97. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. / Макаров А. Д. – М.: Машиностроение. – 1966. – 264 с.
98. Дудкин Е. В. Повышение надежности работы многолезвийного инструмента на автоматических линиях / Е. В. Дудкин, А. Л. Плотников // Автоматизация обрабатывающих процессов в машиностроение: Межвуз. сб. науч. тр., ВолгГТУ, Волгоград. – 1994. – С. 43-47.
99. Иващенко А.П. Анализ и синтез причин, приводящих к снижению стойкости режущего инструмента при резании материалов/ А. П. Иващенко // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: www.science-education.ru/113-11435.
100. Бржозовский Б. М. Обеспечение надежности определения режимов лезвийной обработки для автоматизированного станочного оборудования / Б. М. Бржозовский, А. Л. Плотников. – Саратов: Саратов.гос.техн. ун-т., 2001. – 88 с.
101. Плотников А. Л. Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ: Монография / А. Л. Плотников, А. О. Таубе – Волгоград: Волгоград. гос. техн. ун-т., 2003. – 184 с.
102. Сидоров А. С. Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента в мехатронных станочных системах: дис. ... кандидата техн. наук: 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» / Сидоров А. С.– Уфа.–209 с.
103. Багряцкий Ю. А. Рентгенографическое изучение старения сплавов на никелевой основе / Ю. А. Багряцкий, Ю. Д. Тяпкин // Проблемы металловедения и физики металлов.– 1958. – вып.5. – С. 241–265.
104. Надеинская Е. П. Исследование износа режущего инструмента с помощью радиоактивных изотопов / Надеинская Е. П.– М. : Машгиз, 1956. – 168 с.
105. Деревянченко А. Г. Алгоритмы автоматического контроля износа

лезвий инструментов в гибких производственных системах / А.Г. Деревянченко // Металлорежущие станки. – 1985. – № 13. – С. 37 – 46.

106. Кибальченко А. В. Контроль состояния режущего инструмента обзорная информация / А. В Кибальченко, Выпуск 2. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 25 с.

107. Калашников М. А. Разработка и исследование переменного-частотного метода электрических измерений параметров поверхностных слоев металлических изделий: автореф. дис. на соискание наук. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.11 «Методы контроля и диагностика в машиностроении» / М. А. Калашников.– Н.: Новочеркасский политехнический институт, 1974. – 24 с.

108. Контроль поломки износа режущего инструмента // Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. Серия 2. Режущие инструменты, – М., 1987. – Вып.15 – С. 1-5.

109. Подгорков В. В. Теория резания: учеб. пособие / В. В. Подгорков. – Иваново: ИвГУ, 1986. – 80 с.

110. Зориктуев В. Ц. Идентификация и оптимальное управление автоматизированными технологическими системами: учеб. пособие / В. Ц Зориктуев. – Уфа: УАИ, 1992. – 118 с.

111. Маталин А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Издательство: Лань, 2008 – 512 с.

112. Барзов А. А., Диагностика обрабатывающей наследственности методом акустической эмиссии / А. А. Барзов, А. И. Денчик. // Обработка резанием. – 1983.– № 4. – С. 1–5.

113. Янбухтин Р. М. Интенсификация токарной обработки труднообрабатываемых материалов с учетом вибрационных явлений, Автоматизированные технологические и мехатронные системы в машиностроении / Р. М. Янбухтин // Сб. науч. трудов. – Уфа: УГАТУ, 1997.

114. Кретинин О. В. Исследование спектра термо ЭДС и сил при резании / О. В. Кретинин // Труды ГПИ (Горький).– 1970.– Т.26, вып.4.– С. 17-18.

115. Коробов Ю. М., Электромеханический износ при трении и резании металлов / Ю. М. Коробов, Г. А. Прейс. – К.: Техніка, 1976. – 200 с.
116. Коуров Г. Н. Идентификация температуры резания в САУ процесса точения на токарном станке / Г. Н. Коуров, Ю. М. Кичко, И. И. Зубарев // Сб. науч. трудов: Интеллектуальные мехатронные станочные системы. – Уфа, 2003. – 120 с.
117. Телегин А. А. Расчет максимальной температуры токарного резца по его инфракрасному излучению / А. А. Телегин // Самолётостроение и техника воздушного флота: Республ. межвед. науч. техн. сб. Харьков. – 1967. – Вып.12. – С. 27-31.
118. Манжурнет В. К. Косвенный контроль размеров детали при точении по силе резания / В. К. Манжурнет // Технология и автоматизация машиностроения: Респ. межвед. науч.-техн. сб. Харьков. – 1972. – Вып.9 – С. 81-84.
119. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
120. Steven Y. Liang Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art / Y.Liang Steven, L. Hecker Rogelio, G. Robert // Landers Journal of Manufacturing Science and Engineering. – MAY 2004. – Vol.126/297. – P.137-142.
121. Gould L. Sensing Tool and Drive Element Condition in Machine Tools / L. Gould // Sensors.–1998. – P. 5–13.
122. On Line Measure of Tool Wear: Ph.D. thesis ["Manufacturing and Machine Tools Division, Department of Mechanical Engineering, UMIST"]. – Manchester, United Kingdom. – 1993. – 250 p.
123. Oraby S. E. Development of Models for Tool Wear Force Relationship in Metal Cutting / S. E Oraby, D. R. Hayhurst // Int. J. Mach. Tools Manuf. – 1991. – № 33 – P. 125–138.
124. Bayramoglu M Systematic Investigation on the Use of Forces Ratios in Tool Condition Monitoring for Turning Operations / M. Bayramoglu, U. Dungal // Trans. Inst. Meas. Control. – London, 1998. – № 20 – P. 92–97.

125. Kuljanic E TWEM, a method based on cutting forces – monitoring tool wear in face milling / E. Kuljanic, M. Sortino // Department of Electrical, Management and Mechanical Engineering – DIEGM. – University of Udine, Udine, Italy, June 2004.
126. Shao H. A cutting power model for tool wear monitoring in milling / H. Shao, H. L. Wang, X. M. Zhao // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2004. – February 2004. – № 44 – P. 105–108.
127. Болотин Ю. З. Диагностика ресурса режущего инструмента / Ю. З. Болотин, В. Г. Грановский // Машиностроитель. – 1989. – № 11. – С. 30.
128. Нахапетян Е. Г. Диагностирование оборудования гибкого автоматизированного производства / Нахапетян Е. Г. – М.: Наука, 1985. – 225 с.
129. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: Учеб. Для ВТУЗов / [Н. М. Капустин, П. М. Кузнецов, А. Г. Схиртладзе и др.]; под ред. Н. М. Капустина. – М.: Высш. шк. 2004. – 415 с.
130. Litao Wang Tool wear monitoring in reconfigurable machining systems through Wavelet analysis / Wang Litao, G. Mehrabi. Mostafa, Kannatey-Asibu Jr. Elijah // Engineering Research Center for Reconfigurable Machining Systems University of Michigan. – Ann Arbor, MI 48109-2125.
131. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. — Ижевск : НИЦ регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 156 с.
132. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 400 с.
133. Models for Speech Recognition / [Huang X. D., Ariki Y., Jack M. A. Hidden Markov] – Edinburgh University Press, 1990. – 275 p.
134. Scheffer C. Wear monitoring in turning operations using vibration and strain measurements / C. Scheffer, P. S. Heyns – Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Pretoria, Pretoria, 0002, South Africa, 2004. – 210 p.
135. Blum T. A Study of Acoustic Emission from Orthogonal Cutting Process / T. Blum, I. Inasaki. // ASME J. Eng. Ind. – 1990. – № 112. – P. 203–211.
136. Moriwaki T. A New Approach to Automatic Detection of Life of Coated

Tool Based on Acoustic Emission Measurement / T. Moriwaki, M. Tobito // ASME J. Eng. Ind. – 1990. – № 112. – P. 212-218.

137. Richard Y. Chiou a Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning / Y. Chiou a Richard, Y. Liang b Steven // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2000. – № 40 – P. 114-118.

138. Liang S. Y. Detection of Cutting Tool Wear Using Time Series Modeling of Acoustic Emission Signals / S.Y.Liang, D.A, Dornfeld // ASME J. Eng. Ind. – 1989. – № 111 –P. 199–205.

139. Подураев В. И. Активный контроль износа инструмента методом акустической эмиссии / В. И Подураев, А. А. Барзов, А. В. Кибальченко // Вестник машиностроения. – 1985. – №4. – С. 14-19

140. Постников С. Н. Электрические явления при трении и резании / С. Н. Постников, С. Н. Горький. – Волго-Вятское кн. изд-во, 1975. – 280 с.

141. К вопросу получения оперативной оценки параметров изнашивания быстрорежущего инструмента / О. В.Кретинин, А. П. Клепин, А. Р. Кварталов [и др.] // Теория трения, смазки и обрабатываемость металлов: Труды ГПИ, Горький – 1977. – Вып. № 4. – С. 112 - 121.

142. Кретинин О. В. О возможном подходе к оценке контактных явлений при граничном трении / О. В. Кретинин, С. А. Кудрявцев // Автоматизированные технологические и мехатронные системы в машиностроении: Сб. науч. трудов. – Уфа: УГАТУ, 1997. – С. 152-159.

143. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И. Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.

144. Lo S., An adaptive-network based fuzzy inference system for prediction of workpiece surface roughness in end milling. / S. Lo // Journal of Materials Processing Technology – 2003. –№ 142 (3). – P. 665-675.

145. Zain, A.M, Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network / A. M. Zain, H. Haron, S. Sharif // Expert Systems with Applications.— 2010. – № 37 (2). – P. 1755-1768.

146. Lou S. Development of four in-process surface recognition systems to predict surface roughness in end milling / S. Lou. – Iowa: Iowa State University, 1997.

147. Lou B. M. S. Surface Roughness Prediction Technique For CNC End-Milling / B. M. S. Lou, J. C. Chen and C. M. Li // Journal Of Industrial Technology. – 1999. – № 15 (1). – P. 1-6.

148. Huang L. A multiple regression model to predict in-process surface roughness in turning operation via accelerometer / L. Huang, J. Chen // Journal of Industrial Technology. – 2001. – № 17 (2) – P. 1-8.

149. Davidson Joseph Surface roughness prediction of flow-formed AA6061 alloy by design of experiments / Joseph Davidson, M. K. Balasubramanian, G. R. N. Tagore // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – № 202 (1-3) – P. 41-46.

150. Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network / A. Zain [et al] // Expert Systems with Applications. – 2010. – № 37 (2). – P. 1755-1768.

151. Dong M. Adaptive network-based fuzzy inference system with leave-one-out cross-validation approach for prediction of surface roughness / M. Dong, N. Wang, // Applied Mathematical Modelling. – 2010.

152. Adaptive network-based fuzzy inference system for prediction of surface roughness in end milling process using hybrid Taguchi-genetic learning algorithm / Ho, W., [et al] // Expert Systems with Applications. – 2009. – № 36 (2, Part 2). – P. 3216-3222.

153. Candida F. Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems / F. Candida, Gene Expression // Complex System. – 2001. – № 13 (2) – P. 87-129.

154. Ferreira C. Gene expression programming in problem solving / C. Ferreira // Soft Computing and Industry - Recent Applications. – 2002. – P. 635-653.

155. Lou S. J. In-Process Surface Roughness Recognition (ISRR) System in End-Milling Operations / S. J. Lou, J. C. Chen // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 1999. – № 15 (3). – P. 200-209.

156. Ингеманссон А. Р. Повышение качества обработки и математическая модель формирования шероховатости поверхности при точении с опережающим пластическим деформированием // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Вестник УГАТУ). – Уфа, 2012. – Т. 16, № 4 (49). – С. 165-170.

157. Пат. 2163182 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 B 7/34. Способ определения шероховатости поверхности детали при обработке на металлорежущем станке / Дорофеев С. Н., Горшков А. С. Летуновский В. В., Моисеев В. А. (RU); заявитель и патентообладатель Закр. акц-ное об-тво "КОМПОМАШ-ТЭК". – № 2000103090/02; заявл. 11.02.2000; опубл. 20.02.2001, Бюл. № 9.- 2 с.

158. Пат. 2379737 Российская Федерация, МПК⁷ G 05 B 19/18. Способ поддержания предельно допустимых обрабатываемых режимов / Агапов С. И., Сидякина С. Ю., Корпелянский О. Ф. (RU); заявитель и патентообладатель Гос. образ-ное уч-дение высшего проф. обр-ния Волгоградский Гос. Техн. Уни-тет (ВолгГТУ). – № 2008109281/09; заявл. 11.03.2008; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 23. – 3 с.

159. Пат. 872052 Российская Федерация, МПК⁷ B 23 B 49/00. Способ оценки шероховатости поверхности в процессе резания / Астапов В. В., Морозов С. А., Шантин И. Д. (RU); –№ 2840742/25-08; заявл. 12.11.79; опубл. 15.10.81, Бюл. № 9. – 3 с.

160. Грановский Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.

161. Грановский Г. И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металла / Г. И. Грановский. – М.: Машиностроение, 1982. – 112 с.

162. Малафеев Ю. М. Выбор режущего инструмента и прогнозирование его

стойкости при обработке пермаллоя 50Н / Ю. М. Малафеев, Д. Н. Приходько // Вестник НТУУ «КПИ», серия «Машиностроение» – 2012, – № 64, – С. 15-18.

163. Пат. 2260786 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 N 3/58. Способ определения ресурса износостойкости твердосплавных режущих инструментов / Нестеренко В. П. (RU); заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет (RU). – № 2004124849/28; заявл. 13.08.2004, опубл. 20.09.2005, Бюл. № 28/2005. – 3 с.

164. Пат. 2417140 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 N 3/58. Устройство контроля износа и определения ресурса остаточной стойкости режущего инструмента для системы чпу станка / Мартинов Г. М., Синопальников В. А., Григорьев А. С. (RU); заявитель и патентообладатель Государственное Образовательное Учреждение Высшего Профессионального Образования Московский Государственный Технологический Университет "Станкин" (RU). – № 2417140/25-08; заявл. 11.11.2009, опубл. 27.04.2011, Бюл. № 06/2008. – 3 с.

165. Пат. 1682888 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 N 3/58. Способ определения ресурса стойкости режущего инструмента / Новиков Н. В., Девин Л. Н., Пискунов А. К., Дрожжин В. Ф., Доброскок В. Л. (UA); заявитель и патентообладатель: Институт сверхтвёрдых материалов (UA). – № 46874070/28; заявл. 3.05.89, опубл. 7.10.91, Бюл. № 37. – 3 с.

166. Теория автоматического управления / [Брюханов В. Н., Косов М. Г., Протопопов С. П. и др.]; под ред. Ю. М. Соломенцева. – [3-е изд., стер.] – М.: Высш. шк., 2000. – 268 с.

167. Остафьев В. А. Диагностика процесса металлообработки / Остафьев В. А., Антонюк В. С., Тымчик Г. С. – К.: Техніка, 1991, – 152 с.

168. Синопальников В. А. Надежность и диагностика обрабатываемых систем / В. А. Синопальников, С. Н. Григорьев – М.: Высшая школа, 2005. – 343 с.

169. Acoustic emission technique as a means for monitoring single point cutting tool wear / P. K. Ramakrishna Rao, P. Prasad, P. Srinivasa Pai [et al] // Trends in NDE Science & Technology – New Delhi, 1986. – Vol. 4. – P. 2513-2518.

170. Синопальников В. А. Контроль и прогнозирование состояния

инструмента при чистовой обработке / В. А. Синопальников // Комплект: ИТО – 2007 – № 9. – С. 60-63.

171. Козочкин М. П. Оснащение технологического оборудования информационно-измерительными системами / М. П. Козочкин, А. Н. Порватов, Ф. С. Сабиров // Измерительная техника. – 2012. – № 5. – С. 29-32.

172. Макаров В. Ф. Оптимизация процессов чистовой лезвийной и абразивной обработки сложно-профильных тяжело нагруженных деталей ГТД из жаропрочных сталей и сплавов / В. Ф. Макаров, В. А. Иванов // Автоматизированные технологические и механотронные системы в машиностроении: сборник научных трудов. – Уфа: УГАТУ, 1997. – С. 134-135.

173. Вейц, В. Л. Вынужденные колебания в металлорежущих станках / Вейц В. Л., Дондошанский В. Е., Чиреев В. И. – М.: Машгиз, 1959. – 288 с.

174. Дурко Е. М. Динамика станков: учебное пособие / Е. М. Дурко, С. И. Фецак. – Уфа: УГАТУ, 1996. – 92 с.

175. Введение в математическое моделирование: учебное пособие / [В. Н. Ашихмин, М. Б. Гитман, И. Э. Келлер и др.]; под ред. П. В. Трусова. – М: Логос, 2005. – 440 с.

176. Лепендин Л. Ф. Акустика / Л. Ф. Лепендин. – М.: Высш. Школа, 1978. – 448 с.

177. Ден-Гартог Дж. П. Механические колебания / Дж. П. Ден-Гартог. – М.: Гос. изд. физ. математическое лит, 1960. – 580 с.

178. Эйкхоффа П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния / П. Эйкхоффа ; [пер. с англ. под ред. Н.С. Райбмана]. – М.: Мир, 1975. – 681 с.

179. Павлов Б. В. Акустическая диагностика механизмов / Б. В. Павлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 224 с.

180. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики: ГОСТ 2789-73. – [Введ. 1975-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 7 с.

181. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике в 10 т. / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М.: Мир, 1965. – 4т. – 261 с.

182. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). - Москва: Машиностроение, 1978. - Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В. В. Болотина. 1978.– 352 с.
183. Грешилов А. А. Математические методы построения прогнозов / Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. – М.: Радио и связь. – 1997. – 112 с.
184. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике/ К. Шеннон. — М.: Изд-во ин. лит. – 1963. — 830 с.
185. Серенсен С. В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность/ Серенсен С. В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. –М.: Машиностроение. – 1975. – 488 с.
186. Голубков Е. П. Маркетинговые исследования / Е. П Голубков. – М.: Финпресс. – 1998. – 379 с.
187. Якушев А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения/ Якушев А. И., Воронцов Л. Н., Федотов Н. М.. — М.: Машиностроение. – 1986. — 352 с.
188. Пичкалев А. В. Применение кривой желательности Харрингтона для сравнительного анализа автоматизированных систем контроля / А. В. Пичкалев // Вестник КГТУ. Красноярск: КГТУ. – 1997. – С. 128–132.
189. Проников А. С. Надёжность машин / А. С. Проников. – М.:Машиностроение. – 1978. – 592 с.
190. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 /Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение. – 1985. – 496 с.
191. Ковальчук Е. Р. Основы автоматизации машиностроительного производства: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / Ковальчук Е. Р., Косов М. Г., Митрофанов В. Г. и др.; Под ред. Ю. М. Соломенцева. – М.: Высш. шк. – 1999. – 312 с.
192. Хлытчиев М. С. Основы автоматики и автоматизации производственных процессов / М. С. Хлытчиев. – М.:Радио и связь. – 1985. – 258 с.

193. Суркова А. И. Повышение эффективности обработки на станках с ЧПУ за счет применения систем автоматизированного контроля/ А. И. Суркова, В. М. Буртовой // Прогрессивные технологии в машиностроении: тематический сборник научных трудов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. — С. 39-42

194. Ширман А. И. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. И. Ширман, А. Г. Соловьёв. — М.: Машиностроение. — 1996. — 276с.

195. Цивінда Н. І. Підвищення ефективності процесу обробки деталей із високомарганцевих сталей шляхом діагностики стану інструменту: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Н. І. Цивінда; Донбас. держ. машинобуд. академія, Краматорськ, 2012. — 20 с.

196. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом/ И. Г. Жарков. — Л.: Машиностроение, 1986. — 184 с.

197. Raja E. Tool flank wear condition monitoring during turning process by SVD analysis on emitted sound signal/ E.Raja// European Journal of scientific research Vol. 49, No., 2011 С. 503-509.

198. Sundaram S., P. Senthilkumar P., A. Kumaravel A., Manoharan N. Study of flank wear in single point cutting tool using acoustic emission sensor techniques / S. Sundaram и др. // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Vol. 3, No. 4, August 2008. — С. 32-36.

199. Prateepasen A. Acoustik Emission and vibration for tool wear monitoring in single-point machining using Belief network/ A. Prateepasen A.//IEEE Instrumentation and Measurement Technology conference. Budapest, Hungary, May21-23, 2001.

200. Fiala Z., Piska M., Jaros A. On the analysis of the sound spektrum at machining of the glass-polyester composite material / Z. Fiala , M. Piska, A. Jaros // MM Science Journal, March 2013. — с.450-459.

201. Сапожков М.А. Электроакустика. Учебник / М.А. Сапожков. — М., Связь, 1978. — 272 с.

202. Данилевский В.В. Технология машиностроения / В.В.Данилевский. — М., Высш. школа, 1977. — 479 с.

203. Ананьев В. А., Балужева Л. Н., Мурашко В. П. Система вентиляции и кондиционирования / В. А. Ананьев, Л. Н. Балужева, В. П. Мурашко.– М., «Евроклимат», 2008. – 516 с.

204. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара / Я.Г.Пановко. – М., Наука, 1977.– 224 с.

205. Четыркин Е.М. Статистические методы определения ресурса/ Е.М.Четыркин – М., Статистика, 1977. – 200 с.

206. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решение / Л.А. Заде – М., Мир, 1976. – 165 с.

207. Залого В. А. Контроль состояния фрезы по звуку, сопровождающему процесс фрезерования / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Вестник машиностроения. – М., Машиностроение, 2015. – № 5. – С. 77–81.

Приложение А

Исходные данные и результаты расчета динамики обрабатывающей системы и литературные данные по характеру изменения параметров звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающих систем

А.1. Исходные данные и результаты математического моделирования динамики обрабатывающей системы токарного станка 16К20Т2.

Таблица А.1 – Параметры динамической модели обрабатывающей системы токарного станка

Динамические параметры	Моделируемый узел обрабатывающей системы (№ массы)					
	Лезвие (1)	Державка резца (2)	Суппорт (3)	Станина (4)	Шпиндель с патроном и заготовкой (5)	Резце- держа- тель (6)
Масса $m_i, кг$	$0,29 \cdot 10^{-6}$	0,12	37	3693	29	20
Коэффициент жесткости $k_i, Н/м$ ($f_i, Гц$)	$1,96 \cdot 10^8$ ($4,2 \cdot 10^6$)	$7,75 \cdot 10^{10}$ ($1,28 \cdot 10^5$)	$2,73 \cdot 10^9$ (1370)	$2,44 \cdot 10^{12}$ (4083)	$5,47 \cdot 10^{10}$ (6920)	$3,15 \cdot 10^9$ (2000)
Коэффициент вязкого сопротивления $c_i, Нс/м$ (доброт- ность Q)	0.5 (20)	2170 (20)	$4,33 \cdot 10^4$ (10)	$3,84 \cdot 10^6$ (25)	$8,45 \cdot 10^4$ (15)	$6,78 \cdot 10^4$ (15)

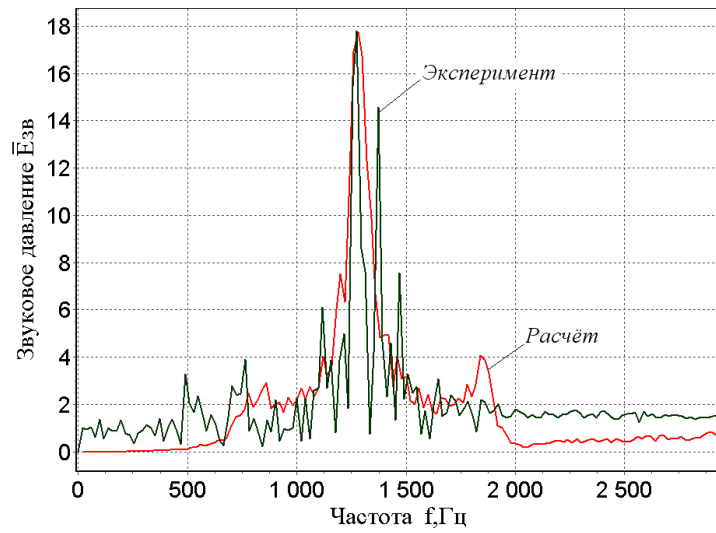
Примечание: коэффициент жесткости k определялся по следующей формуле $k_i = m_i (2\pi f_i)^2$, где f_i – собственная частота парциальных колебаний моделируемого узла находилась методом идентификации; коэффициент вязкого сопротивления c_i определялся по следующей формуле $c_i = \frac{\sqrt{k_i \cdot m_i}}{Q_i}$, где Q_i – добротность (величина) пика собственных парциальных колебаний моделируемого узла находилась методом идентификации.

Таблица А.2 – Параметры динамической модели обрабатывающей системы фрезерного станка

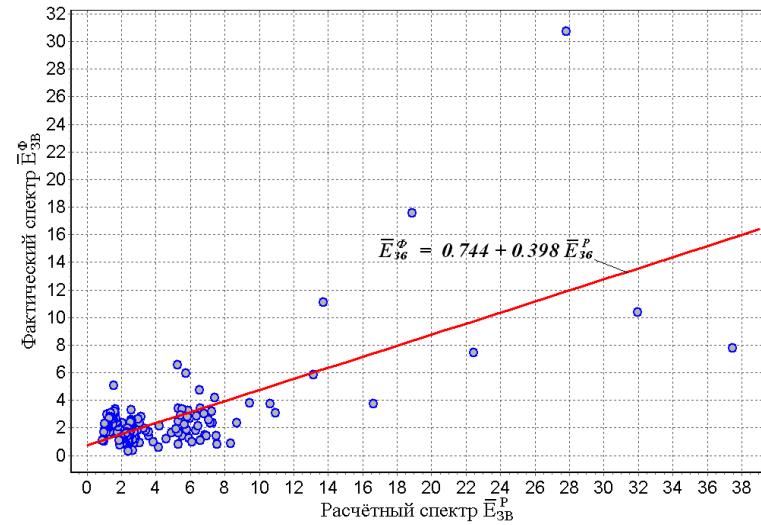
Динамические параметры	Моделируемый узел обрабатывающей системы (№ массы)				
	Консоль с осно-ванием (1)	Шпиндель с патроном и фрезой (2)	Зуб фрезы (3)	Салазки (4)	Стол (5)
Масса m_i , кг	3494	17	$0,3 \cdot 10^{-6}$	305	500
Коэффициент жесткости k_i , Н/м (f_i , Гц)	$8,6 \cdot 10^9$ (250)	$8,1 \cdot 10^6$ (110)	$1,9 \cdot 10^8$ ($4,14 \cdot 10^6$)	$6,3 \cdot 10^{12}$ (228)	$1,2 \cdot 10^9$ (250)
Коэффициент вязкого сопротивления c , Нс/м (добротность Q)	$1,8 \cdot 10^6$ (3)	2348 (17)	0.5 (10)	$1,4 \cdot 10^5$ (3)	$2,6 \cdot 10^8$ (3)

Примечание: коэффициент жесткости k определяется по следующей формуле $k = m \cdot (2\pi \cdot f_i)^2$, где f_i – собственная частота парциальных колебаний моделируемого узла; коэффициент вязкого сопротивления c определяется по следующей формуле $c = \frac{\sqrt{k \cdot m}}{Q}$, где Q – добротность (величина) пика собственных парциальных колебаний моделируемого узла находилась методом идентификации.

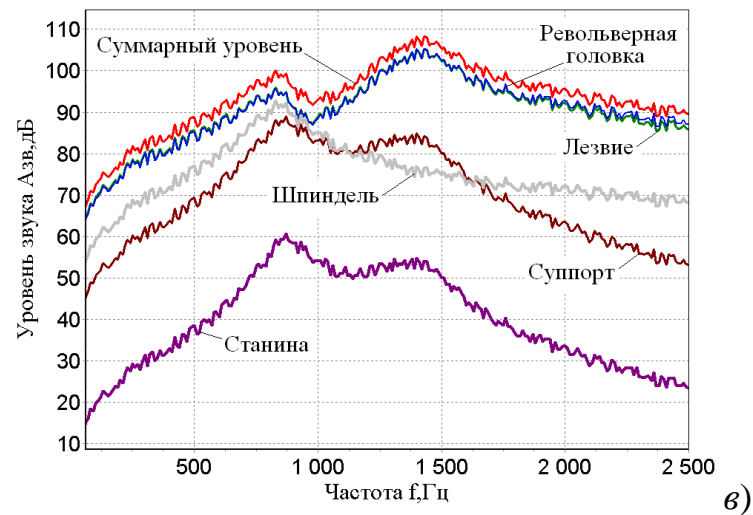
Указанные в таблице массы узлов станка соответствуют данным, приведенным в документации на моделируемый станок.



а)



б)



в)

Рисунок А.1 – Результаты расчёта спектра звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающей системы токарного станка: а) – сравнение расчётного и фактического спектров ; б) – линия регрессионной зависимости между фактическим и расчётным спектрами; в) – составляющие суммарной амплитуды звуковой волны

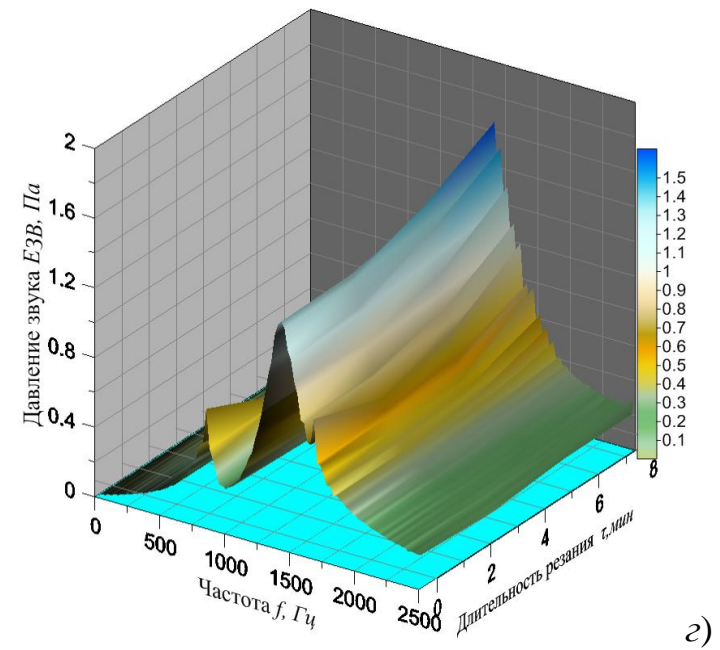
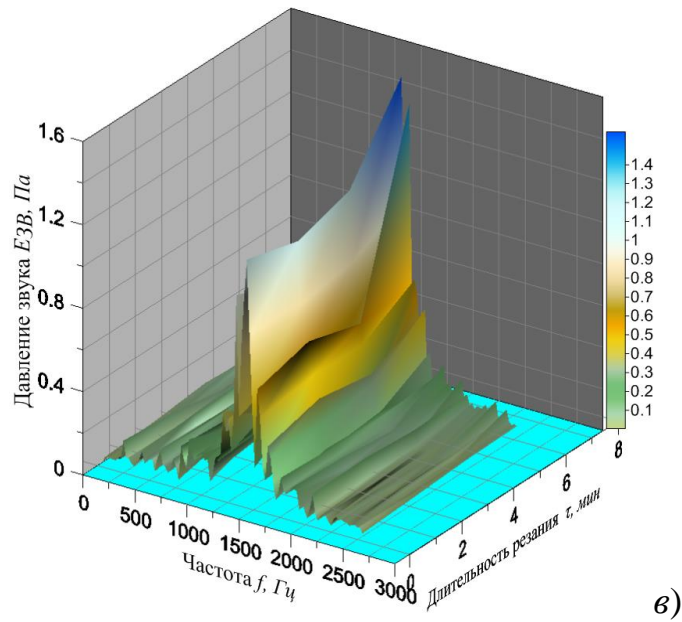
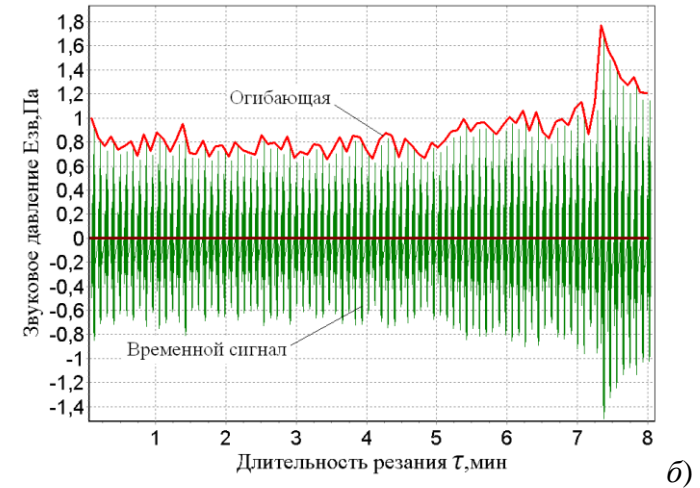
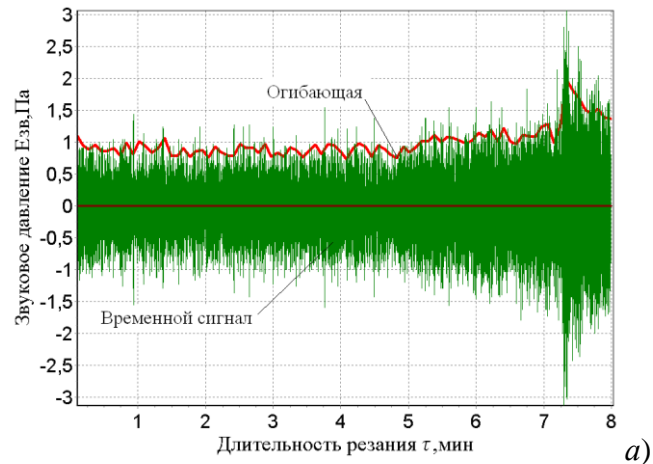
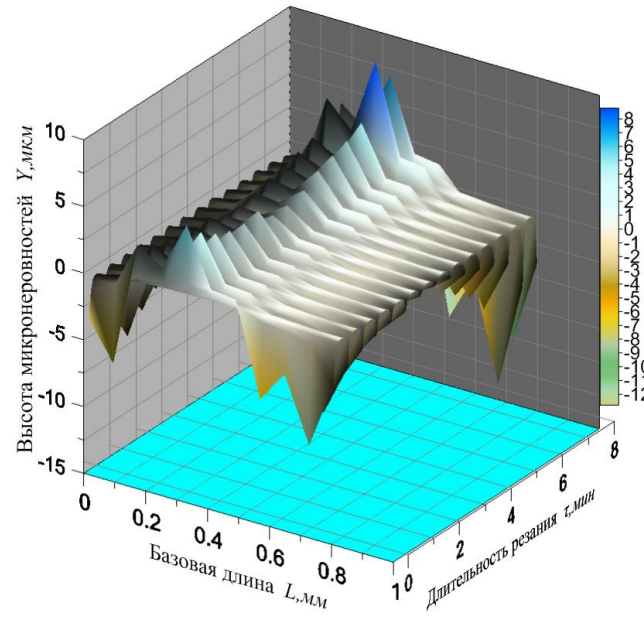
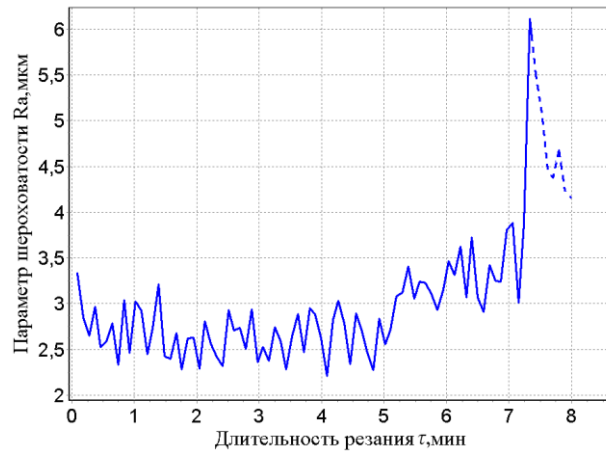


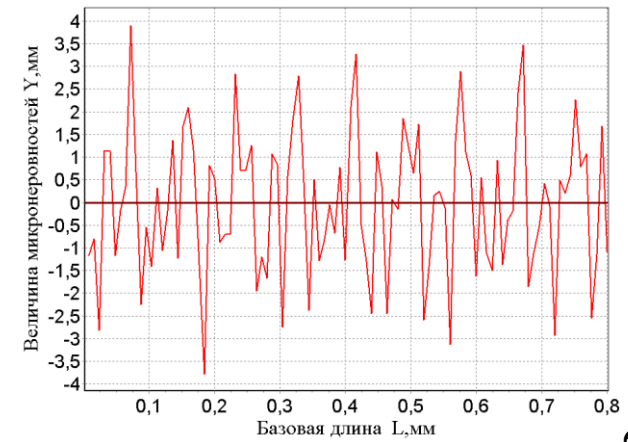
Рисунок А.2 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных: а) экспериментальная и б) расчётная временные реализации; в) экспериментальная и з) расчётная диаграммы «частота – длительность работы – амплитуда звуковой волны»



а)

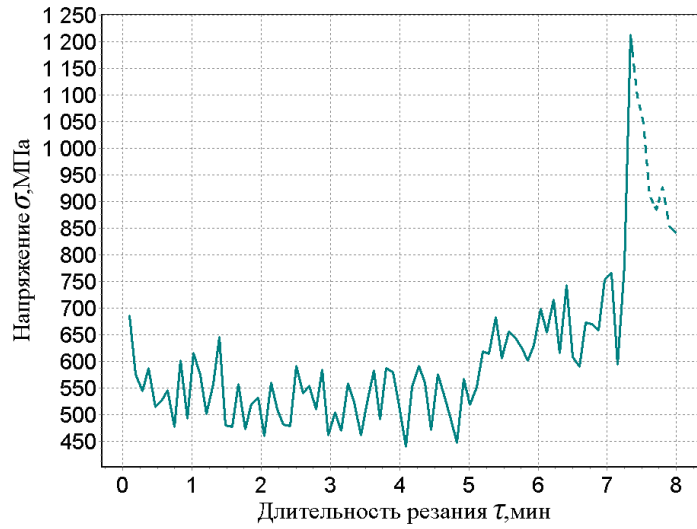


б)

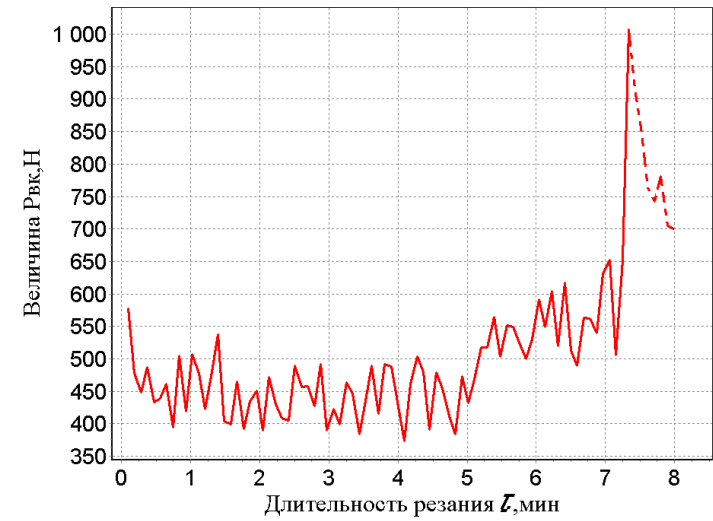


в)

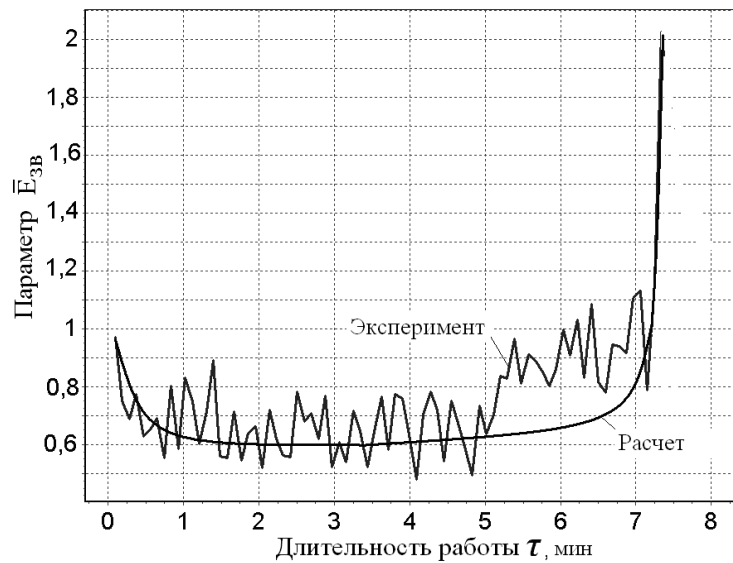
Рисунок А.3 – Параметры шероховатости, полученные расчётно: а) трёхмерная диаграмма «базовая длина - длительность работы - высота микронеровности»; б) изменение параметра шероховатости R_a в зависимости от длительности работы; в) профиль шероховатости



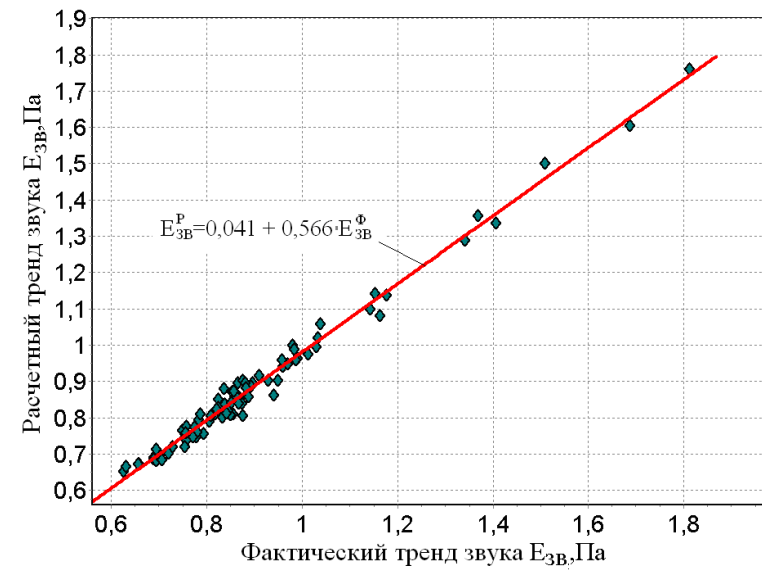
а)



б)

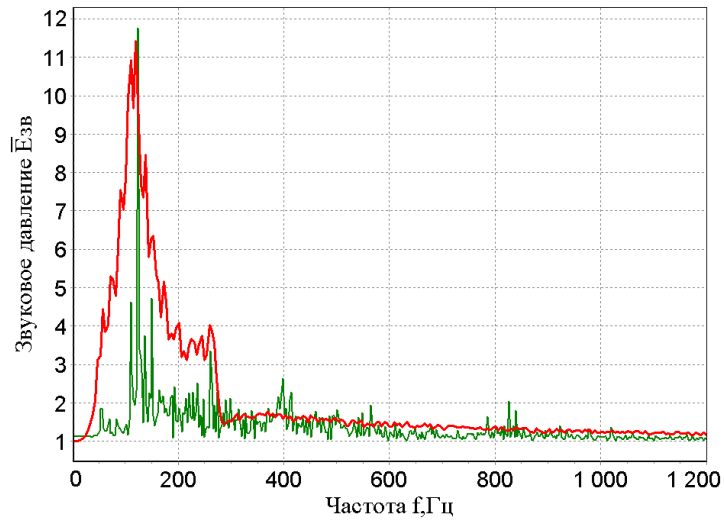


в)

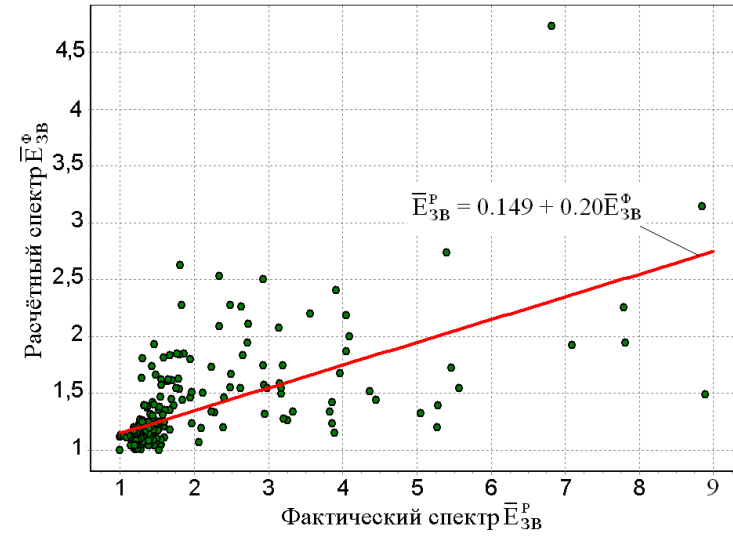


з)

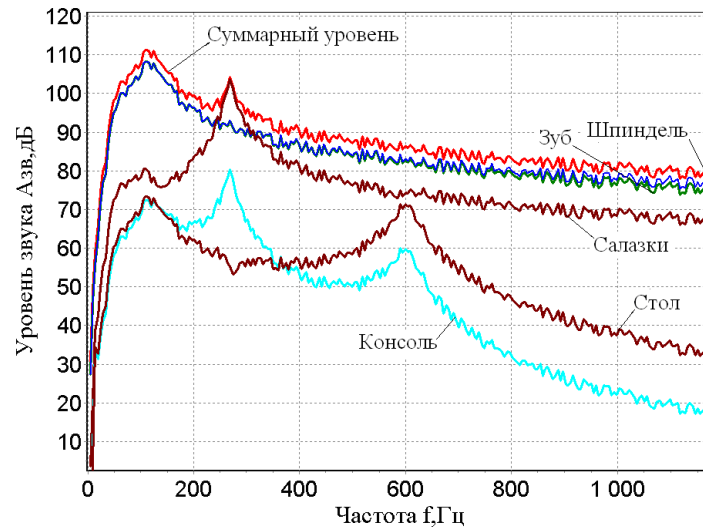
Рисунок А.4 – Данные, полученные расчётно: а) величина напряжения в лезвии вблизи от режущей кромки; б) величина контактного усилия; в) расчётный и фактический (экспериментальный) тренд звука; з) линия регрессионной зависимости между расчётным и фактическим трендами звука



а)



б)



в)

Рисунок А.5 – Результаты расчёта спектра звука: а) - сравнение расчётного и фактического спектров звуковой волны; б) – линия регрессионной зависимости между фактическим и расчётным спектрами; в) – составляющие суммарной амплитуды звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающей системы фрезерного станка

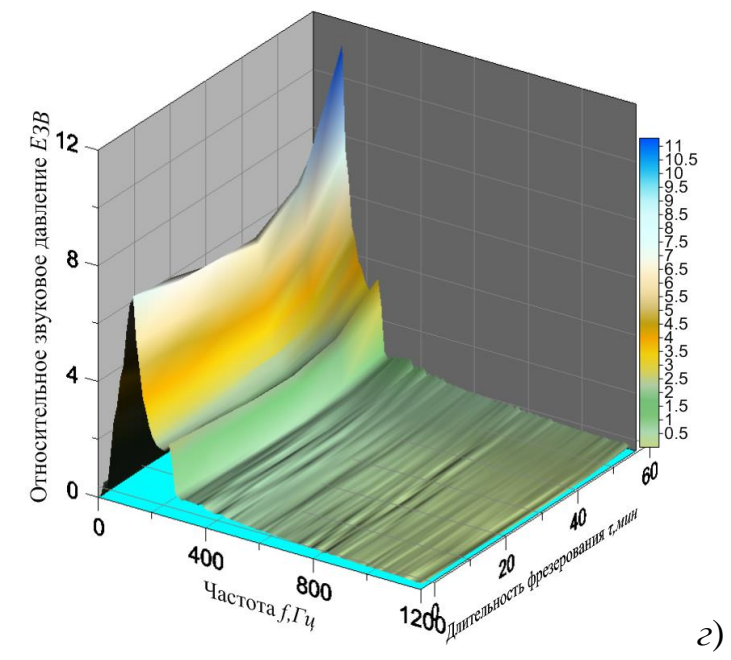
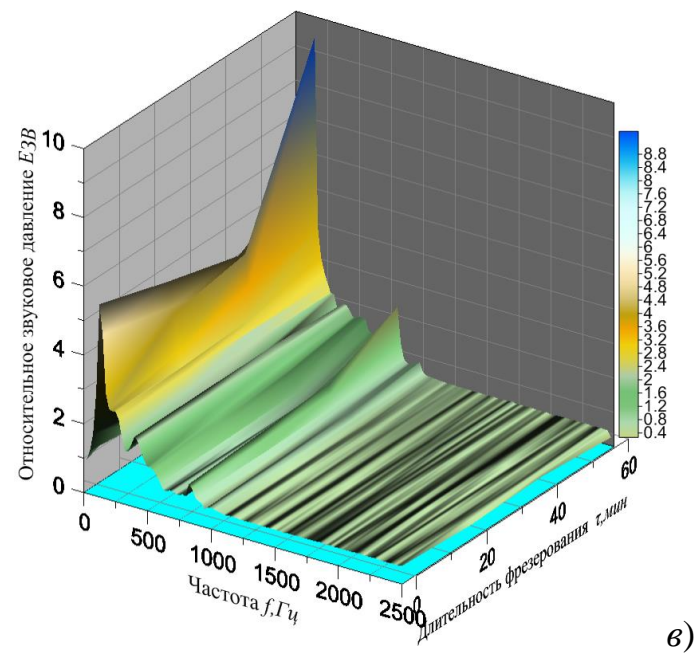
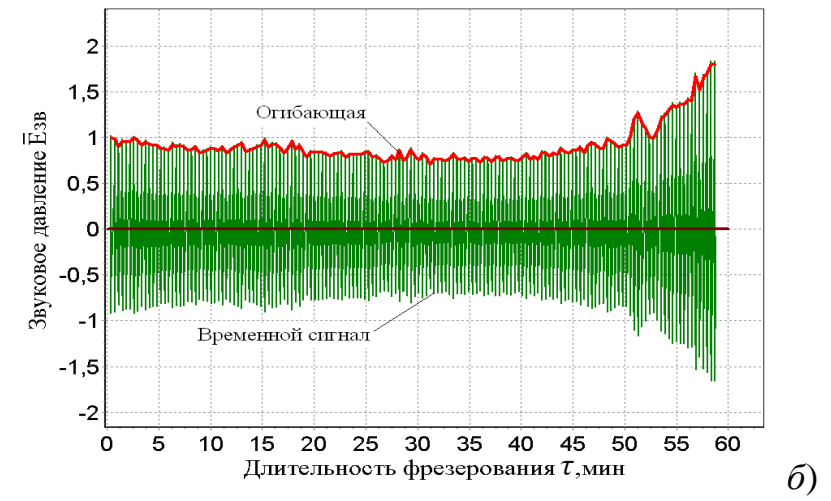
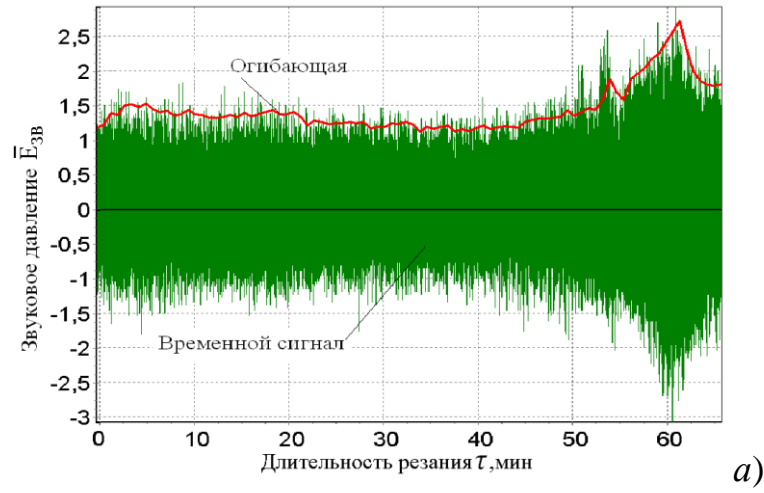
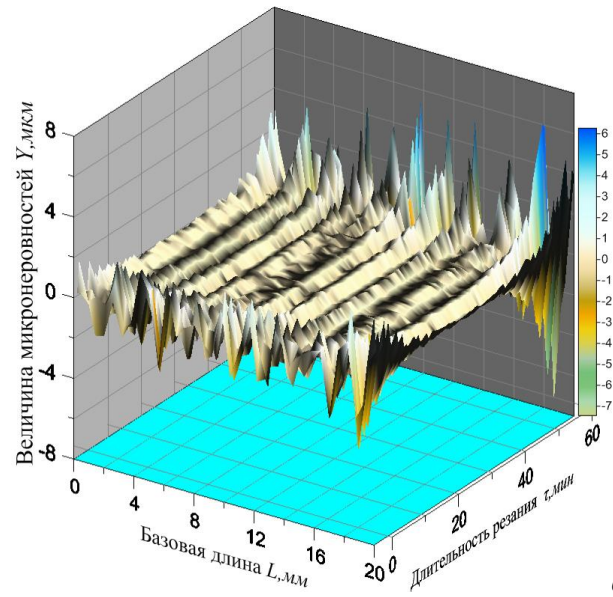
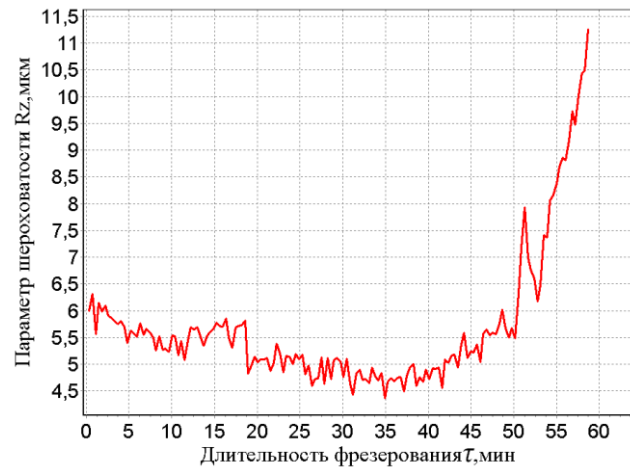


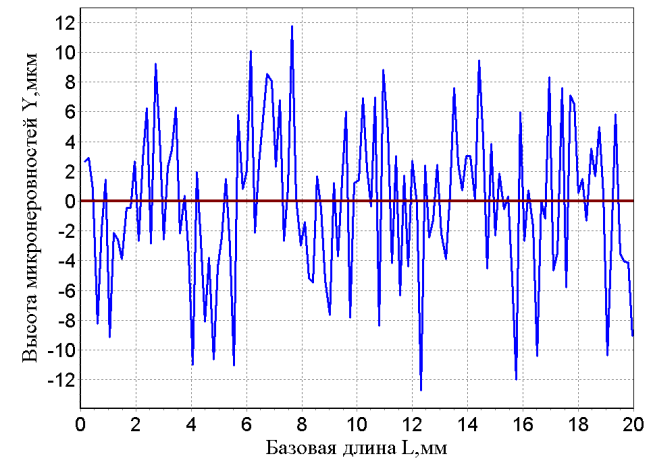
Рисунок А.6 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных: а) экспериментальная и б) расчётная временные реализации; в) экспериментальная и г) расчётная диаграммы «частота – длительность работы – амплитуда звуковой волны»



а)

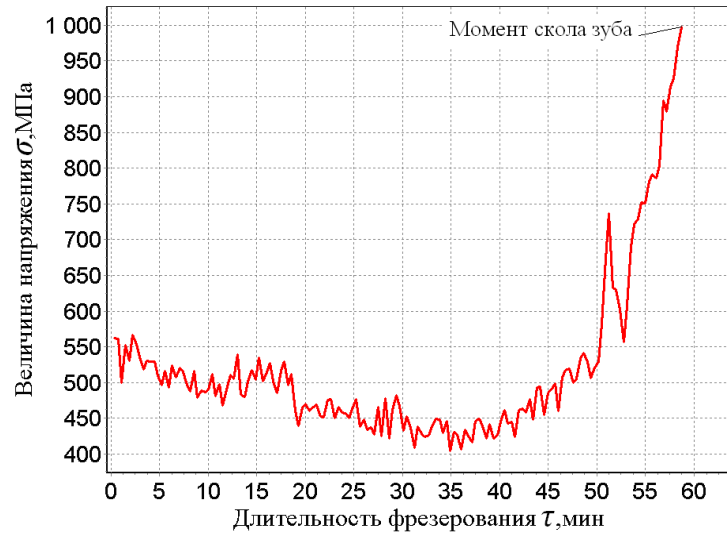


б)

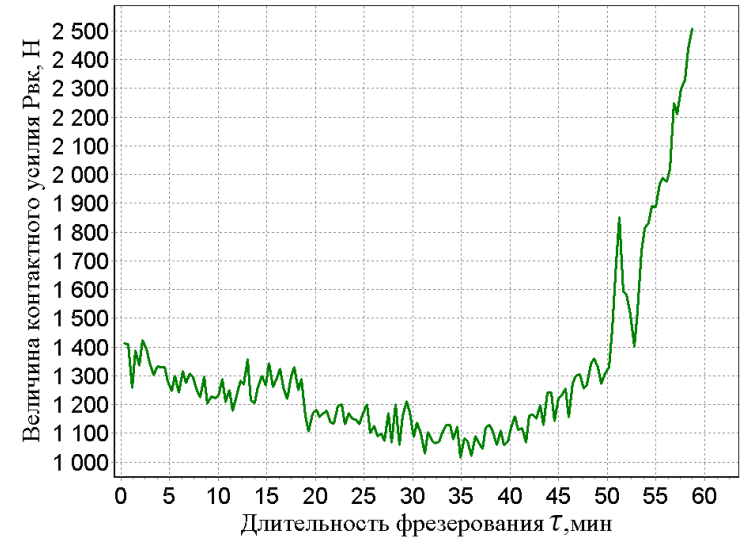


в)

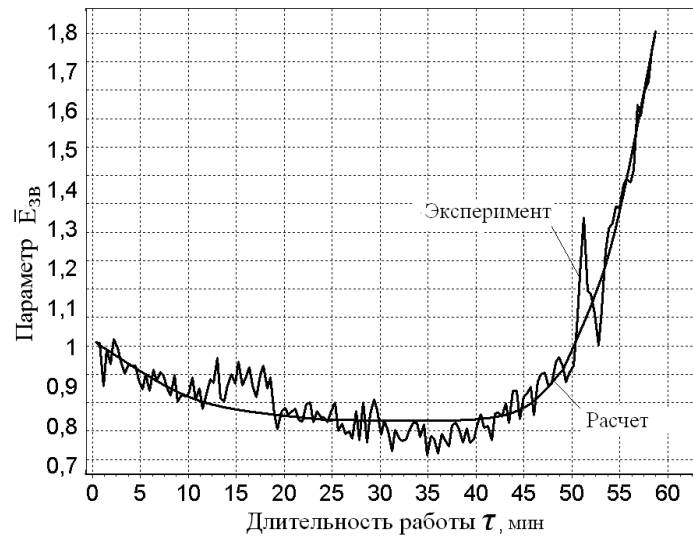
Рисунок А.7 – Параметры шероховатости, полученные расчётно: а) трёхмерная диаграмма «базовая длина - длительность работы - высота микронеровности»; б) изменение параметра шероховатости R_a в зависимости от длительности работы; в) профиль шероховатости



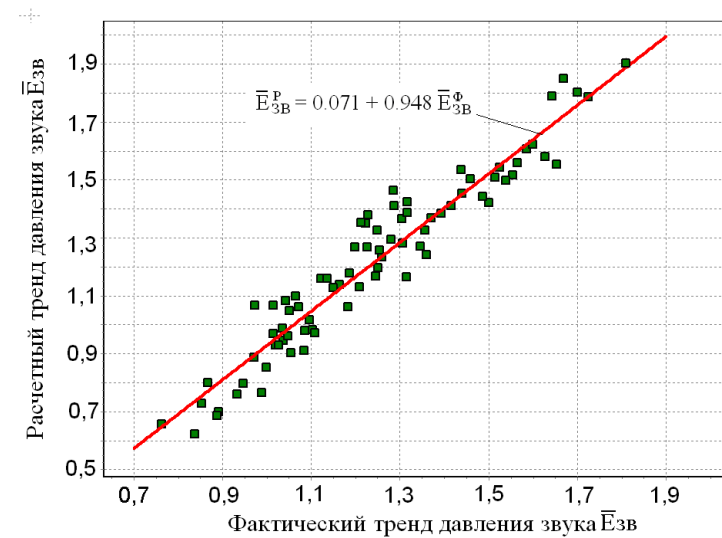
а)



б)



в)



г)

Рисунок А.8 – Данные, полученные расчётно: а) величина напряжения в зубе фрезы вблизи от режущей кромки; б) величина контактного усилия; в) расчётный и фактический (экспериментальный) тренд звука; г) линия регрессионной зависимости между расчётным и фактическим трендами

А.2. Изменение звука в зависимости от износа режущего инструмента (литературные данные)

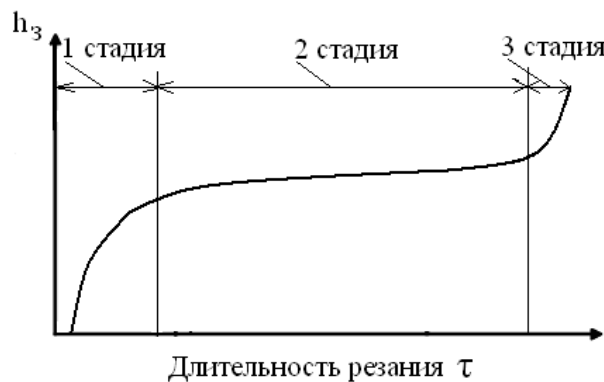


Рисунок А.9 – Стадии износа инструмента [197]

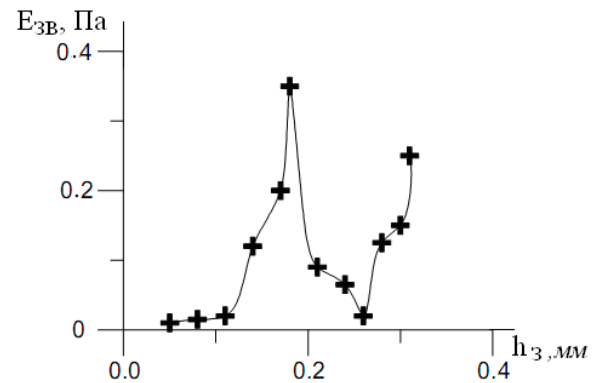


Рисунок А.10 – Изменение амплитуды звуковой волны в зависимости от износа инструмента [197]

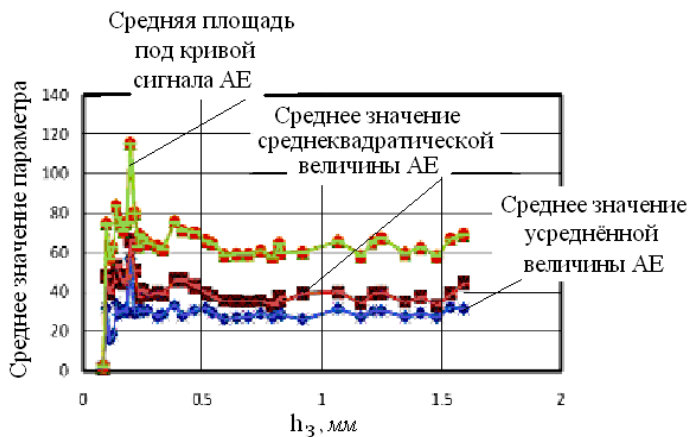


Рисунок А.11 – Изменение параметров акустической эмиссии (АЭ) в зависимости от износа инструмента [198]

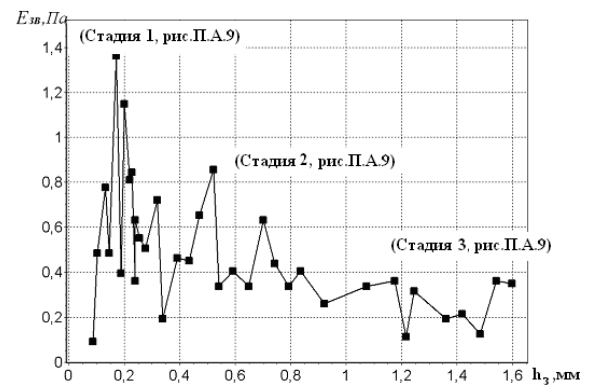


Рисунок А.12 – Изменение амплитуды звуковой волны в зависимости от износа инструмента [198]

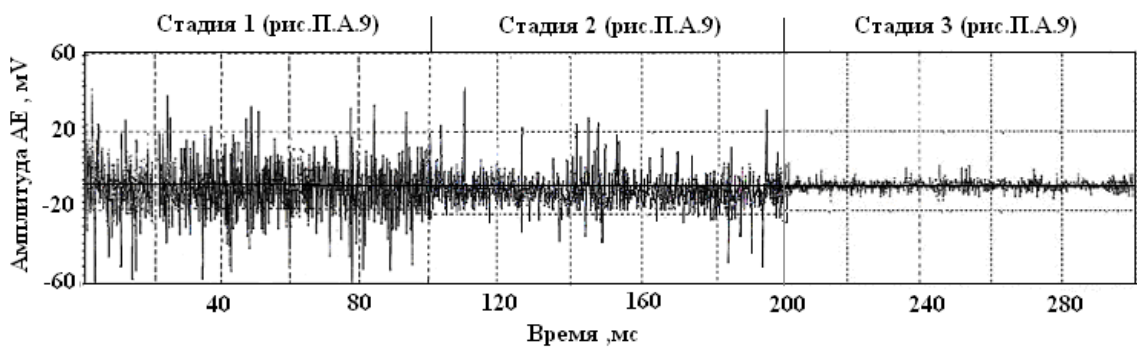


Рисунок А.13 – Изменение амплитуды акустической эмиссии (АЭ) в зависимости от стадии износа инструмента [198]

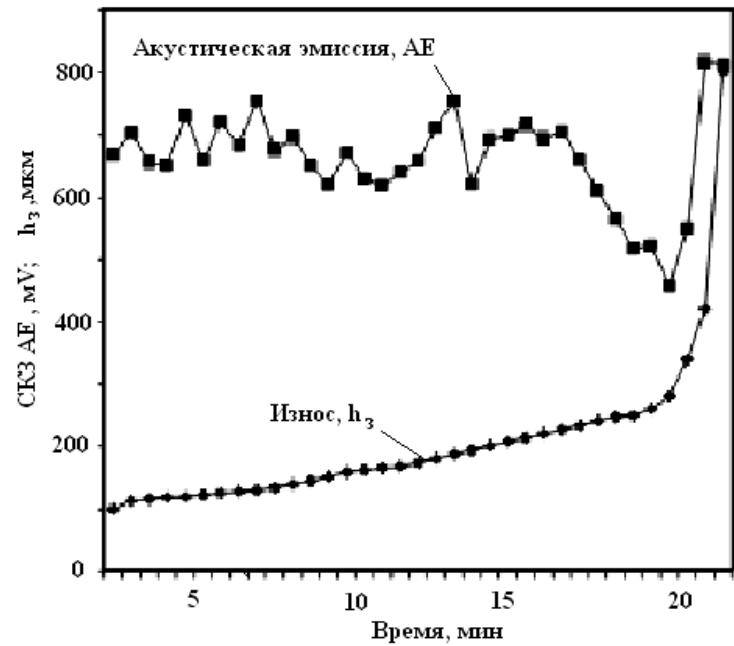


Рисунок А.14 – Изменение среднеквадратической величины акустической эмиссии и износа инструмента ($V=300$ м/мин, $t=0,5$ мм, $S=0.2$ мм/об [199])

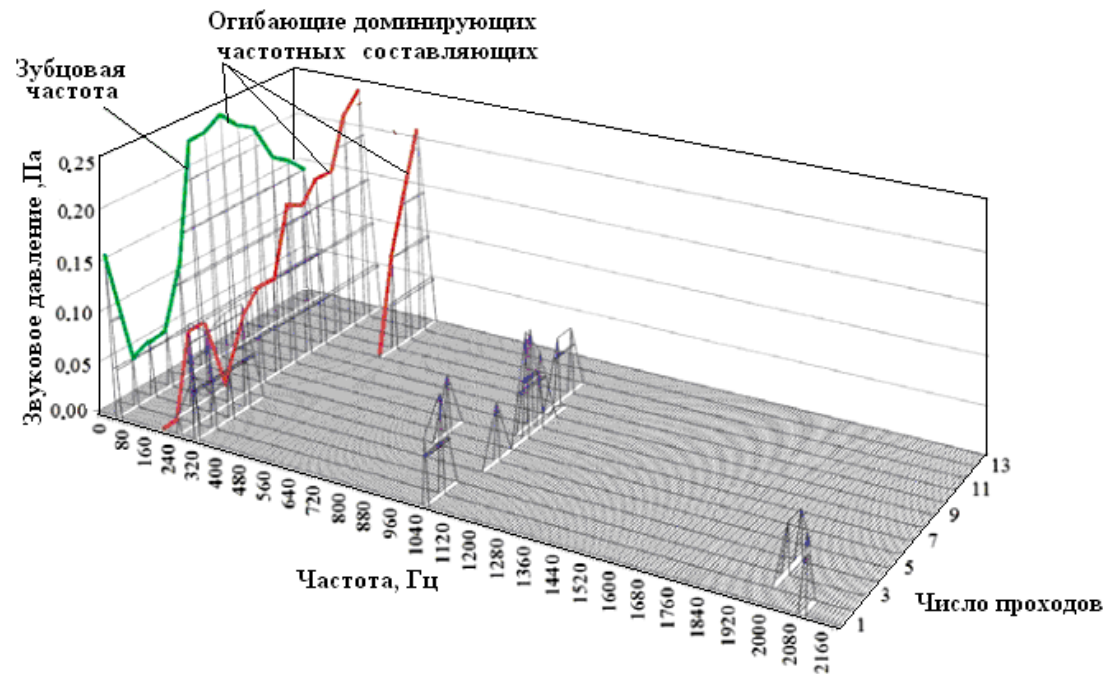


Рисунок А.15 – Трехмерная диаграмма изменения спектра звуковой волны в зависимости от числа проходов инструмента [200]

Приложение Б

Иллюстрации к Разделу 4

Б.1 Результаты экспериментов по выявлению корреляционной зависимости между параметрами звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающей системы, и параметрами шероховатости



Рисунок Б.1 – Регистрация высотного параметра шероховатости посредством профилометра типа 283 и ноутбука

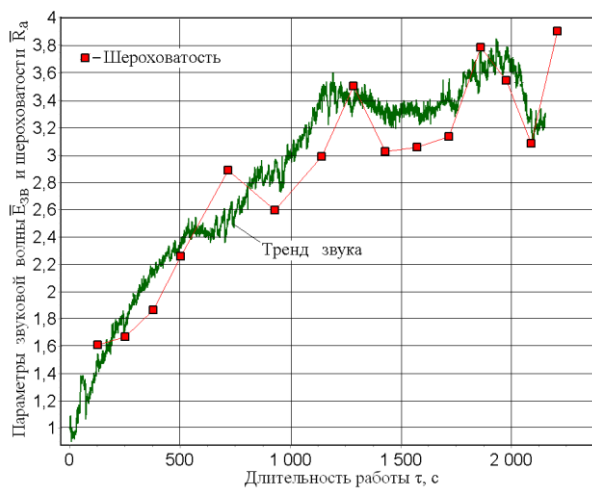


Рисунок Б.2 – Тренд звука и изменение с течением времени шероховатости

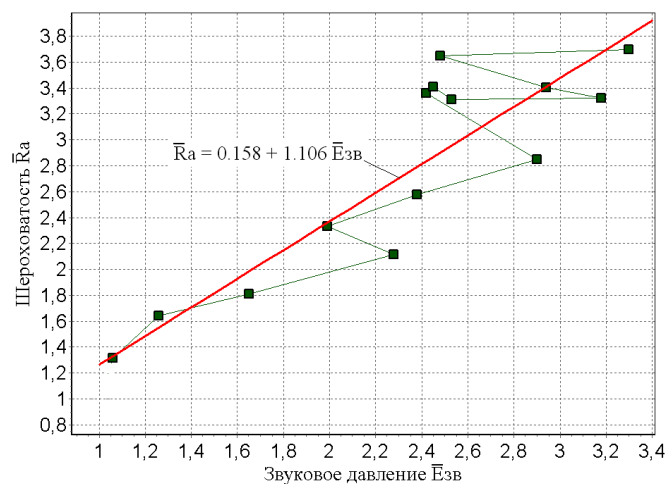


Рисунок Б.3 – Регрессионная зависимость между параметром шероховатости и относительной величиной амплитуды звуковой волны \bar{E}_{zv}

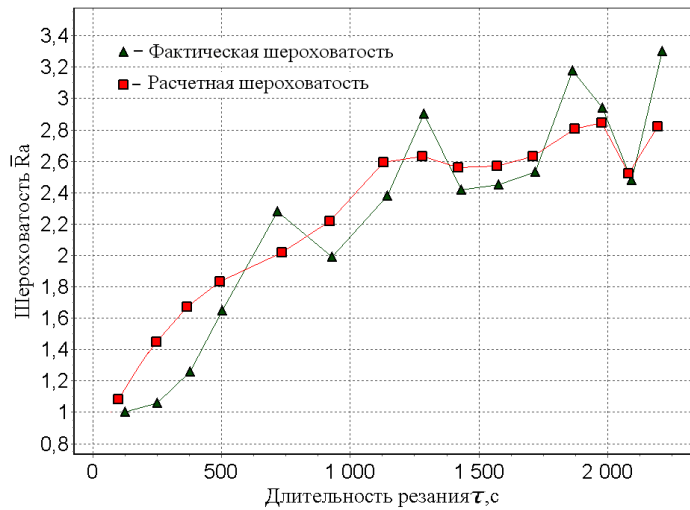


Рисунок Б.4 – Сравнение фактической и расчетной величины параметра шероховатости R_a ($\bar{R}_a = 0.158 + 1.106 \bar{E}_{ЗВ}$)

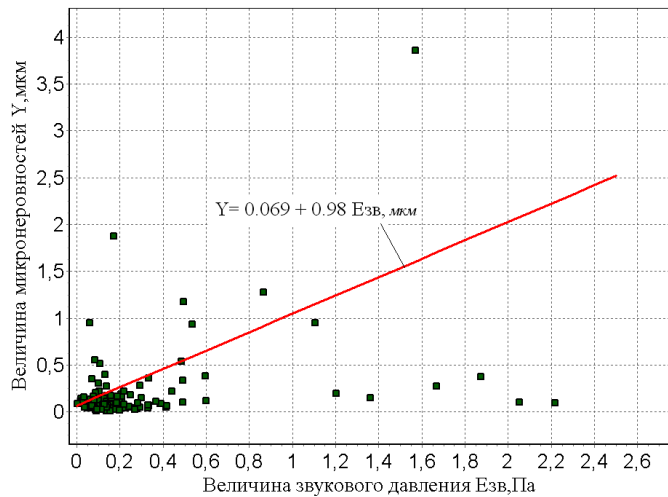


Рисунок Б.6 – Регрессионная зависимость между спектрами шероховатости и звуковой волны

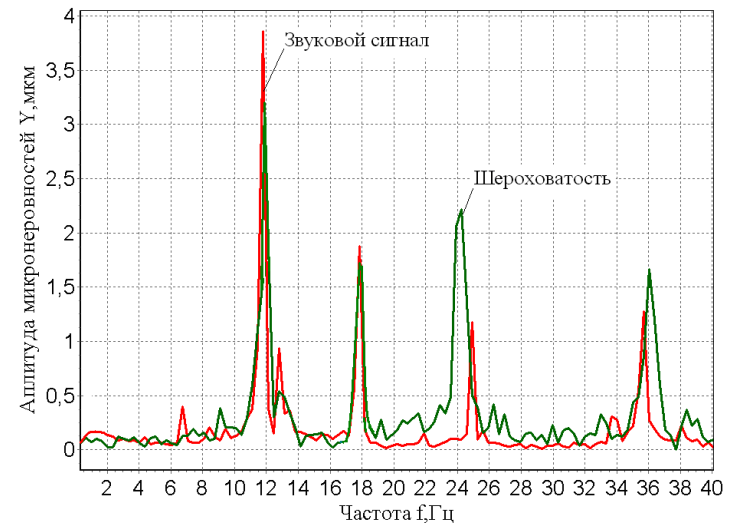


Рисунок Б.5 – Спектры шероховатости и звукового сигнала

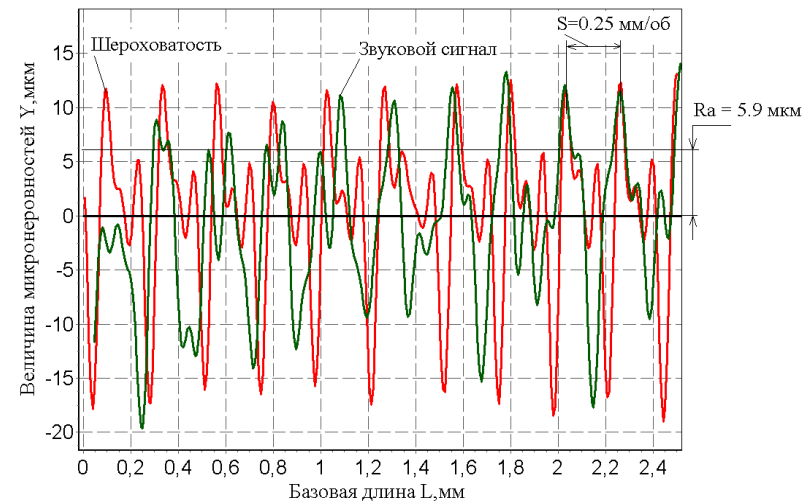
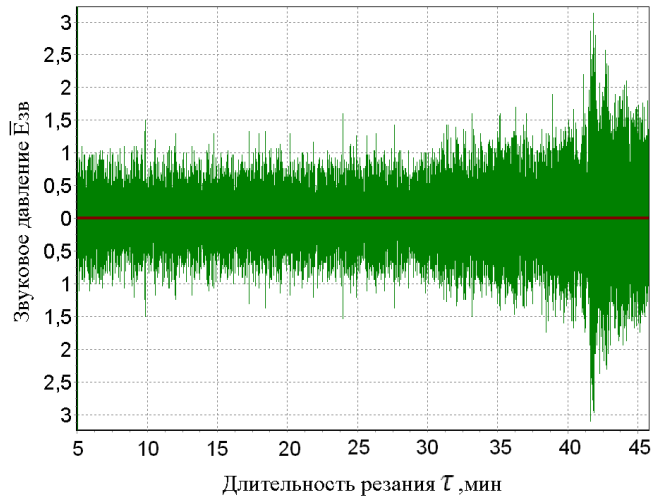
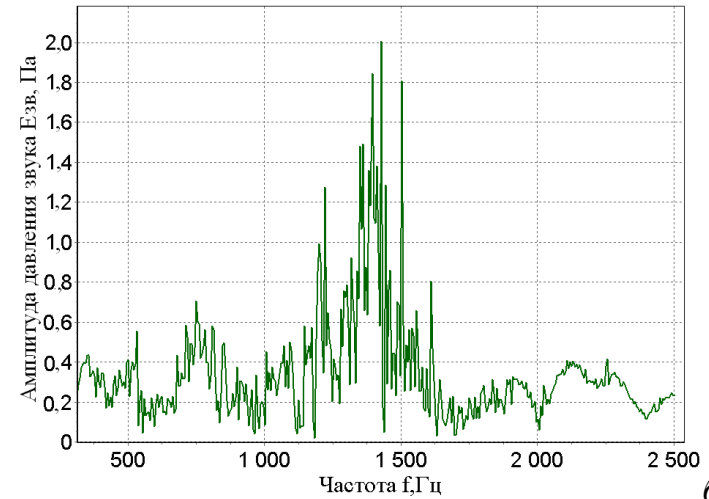


Рисунок Б.7 – Профиль шероховатости и временная реализация звуковой волны

Б.2 Методика адаптивного управления работой обрабатывающей системы



а)



б)

Рисунок Б.8 – Характеристики звуковой волны: а) временная реализация звуковой волны; б) спектр звуковой волны



Рисунок Б.9 – Тренд звука на исходном и скорректированном режиме работы обрабатывающей системы

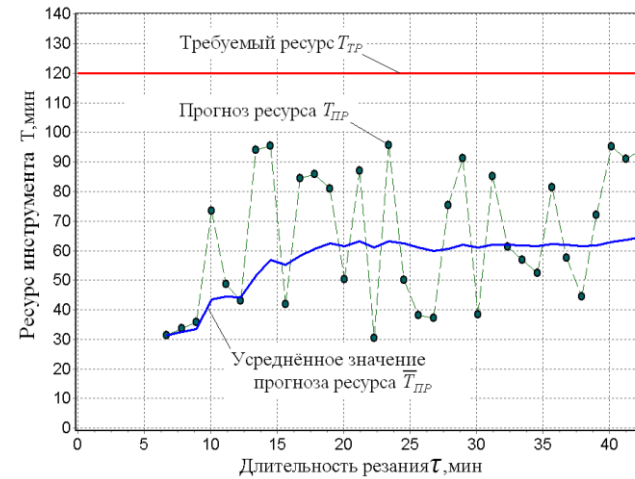
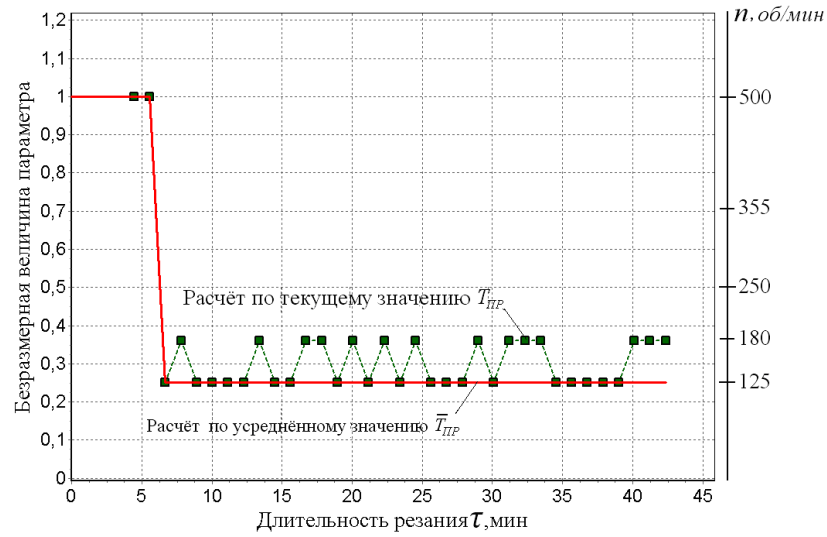
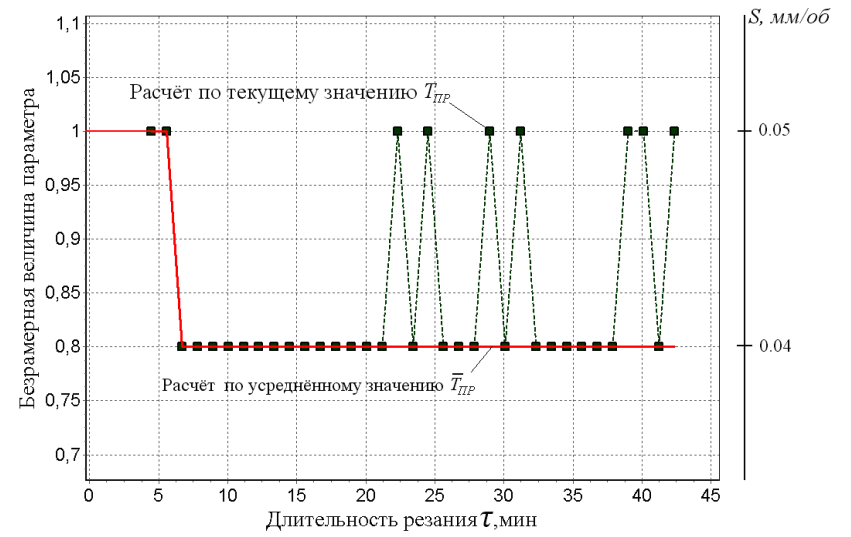


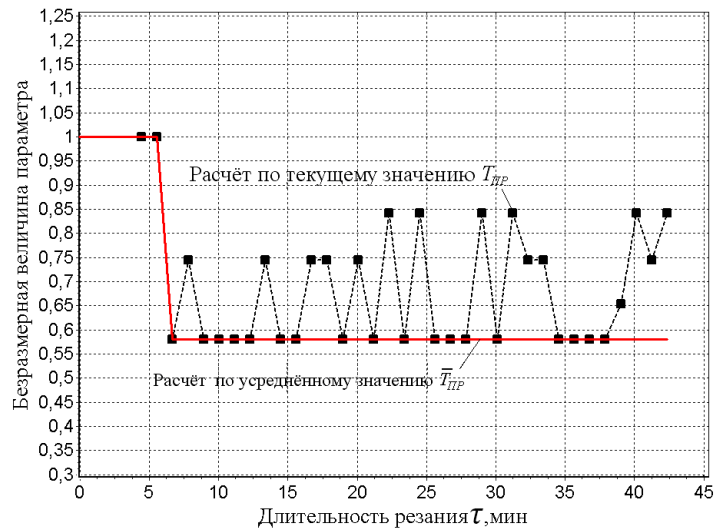
Рисунок Б.10 – Сравнение требуемого и фактического ресурса обрабатывающей системы



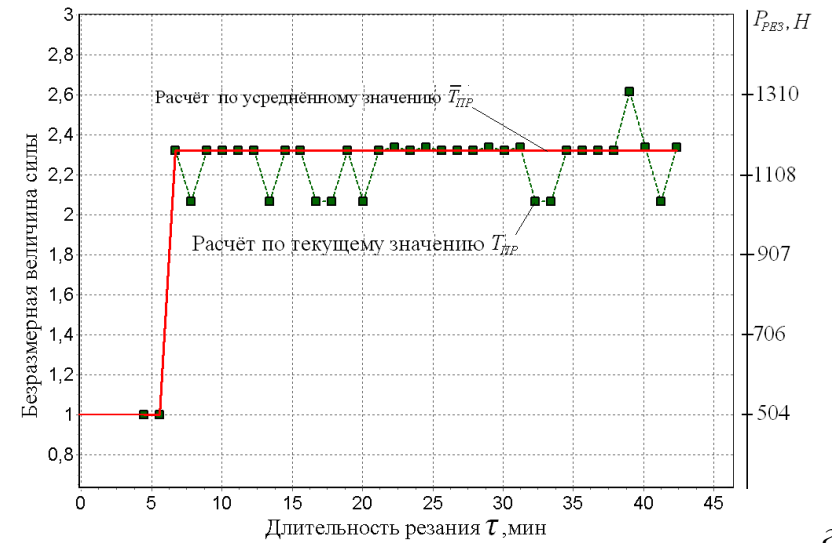
а)



б)



в)



г)

Рисунок Б.11 – Характеристика режима работы при двух способах оценки ресурса обрабатывающей системы
 а) скорость резания V (обороты шпинделя n); б) подача S ; в) скорость износа $\bar{\gamma}$; г) сила резания

Приложение В

Справочный материал к разделу 4

Таблица В.1 – Дефекты станка, выявляемые методом вибродиагностики

№ п/п	Определяемые параметры
1	Дефекты подшипниковых опор
2	Биение валов, шпинделей
3	Неравномерный радиальный натяг в подшипнике
4	Раковины, трещины на наружном кольце подшипника
5	Раковины, трещины на внутреннем кольце подшипника
6	Раковины, сколы на телах качения подшипника
7	Дефект ведущей шестерни
8	Дефект ведомой шестерни
9	Дефект зацепления ведущей шестерни
10	Дефект зацепления ведомой шестерни
11	Биение винта шарико-винтовой передачи
12	Перекос винта шарико-винтовой передачи
13	Износ винта и шариков шарико-винтовой передачи
14	Раковины, сколы на телах качения шарико-винтовой передачи
15	Раковины, трещины винта и гаек шарико-винтовой передачи
16	Износ гаек шарико-винтовой передачи
17	Дисбаланс валов, шпинделей, шкивов

Таблица В.2 – Дефекты подшипниковых опор и информационные частоты, на которых они выявляются

№	Наименование дефекта подшипника	Информационная частота дефекта	Наличие в сигнале гармоник
Проблемы монтажа подшипников качения			
1	Перекося наружного кольца при посадке	$2 \times f_H$	$k=1,2$
2	Неоднородный радиальный натяг	$k \times f_{об}$	$k=1,2$
3	Проскальзывание в посадочном месте	$k \times f_{об}$	$k=1,2,3$
4	Ослабление крепления подшипника	$k \times f_{об}$	$k=0.5,1,2,3$
5	Задевания в подшипнике и уплотнениях	$k \times f_{об}$	$k=0.5,1,1.5, 2,2.5,3$
Проблемы износа подшипников качения			
6	Увеличенные зазоры в подшипнике	$k \times f_{об}$	$k=1,2,3,4,5,6$
7	Износ поверхности наружного кольца	f_H	–
8	Износ поверхности тел качения	$f_C, f_{об} - f_C$	$k=1,2,3$
9	Износ поверхности внутреннего кольца	f_B	–
10	Дефект группы поверхностей трения	$f_H + f_B, f_H + f_{об}$	$k=1,2,..$
Дефекты подшипников качения			
11	Раковины (сколы) на наружном кольце	$k \times f_H$	$k=1,2,3$
12	Раковины (сколы) на внутреннем кольце	$k \times f_B$	$k=1,2,3$
13	Раковины (сколы) на телах качения	$k \times f_{mk}$	$k=1,2,3$
14	Обкатывание наружного кольца	$f_{об}$	

Таблица В.3 – Формулы для расчёта информационных частот зубчатого зацепления

Информационная частота	Вид дефекта и его причина		
	изготовление	сборка	износ
$f_{об}$	Дисбаланс	–	–
$kf_{об1}$ и $kf_{об2}$ $k= 1,2$ реже 3 и 4 $mf_z \pm nf_{об}$ $k, n, m = 1, 2, \dots$	Переменная погрешность шага зацепления	Нарушение соосности (перекос валов)	–
$kf_{об} k = 1, 2, \dots, 20$ и выше	–	Повышенный боковой зазор между колесами	–
f_z	Постоянная погрешность шага зацепления		
$kf_z, kf_{об}$ рост шумовой компоненты $mf_m \pm nf_{об}; n = 0, 1, 2, \dots$	–	–	Абразивный износ
$kf_{об}, mf_z \pm nf_{об}$ $mf_m \pm nf_{об}$ (флуктуация амплитуд), $n = 0, 1, 2, \dots$	–	–	Выкрашивание зубьев
$kf_{об}$ $mf_z \pm nf_{об}, mf_m \pm nf_{об}$ (флуктуация амплитуд), $n = 0, 1, 2, \dots$ рост шумовой компоненты	–	–	Трещины и/или излом зубьев

Таблица В.4 – Формулы для расчёта информационных частот подшипника

Кинематические характеристики и дефекты подшипника	Формула
Перекачивание тел качения по наружной дорожке	$f_H = z/2 f_{об} (1 - d_{мк} / D_{ср} \cos \beta)$ ($f_H = f_{об} (z/2 - 1.2)$)
Перекачивания тел качения по внутренней дорожке	$f_B = z/2 f_{об} (1 + d_{мк} / D_{ср} \cos \beta)$ ($f_B = f_{об} (z/2 + 1.2)$)
Дефект сепаратора	$f_C = 1/2 f_{об} (1 - d_{мк} / D_{ср} \cos \beta)$ ($f_C = f_{об} (1/2 - 1.2/z)$)
Перекачивания тел качения	$f_{мк} = 1/2 f_{об} d_{мк} / D_{ср} [1 - (d_{мк} / D_{ср})^2 \cos 2\beta]$ ($f_{мк} = f_{об} (z/2 - 1.2/z)$)
Дефекты формы тел качения	$f_{мк}^{\phi} = 2 f_{об} \left(\frac{D_{ср} - d_{мк}}{d_{мк}} \right) \left(\frac{D_{ср} + d_{мк}}{d_{мк}} \right)$
Дефекты внутренней дорожки	$f_B^{Деф} = 2 f_{об} \left(\frac{D_{ср} + d_{мк}}{d_{мк}} \right)$
Дефекты наружной дорожки	$f_H^{Деф} = 2 f_{об} \left(\frac{D_{ср} - d_{мк}}{d_{мк}} \right)$
Резонанс тел качения	$f_{мк}^{рез} = \frac{0.848 E}{2 d_{мк} \rho}$

Примечание: $f_{об}$ – оборотная частота вращения ротора, Гц; $d_{мк}$ – диаметр тел вращения, м; $D_{ср}$ – средний диаметр сепаратора, м; z – число тел качения, шт; β – угол контакта тела качения с обоймой; E – модуль Юнга, Па; ρ – удельная плотность материала, $\frac{кг}{м^3}$.

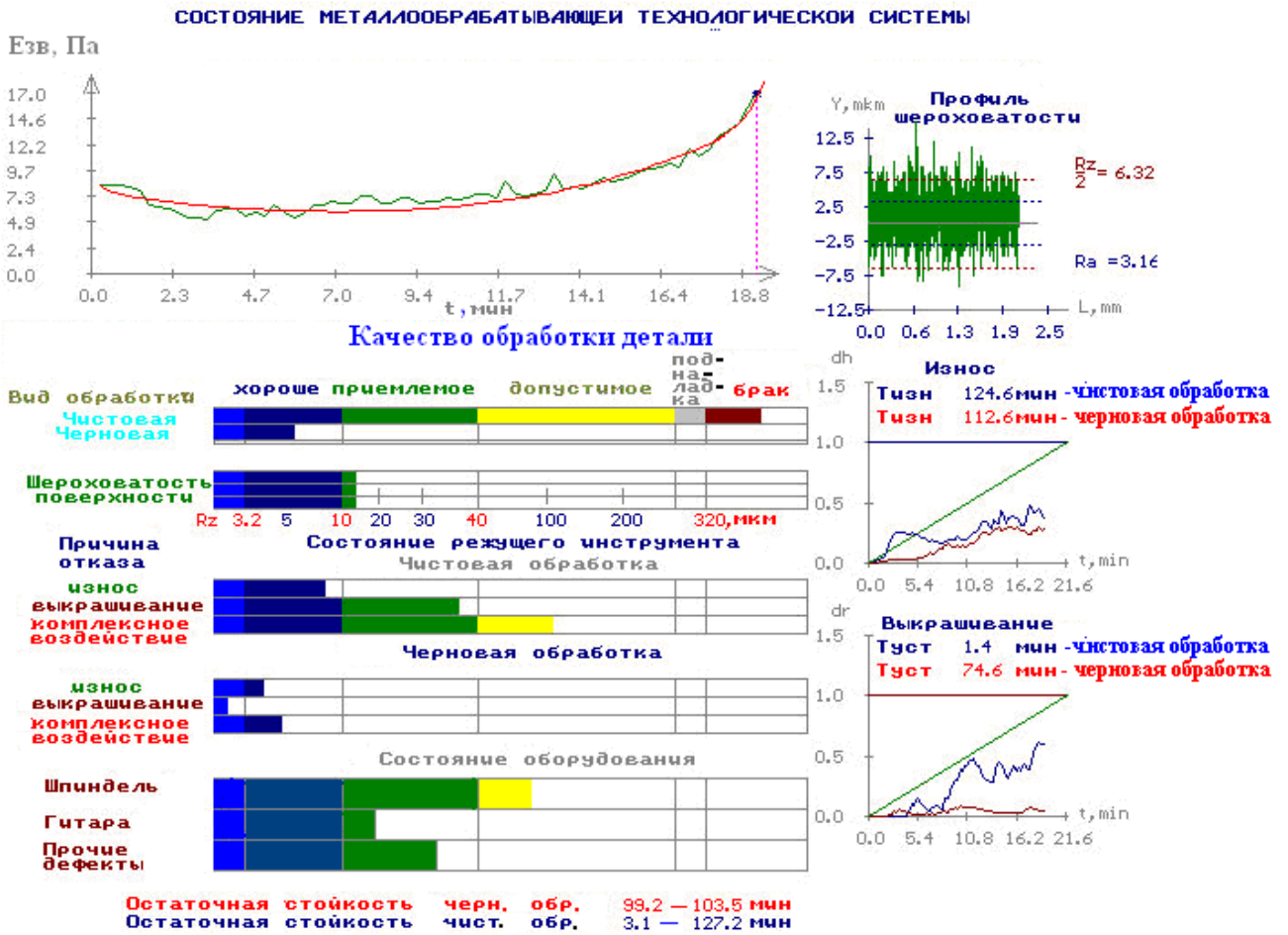


Рисунок В.1 – Визуализации результатов контроля состояния металлообрабатывающей обрабатывающей системы

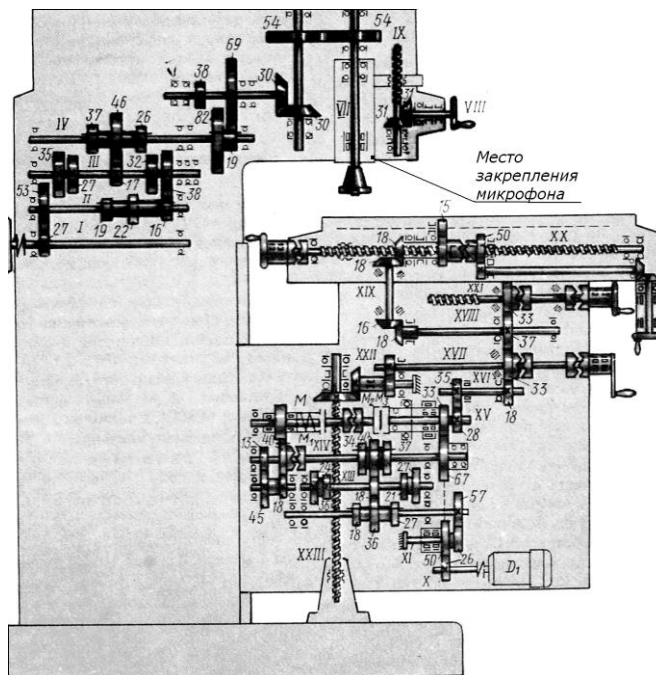


Рисунок В.2 – Кинематическая схема фрезерного станка 6P13 с указанием места закрепления микрофона

В.1 Кинематическая схема станка 16К20Т1

От электродвигателя главного привода Д1 (рис.В.3), помещенного на стенке станины, вращение передается клиновыми ремнями на приводной шкив автоматической коробки скоростей, которая обеспечивает получение 12 чисел оборотов выходного вала. С выходного вала коробки скоростей вращение передается упругой муфтой на входной вал шпиндельной бабки станка. Шпиндель с учетом своего трёхступенчатого редуктора получает 36 ступеней скоростей вращения.

Характеристика зубчатых колёс приведена табл. В.5.

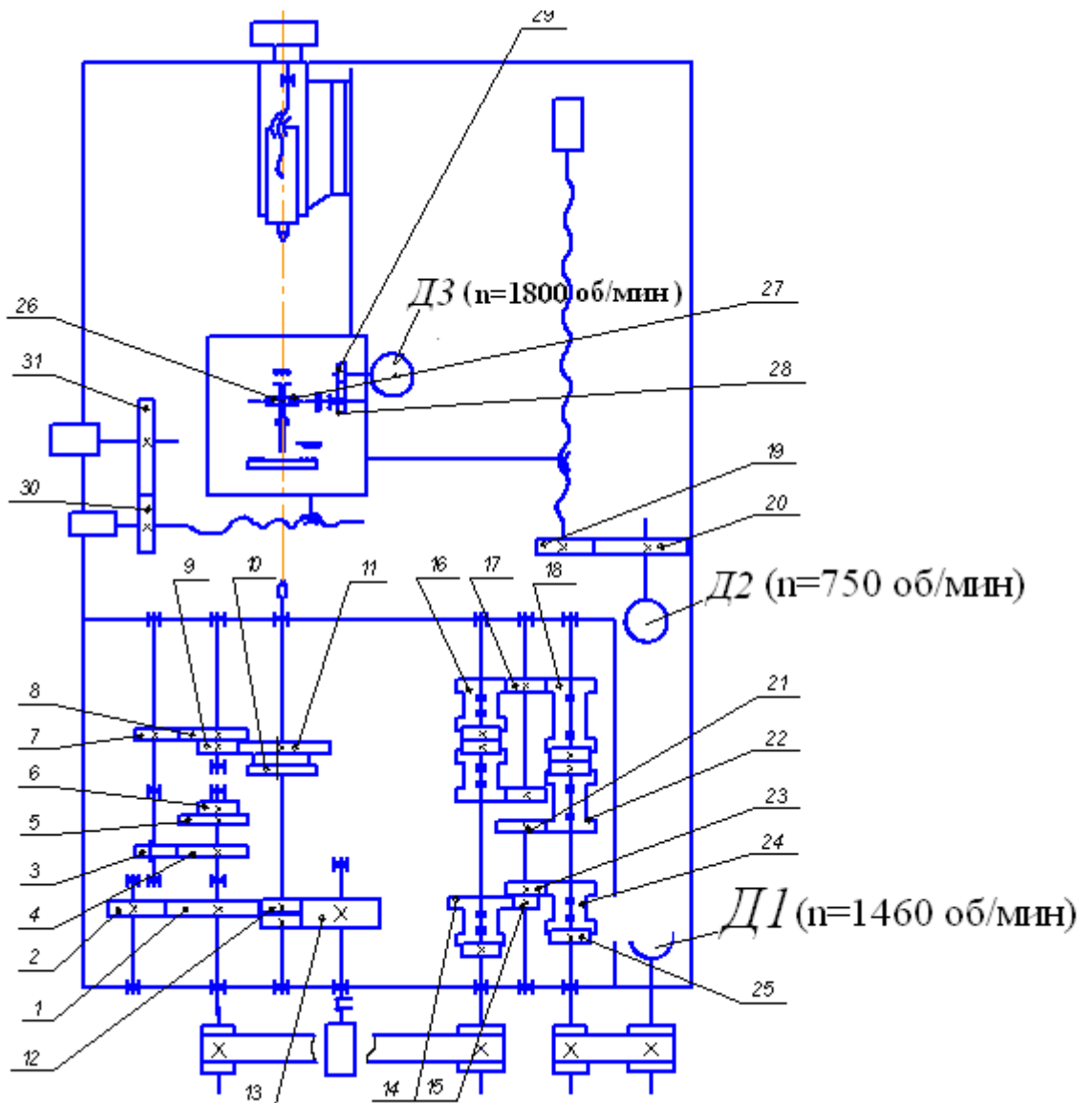


Рисунок В.3 – Кинематическая схема станка

Таблица В.5 – Характеристика зубчатых колёс редукторов станка 16К20Т1

Редуктор	Позиция	Число зубьев зубчатых колес, мм	Модуль, мм	Ширина обода зубчатого колеса, мм
Автоматическая коробка скоростей	1	47	3	27
	2	47	3	27
	3	45	3	25
	4	45	3	25
	5	60	3	25
	6	30	3	54
	7	18	3	25
	8	72	3	25
	9	30	3	25
	10	48	3	27
	11	60	3	25
	12	60	3	25
	13	60	4	25
	14	56	3	25
	15	30	4	25
	16	24	4	26
	17	48	4	46
	18	24	4	40
	19	50	4	22
	20	50	3.5	52/32
Бабка шпиндельная	21	42	3,5	32
	22	30	4	50
	23	36	4	27
	24	14	4	29
	25	30	4	49
	26	48	4	22
	27	48	4	22
	28	48	4	49
	29	90	2	36
	30	40	2	15
	31	40	2	15

Приложение Г

Справочно – иллюстративный материал к разделу 5

Г.1 Результаты обработки зарегистрированного сигнала

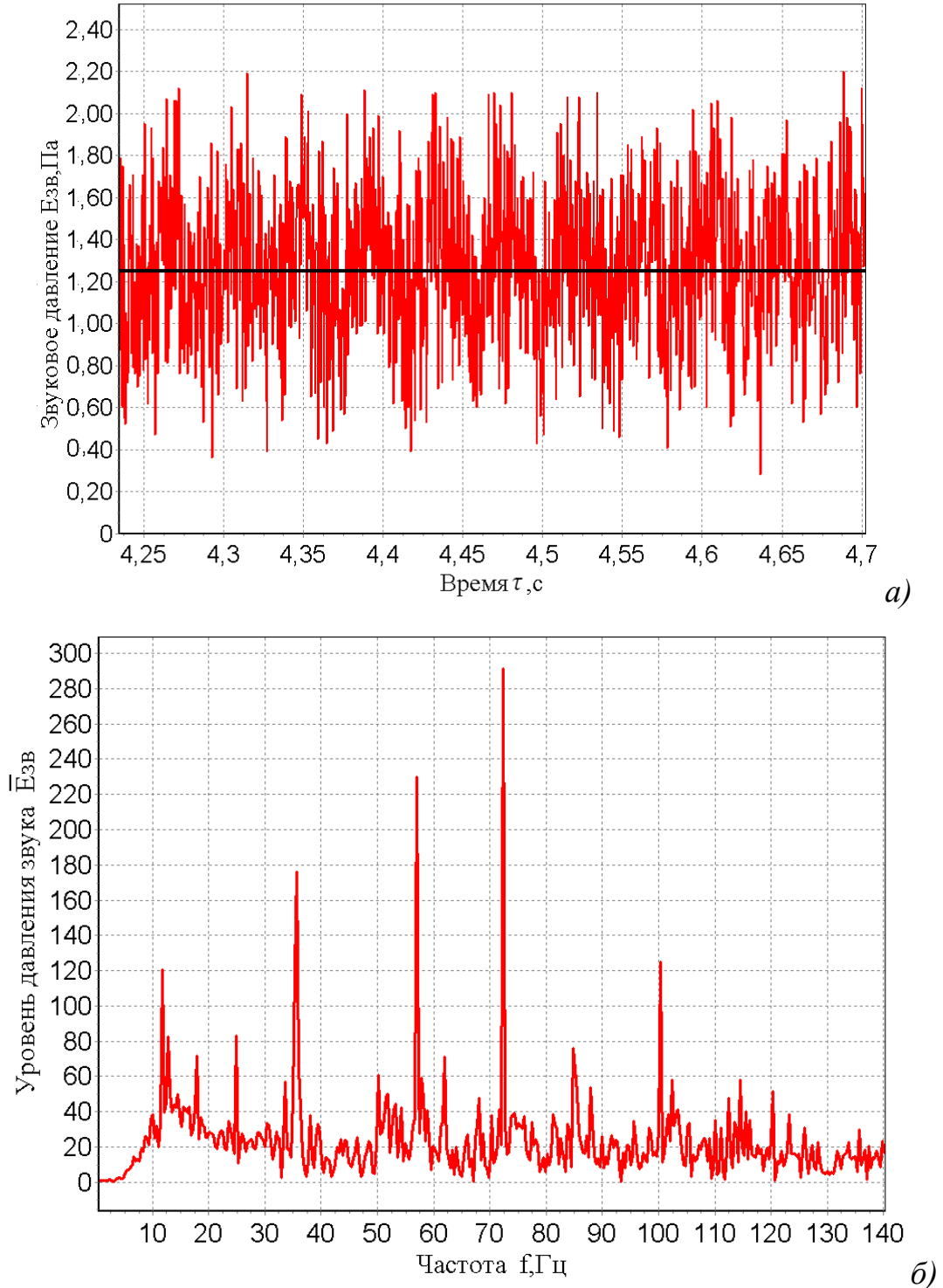
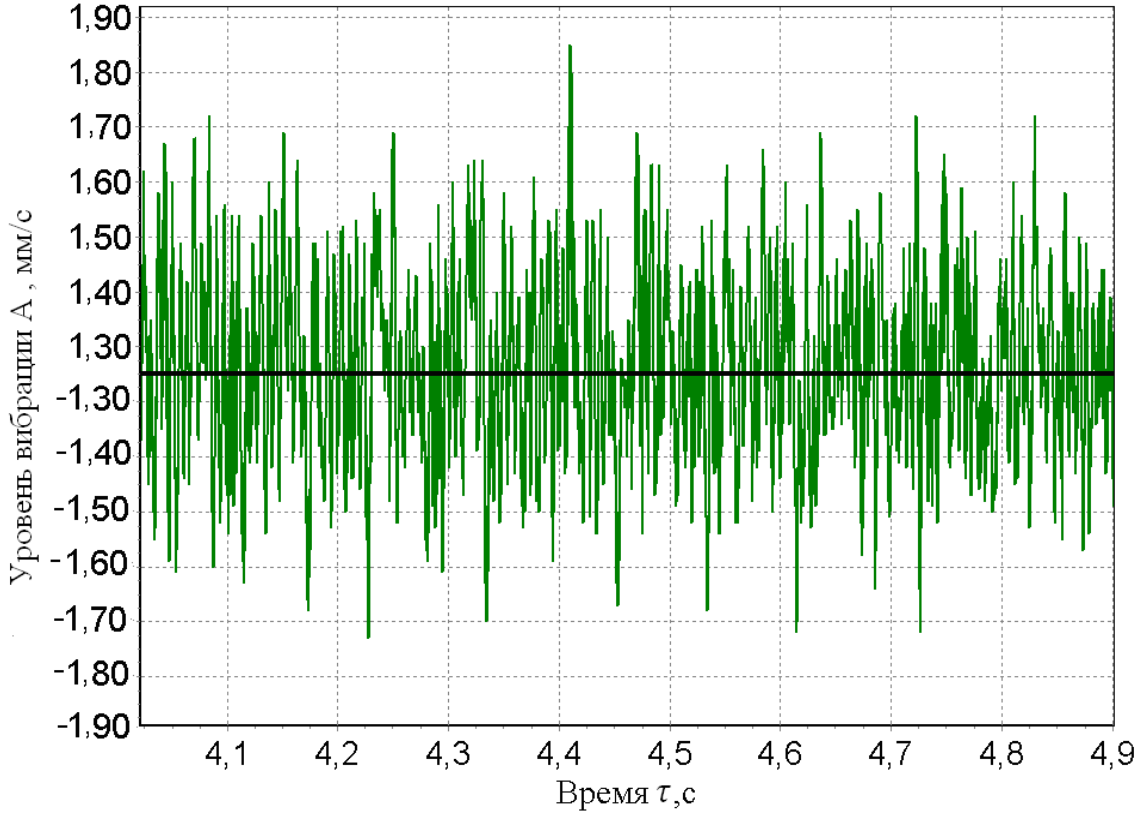
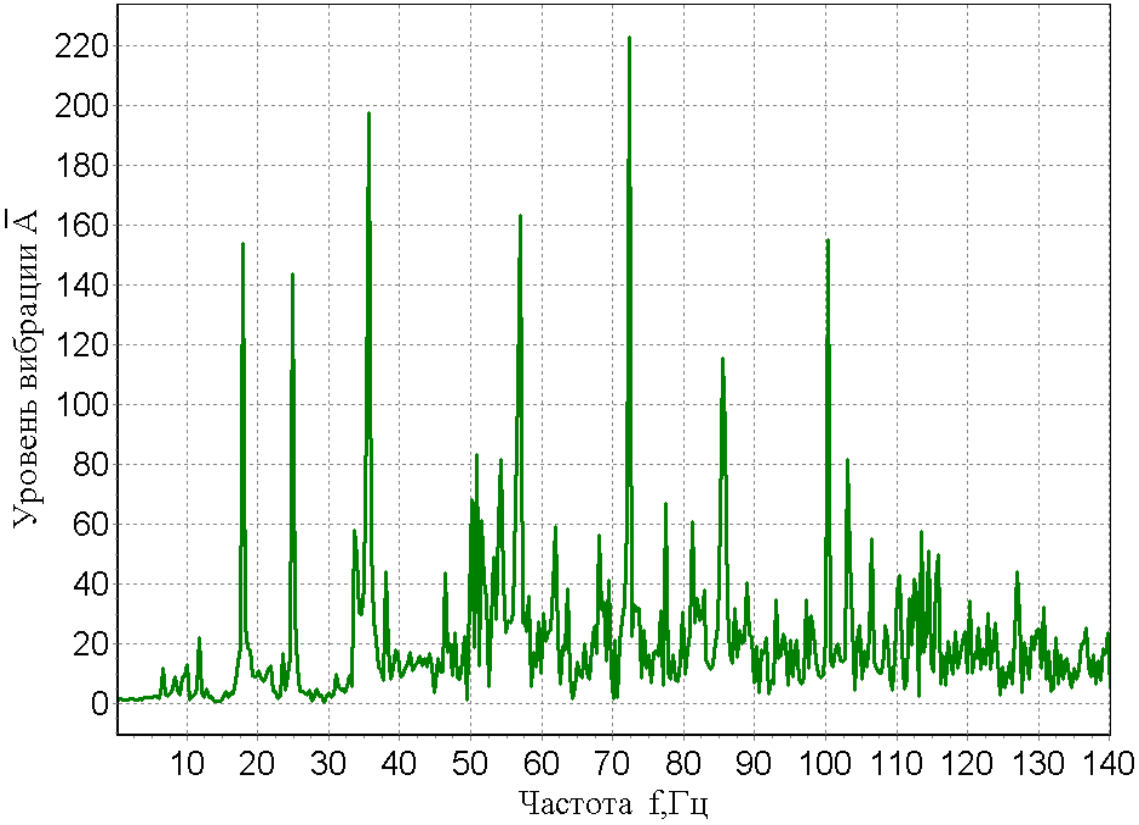


Рисунок Г.1 – Результаты обработки зарегистрированного сигнала: а) временная реализация звукового сигнала; б) спектр звукового сигнала



a)



b)

Рисунок Г.2 – Результаты обработки зарегистрированного сигнала: a) временная реализация вибрационного сигнала; б) спектр вибрационного сигнала

Г.2 Статистическая оценка качества аппроксимации экспериментальных данных

Для статистического оценивания коэффициентов прогнозной модели (3.11) необходимо проверить, так называемую, нуль-гипотезу, т.е. проверить, отличается ли статистически значимо оценка коэффициентов модели от нуля. Границу значимости $\hat{\gamma}$ устанавливают на основании распределения Стьюдента:

$$\hat{\gamma} = \frac{|a|}{\sigma_a} > \gamma_{(n-3;P)}^{табл}, \quad (\text{Г.1})$$

где a – значение коэффициента модели; $\gamma_{(n-3;P)}^{табл}$ – табличное значение распределения Стьюдента, выбираемое по количеству экспериментальных данных, входящих в анализируемую выборку (n – число экспериментальных данных, $P=0.95$ – доверительная вероятность).

Если условие (Г.1) соблюдается, то можно сделать вывод, что рассматриваемое значение коэффициента модели значимо отличается от нуля. Оценку значимости коэффициента корреляции между расчётными и экспериментальными данными выполняют по формуле

$$\hat{r} = \frac{r\sqrt{(n-2)}}{\sqrt{1-r^2}} \geq r_{(n-3;P)}, \quad (\text{Г.2})$$

Если это условие выполняется, то гипотезу отклоняют. Для этого значение коэффициента корреляции \hat{r} сравнивают с его критическим табличным значением $r_{(n-3;P)}$.

Для проверки значимости прогнозной модели в целом используют F -критерий Фишера, для этого общую дисперсию $D_{общ}$ сравнивают с остаточной дисперсией $D_{ост}$. Общая дисперсия характеризует рассеяние экспериментальных данных об уровне звука относительно его среднего значения.

$$D_{общ} = \frac{\sum E_{ЗВ}^2 - \frac{(\sum E_{ЗВ})^2}{n}}{n-1}. \quad (\text{Г.3})$$

Остаточная дисперсия характеризует различие между экспериментальными $E_{ЗВ}$ и расчётными $E_{ЗВ}^P$ данными об уровне звука.

$$D_{общ} = \frac{\sum (E_{ЗВ}^P - E_{ЗВ})^2}{n-1}. \quad (\text{Г.4})$$

Критерий Фишера находят по следующей формуле:

$$\hat{F} = \frac{D_{общ}}{D_{ост}} > F_{(n-3, P)}^{табл}. \quad (\text{Г.5})$$

Критерий Фишера показывает, во сколько раз модель предсказывает результаты опытов лучше, чем среднее $E_{ЗВ}^{CP}$.

Кроме этого вычислялся коэффициент детерминации R и средняя величина отклонения расчетных данных от экспериментальных.

$$R = \sqrt{1 - \frac{D_{ост}}{D_{общ}}}. \quad (\text{Г.6})$$

$$A = \frac{\sum |E_{ЗВ} - E_{ЗВ}^P|}{n E_{ЗВ}}. \quad (\text{Г.7})$$

Основой расчета точности определения ресурса инструмента T является следующее выражение, полученное путём дифференцирования выражения (3.21) по величине звукового давления $E_{ЗВ}$ при $\tau > T_{ИП}$.

$$\Delta T = \frac{T - \tau}{\alpha E_{ЗВ}^{ИП} \beta} \left(\frac{T - \tau}{\tau - T_{ИП}} \right)^\beta \sqrt{D_{ост}}. \quad (\text{Г.8})$$

где $E_{ЗВ}^{ИП} = (E_{0ЗВ} + \mathcal{G}_{ИП} \cdot T_{ИП})$ – уровень звука на момент окончания участка приработки резца. Прогнозируемая величина ресурса $T_{Прогн}$ с заданной вероятностью P ($P=0.95$) должна находиться в следующем доверительном интервале (доверительные границы для экспериментальной выборки):

$$T - \gamma_{(n-1; P)}^{табл} \Delta T < T_{Прогн} < T + \gamma_{(n-1; P)}^{табл} \Delta T, \quad (\text{Г.9})$$

где $\gamma_{(n-1; P)}^{табл}$ – коэффициент Стьюдента;

T – математическое ожидание ресурса – параметр прогнозной модели, определяемый в процессе минимизации функционала (3.12).

Параметр T (математическое ожидание ресурса \bar{T}), изменяется в более узких границах:

$$T - \frac{\gamma_{(n-1;P)}^{табл}}{\sqrt{n}} \Delta T < \bar{T} < T + \frac{\gamma_{(n-1;P)}^{табл}}{\sqrt{n}} \Delta T. \quad (Г.10)$$

Ниже представлены результаты статистической оценки качества аппроксимации и точности определения ресурса инструмента проведенной по результатам обработки экспериментальных данных представленных в РАЗДЕЛЕ 5.

Таблица Г.1 – Оценка статистической значимости прогнозной модели, описывающей звук, сопровождающий износ инструмента

Обрабатывающая система	Общая дисперсия $D_{общ}$	Остаточная дисперсия $D_{ост}$	Коэффициент детерминации R	Коэффициент корреляции r ($r_{крит}$)	Среднее отклонение $A, \%$	Критерий Фишера F ($F_{табл}$)
токарного станка	0.066	0.020	0.681	0.825 (0.370)	16.7	17.8 (2.9)
фрезерного станка	0.112	0.001	0.987	0.993 (0.248)	1.9	1537 (2.7)

Таблица Г.2 – Оценка статистической значимости прогнозной модели, описывающей звук, сопровождающий разрушение инструмента

Обрабатывающая система	Общая дисперсия $D_{общ}$	Остаточная дисперсия $D_{ост}$	Коэффициент детерминации R	Коэффициент корреляции r ($r_{крит}$)	Среднее отклонение $A, \%$	Критерий Фишера F ($F_{табл}$)
токарного станка	0.225	0.096	0.816	0.903 (0.314)	7.6	53.3 (2.8)
фрезерного станка	0.451	0.056	0.98	0.992 (0.267)	3.4	1072 (2.7)

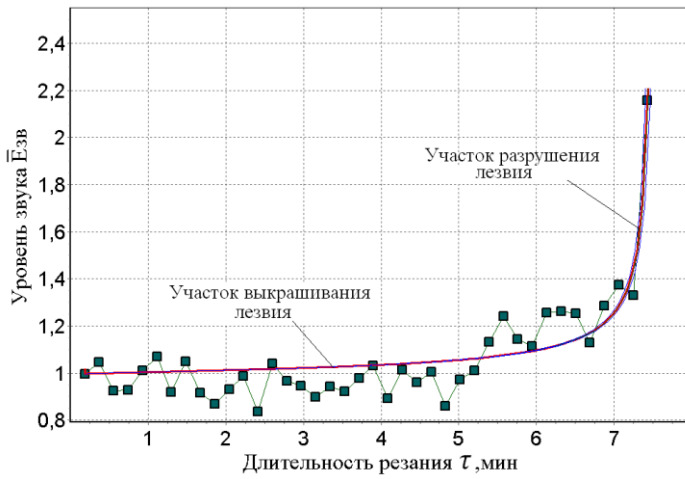


Рисунок Г.3 – Аппроксимация графиком модели (3.11) экспериментальных данных [10] о характере изменения амплитуды звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающей системы токарного станка при выкрашивании и последующем сколе лезвия

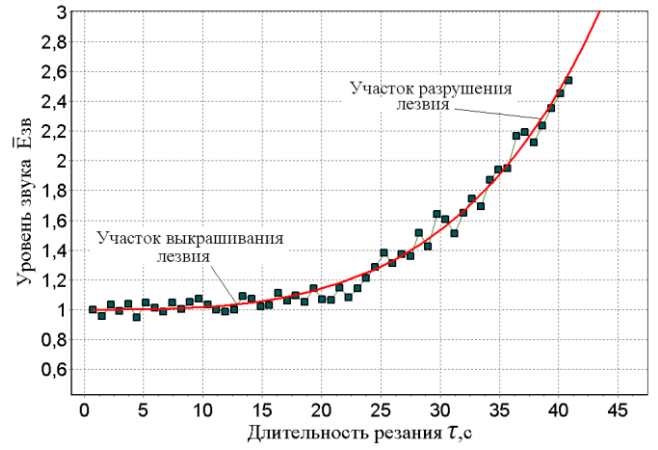


Рисунок Г.4 – Аппроксимация графиком модели (3.11) экспериментальных данных о характере изменения амплитуды звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающей системы фрезерного станка при выкрашивании и последующем сколе зуба цилиндрической фрезы

Таблица Г.3 – Статистическая оценка точности определения ресурса инструмента при нормальном износе

Обрабатывающая система	Прогноз стойкости T	Отклонение доверительных границ для выборки ΔT	Отклонение доверительных границ для матожидания $\Delta T / \sqrt{n}$	Табличное значение коэффициента Стьюдента $\gamma_{(n-1;P)}^{табл}$	Фактическое значение коэффициента Стьюдента $\gamma_{ФАКТ}$	Коэффициент вариации ν
токарного станка	630 мм	79 мм	14.70 мм	2.06	7.9	0.120
фрезерного станка	59 мин	± 3.40 мин	± 0.43 мин	2.00	17.5	0.057

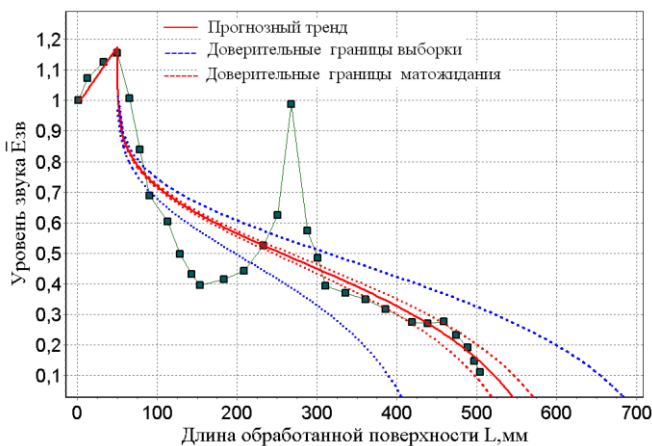


Рисунок Г.5 – Прогнозный тренд уровня звука, сопровождающего продольное точение, и его доверительные границы

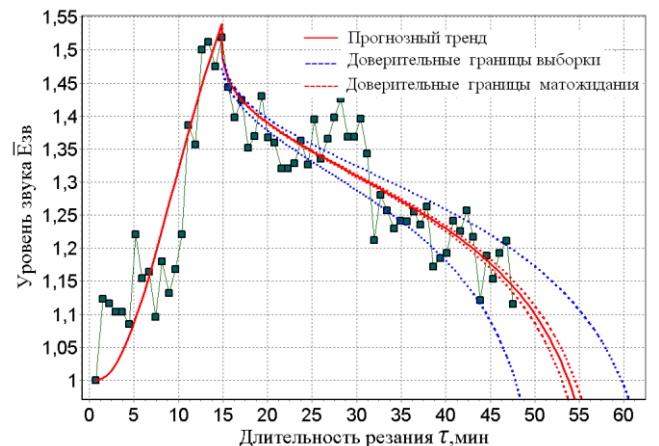


Рисунок Г.6 – Прогнозный тренд уровня звука, сопровождающего фрезерование, и его доверительные границы

Таблица Г.4 – Статистическая оценка точности определения ресурса ресурса инструмента при выкрашивании и при сколе

Обрабатывающая система	Прогноз стойкости T	Отклонение доверительных границ для выборки ΔT	Отклонение доверительных границ для матожидания $\Delta T / \sqrt{n}$	Табличное значение коэффициента Стьюдента $\gamma_{(n-1;P)}^{табл}$	Фактическое значение коэффициента Стьюдента $\gamma_{ФАКТ}$	Коэффициент вариации ν
токарного станка	7.5 мин	0.014 мин	0.002 мин	2.02	130	0.002
фрезерного станка	148.8 с	± 1.43 с	± 0.19 с	2.00	103	0.009

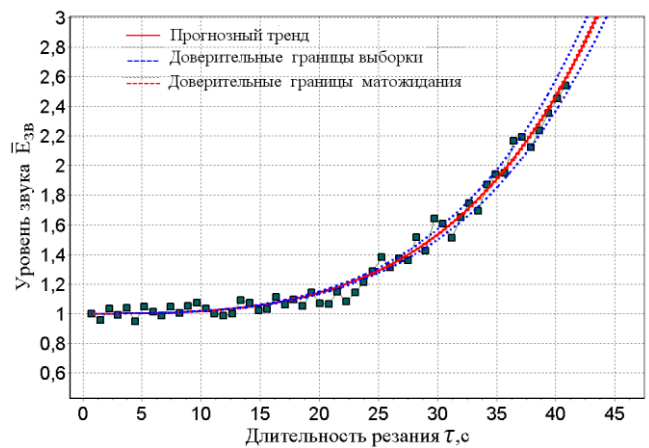
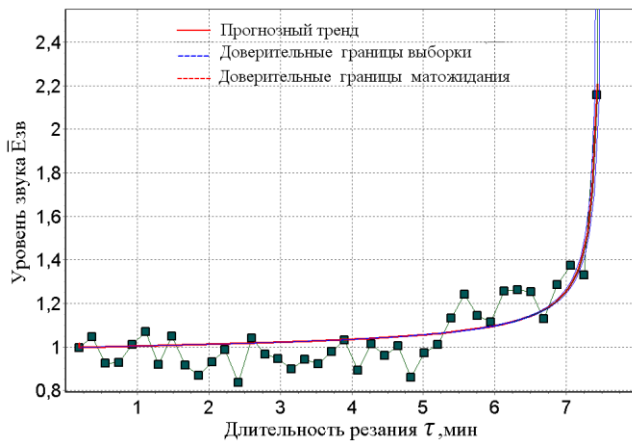


Рисунок Г.7 – Прогнозный тренд уровня звука, сопровождающего процесс продольного точения при выкрашивании и последующем сколе лезвия, и его доверительные границы

Рисунок Г.8 – Прогнозный тренд уровня звука, сопровождающего процесс фрезерования при выкрашивании и последующем сколе зуба цилиндрической фрезы, и его доверительные границы

Г.3 Примеры «Протоколов диагностирования технического состояния обрабатывающей системы» (продольное точение)

**ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ**
(длительность резания – 5.76 мин)

1 Состояние детали

1.1 Качество обработки детали:

– хорошее.

1.2 Шероховатость поверхности :

– соответствует чистовой обработке ($Ra = 0.25$ мкм).

1.3 Допустимая длительность обработки

с доверительной вероятностью $P=0,95$

составляет: 5.70 ... 8.29 мин.

2 Техническое состояние инструмента

2.1 Состояние инструмента из-за износа

–хорошее,

– вероятность отказа - $Q = 0.363$,

- прогнозируемый остаточный ресурс инструмента
с доверительной вероятностью $P=0,95$

составляет: 5.52 ... 8.47 мин

2.2 Состояние инструмента из-за выкрашивания

–приемлемое,

– вероятность отказа - $Q = 0.260$,

– прогнозируемый остаточный ресурс инструмента
с доверительной вероятностью $P=0,95$

составляет: 11.76 ... 14.82 мин.

2.3 Состояние инструмента из-за комплексного воздействия износа и выкрашивания

–допустимое,

– вероятность отказа - $Q = 0.529$,

– прогнозируемый остаточный ресурс инструмента
с доверительной вероятностью $P=0,95$

составляет: 1.23 ... 2.53 мин.

3 Техническое состояние станка
(при наработке на 540 сут)

3.1 Шпиндель:

- степень развития дефекта - *средняя*,
- вероятность отказа $Q = 0.479$,
- скорость развития дефекта - *умеренная*,
- наработка станка до остановки на осмотр (ремонт) из-за развития дефекта составляет: 28 - 32 сут.

3.2 Редуктор:

- степень развития дефекта - *выше средней*,
- вероятность отказа $Q = 0.493$,
- скорость развития дефекта - *критическая*,
- наработка станка до остановки на осмотр (ремонт) из-за развития дефекта составляет: 19 - 22 сут.

3.3 Прочие дефекты:

- степень развития дефекта - *выше средней*,
- вероятность отказа $Q = 0.507$,
- скорость развития дефекта - *критическая*,
- наработка станка до остановки на осмотр (ремонт) из-за развития дефекта составляет: 14 - 16 сут.,

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ (длительность резания – 10.59 мин)

1 Состояние детали

1.1 Качество обработки детали:

- брак.

1.2 Шероховатость поверхности:

- соответствует черновой обработке ($Ra = 100 \text{ мкм}$).

1.3 Допустимая длительность обработки

- с доверительной вероятностью $P=0,95$

составляет: 0.00 ... 0.00 мин.

2 Техническое состояние инструмента

2.1 Состояние инструмента из-за износа

- требует подналадки,
- вероятность отказа - $Q = 0.625$,
- прогнозируемый остаточный ресурс инструмента с доверительной вероятностью $P=0,95$ составляет: 0.00 ... 0.98 мин.

2.2 Состояние инструмента из-за выкрашивания

- приемлемое,
- вероятность отказа - $Q = 0.475$,
- прогнозируемый остаточный ресурс инструмента

с доверительной вероятностью $P=0,95$
составляет: 4.72 ... 6.92 мин.

2.3 Состояние инструмента из-за комплексного воздействия износа и выкрашивания

- требует подналадки,
- вероятность отказа $-Q = 0.803$,
- прогнозируемый остаточный ресурс инструмента с доверительной вероятностью $P=0,95$
составляет: 0.00 ... 0.00 мин.

3 Техническое состояние станка (при наработке на 580 сут)

3.1 Шпиндель:

- степень развития дефекта - *выше средней*,
- вероятность отказа $Q = 0.543$,
- скорость развития дефекта - *критическая*,
- наработка станка до остановки на осмотр (ремонт) из-за развития дефекта составляет: 13 - 16 сут.,

3.2 Редуктор:

- степень развития дефекта - *выше средней*,
- вероятность отказа $Q = 0.556$,
- скорость развития дефекта - *критическая*,
- наработка станка до остановки на осмотр (ремонт) из-за развития дефекта составляет: 11 - 14 сут.,

3.3 Прочие дефекты:

- степень развития дефекта - *выше средней*,
- вероятность отказа $Q = 0.608$,
- скорость развития дефекта - *критическая*,
- наработка станка до остановки на осмотр (ремонт) из-за развития дефекта составляет: 4 - 6 сут.

Приложение Д

АКТЫ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер виробництва атомних енергетичних насосів та комплектуючих

виробів

ПАТ «Сумське НПО ім. М.В. Фрунзе»

О.Д. Пирогов
2015 р.

АКТ

про використання результатів дисертації на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук
Нагорного Володимира В'ячеславовича

Комісія у складі:

Чучман Є.В. - Начальник механічного цеху №22, голова комісії
 Стеценко В.М. - Начальник технічного бюро цеху №22, член комісії.
 Кузьмин В.М. - Головний механік виробництва АЕНіКО, член комісії.

склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи "**Контроль динамічної поведінки металообробних технологічних систем та метод визначення їх ресурсу**", яка виконана на кафедрі «Технологія машинобудування, верстати та інструменти» Сумського державного університету, використані в науково-виробничій діяльності «Виробництва атомних енергетичних насосів та комплектуючих виробів ПАТ «Сумське НПО ім. М.В. Фрунзе» при металообробці на верстатах з ЧПК найбільш відповідальних і трудомістких виробів.

Зокрема, випробуваний і отримав рекомендації до використання в практиці різання метод визначення ресурсу інструменту. Метод реалізовано у вигляді мікропроцесорного прогнозно-діагностичного комплексу, який дозволяє автоматизувати процес контролю в режимі поточного часу якості обробки виробу і визначати напрацювання ріжучого інструменту до його заміни, запобігаючи тим самим його непередбачену поломку і брак виробу. Дослідна експлуатація комплексу показала, що впровадження його у виробництво дозволяє економити до 10% часу металообробки, яка традиційно витрачається на виявлення і заміну зламаних ріжучих інструментів і усунення браку виробу і, як результат, не менше, ніж на 10%, підвищує ефективність металообробки, особливо при виготовленні відповідальних і трудомістких виробів, у тому числі довгомірних і великогабаритних.

Голова комісії

Чучман Є.В.

Члени комісії:

Стеценко В.М.

Кузьмин В.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор «ТРІЗ» ЛТД ТОВ
В. С. Марцинковський

« 19 » серпня 2015 р.

**АКТ**

про використання результатів дисертації на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук
Нагорного Володимира В'ячеславовича

Комісія у складі:




Білік Я. І. – зам. директора, голова комісії.
Лабенко С. В. – керівник проекту, член комісії.
Путро К. Д. – керівник проекту, член комісії.

склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи "**Контроль динамічної поведінки металообробних технологічних систем та метод визначення їх ресурсу**", яка виконана на кафедрі «Технологія машинобудування, верстати та інструменти» Сумського державного університету, використані в науково-виробничій діяльності «ТРІЗ» ЛТД ТОВ при металообробці на верстатах з ЧПК.

Зокрема, випробуваний і отримав рекомендації до використання в практиці різання метод контролю динамічної поведінки металообробних технологічних систем та визначення їх ресурсу. Метод реалізовано у вигляді мікропроцесорного прогнозно-діагностичного комплексу, який дозволяє автоматизувати процес контролю в режимі поточного часу динамічної поведінки металообробних систем і визначати напрацювання ріжучого інструменту до його заміни, запобігаючи тим самим його поломку та брак виробу. Дослідна експлуатація комплексу показала, що впровадження комплексу у виробництво дозволяє економити до 10% часу металообробки, яка традиційно витрачається на виявлення і заміну зламаних ріжучих інструментів і усунення браку виробу і, як результат, не менше, ніж на 10%, підвищує ефективність металообробки.

Голова комісії

Члени комісії:

 Я. І. Білік
 С. В. Лабенко
 К. Д. Путро

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор

В.Д. Карпуша

_____ 2015 р.

АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
«Контроль динамічної поведінки металообробних технологічних систем
та метод визначення їх ресурсу» у навчальний процес


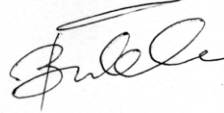
Акт складено комісією у складі:

Голова комісії	Зав. секцією ТМБ каф. ТМВІ, д.т.н. доц. Д.В. Криворучко
Члени комісії:	доц. каф. ТМВІ, к.т.н. Ємельяненко С.С. доц. каф. ТМВІ, к.т.н. Іванов В.О.

Даний акт засвідчує, що результати дисертаційної роботи Нагорного Володимира В'ячеславовича «Контроль динамічної поведінки металообробних технологічних систем та метод визначення їх ресурсу» у рамках держбюджетної роботи України «"Підвищення вібростійкості процесів фрезерування та точіння складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів на основі керування і оптимізації геометрії різальної частини інструментів" (державний реєстраційний номер 0113U000136С), де здобувач був виконавцем окремих розділів, були впроваджені у навчальний процес у весняному семестрі 2015 року, а саме:

1. При читанні курсу лекцій з дисципліни «Теорія різання» розроблено лекцію «Діагностика и прогнозування стану обробної системи і ріжучого інструменту при точені і фрезеруванні» з використанням запропонованої автором методології контролю динамічної поведінки металообробних технологічних систем та методу визначення їх ресурсу.

2. При виконанні кваліфікаційних робіт магістрами кафедри використовується запропоноване нормативно-методичне та програмне забезпечення для проведення робіт з удосконалення систем контролю динамічної поведінки металообробних технологічних систем та методів визначення їх ресурсу

Голова комісії	 Зав. секцією ТМБ каф. ТМВІ, д.т.н., доц. Д.В. Криворучко
Члени комісії:	доц. каф. ТМВІ, к.т.н. . Ємельяненко С.С.  доц. каф. ТМВІ, к.т.н. Іванов В.О.