

Министерство образования и науки Украины
Сумский государственный университет

В. А. Залого, В. М. Нагорный, В. В. Нагорный

**Контроль динамического состояния
металлообрабатывающей технологической
системы и прогнозирование её ресурса**

Монография

Рекомендовано ученым советом Сумского государственного университета



Сумы
Сумский государственный университет
2016

УДК 621.9.029
ББК 34.63-14
3-24

Рецензенты:

В. Б. Тарельник – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технический сервис» Сумского национального аграрного университета;
В. А. Федорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Интегрированные технологии машиностроения» им. М. Ф. Семка НТУ «ХПИ»

*Рекомендовано к изданию ученым советом
Сумского государственного университета
(протокол № 2 от 8 октября 2015 года)*

Залога В. А.

3-24 Контроль динамического состояния металлообрабатывающей технологической системы и прогнозирование ее ресурса : монография / В. А. Залога, В. М. Нагорный, В. В. Нагорный. – Сумы : Сумский государственный университет, 2016. – 242 с.
ISBN 978-966-657-604-3

В монографии рассмотрено динамическое поведение металлообрабатывающей технологической системы при износе режущего инструмента. На основании этого авторы разработали модель прогнозирования технического состояния технологической системы, позволяющую оценивать ресурс как инструмента, так и технологической системы в целом. Знание ресурса технологической системы обеспечивает переход к адаптивному управлению её функционированием и исключает тем самым непредвиденные остановки на замену инструмента, ремонт станка и сводит к минимуму риск появления брака обработанной детали. Разработанный авторами автоматизированный прогнозно-диагностический комплекс обеспечивает внедрение предложенной ими прогнозной модели в практику обработки широкого круга материалов, что в итоге решает важную научно-практическую задачу повышения эффективности процесса резания.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, научно-исследовательских лабораторий, магистров и аспирантов технических специальностей.

**УДК 621.9.029
ББК 34.63-14**

© Залога В. А., Нагорный В. М., Нагорный В. В., 2016

СОДЕРЖАНИЕ

С.

ВВЕДЕНИЕ	9
РАЗДЕЛ 1 Современное состояние проблемы контроля динамического поведения обрабатывающих технологических систем и определения их ресурса	12
1.1. Динамическое поведение обрабатывающей системы и влияющие на нее факторы.....	15
1.2. Влияние на динамическое поведение обрабатывающей системы технического состояния режущего инструмента.....	21
1.2.1. Виды и кривые изнашивания инструмента.....	21
1.2.2. Нестабильность свойств режущего инструмента.....	22
1.2.3. Распространенные методы контроля технического состояния обрабатывающей системы и способы их реализации.....	26
1.2.3.1. Измерение силы резания	28
1.2.3.2. Измерение вибрации.....	28
1.2.3.3. Измерение высокочастотных сигналов	30
1.2.3.4. Измерение температуры, сигнала термо эдс и параметров других физических явлений.....	31
1.3. Контроль параметров шероховатости поверхности детали	32
1.4. Способы реализации действующих методов определения ресурса обрабатывающих систем.....	33
1.5. Системы контроля динамического поведения и определения ресурса обрабатывающих систем.....	38
Выводы к разделу 1	44
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	52
2.1.4. Помехи, возникающие при регистрации звуковой волны, генерируемой при работе обрабатывающей системы.....	54
2.2. Основные подходы к моделированию динамики обрабатывающей системы.....	60
2.3. Цель исследований динамики обрабатывающих систем	62
2.4. Предмет исследований.....	62
2.4.1. Токарно-винторезный станок.....	62
2.4.2. Вертикально-фрезерный станок.....	63
2.5. Методика исследований	64
2.5.1. Амплитуда звуковой волны и обобщённые координаты	64
2.5.2. Моделирование изменения технического состояния инструмента	67
2.5.2.1. Участок нормального износа инструмента	69
2.5.2.2. Участок катастрофического износа (разрушения) инструмента	72
2.5.3. Определение параметров моделей	77
2.5.4. Определение параметров контактного взаимодействия заготовки и инструмента	80
2.5.4.1. Определение параметров контактного взаимодействия	82
2.5.4.2. Определение параметров контактной жёсткости.....	85
2.5.4.3. Определение параметров возмущающего воздействия, действующего на модель технологической системы	85
2.6. Динамические модели обрабатывающих технологических систем.....	89
2.6.1. Описание динамической модели технологической системы токарного станка.....	89
2.6.2. Описание динамической модели технологической системы фрезерного станка.....	90
2.7. Результаты исследований.....	92

РАЗДЕЛ 3 Разработка методологии прогнозирования на примере технологических металлообрабатывающих систем ресурса механического оборудования.....	104
3.1. Общие положения.....	104
3.2. Инструментарий прогнозирования.....	105
3.3. Разработка модели прогнозирования ресурса инструмента на основе анализа звука, сопровождающего процесс металлообработки.....	110
3.3.1. Разработка аналитического выражения прогнозной модели.....	111
3.3.1.1. Участок приработочного износа инструмента.....	111
3.3.1.2. Участок нормального и катастрофического износа (выкрашивания) инструмента.....	114
3.4. Определение износа инструмента по результатам прогнозирования его ресурса.....	120
3.5. Метод прогнозирования ресурса лезвийного инструмента.....	122
3.5.1. Компенсация нестабильности прогнозирования ресурса инструмента.....	123
3.5.2. Достоверность прогноза ресурса режущего инструмента.....	127
3.5.2.1. Корреляционный метод.....	127
Выводы к разделу 3.....	129
РАЗДЕЛ 4 Разработка и программная реализация методов и алгоритмов прогнозирования ресурса, диагностирования технического состояния и адаптивного управления работой обрабатывающих систем.....	131
4.1. Основные положения метода диагностирования технического состояния обрабатывающих систем.....	132
4.2. Методология диагностирования состояния обрабатывающей системы.....	134
4.2.1. Диагностирование технического состояния режущего инструмента.....	136
4.2.2. Контроль качества обработки деталей резанием.....	141
4.2.2.1. Показатель точности обработки $a_{ТОЧ}$	142
4.2.2.2. Показатель шероховатости обработанной поверхности.....	144

4.2.3. Диагностирование технического состояния станочного оборудования	147
4.2.3.1. База данных	148
4.2.3.2. База знаний.....	150
4.3. Адаптивное управление режимом резания	153
4.4. Автоматизация работы прогнозно-диагностического комплекса	159
Выводы к разделу 4	170
РАЗДЕЛ 5 Экспериментальная апробация разработанного прогнозно-диагностического комплекса.....	173
5.1. Цель и методика эксперимента.....	173
5.2. Результаты экспериментов.....	177
5.2.1. Закономерности поведения тренда параметра \bar{E}_{3B} и прогноз ресурса инструмента	177
5.2.2. Проверка эффективности алгоритма работы прогнозно-диагностического комплекса	181
5.2.2.1. Эксперимент с режущей пластинкой Р 25	182
5.2.2.2. Эксперимент с режущей пластинкой Т15К6	185
5.2.3. Диагностика технического состояния конструктивных узлов токарного станка	191
Выводы к разделу 5	192
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	194
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	199
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	222
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	225
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	232

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 – 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 так же, как и для роторных машин, пытаются использовать косвенные методы оценки состояния обрабатывающих систем, основанные на контроле, как правило, тренда амплитуды их колебаний, наблюдаемых в процессе выполнения заданной технологической операции. Однако отсутствие для обрабатывающих систем «Норм виброактивности» существенно усложняет проблему, так как не позволяет выполнить экстраполяцию контролируемого информационного сигнала до указанной в нормах его предельно допустимой величины.

В то же время практика эксплуатации обрабатывающих систем свидетельствует о том, что амплитуда их колебаний в процессе выполнения технологической операции не остается постоянной, а изменяется по определенному тренду. Если описать тренд некоторой аналитической зависимостью, в число коэффициентов которой в виде числового значения включить и искомый ресурс, то оперативное вычисление этих коэффициентов по результатам непрерывного контроля тренда позволит определять в том числе и искомую наработку обрабатывающей системы до ее отказа. В данном случае наработка будет характеризовать индивидуальный фактический ресурс обрабатывающей системы, отвечающий фактически реализующимся в действительности условиям ее эксплуатации.

Естественно, контроль тренда и последующая обработка зарегистрированной информации должны быть автоматизированы, что создаст предпосылки для внедрения в промышленность

разработанного метода определения ресурса рассмотренных машиностроительных конструкций.

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 авторами исследований, результаты которых изложены в данной монографии.

РАЗДЕЛ 1

Современное состояние проблемы контроля динамического поведения обрабатывающих 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, для чего, 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 некоторыми 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 НТУ «ХПИ» А. И. Грабченко, НТУ «ХПИ», г. Харьков; Ю. М. Внуков, ЗНТУ, г. Запорожье; Л. Н. Девин, ИСМ им. В. Н. Бакуля, г. Киев; А. Г. Деревянченко, ОНПУ, г. Одесса; В. А. Залого, СумГУ, г. Сумы; В. П. Мазур, ХНУ, г. Хмельницк; Ю. К. Новосёлов и Ф. Я. Якубов, СевНТУ, г. Севастополь и др. Однако, несмотря на огромную библиографию по данной тематике, многие теоретические и практические проблемы 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 технологической системы вибрируют с большей или меньшей интенсивностью почти во всех случаях её функционирования. Основной элемент системы – 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 технологической системе, можно разделить на две основные группы: не связанные с процессом резания (группа *I*) и вызванные непосредственно процессом резания (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. В этом случае источником энергии колебаний в технологической системе «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) обычно является приводной электродвигатель, а переменные силы, поддерживающие колебательное движение, создаются и управляются самим движением [70].

В. А. Кудинов установил, что основной причиной возникновения вибрации при резании является неоднозначность толщины среза и, следовательно, силы резания по перемещению [71]. Он исследовал движение системы с упругой связью между двумя взаимно перпендикулярными звеньями с учетом нелинейной зависимости силы резания от скорости. Диссипативные силы были приняты в виде сил вязкого трения. В. А. Кудинов разработал теоретические положения, в которых относительное колебательное движение резца и детали рассматривается как сочетание взаимосвязанных колебаний по обобщенным координатам системы. Он рассматривает динамическую систему станка как замкнутую многоконтурную систему, включающую взаимодействие упругой системы СПИЗ со всеми рабочими процессами, протекающими в ее подвижных соединениях. Из анализа теории координатной связи следует важный вывод о значении правильного ориентирования осей жесткости системы для получения устойчивого движения резания (ориентации доминирующей системы по направлению).

А. П. Соколовский [72] показал, что часть силы резания ΔP_y представляет собой функцию скорости относительных колебаний между инструментом и обрабатываемой деталью. Он объясняет это тем, что величина силы резания при движении резца в сторону детали отличается от силы, образующейся при движении резца в обратном направлении. Инструмент врезается в материал с меньшей силой, чем при выходе из материала, так как резец срезает материал, предварительно испытавший пластическую деформацию и поэтому упрочненный. Поэтому А. П. Соколовский принимает, что значение ΔP_y зависит от отношения скорости колебаний к скорости резания.

И. С. Штейнберг [73] считает, 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. Это, по его мнению, объясняется тем, что силы вторичного возмущения (переменное сечение стружки) становятся больше сил первичного возмущения и определяют дальнейший колебательный процесс. Поэтому основным средством устранения вибраций он считает изменение скорости и подачи из зоны режима обработки, соответствующей «неустойчивому наросту». Теории возникновения вибраций Ф. Тейлора и И. С. Штейнберга были подвергнуты критике, так как они объясняли возникновение автоколебаний появлением вынужденных колебаний упругой системы под действием внешней периодической силы.

Л. К. Кучма [74] провел ряд опытов при токарной обработке для выяснения влияния режимов резания, геометрических параметров режущего инструмента и жесткости системы СПИЗ на интенсивность вибраций. В результате были намечены пути для наиболее целесообразного выбора условий обработки.

И. С. Амосов [75] исследовал колебания обрабатываемой детали и инструмента в горизонтальном и вертикальном направлениях, а также изменение горизонтальной и вертикальной составляющих силы резания по времени. Деталь колеблется с большей амплитудой, чем

инструмент; деталь и инструмент совершают колебания в двух основных направлениях с определенным сдвигом по фазе, вследствие чего их движение выражается в виде замкнутой кривой. В результате измерений колебаний и силы построена зависимость «сила» - «путь». Разность полученных площадей на графике этой зависимости выражает работу, сообщенную колебательной системе.

Ю. Т. Межевой [76] отрицает заметное влияние изменения рабочих углов резания инструмента на интенсивность вибраций, а также зависимость силы резания от скорости. В его опытах силы резания при врезании, отнесенные к одной и той же толщине среза, были несколько больше, чем силы резания при выходе резца из материала. Основной причиной возникновения вибраций он считает неоднозначность зависимости площади сечения среза от перемещения резца, т.е. координатную связь.

Автоколебания являются наиболее опасными, так как они возникают в широком диапазоне режимов резания и значительно труднее, чем другие виды колебаний, поддаются устранению. Эти колебания являются наиболее распространенным видом вибраций, возникающих в процессе резания металлов. Ранее считали, что они представляют собой вынужденные колебания, возникающие под действием периодически меняющейся силы, обусловленной отрывом отдельных элементов стружки.

Н. А. Дроздов [77] впервые рассмотрел автоколебательную схему возникновения вибраций при резании металлов на токарном станке. Он показал, что наблюдаемые вибрации нельзя объяснить резонансом вследствие совпадения частоты скалывания элементов стружки с частотой собственных колебаний обрабатываемой детали или резца. По его мнению, автоколебания возникают под действием какой-либо внешней непериодической силы, например, сил трения и резания, так как они зависят от состояния системы СПИЗ, и, совершая колебания, резец делает эти силы периодическими и создает волнистую поверхность резания. В результате при следующем обороте детали снимаемая стружка будет иметь переменную толщину и на систему начинает действовать новая

периодическая возмущающая сила с таким же периодом, как и период колеблющейся системы.

А. И. Каширин [78] установил три причины, поддерживающие автоколебания при резании сталей: первая из них обусловлена силой трения между стружкой и передней поверхностью и между обрабатываемой деталью и задней поверхностью; вторая - переменными силами из-за изменения рабочих углов резания в процессе колебательного движения; третья, названная им вторичным возмущением, - переменным сечением среза, возникающим при движении резца по вибрационному следу от предыдущего прохода.

Г. А. Манжос [79] установила, что при резании возникают автоколебания. Измерение профиля волн на обработанной поверхности показало, что волны не имеют синусоидальную форму. На основании этого был сделан вывод, что возникающие автоколебания носят резко выраженный нелинейный характер.

И. И. Ильницкий [80] сделал вывод, что изменение действительного переднего угла в процессе резания возбуждает колебательные процессы, вызывая переменную силу для их поддержания. Периодическое изменение заднего угла вызывает переменную силу трения, которая поддерживает колебания в технологической системе СПИЗ. В отличие от других исследователей он полагал, что эта переменная сила возникает не только после образования волнистости, а немедленно в результате возмущения системы.

А. Л. Воронов [81] показал, что высокочастотные вибрации резца являются автоколебаниями почти гармонического типа, обусловленными переменной силой трения по задней поверхности резца.

Л. С. Мурашкин [82] в своих исследованиях анализировал колебательную систему «деталь — суппорт» как систему с двумя степенями свободы в направлении действия силы резания P_z . Показано, что автоколебания в системе СПИЗ обусловлены нелинейной характеристикой силы резания $P_z = f(V)$. Возникновение автоколебаний обусловлено зависимостью силы резания P_z от

скорости резания; оно больше, чем возбуждение от силы трения по передней поверхности инструмента.

В. В. Заре [83] установил, что относительное рассеяние энергии колебаний при увеличении жесткости детали возрастает. Он исследовал зависимость $P_z = f(V)$ для определения возбуждающей способности силы P_z в различных технологических условиях обработки, а также аналитически вывел выражение, определяющее возникновение автоколебаний и их интенсивность.

М. Э. Эльясберг, исследуя устойчивость процесса резания, сформулировал теорию [84], в которой указал, что вследствие специфичности процесса стружкообразования, связанной с пластическими свойствами металла, в нем происходят изменения, которые не могут распространяться мгновенно на всю деформируемую зону. Это вызывает запаздывание в изменении поля напряжений и, следовательно, отставание сил, действующих на резец, от его перемещения. Такое предположение приводит к выводу, что автоколебания при резании металла возникают в результате наличия запаздывающих сил.

В. Л. Вейц [85] считает, что в идеальной системе при любых режимах резец будет находиться в равновесии под действием силы резания и сил реакции, и только случайные воздействия могут вывести его из этого состояния.

В. Н. Подураев [86] подробно освещает и исследует вопросы, касающиеся анализа качества технологической системы СПИЗ в связи с процессом стружкообразования. На основании этих работ можно описать динамические явления, возникающие в металлообрабатывающей технологической системе.

Исследованиями Ю. Н. Внукова [87 – 89 и др.] доказано, что как вынужденные вибрации, так и автоколебания, возникающие в рабочей зоне, существенно влияют на динамическое состояние элементов обрабатывающей системы, а следовательно, на работоспособность режущих инструментов, качество обработанных поверхностей и, например, шпиндельного узла. Рассмотрим принятые в настоящее время способы контроля элементов технологической системы.

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 получистовой и чистовой обработках) фактическое положение вершины резца из-за радиального износа смещается от оси заготовки (рис. 1.1 *з*), приводя к изменению размеров формируемой (обработанной) поверхности. Например, при обтачивании, т.е. при формировании цилиндрической поверхности, фактический диаметр обработанной поверхности становится больше расчетного.

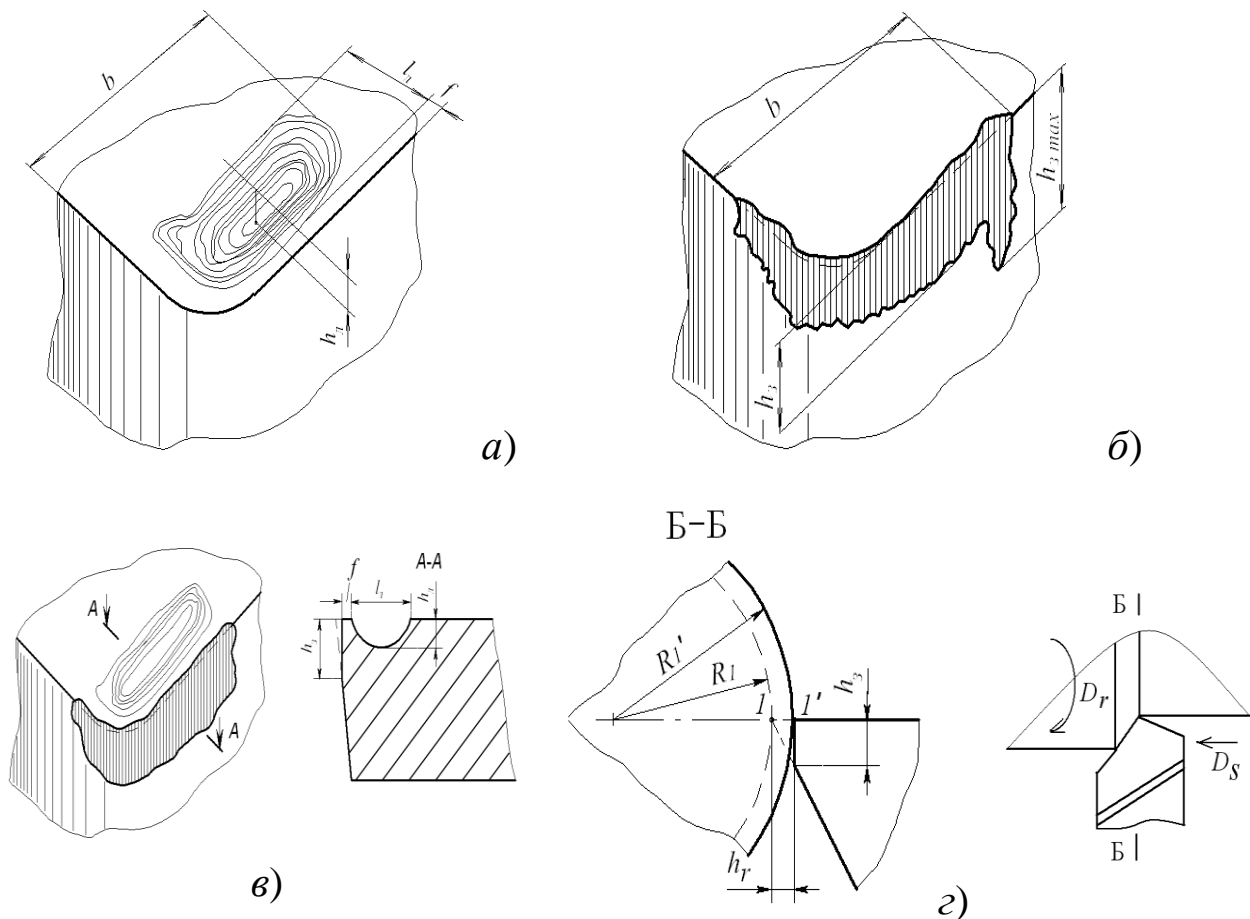


Рисунок 1.1 – Износ резца по передней (*а*), задней (*б*) поверхностях; сбалансированный износ резца (*в*); радиальный износ резца (*з*)

В этом случае величину размерного износа в зоне вершины лезвия h_r [1, 2, 3] принято называть радиальным износом, являющимся одной из характеристик так называемого размерного ресурса инструмента.

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].

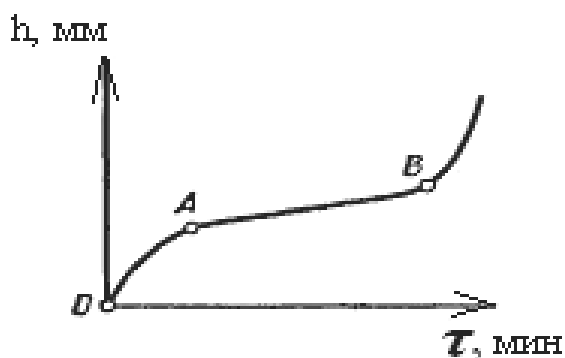


Рисунок 1.2 – Кривая износа, характеризующая изнашивание инструмента

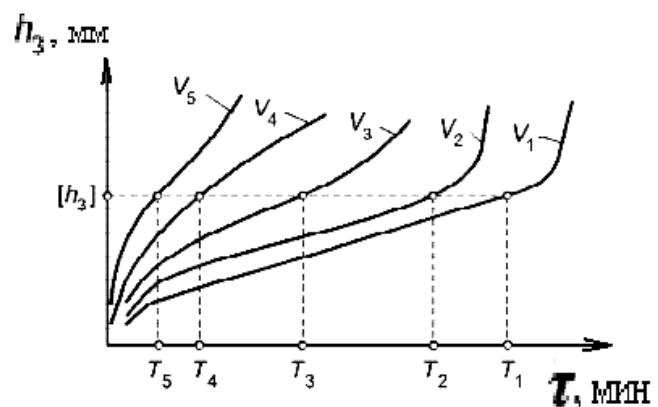


Рисунок 1.3 – Кривые износа инструмента при возрастающих скоростях резания ($V_i > V_{i-1}$)

Типовая кривая износа приведена на рис. 1.2, а ее изменение в зависимости от скорости резания – на рис. 1.3.

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 протекает 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 на 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. 1.4 приведены данные о разбросе химического состава, а соответственно и свойств стали 40X. Представленные кривые

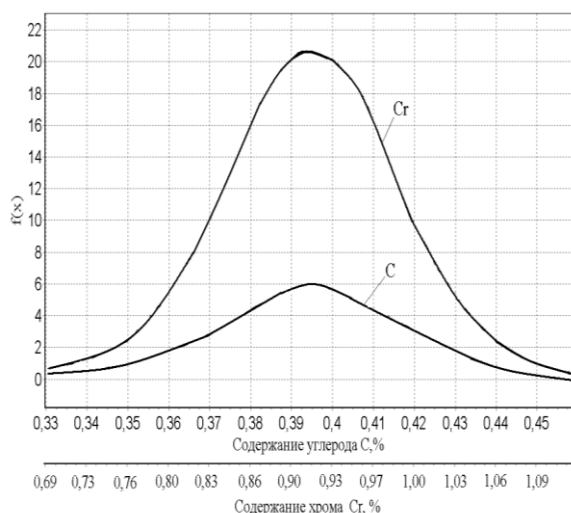


Рисунок 1.4 – Плотность распределения химического состава стали 40X по углероду и хрому [101]

(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. 1.5).

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

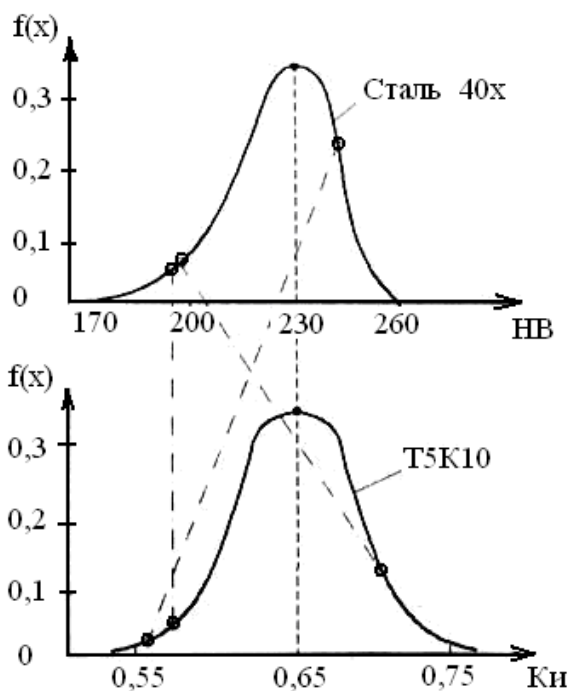


Рисунок 1.5 – Плотности распределения основных свойств Стали 40X и твердого сплава T5K10

автоматизированном станочном оборудовании является самое неблагоприятное сочетание низких режущих свойств инструмента ($K_n = 0.55$) и наиболее высокой твердости обрабатываемой стали (HB = 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, $h_z = 0,8$ 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 испытуемых 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 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 удается, 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) 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 оптико-телевизионными, лазерными, электромеханическими, ультразвуковыми или пневматическими методами.

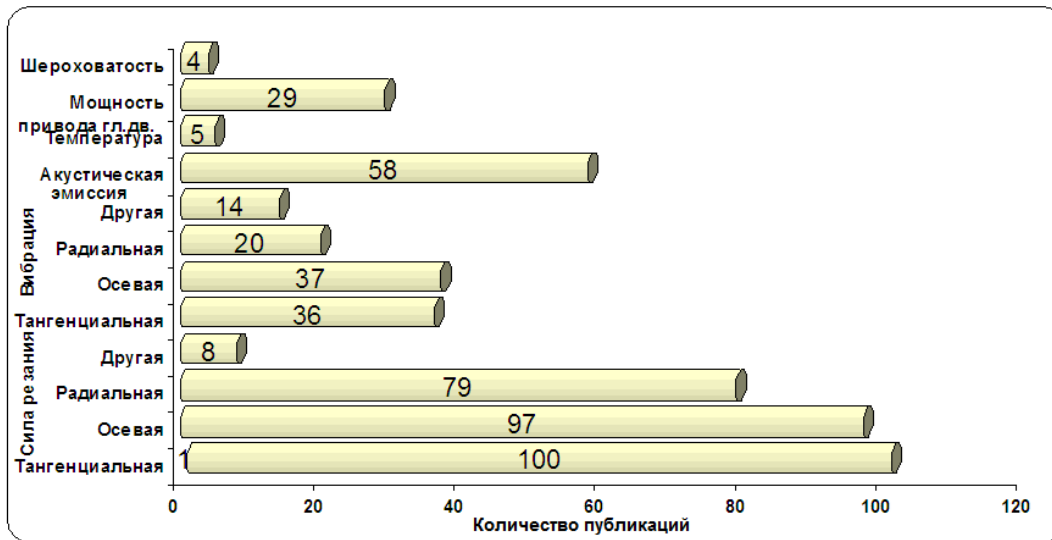


Рисунок 1.6 – Количество публикаций о применении различных физических явлений и их параметров, используемых для контроля технического состояния обрабатывающих систем

Таблица 1.1 – Классификация 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]

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 также 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 быстроедействие [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 Moriwaki, 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].

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 «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 также классифицируется как отказ обрабатывающей системы по показателям качества выпускаемой продукции [69].

1.3. Контроль параметров шероховатости поверхности детали

Параметр R_a шероховатости (рис. 1.7) определяют двояко. Согласно первому методу параметр R_a , *мкм*, рассчитывают, исходя из геометрических соображений, по следующей формуле [5]:

$$R_a = 31,25 \frac{S^2}{r_B}. \quad (1.1)$$

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

$$R_a = 0,81 + 0,004 V + 8,64 S - 2,88 t - 2,80 h_3 + 0,005 VS - 0,004 Vt + 0,005 Vh_3 + 3,35 St - 70,30 Sh_3 + 0,00001 V^2 + 26,70 S^2 + 9,93 t^2 + 27,71 h_3^2, \quad (1.2)$$

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

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

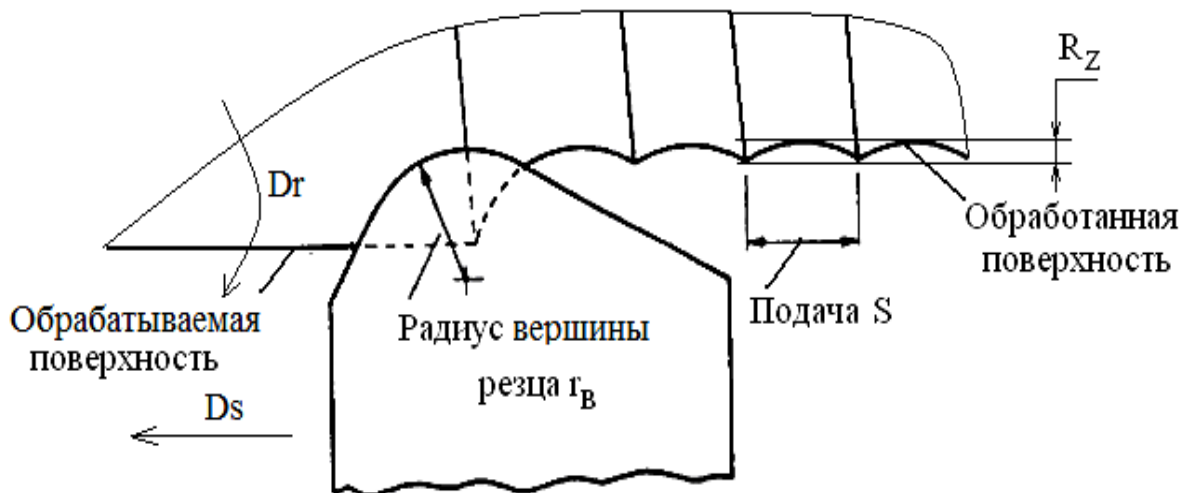


Рисунок 1.7 – Образование шероховатости поверхности при металлообработке

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

где V и S – соответственно скорость, $м/мин$, 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.

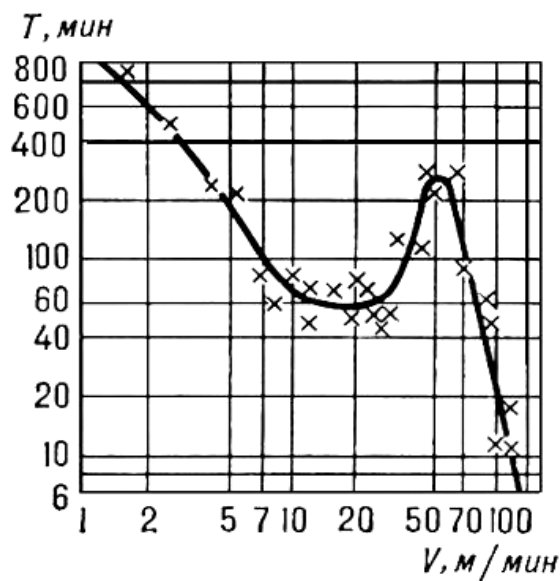


Рисунок 1.8 – Зависимость ресурса инструмента от скорости резания

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, *мин*, с использованием для этого эмпирических зависимостей. Исторически первым предложил подобную эмпирическую зависимость Ф. Тейлор [1, 161]:

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

где C_T – константа; m – показатель степени; V – скорость резания, *м/мин*.

Экспериментально установлено, что в общем случае ресурс обрабатывающей системы, ограничиваемый ресурсом режущего инструмента, сложным образом зависит от скорости резания (рис. 1.8). В [161] график функции $T(V)$, *мин*, предлагается аппроксимировать следующей экспериментальной зависимостью:

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

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:

$$T = 18t^{-1.25} S^{-1.25} V^{(3S^{0.6} e^{-0.3S})} e^{-(0.25S^{0.86} e^{-0.9S})} V^{-2.8S}. \quad (1.7)$$

В [163] получено следующее уравнение регрессии, позволяющее для заданного режима работы обрабатывающей 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):

$$T = -18,21 + 0,099V + 1100,062S - 405,06h_3 - 0,00031V^2 - 5367,63S^2 + 6405,19h_3^2 - \\ -13,4VS + 2,56Vh_3 - 23872Sh_3 + 0,034V^2S - 0,0064V^2h_3 + 76,59VS^2 + 104536,3S^2h_3 - \\ -0,19V^2S^2 + 219,53VSh_3 - 1254,44VS^2h_3 - 0,55V^2Sh_3 + 3,14V^2S^2h_3. \quad (1.8)$$

Уравнение подтверждает общеизвестный факт доминирующего влияния на ресурс обрабатывающей системы скорости резания V и подачи S . 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, *мин*, определяют по следующей зависимости:

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

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 в твердосплавных режущих инструментах, 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. 1.9); K – коэффициент наклона линейной

функции аппроксимации ($K = \operatorname{tg}(\alpha_{\text{сред}})$).

Коэффициент K (угол наклона линейного уравнения регрессии) определяется по данным износа инструмента, полученным при обработке n предыдущих деталей. Остаточный ресурс $T_{\text{ост}}$ определяют следующим образом:

$$T_{\text{ост}} = T - \tau, \quad (1.11)$$

где τ - текущая наработка инструмента.

Рассчитанное значение $T_{\text{ост}}$ должно превышать время следующего технологического перехода $T_{\text{маш}}$, т.е. должно выполняться условие $T_{\text{ост}} \geq T_{\text{маш}}$. 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. 1.10).

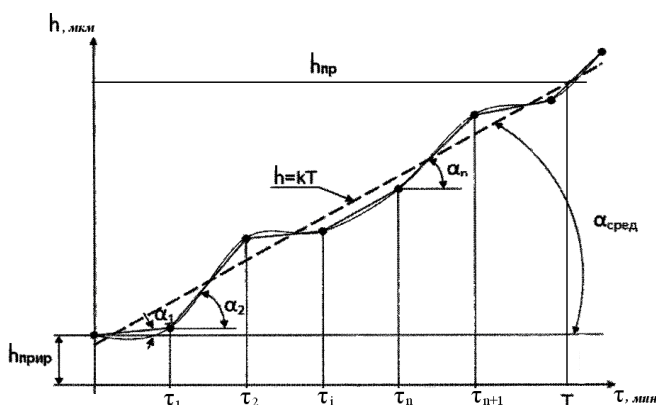


Рисунок 1.9 – Определение уравнения регрессии для оценки величины износа инструмента

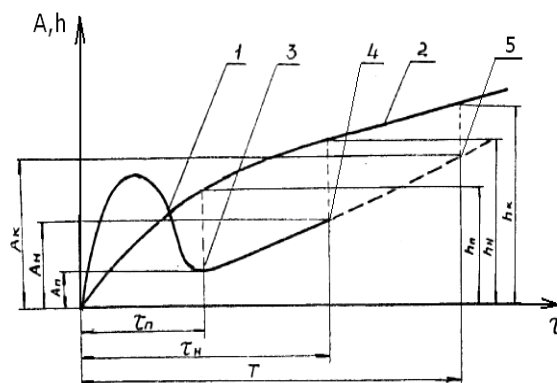


Рисунок 1.10 – Изменение амплитуды акустической эмиссии (кр.1) и износа инструмента (кр.2)

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 (т. 3); τ_n – время второго замера (т. 4); A_n – амплитуда сигнала акустической эмиссии в точке второго экстремума графика акустической эмиссии (т. 3); A_n – амплитуда сигнала акустической эмиссии в точке второго замера амплитуды акустической эмиссии (т. 4); A_k – амплитуда сигнала акустической

эмиссии, соответствующая критическому износу инструмента (т. 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 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 также 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.

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.

Общая структура системы контроля динамического поведения обрабатывающей системы представлена на рис 1.11.

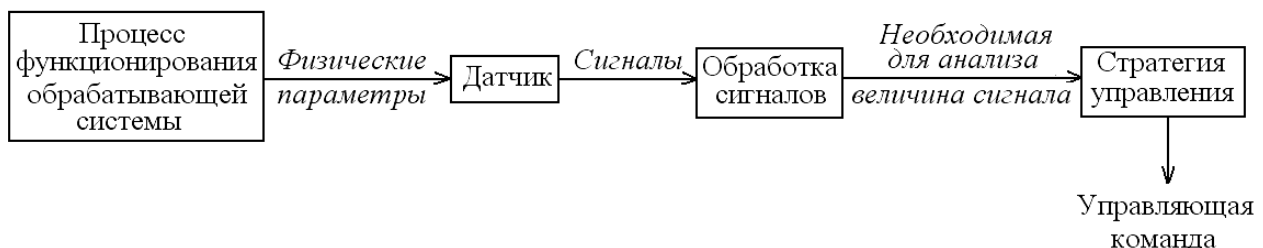


Рисунок 1.11 – **Общая структура системы контроля динамического поведения обрабатывающей системы**

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 количестве параметров, определяющих течение процесса ее работы, в большом количестве 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. 1.12).

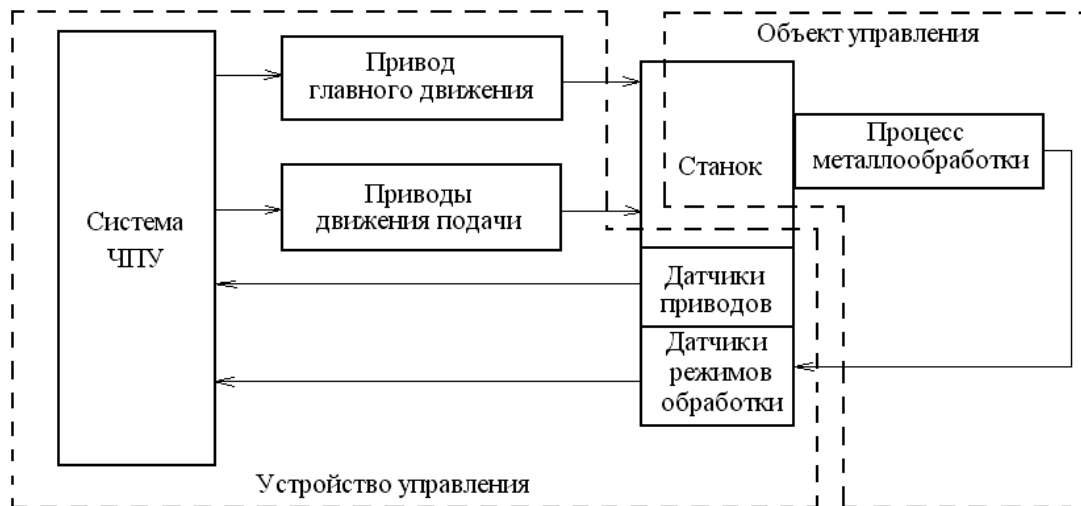


Рисунок 1.12 – Структурная схема обрабатывающей системы как объекта автоматического управления

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 обрабатывающих систем.

Большинство диагностических систем в металлообработке решают задачу только в узком диапазоне для оценки степени

критичности динамического поведения, как правило, только одного элемента обрабатывающей системы (детали, резца, станка), одного вида обработки и материала, и одних заданных режимов работы обрабатывающей системы.

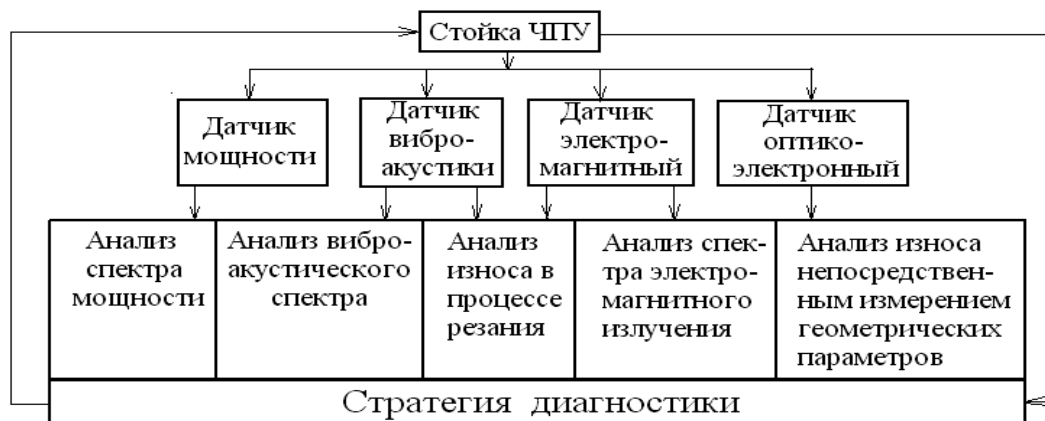
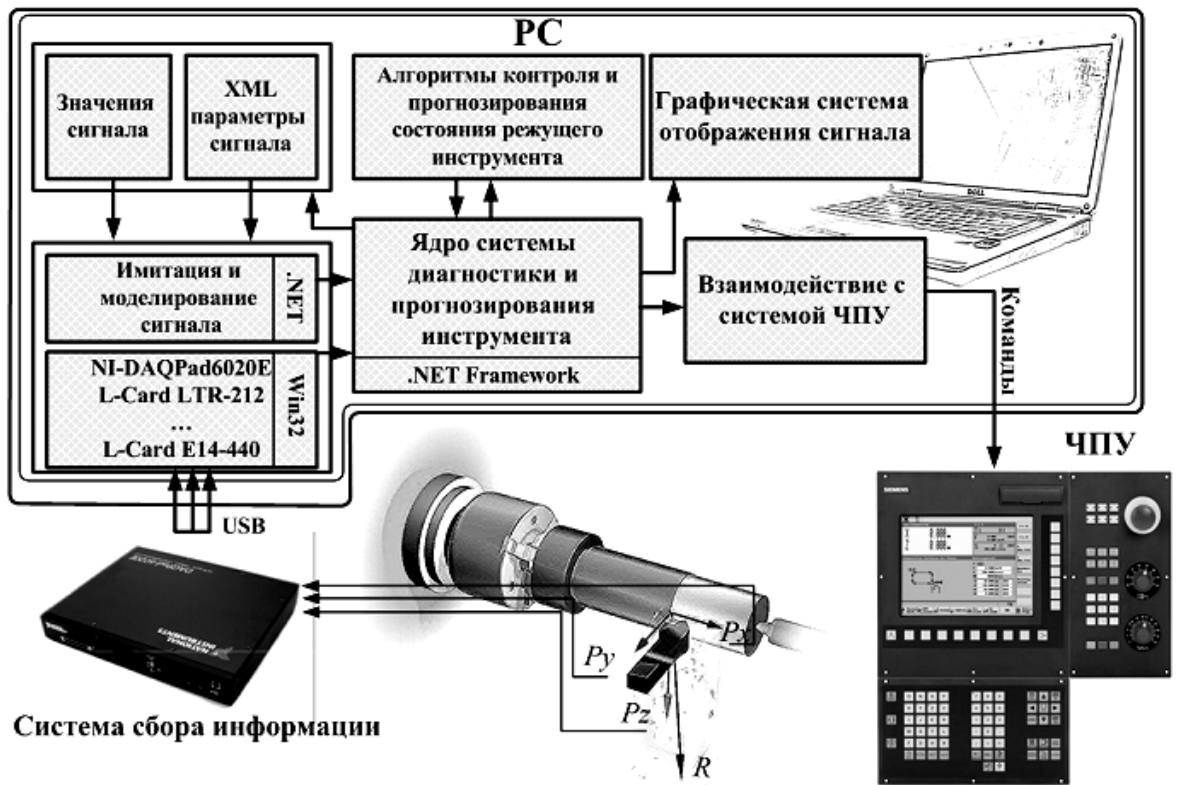


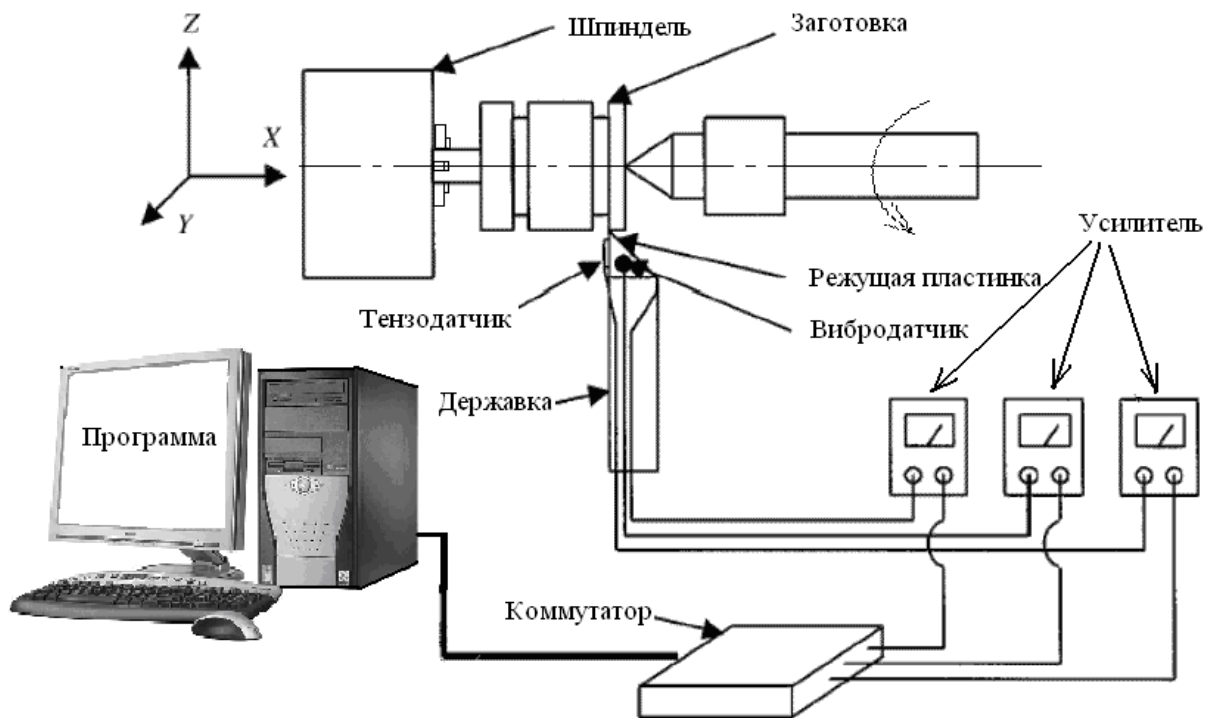
Рисунок 1.13 – Многоканальная контрольно - диагностическая система

Для расширения функциональных возможностей современные системы контроля должны быть оснащены несколькими датчиками, формирующими сигналы о динамическом поведении всех элементов контролируемой обрабатывающей системы на всех режимах ее работы. Это существенно усложняет систему контроля и делает ее менее надежной. Структурная схема подобной системы приведена на рис. 1.13 [169].

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 процесса механической обработки изделий в автоматизированном производстве, например, такие, как СТМ (рис. 1.14 а), PROMETEC (рис. 1.14 б), NORDMANN (рис. 1.15 а), OMATIVE (рис. 1.15 б) и др. [171-174]. Эти комплексы либо встраиваются в существующую систему ЧПУ станка (рис. 1.14 а), либо дополняют ее, функционируя параллельно (рис. 1.14 б, 1.15 а, б).

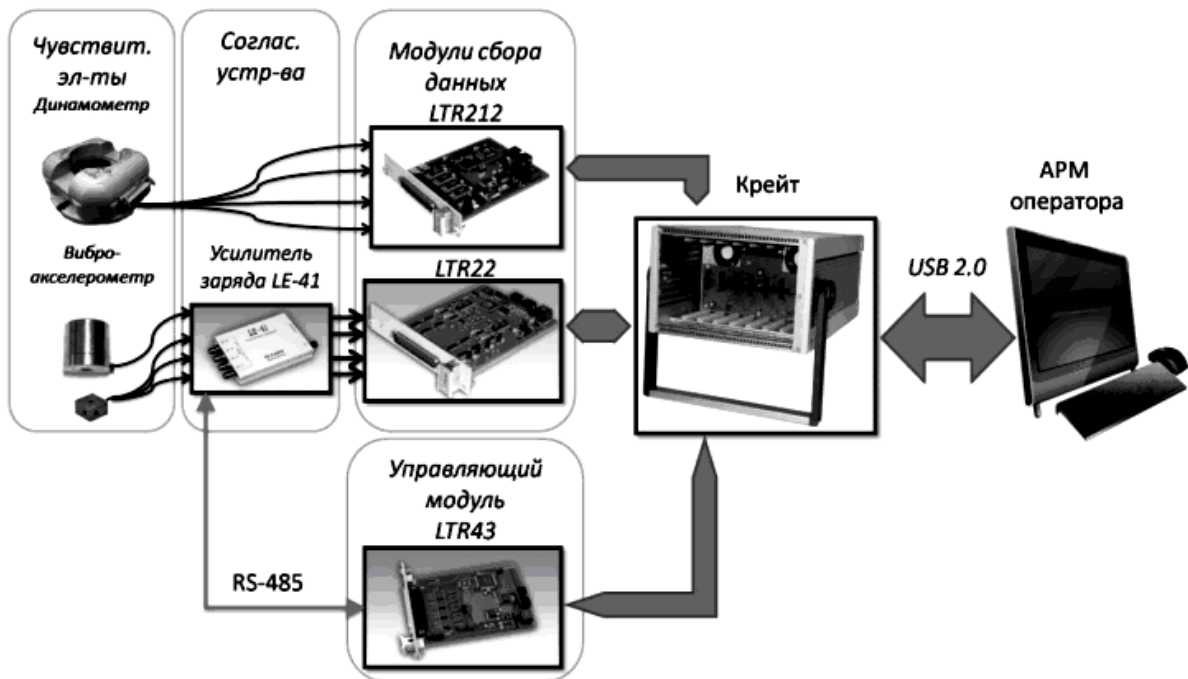


а)

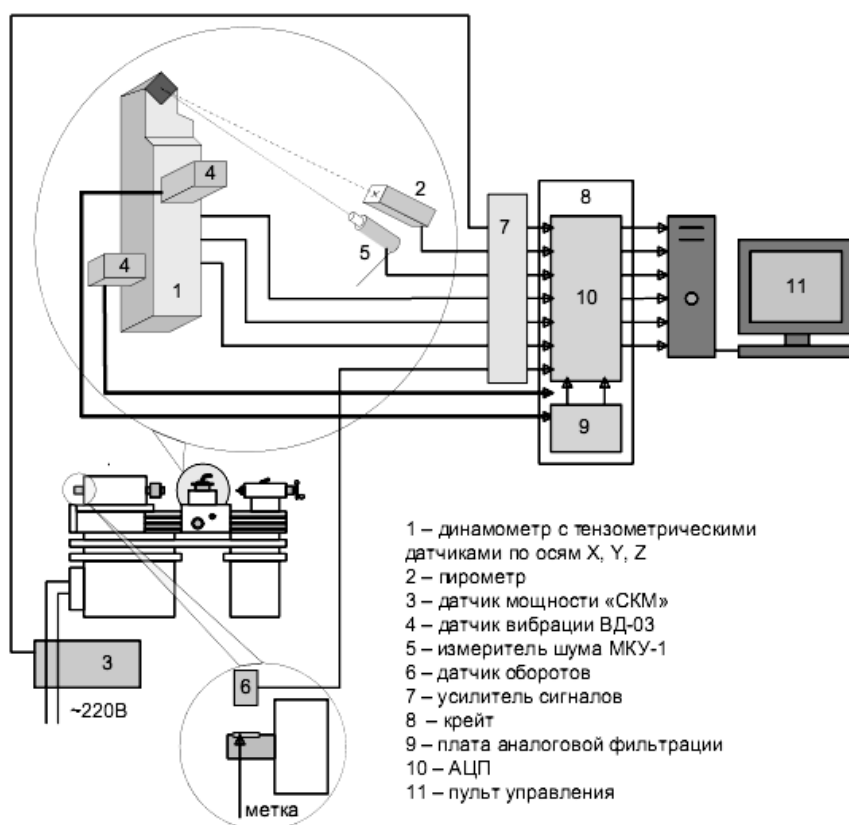


б)

Рисунок 1.14 – Характеристики диагностических систем:
 а) типовая схема измерений при диагностическом контроле;
 б) архитектура подсистемы диагностики



а)



б)

Рисунок 1.15 – Структурная схема переносного универсального модульного диагностического комплекса (а); компьютерный центр комплексной диагностики процесса резания (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 к разделу 1

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 аппаратно реализуемые методы контроля, которые порой совершенно не пригодны для применения в производственных условиях.

2. 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 также отсутствием нормативной документации, позволяющей оценивать степень критичности этого поведения.

3. В значительном количестве 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. Оперативный контроль динамического поведения обрабатывающих систем требует применения специально создаваемых информационно-измерительных систем, предназначенных для получения исходных для проведения прогноза данных. 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 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.

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 упругомассовые 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 твёрдой 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 итоге 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 безконтактных 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]:

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

где f – частота колебаний частицы воздушной среды в i -й точке звукового поля, $Гц$; 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 -й 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 в 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].

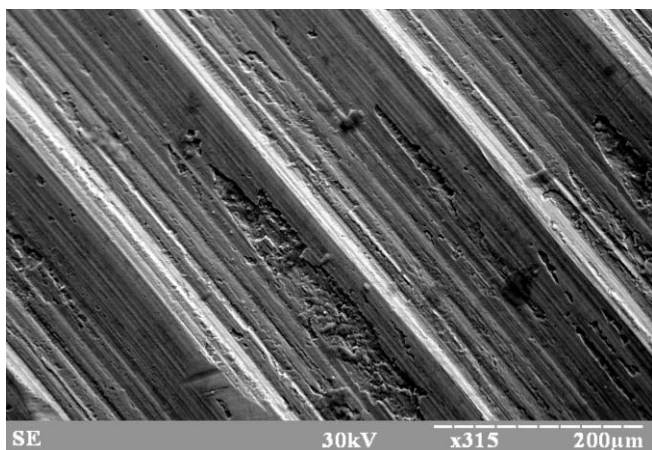


Рисунок 2.1 – Увеличенная под микроскопом поверхность детали после токарной обработки

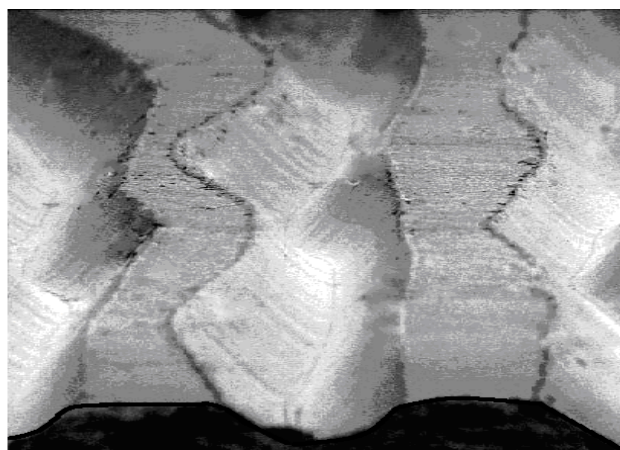


Рисунок 2.2 – Увеличенная под микроскопом поверхность грампластинки

На рис. 2.2 приведена увеличенная в 1000 раз часть звуковой дорожки грампластинки, представляющей 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 $\bar{E}_{3\phi}$, сопровождающей работу обрабатывающих систем токарного (рис. 2.3) и фрезерного (рис. 2.4) станков на режимах, приведенных в табл. 2.1.

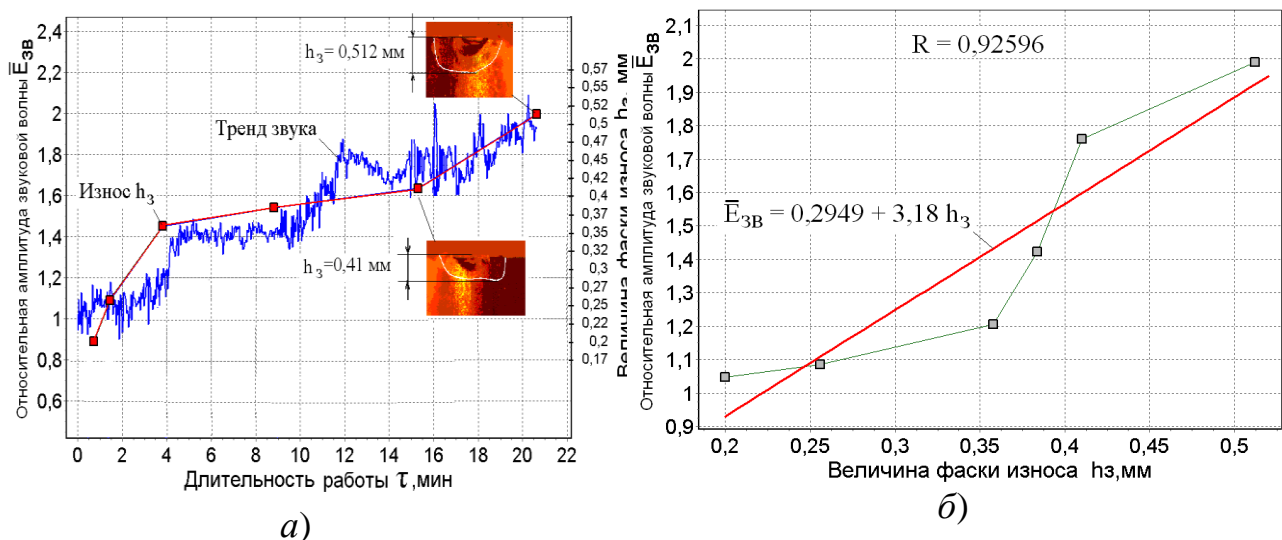


Рисунок 2.3 – Корреляция между износом инструмента и амплитудой звуковой волны, наблюдаемая при работе обрабатывающей системы токарного станка: а) кривая износа h_3 и тренд звука $\bar{E}_{3\phi}$; б) регрессионная зависимость между относительной амплитудой звуковой волны $\bar{E}_{3\phi}$ и износом h_3

В последнем случае для наглядности представления информации на рис. 2.4 а приведено также 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 0,926;
- фрезерного станка равен - 0,855.

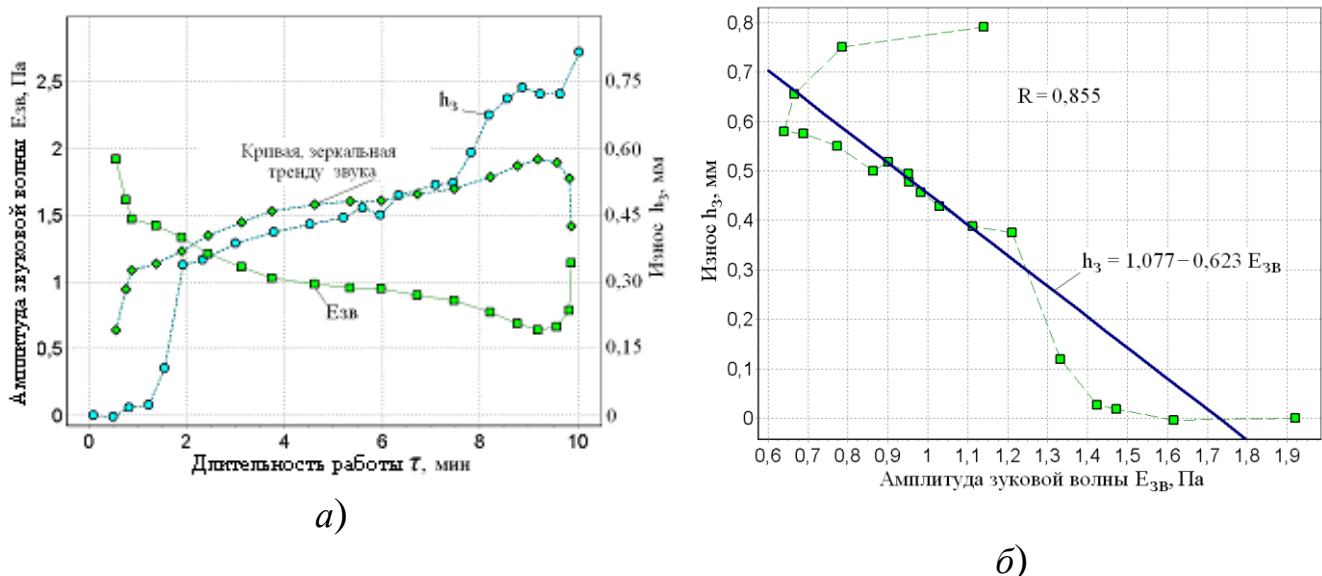


Рисунок 2.4 – Корреляция между износом инструмента и амплитудой звуковой волны, наблюдаемая при работе обрабатывающей системы фрезерного станка: а) кривая износа h_z и тренд звука $E_{зв}$; б) регрессионная зависимость между амплитудой звуковой волны $E_{зв}$ и износом h_z

Высокая степень корреляции величины износа и амплитуды звуковой волны явилась определяющей 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:

– **амплитудой звукового давления** $E_{ЗВ}$ (рис. 2.5) – максимальное дополнительное к атмосферному давлению, возникающее в среде при прохождении звуковых волн, выражаемое в паскалях ($Па = \frac{1Н}{1М^2}$);

– **интенсивностью звука** I – это векторная величина, характеризующая энергию, переносимую за одну секунду звуковыми волнами через расположенную перпендикулярно их направлению площади в $1 м^2$ пространства, окружающего источник звука (рис. 2.6).

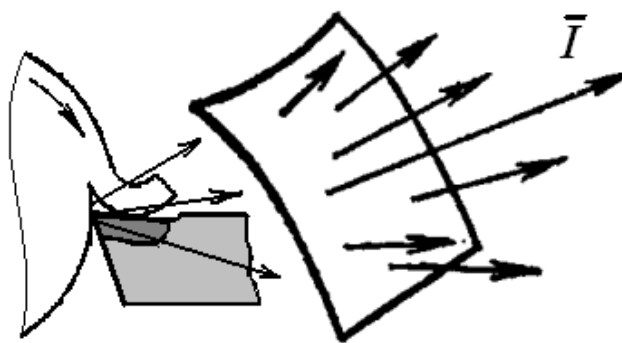
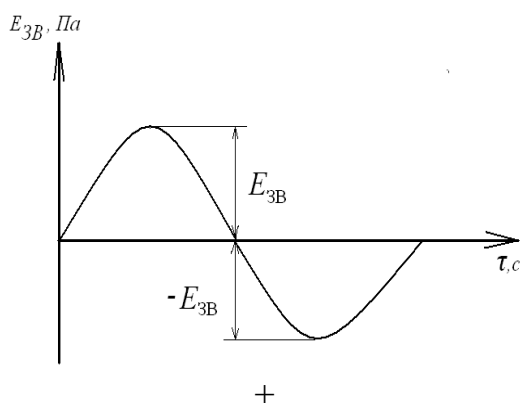


Рисунок 2.5 – Звуковая волна

Рисунок 2.6 – Интенсивность звука

Вектор интенсивности звука \vec{I} равен

$$\vec{I} = E_{ЗВ} \cdot \vec{V}, \quad (2.2)$$

где \vec{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 $\rho \cdot C = 415 кг/(с \cdot м^2)$).

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 измеренной

амплитуды звуковой волны $E_{зв}$ (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).

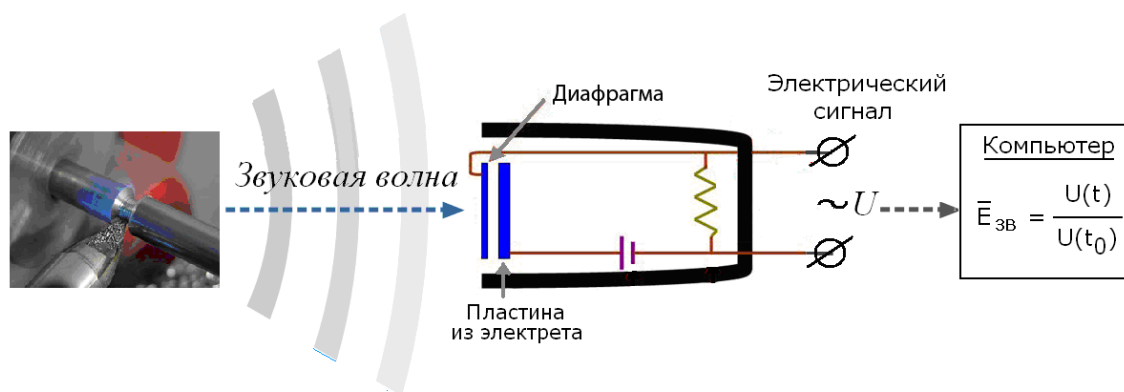


Рисунок 2.7 – Схема регистрации посредством микрофона звуковой волны, возникающей в рабочей зоне обрабатывающей системы

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).

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 :

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

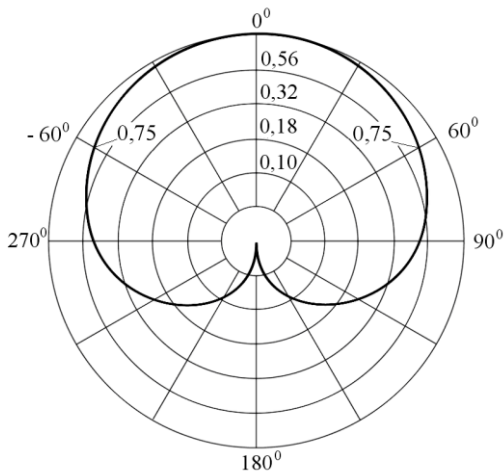


Рисунок 2.8 – Годограф чувствительности микрофона

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 исключить 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 звуковой фон, создаваемый при работе оборудования, расположенного рядом с рабочей зоной контролируемой обрабатывающей системы.

Для исключения мультипликативных помех при контроле динамического поведения обрабатывающих систем следует переходить к относительным величинам $\bar{E}_{ЗВ}$, равным отношению измеряемой величины амплитуды звуковой волны $E_{ЗВi}$ к её величине $E_{ЗВ1}$, зарегистрированной при первом измерении,

$$\bar{E}_{ЗВ} = \frac{E_{ЗВi}}{E_{ЗВ1}}. \quad (2.5)$$

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

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

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

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

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

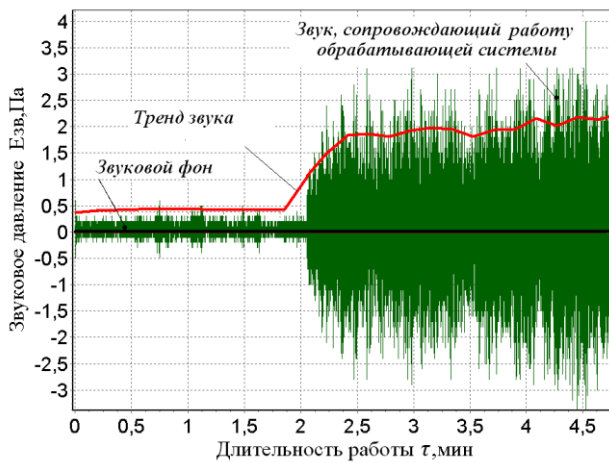


Рисунок 2.9 – Временная реализация звуковой волны

звуковой волны, включающая фоновый участок и участок работы обрабатывающей системы токарного станка (станок 16К20Т1) 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 16К20Т1, а также из волн,

генерируемых при работе под нагрузкой окружающего его аналогичного обрабатывающего станочного оборудования. План размещения станков при проведении экспериментов показан на рис. 2.10.

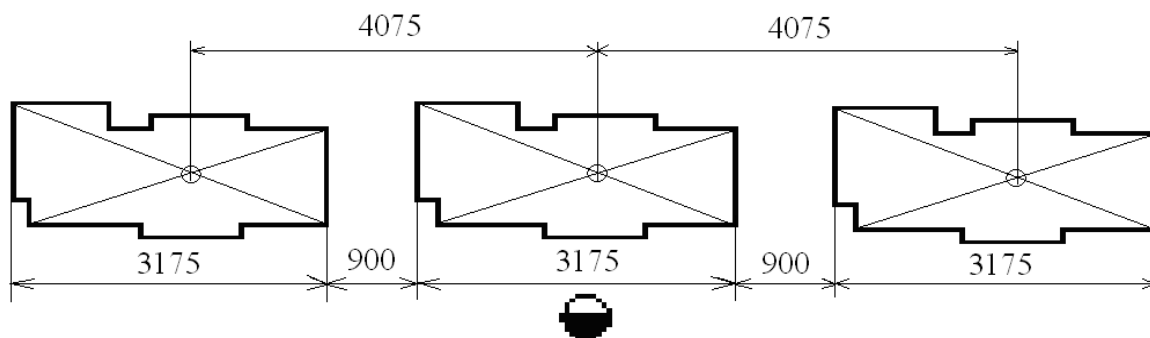


Рисунок 2.10 – План размещения станочного оборудования при проведении эксперимента

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 «Правилем шести децибел» [203], согласно которому изменение величины амплитуды звуковой волны (давления звука) прямо пропорционально изменению расстояния от 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 $\hat{E}_{3B}^{СУМ}$, Па, в точке контроля определяется из следующего выражения:

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

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 %.



Рисунок 2.11 – Размещение микрофона в непосредственной близости от зоны резания

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).

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_{Σ}); амплитуды звуковой волны, очищенной от помехи ($E_{ЗВ}$).

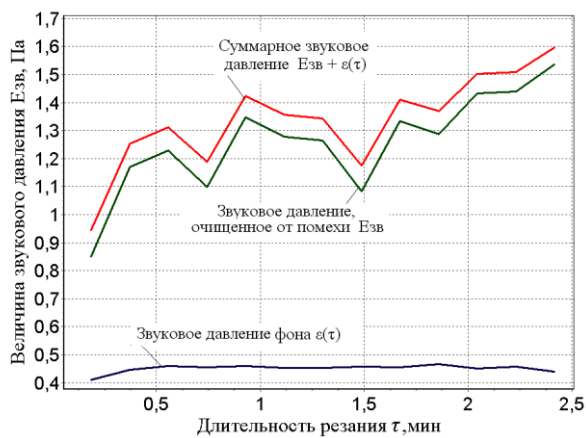


Рисунок 2.12 – Соотношение между амплитудами звуковых волн полезного и суммарного сигналов, а также сигнала помехи

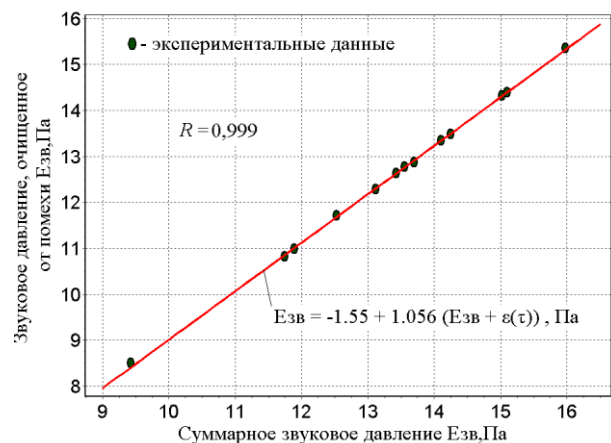


Рисунок 2.13 – Регрессионная зависимость между амплитудами звуковых волн полезного и суммарного (зашумленного) сигналов

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 приведены 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 также 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 $E_{уд}$ и длительностью $\tau_{уд}$ (рис. 2.14).

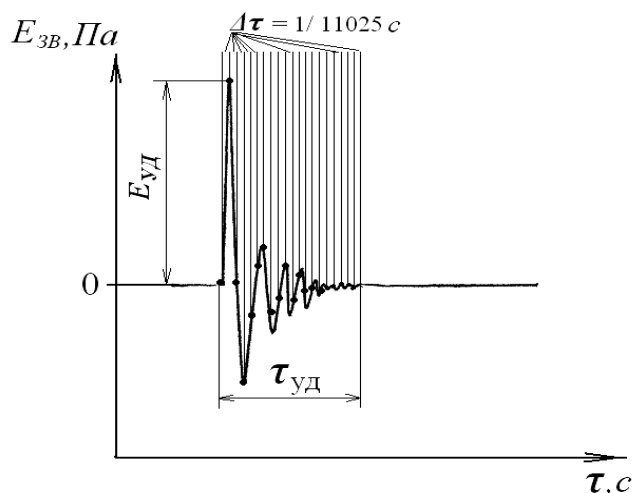


Рисунок 2.14 – Импульс звуковой волны и схема его оцифровки

При поступлении аналогового сигнала, в том числе и импульсного, в компьютер, он подвергается «оцифровке», т.е. дискретному считыванию с определенным шагом по времени $\Delta\tau$. Шаг по времени равен $1/11\,025$ с, где цифра $11\,025$ равна стандартной частоте дискретизации $f_{дис}$, применяемой при цифровой обработке аналоговых сигналов. Число считываемых значений

сигнала $n_{шт}$ совпадает с числом шагов по времени, которое определяется из следующего выражения:

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

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

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

где L – длина стержня, м, эквивалентного по динамическим

характеристикам металлическому предмету генерирующему, например, при падении на пол, импульс звука; C – скорость распространения продольных колебаний в металле, m/c ($C = 5\ 170\ m/c$).

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 $E_{з\phi}$, Pa .

Таблица 2.2 – Изменение длительности удара $\tau_{уд}$ и числа считываемых значений звукового импульса $n_{шт}$ 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
$\tau_{уд} 10^{-4}, с$	0,77	1,16	1,55	1,93	2,32	2,71	3,10	3,48	3,67
$n_{шт}$	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

При наличии помехи величина суммарной амплитуды $E_{з\phi}^{сум}$, Pa , находится как векторная сумма уровня помехи $E_{y\phi}$ и уровня полезного сигнала $E_{з\phi}$. Допустим, что уровень помехи в 10 раз превышает уровень полезного сигнала ($E_{y\phi} = 10 E_{з\phi}$). Примем с существенным запасом, что длительность импульса $\tau_{уд}$ 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 3 072 значения сигнала (считывание осуществляется три раза по 1 024 отсчета). Считываемые значения складываются и усредняются делением образующейся при этом суммы на число слагаемых – 3 072 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, Pa , тогда

$$\hat{E}_{3\phi}^{сум} = \sqrt{\left(\hat{E}_{3\phi} \frac{2972}{3072}\right)^2 + \left(10\hat{E}_{3\phi} \frac{100}{3072}\right)^2} = 1,02\hat{E}_{3\phi}.$$

Как видим, даже при **10-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;
- звуковую волну, 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 заготовку 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 в виду, 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 является техническая документация: сборочные и рабочие чертежи, кинематическая и другие схемы, а также результаты ранее 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 определенная 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 сопротивления – 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 данных систем.

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

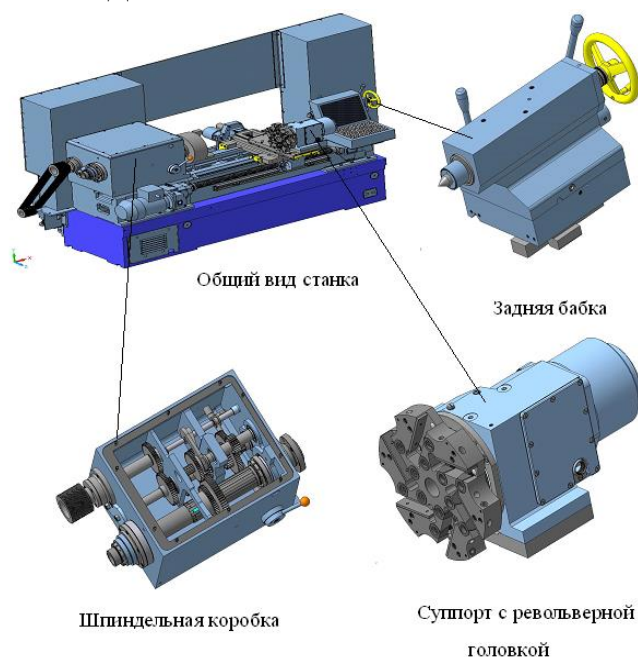


Рисунок 2.15 – Токарный станок модели 16К20Т1

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 правой нижней 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 6Р13 является типичным представителем парка фрезерного станочного оборудования (рис. 2.16). Он предназначен для фрезерования, сверления и выполнения расточных работ заготовок любых форм и из любых материалов - от чугуна до сплавов цветных металлов, пластмасс.

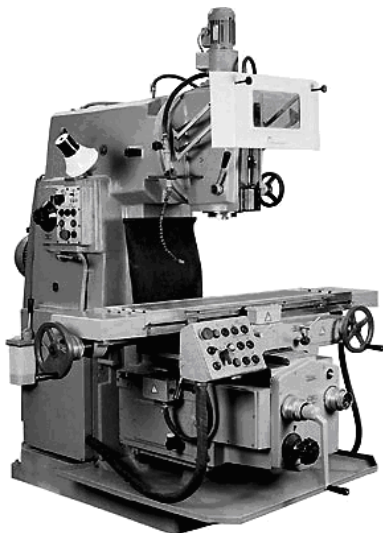


Рисунок 2.16 – Внешний вид вертикально-фрезерного станка 6Р13

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.

Значительная жесткость вертикально-фрезерного станка 6Р13 в сочетании с мощным приводом позволяет использовать фрезы как из быстрорежущей стали, так и с пластинами из твердых сплавов и сверхтвердых материалов.

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. Амплитуда звуковой волны и обобщённые координаты

Амплитуда звуковой волны в среде, окружающей обрабатывающую систему, представляет собой разность между мгновенным значением давления в данной точке среды при наличии звуковых колебаний и статического давления в той же точке при их отсутствии. Иными словами, амплитуда звуковой волны есть переменное давление в среде, обусловленное пространственными акустическими колебаниями. Амплитуда звуковой волны может быть рассчитана через амплитуду колебания поверхности, создающей эту волну [178]:

$$E_{ЗВ} = 2\pi f \cdot \rho c A, \quad (2.11)$$

где $E_{ЗВ}$ – амплитуда звукового давления, Па; f – частота колебаний поверхности, Гц; c – скорость распространения звука в воздушной среде, м/с; ρ – плотность воздушной среды, кг/м³; A – амплитуда колебания поверхности, м.

В нашем случае данной поверхностью является поверхность соответствующего элемента технологической системы, совершающая в процессе резания пространственные колебания. Конструктивно технологическая система станка состоит из отдельных узлов и агрегатов, что позволяет использовать при её моделировании упруго-массовую модель с сосредоточенными параметрами. В виде сосредоточенных масс представлялись также режущее лезвие и корпус инструмента.

В качестве обобщённой координаты, описывающей пространственные колебания центра масс моделируемых элементов технологической системы, рассматривается комплексный радиус – вектор $\bar{\xi}_i$, то есть

$$\bar{\xi}_i = y_i + j \cdot z_i, \quad (2.12)$$

где y_i и z_i – проекции радиус-вектора $\bar{\xi}_i$ соответственно на боковую (радиальную) (OY) и вертикальную (OZ) оси (рис. 2.17), используемые при описании процесса резания и динамики станков [71].

Пример подобного описания для резца показан на рис. 2.17.

Радиус-векторы $\bar{\xi}_i$ характеризуют положение на плоскости YOZ центров масс моделируемых элементов технологической системы. В данной плоскости отмечается наибольшая подвижность рассматриваемого элемента станочного оборудования.

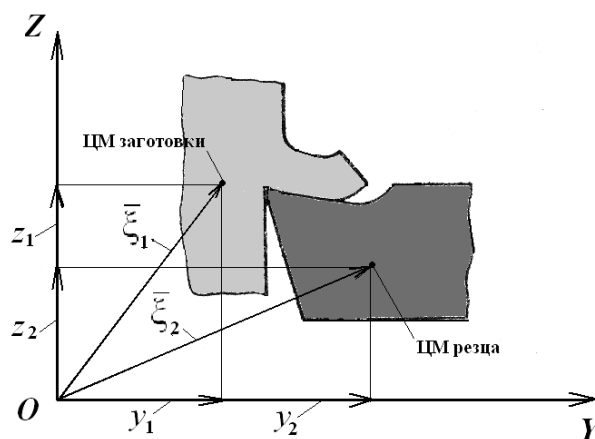


Рисунок 2.17 – Пример обобщённых координат, с помощью которых описывались колебания заготовки и резца

Для достижения поставленной цели – установление закономерностей динамического поведения режущего инструмента и технологической системы в целом при деградации технического состояния инструмента и проявлении этих закономерностей в звуке, сопровождающем процесс резания, анализировалось изменение уровня звука одновременно по частотной и временной координатам. В соответствии с этим звук рассматривался как двумерная функция – функция частоты ($f, Гц$) и функция времени (времени резания $\tau, с$). Для выполнения этого условия в расчетах определялась двумерная функция

$E_{3B}(f, \tau)$, характеризующая изменение одновременно с течением времени частотного спектра и уровня звука. Уровень звукового давления, измеряемый в паскалях, рассчитывался по формуле (2.11), принявшей применительно к сказанному выше следующей вид:

$$E_{3B}(f, \tau) = 2\pi f \cdot \rho c \xi_{CYM}(f, \tau), \quad (2.13)$$

где $\xi_{CYM}(f, \tau)$ – средневзвешенная векторная сумма амплитуд колебаний моделируемых элементов технологической системы, m ; c – скорость звука в воздухе ($c = 340 \text{ м/с}$); ρ – плотность воздуха ($\rho = 2.2 \text{ кг/м}^3$), тогда запишем

$$\xi_{CYM}(f, \tau) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^6 \xi \text{Re}_i(f, \tau)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^6 \xi \text{Im}_i(f, \tau)\right)^2}, \quad (2.14)$$

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

Результаты расчёта величины звукового давления $E_{3B}(f, \tau)$ для наглядности представлялись в виде трёхмерной «амплитудно – частотно – временной» диаграммы.

На практике при диагностическом контроле процесса резания с помощью микрофона контролируется характер изменения суммарной величины звукового давления в зависимости от длительности резания τ , т.е. вместо двумерной функции $E_{3B}(f, \tau)$ определяется значение одномерной функции $E_{3B}^{CYM}(\tau)$. В расчёте эта функция, Па, определялась следующим образом:

$$E_{3B}^{CYM}(\tau) = \rho C \sqrt{\sum_{i=1}^{n/2} [X_{CYM}(f_i, \tau) \cdot (2\pi f_i)]^2}, \quad (2.15)$$

где f_i – частота i -й спектральной составляющей звука ($f_i = \frac{f_K}{n} \cdot i$),

где f_K – частота Котельникова ($f_K = 11\,025 \text{ Гц}$); n – число дискретных составляющих звукового сигнала, подвергавшихся анализу ($n = 2^{12} = 4\,096$); $n/2$ – количество спектральных составляющих звука, уровни которых подвергались суммированию.

График данной одномерной функции представляет собой огибающую временного знакопеременного звукового сигнала.

Порядок определения указанной огибающей в эксперименте рассмотрен ниже.

2.5.2. Моделирование изменения технического состояния инструмента

Моделировался процесс обработки заготовки из конструкционной стали. Известно ([1–3]), что характерным при обработке этих сталей является износ по передней и задней поверхностям. Для моделирования был принят наиболее часто рассматриваемый при чистовом и получистовом точении, когда имеет место обязательное требование к состоянию (шероховатости) обработанной поверхности, износ по главной задней поверхности h_3 , закон изменения которого во времени приведен на рис. 2.18 а ([1–3]).

В точке А кривой износа заканчивается участок приработки инструмента, где его износ характеризуется величиной $h_{3пр}$, и начинается участок нормального (практически линейного) износа. Этот участок заканчивается в точке В, где инструмент достигает

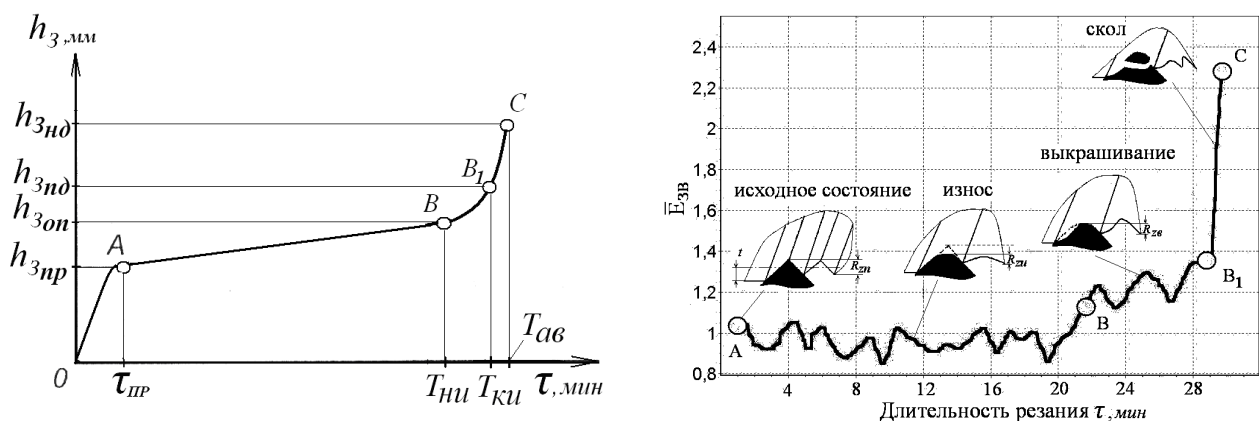


Рисунок 2.18 – Кривая износа режущего инструмента (а) и соответствующий ей тренд звука $\bar{E}_{зв}$, сопровождающего процесс обработки резанием (б)

оптимального по технологическому критерию износа $h_{3он}$.

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. 2.18 а, точка B_1), так как дальше начинается участок, на котором (например, в точке C) степень износа инструмента, т. е. величина $h_{знд}$ становится недопустимо большой (рис. 2.18 а).

В соответствии с изменением кривой износа, как показывает практика резания [19–21] и корреляционная зависимость между трендом амплитуды звуковой волны и кривой износа, рассмотренная в п. 2.1 (рис. 2.3 и 2.4), изменяется и тренд давления звука, сопровождающего процесс резания (рис. 2.18 б). Так, на участке нормального износа амплитуда давления звука относительно стабильная, в то время как на участке катастрофического износа она начинает заметно изменяться (как правило, увеличиваться).

Такое поведение тренда давления 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. 2.18 б). Этому способствует образование при обработке сталей лунки на передней поверхности, что сопровождается кинематическим увеличением переднего угла γ и адекватным уменьшением силы резания (участок нормального износа);

– 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. 2.18 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. 2.18 а, б)).

Рассмотрим моделирование износа инструмента на каждом из участков кривой изнашивания, причем на последнем участке рассмотрим и модель разрушения лезвия инструмента.

2.5.2.1. Участок нормального износа инструмента

Длительность участка нормального износа инструмента связана с его износостойкостью I , являющейся величиной, обратной интенсивности (скорости) изнашивания Δ , т.е. $I = 1/\Delta$. Интенсивность износа, которая является относительной (безразмерной) величиной, можно определить по формуле [1, 2]:

$$\Delta = \frac{h}{L} = \frac{h}{vT}, \quad (2.16)$$

где h - величина износа, мм; L - путь, который проходит инструмент в процессе механической обработки, мм; T - период стойкости, мин.

Здесь и далее под износом понимается износ по главной задней поверхности инструмента h_3 . В период нормального износа (рис. 2.18) (без учета времени приработки (участок OA) и времени катастрофического износа (участок BC)) выражение (2.6) можно представить в следующем виде:

$$J = \frac{h_i - h_0}{(\tau_i - \tau_0) \cdot v} = \frac{h_{H\max} - h_i}{(T - \tau_i) \cdot v} \quad (2.17)$$

где $h_i, h_0, h_{r\max}$ - величины абсолютного износа соответственно текущая, наблюдаемая в момент времени τ_i ; исходная (начальная), фиксируемая после приработки инструмента в течение времени τ_0 ; максимальная, соответствующая предельно допустимому размерному износу инструмента (см. рис. 1.1 б), определяемому при эксплуатации инструмента в течение времени, равному его ресурсу T .

Во временном интервале $\tau_0 - T$, соответствующем времени бездефектной эксплуатации инструмента, интенсивность износа постоянна по величине ($\Delta = const$) и кривая на этом участке (участок AB) приближается к прямой. Поэтому на данном участке выражение (2.17) можно переписать следующим образом:

$$\frac{h_i - h_0}{h_{r\max} - h_i} = \frac{\tau_i - \tau_0}{T - \tau_i}. \quad (2.18)$$

Преобразуем данное равенство относительно текущей величины износа h_i :

$$h_i = h_0 \frac{T - \tau_i}{T - \tau_0} + h_{r\max} \frac{\tau_i - \tau_0}{T - \tau_0}. \quad (2.19)$$

Если пренебречь незначительным по величине исходным износом h_0 или принять эту величину за точку отсчёта, то выражение (2.9) можно упростить:

$$h_i = h_{r\max} \frac{\tau_i - \tau_0}{T - \tau_0}. \quad (2.20)$$

Износ приводит к изменению радиуса r_ϵ при вершине инструмента:

$$r_{\epsilon i} = r_\epsilon + h_r, \quad (2.21)$$

где r_ϵ – начальная величина радиуса вершины лезвия; h_r – величина изменения радиуса вершины лезвия вследствие его износа по задним (главной и вспомогательной) поверхностям (радиальный износ (см. рис. 1.1 з)).

Изменение радиуса вершины лезвия вследствие износа с учетом (2.10) можно переписать в следующем виде:

$$r_{\epsilon i} = r_\epsilon + h_{r\max} \frac{\tau - \tau_0}{T_{НИ} - \tau_0}, \quad (2.22)$$

где $h_{r\max}$ – предельно допустимая величина радиального износа, равная разности между радиусом при вершине острозаточенного инструмента ($r_{И0}$) и радиусом при вершине затупленного инструмента ($r_{И\max}$); $T_{НИ}$ – ресурс инструмента, ограничиваемый предельно допустимым износом его лезвия (точка B на рис. 2.18).

Изменение радиуса вершины лезвия сопровождается изменением высоты микронеровностей (шероховатости) на обработанной поверхности (рис. 2.19 а, б, в).

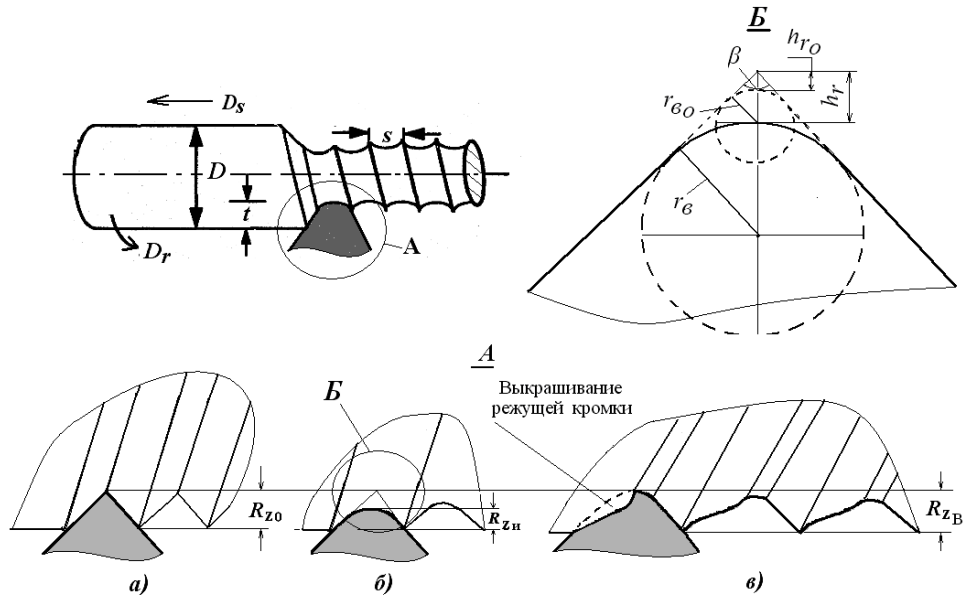


Рисунок 2.19 – Изменение геометрии лезвия инструмента по мере его износа: *а)* острозаточенный инструмент; *б)* инструмент на участке стационарного износа; *в)* инструмент на участке катастрофического износа, когда имеет место выкрашивание режущей кромки

Параметр $h_{r\max}$ удобно выразить через начальное значение радиуса при вершине r_ϵ , т. е.

$$h_{r\max} = r_{\epsilon\max} - r_\epsilon = \gamma r_\epsilon - r_\epsilon = (\gamma - 1) r_\epsilon, \quad (2.23)$$

где $\gamma = 1,1; 1,2; 1,3; \dots$

С учетом (2.23) выражение (2.22) запишется в следующем виде:

$$r_{\epsilon i} = r_\epsilon + (\gamma - 1) r_\epsilon \frac{\tau - \tau_0}{T_{\text{НИ}} - \tau_0}. \quad (2.24)$$

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 2 000 МПа), высоких температурах (до 1 000 °С и более), доходящих до температур плавления обрабатываемого материала, и значительных действительных площадях контакта. Величина износа в основном зависит от скорости резания, толщины среза и величины переднего угла режущего клина. Износ происходит при сложном взаимном влиянии вибраций (усталостное разрушение), трения и адгезии, приводящих к появлению и разрушению наростов и, следовательно, к

интенсификации процесса разрушения поверхностных слоев режущего клина.

Кроме этого, процесс трения при резании протекает между двумя относительно чистыми поверхностями: ювенальной, только что образованной поверхностью стружки, и поверхностями инструмента, непрерывно очищающимися сходящей стружкой, поверхностью резания и обработанной поверхностью. При этом трущиеся поверхности скользят относительно друг-друга с относительно большими скоростями.

Таким образом, модель износа инструмента при резании является достаточно сложной и многопараметрической. Однако в рассматриваемом случае интерес могут представлять не столько количественные, сколько качественные трендовые характеристики изменения износа инструмента во времени. Для решения данной задачи можно ограничиться упрощённой моделью (2.23), являющейся функцией времени. Для учета нелинейного характера поведения износа, мм, во времени введём в функцию (2.23) показатель степени α :

$$r_{oi} = r_e + (\gamma - 1) r_e \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{ни} - \tau_0} \right)^\alpha. \quad (2.25)$$

2.5.2.2. Участок катастрофического износа (разрушения) инструмента

На участке катастрофического износа инструмент испытывает интенсивный износ, сопровождающийся, например, выкрашиванием лезвия, изменяющего его микрогеометрию, а также происходит заключительный этап развития трещин, приводящих к сколу лезвия. Рассмотрим эти два процесса отдельно.

Выкрашивание режущих кромок лезвия

Выкрашивание главной режущей кромки приводит к искажению ее микрогеометрии и, в частности, может вызывать уменьшение радиуса при вершине инструмента, приводящему, в конечном счете, к ухудшению шероховатости обработанной поверхности (рис. 2.19 в)). Всё это происходит на фоне постоянного износа, оказывающего воздействие

на радиус при вершине инструмента, т. е. увеличивающего его. Эти два процесса можно описать следующим образом:

$$r_{ei} = (r_g + h_r) - h_B, \quad (2.26)$$

где h_r, h_B —величины изменения радиуса вершины лезвия, соответственно, вследствие нормального и катастрофического износов в результате выкрашивания режущих кромок (главной и вспомогательной).

Выражение в скобках характеризует увеличение радиуса вследствие износа лезвия (формула (2.24)). Запишем выражение для параметра h_B , характеризующего уменьшение радиуса при вершине инструмента при катастрофическом износе, вследствие, например, выкрашивания:

$$h_B = h_{B \max} \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{KH} - \tau_0} \right), \quad (2.27)$$

При этом параметр $h_{B \max}$ представляет собой разницу между величиной радиуса, реализуемой при нормальном износе (в точке B , рис. 2.18) резца $(r_g + h_p)$ и его минимальной величиной, реализуемой при наступлении предельно допустимой степени катастрофического износа (точка B_1 , рис. 2.18) $r_{g \min}$. Выразим этот параметр в долях от величины радиуса $(r_g + h_r)$ и запишем выражение для параметра $h_{B \max}$:

$$h_{B \max} = (r_g + h_r) - r_{g \min} = (r_g + h_r) - \eta(r_g + h_r) = (r_g + h_r) \cdot (1 - \eta). \quad (2.28)$$

Запишем равенство (2.26) с учётом (2.27) и (2.28):

$$r_{ei} = (r_g + h_r) \left[1 - (1 - \eta) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{KH} - \tau_0} \right)^\alpha \right]. \quad (2.29)$$

Первую скобку в данном выражении, характеризующую увеличение радиуса вследствие износа, заменим соотношением (2.25):

$$r_{ei} = \left[r_g + (\gamma - 1) r_g \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{HI} - \tau_0} \right)^\alpha \right] \cdot \left[1 - (1 - \eta) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{KH} - \tau_0} \right)^\beta \right]. \quad (2.30)$$

Выражение (2.29) представляет собой модель изменения с течением времени радиуса при вершине резца на участках нормального и катастрофического видов износа лезвия инструмента.

На рис. 2.20 приведен характер изменения радиуса r_{ei} , рассчитанный для типового случая, когда $T_{НИ} = 150$ мин, $T_{КИ} = 60$ мин, $\gamma = 5$, $\eta = 0,1$, $\alpha = 0,3$, $\beta = 1,2$.

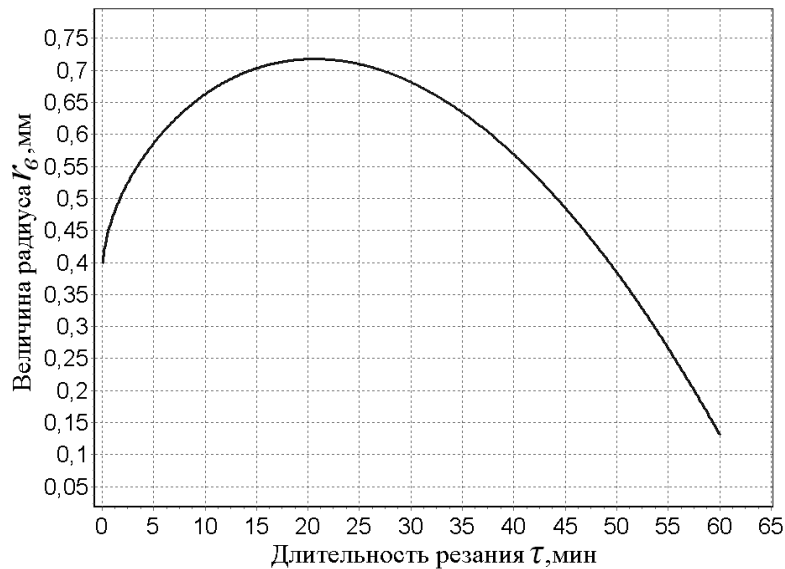


Рисунок 2.20 – **Изменение радиуса при вершине резца по мере износа и выкрашивания лезвия**

Из рис. 2.20 следует, что к 20 мин резания радиус при вершине инструмента вследствие его износа достигает максимума, а затем в процессе катастрофического износа, сопровождающегося выкрашиванием лезвия, радиус начинает уменьшаться и на 60 мин резания составляет величину порядка, 0,1 от исходного r_e . На практике из-за разнообразного сочетания 6 парам. модели (2.30), отражающих в определённой мере разнообразие как режимов резания, так и сочетаний материалов заготовки и инструмента, характер данной кривой может быть так же весьма разнообразным.

Примечание. Увеличение частоты выкрашиваний в процессе катастрофического износа, несомненно, сопровождается усилением вибрационных процессов, чему способствует и ослабление демпфирующего действия площадок износа в связи с уменьшением площади контакта лезвия с обрабатываемой деталью при уменьшении радиуса вершины лезвия. Именно этим можно объяснить резкое возрастание уровня звука и ухудшения шероховатости обработанной поверхности на участке катастрофического износа лезвия, чему в

значительной степени способствуют и возникающие при этом в нём трещины и его сколы (см. рис. 2.23 и рис. 2.29).

Скол лезвия

Причиной скола является процесс объединения в одну магистральную трещину исходных микротрещин, имеющих и появляющихся в лезвии в процессе эксплуатации инструмента. Увеличение длины трещины приводит к уменьшению высоты лезвия H_0 (рис. 2.21), что влечёт за собой уменьшение жёсткости лезвия $K_l(\tau)$.

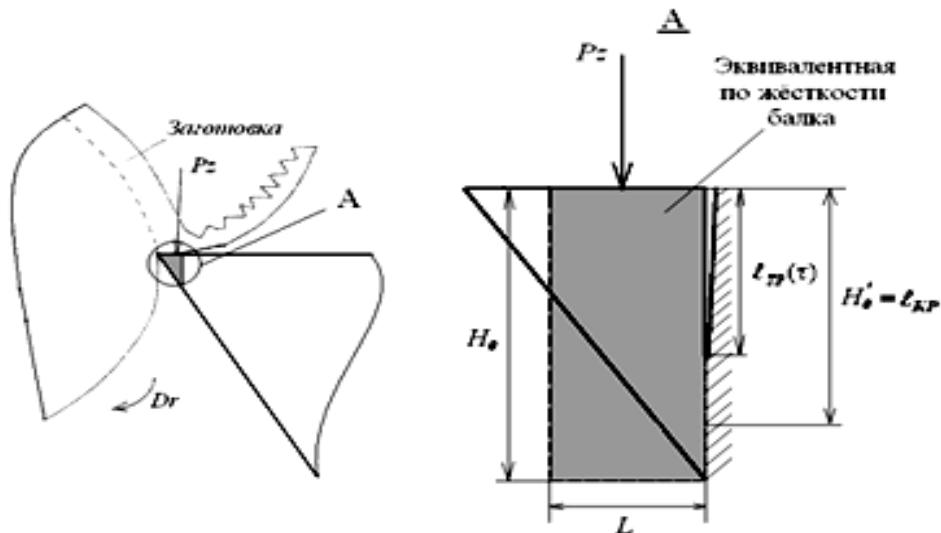


Рисунок 2.21 – Расчетная схема лезвия инструмента при наличии у него вблизи режущей кромки трещины

Лезвие, вблизи от его режущей кромки, представлялось в виде эквивалентной по жёсткости консольной балки (рис. 2.21), исходная жёсткость которой ($K_{КБ}$) равнялась жёсткости лезвия $K_l(0)$ при отсутствии в нём трещины.

Жёсткость эквивалентной консольной балки, $H/м$, можно описать следующим известным выражением [179]:

$$K_{КБ} = \frac{E \cdot B \cdot H_0^3}{4 L^3}, \quad (2.31)$$

где E – модуль упругости твёрдого сплава ($E = 6,1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$); параметр B – ширина эквивалентной балки; H_0 – высота балки, эквивалентной по жёсткости лезвию при отсутствии в нём трещины; L – длина балки (рис. 2.21).

Для определённости в расчётах параметр H_0 принимался равным максимально допустимому износу по задней поверхности резца

($h_3 = h_{3\text{дон}}$). При моделировании полагали, что развитие трещины ($\ell_{Tp}(\tau)$) приводит к уменьшению высоты балки ($H(\tau) = H_0 - \ell_{Tp}(\tau)$), что, в свою очередь, уменьшает её жёсткость. Изменение жёсткости лезвия $K_L(\tau)$ во времени предложено описывать следующим выражением:

$$K_L(\tau) = K_L(0) \cdot \left(\frac{H(\tau)}{H_0} \right)^3 = K_L(0) \cdot \left(\frac{H_0 - \ell_{Tp}(\tau)}{H_0} \right)^3 = K_L(0) \cdot \left(1 - \frac{\ell_{Tp}(\tau)}{H_0} \right)^3, \quad (2.32)$$

где $K_L(0)$ – исходная жесткость лезвия при отсутствии в нем трещины ($K_L(0) = K_{KB}$), H/m ; $\ell_{Tp}(\tau)$ – текущая длина трещины ($\ell_{Tp}(\tau) = H'_0 \cdot e^{\ln 1000 \left(\frac{\tau}{T_c} - 1 \right)}$, мм, [30]); H'_0 – величина скола, равная критической длине трещины ℓ_{KP} (рис. 2.21), при которой происходит неконтролируемое развитие трещины и разрушение режущей кромки [44] (в расчете полагалось, что $H'_0 = H_0$); T_c – ресурс режущего инструмента, равный его наработке до скола лезвия, мин.

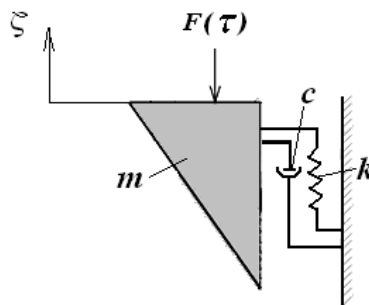


Рисунок 2.22 – Динамическая модель, описывающая поведение откалывающейся части лезвия

Динамическая модель, описывающая поведение откалывающейся части лезвия, показана на рис. 2.22.

Колебания модели, имеющей одну степень свободы, описывались дифуравнением (2.33). Изменение жёсткости модели во времени происходило в соответствии с уравнением (2.32).

$$m\ddot{\zeta} + c\dot{\zeta} + k\zeta = F(t). \quad (2.33)$$

Инерционный m , демпфирующий c и жесткостной k параметры модели приведены в первом столбце табл. А1.

Поведение нагружаемой части лезвия рассматривалось до момента её отделения от резца, т.е. до момента скола.

На рис. 2.23 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 по мере увеличения выкрашиваний режущей кромки развития в лезвии трещины.

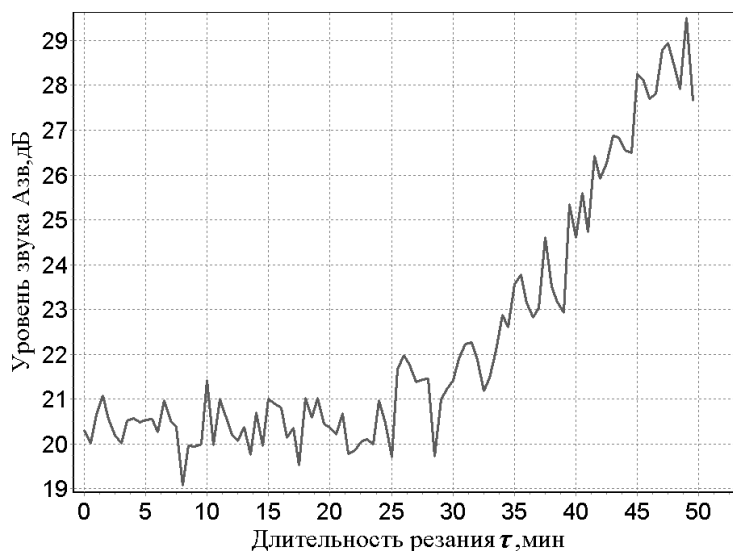


Рисунок 2.23 – Изменение уровня звука, генерируемого при колебании лезвия по мере развития в нём трещины

2.5.3. Определение параметров моделей

Взаимное расположение инерционных и упругодемпфирующих элементов моделей определялось конструктивно-компоновочной схемой моделируемых технологических систем. Величины этих параметров определялись расчетным способом с последующим уточнением их значений, выполняемым методом идентификации параметров модели [180]. Расчетным способом определялись лишь массы режущих лезвий, прилегающих к режущей кромке инструмента и подвергающихся при этом наиболее интенсивному нагружению.

Так, в качестве массы лезвия резца или зуба фрезы m_1 в модели рассматривалась масса части лезвия, прилегающая к режущей кромке (режущая часть лезвия). При этом величина m_1 принималась равной массе параллелепипеда (рис. 2.24), 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 для обеспечения условия гарантированного запаса принималась площадь пятна контакта лезвия со срезаемым слоем равной площади поперечного сечения срезаемого с заготовки слоя материала $f = t \cdot S = a \cdot b$ (рис. 2.24).

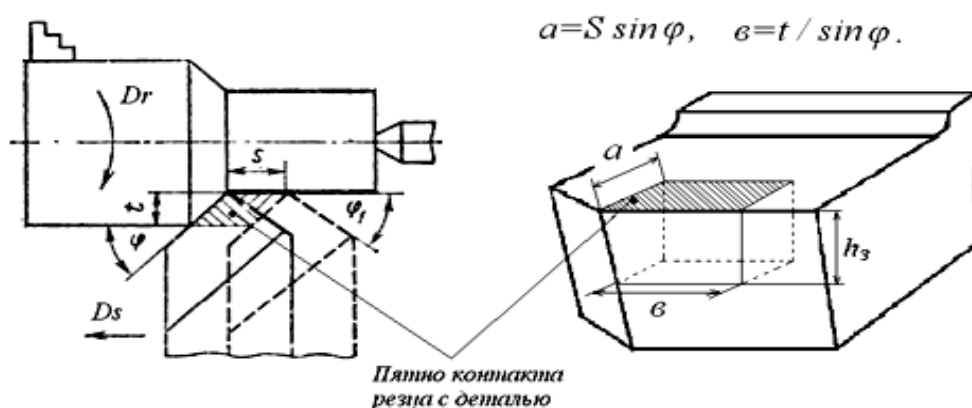


Рисунок 2.24 – Объем лезвия, испытывающий силовое воздействие при резании

В соответствии с этим масса m_1 определялась по следующей формуле:

$$m_1 = (t \cdot S \cdot h_3 \cdot \rho), \quad (2.34)$$

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

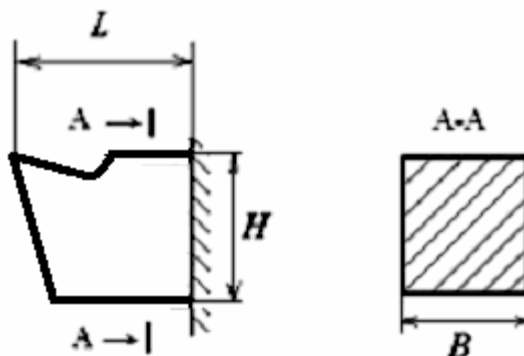


Рисунок 2.25 – Расчётная схема стержня державки

В качестве массы державки реза m_2 , кг, рассматривалась масса её консольной части (рис. 2.25):

$$m_2 = L \cdot H \cdot B \cdot \rho. \quad (2.35)$$

Оценка частоты собственных (парциальных) колебаний лезвия вблизи режущей кромки f_1 проводилась в предположении, что оно представляет собой упругое тело объёмом v . В этом случае низшая частота, f_1 , которая может возникнуть в данном объёме, определялась по следующей формуле [181]:

$$f_1 = c_{3B} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{2\pi \cdot v}}, \quad (2.36)$$

где c_{3B} – скорость распространения упругих поперечных волн в твердом сплаве ($c_{3B} = 3230$ м/с [181]); v – объём лезвия вблизи режущей кромки ($v = t \cdot S \cdot h_3$).

Парциальная частота державки резца f_2 , f_2 , определялась как частота продольных колебаний стержня по следующей формуле [179]:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \left(n + \frac{1}{2} \right) \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{E F}{\mu L^2}}, \quad (2.37)$$

где n – число узлов (для консольного закрепления $n = 1$); μ – погонная масса стержня, кг/м; F – площадь поперечного сечения ($F = H \cdot B$, м²); E – модуль упругости стали ($E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м²).

Параметры B , H и L указаны на рис. 2.25. В качестве массы зуба фрезы m_3 в модели рассматривалась масса части зуба, которая прилегает к режущей кромке, и непосредственно осуществляющей процесс резания.

Расчёты выполнялись по следующей формуле:

$$m_3 = S t h_3 \rho,$$

где S – подача на зуб ($S = 0.08$ мм/зуб); t – глубина резания ($t = 3$ мм); h_3 – предельно допустимая величина износа по задней поверхности зуба ($h_3 = 0.4$ мм [64]); ρ – плотность стали ($\rho = 7.8 \cdot 10^3$ кг/см³).

Расчёт дал значение массы m_3 , равное $0,75 \cdot 10^{-6}$ кг.

Значения приведенных масс, парциальных частот и добротностей Q_i парциальных резонансов остальных моделируемых узлов обеих станков, приведенных в табл. 2.4 и 2.5, уточнялись, как уже было сказано выше, методом идентификации параметров модели. Процедура идентификации заключалась в минимизации невязки

между фактическим $E_{38}^{\phi}(\omega)$ и расчетным $E_{38}^p(\omega)$ спектрами звукового давления:

$$U = \sum_{i=1}^n \left(E_{38}^{\phi}(\omega_i) - E_{38}^p(\omega_i) \right)^2, \quad (2.38)$$

где n – число частот фактического и расчетного спектров, на которых осуществлялось их сравнение ($n = 4\ 096$ *шт.*).

Для идентификации использовался фактический спектр, характеризующий звук, сопровождающий процесс металлообработки при инструменте с величиной $h_3 = 0$, т. е. при отсутствии у него как площадки износа, так и каких-либо дефектов. Фактические спектры определялись в экспериментах, описанных в разд. 5.

Для исследования динамики технологической системы предложено её размыкание, хотя в действительности она является замкнутой динамической системой. Замыкается она в точке контакта режущего инструмента с обрабатываемой поверхностью детали. Для «размыкания» системы необходимо ввести в точке контакта действующее там контактное усилие.

2.5.4. Определение параметров контактного взаимодействия заготовки и инструмента

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). Однако разные по природе колебания одинаковы в одном – они оставляют вибрационный след на обработанной поверхности, периодически изменяя радиус впадины неровности на поверхности детали r_d на детали по сравнению с радиусом на лезвии инструмента $r_{и}$, формирующим ее (рис. 2.26 *a*). Образно выражаясь, заготовка, например, при токарной обработке, играет роль своеобразного «воскового валика», на котором записывается «мелодия» звука, сопровождающего процесс резания.

Этот вибрационный след, называемый шероховатостью (поперечной, винтовой, рис. 2.26 б), стандартизирован под названием профиль шероховатости (рис. 2.27 [182]).

Данный след 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 технологической системы, абстрагируясь от

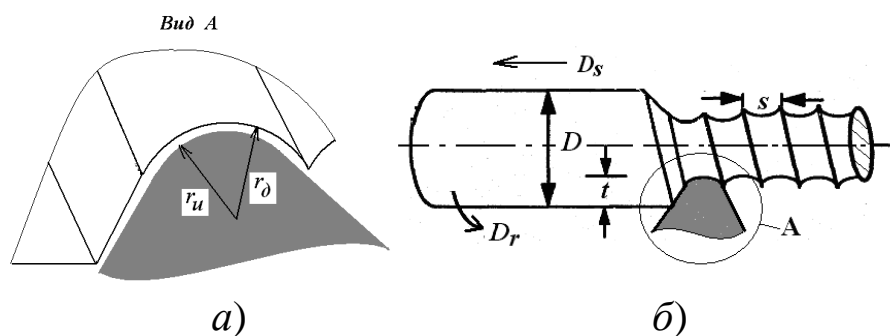


Рисунок 2.26 – Вибрационный след на обработанной поверхности детали

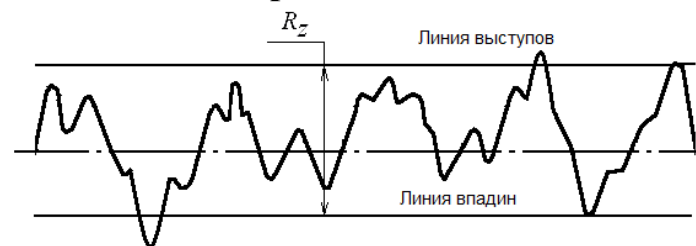


Рисунок 2.27 – Профиль шероховатости

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 механические колебания технологической 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 $P_{кон}$ и контактной жёсткостью $K_{кон}$.

2.5.4.1. Определение параметров контактного взаимодействия

Контактное усилие, H , определяется в соответствии с теорией Герца по следующей формуле [181]:

$$P_{\text{кон}} = \lambda \Delta^{1,5}, \quad (2.39)$$

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

$$\lambda = \frac{4}{3} \left(\frac{E_D E_H}{(1 - \mu_D^2) E_H + (1 - \mu_H^2) E_D} \right) \sqrt{\frac{-r_D r_B}{-r_D + r_B}}, \quad (2.40)$$

где E_D и E_H – модуль упругости соответственно материала заготовки ($E_D = 2.1 \cdot 10^{11}$ МПа) и инструментального материала ($E_H = 6.3 \cdot 10^{11}$ МПа); μ_D и μ_H – коэффициент Пуассона материала заготовки и инструментального материала (в расчетах было принято, что они равны величине 0,28); r_D и r_B – радиус следа от резца на обрабатываемой поверхности заготовки и радиус при вершине инструмента ($r_B = 0,4\text{--}2,4$ мм [1]).

Радиус следа от резца r_D имеет знак минус, т. к. он характеризует вогнутую поверхность. В расчете было принято, что его величина на 10% превышает радиус при вершине резца r_D ($r_D = 1,1 r_B$). Таким образом, были учтены взаимные колебания инструмента и заготовки, исключаяющие точное копирование следом инструмента геометрии его режущей части. С учетом этого допущения, а также полагая, что коэффициенты Пуассона материалов заготовки и режущей пластины примерно равны, выражение (2.40) примет следующий вид:

$$\lambda = \frac{4}{3(1 - \mu^2)} \left(\frac{E_D E_H}{E_H + E_D} \right) \sqrt{11 r_B}. \quad (2.41)$$

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

Шероховатость, мкм, и радиус, мм, при вершине инструмента

связаны между собой следующим выражением [5]:

$$R_z = 125 \cdot \frac{S^2}{r_B}, \quad (2.42)$$

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. 2.28) и последующим разложением её в ряд Тейлора с удержанием первого линейного члена ряда:

$$R_z = r_B - r_B \sqrt{1 - \frac{S^2}{4r_B^2}} \approx \frac{S^2}{8r_B}, \quad (2.43)$$

где R_z – расчетная величина неровностей, мм; r_B – радиус вершины резца до начала его работы, мм; S – подача, мм/об.

С учетом (2.30) выражение (2.42) примет следующий вид:

$$R_z = 125 \cdot \frac{S^2}{\left[r_B + (\gamma - 1) r_B \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{НИ} - \tau_0} \right)^\alpha \right] \cdot \left[1 - (1 - \eta) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{КИ} - \tau_0} \right)^\beta \right]}. \quad (2.44)$$

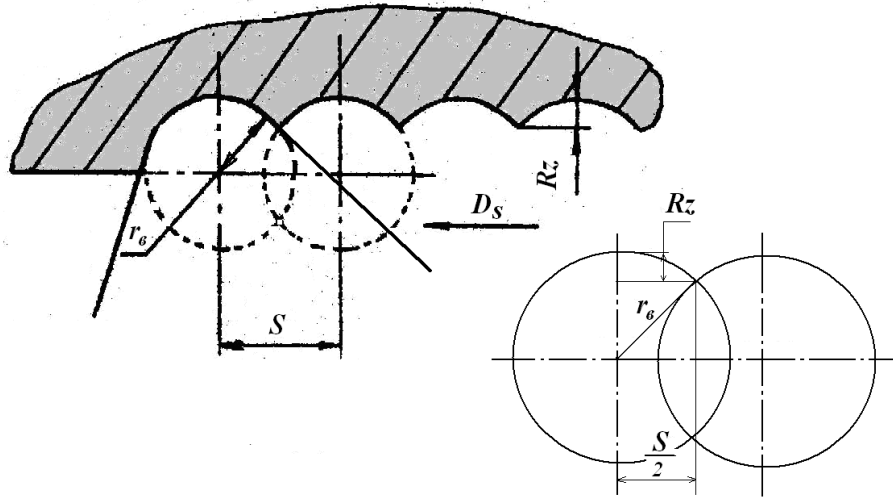


Рисунок 2.28 — Схема образования профиля обработанной поверхности при $r_B \geq S$

Проанализируем изменение шероховатости с течением времени, 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 её исходной величине ($R_{Z0} = 125 \cdot \frac{S^2}{r_{B0}}$), избавившись одновременно от коэффициента размерности 125, а также величин подачи S и радиуса r_B , т.е.

$$\bar{R}_Z = \frac{1}{\left[1 + (\gamma - 1) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{НИ} - \tau_0} \right)^\alpha \right] \cdot \left[1 - (1 - \eta) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{КИ} - \tau_0} \right)^\beta \right]} \quad (2.45)$$

График изменения функции (2.44) показан на рис. 2.29. Расчёт производился для следующих параметров: $T_{НИ} = 150$ мин, $T_{КИ} = 60$ мин, $\gamma = 5$, $\eta = 0,1$, $\alpha = 0,6$, $\beta = 1,5$.

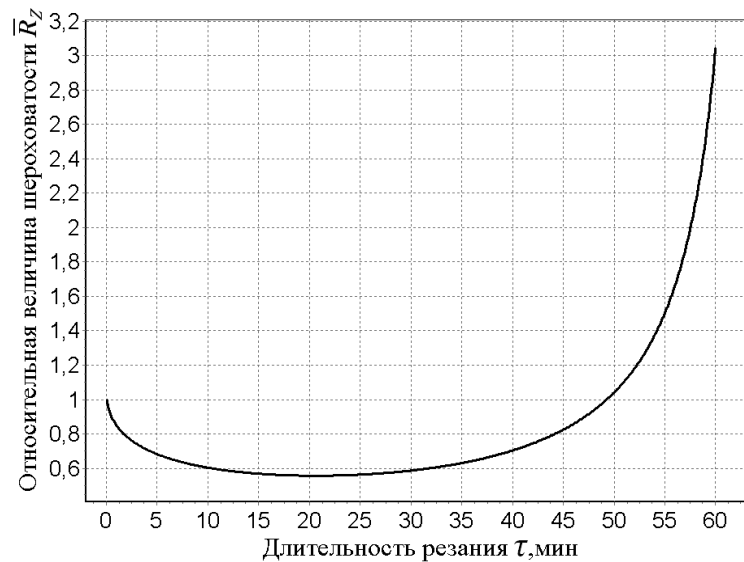


Рисунок 2.29 –Изменение шероховатости с течением времени по мере изменения состояния режущего лезвия

Как следует из графика, шероховатость вначале до 20 мин по мере увеличения радиуса при вершине резца уменьшается, а потом в зоне катастрофического износа лезвия начинает возрастать, достигая к 50 мин своего исходного значения. К 60 мин шероховатость уже в три раза превышает своё исходное значение, имевшее место при острозаточенном резце.

С учетом (2.42) и (2.41) выражение (2.39) примет следующий вид:

$$P_{кон} = \frac{1}{5(1 - \mu^2)} \left(\frac{E_D E_H}{E_H + E_D} \right) \frac{S^3}{r_B} \quad (2.46)$$

Из (2.33) следует, что контактное усилие в значительной степени зависит от подачи S . Подставим в (2.46) выражение (2.30),

учитывающее изменение радиуса, мм, при вершине резца в процессе его эксплуатации,

$$P_{\text{кон}} = \frac{1}{5(1-\mu^2)} \left(\frac{E_d E_{II}}{E_{II} + E_d} \right) \frac{S^3}{\left[r_B + (\gamma-1) r_B \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{\text{НИ}} - \tau_0} \right) \right] \cdot \left[1 - (1-\eta) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{\text{КИ}} - \tau_0} \right) \right]}. \quad (2.47)$$

Разделив (2.47) на (2.46) и полагая в (2.46), что $r_e = r_{e0}$, получим выражение для относительной величины контактного усилия $\bar{P}_{\text{кон}}$:

$$\bar{P}_{\text{кон}} = \frac{1}{\left[1 + (\gamma-1) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{\text{НИ}} - \tau_0} \right) \right] \cdot \left[1 - (1-\eta) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{\text{КИ}} - \tau_0} \right) \right]}. \quad (2.48)$$

Как видим, выражения (2.48) и (2.45) идентичны, следовательно, контактное усилие и шероховатость изменяются идентично (рис. 2.29) по мере изменения состояния режущего лезвия инструмента.

2.5.4.2. Определение параметров контактной жёсткости

Контактная жёсткость $K_{\text{кон}}$, Н/м, определялась как производная от контактного усилия по величине взаимного сближения инструмента и заготовки Δ :

$$K_{\text{кон}} = \frac{dP_{\text{кон}}}{d\Delta} = 1,5 \lambda \Delta^{0,5}. \quad (2.49)$$

С учётом (2.42) и (2.41) это выражение примет следующий вид:

$$K_{\text{кон}} = \frac{2,35}{(1-\mu^2)} \left(\frac{E_d E_{II}}{E_{II} + E_d} \right) S. \quad (2.50)$$

Из (2.50) следует, что контактная жёсткость линейно зависит от подачи и не чувствительна к изменению геометрии лезвия.

2.5.4.3. Определение параметров возмущающего воздействия, действующего на модель технологической системы

Выше было показано, что контактное усилие является функцией времени, т. к. его величина измеряется с течением времени по мере изменения состояния лезвия инструмента. Однако если его рассматривать в виде динамического воздействия на

металлообрабатывающую обрабатывающую систему, то его необходимо рассматривать и как функцию частоты колебаний динамической системы станка.

Другими словами, входное воздействие, обозначим его величиной P_{BK} , является одновременно функцией исходной величины контактного усилия, частоты и времени:

$$P_{BK}(P_{KOH0}, \tau, \omega) = P_{KOH0} \cdot K_{\tau} \cdot K_{\omega}, \quad (2.51)$$

где $P_{KOH0} = \frac{1}{5(1-\mu^2)} \left(\frac{E_d E_H}{E_H + E_d} \right) \frac{S^3}{r_{B0}}$ – исходное значение контактного

усилия, фиксируемого при острогатованном ($r_B = r_{B0} = 0$) резце;

$K_{\tau} = \bar{P}_{KOH} = \frac{1}{\left[1 + (\gamma - 1) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{HH} - \tau_0} \right) \right] \cdot \left[1 - (1 - \eta) \left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{KH} - \tau_0} \right) \right]}$ – временной множитель,

равный безразмерному контактному усилию (2.47), где γ, T_H, η, T_B – параметры временного множителя, определяемые при идентификации параметров звуковой волны (рис. 2.30),

сопровождающего процесс резания; $K_{\omega} = \frac{\omega_i^2}{\sqrt{(\omega_{III}^2 - \omega_i^2)^2 + \frac{\omega_{III}^2}{Q^2} \omega_i^2}}$ –

частотный множитель, где ω_i – переменная круговая частота возмущающего воздействия; ω_{III} – постоянная круговая частота возмущающего воздействия, равная частоте оборотов шпинделя; Q – степень усиления возмущающего воздействия на частоте ω_{III} , $Q = 1, 2, 3, \dots, 15$.

Период частоты ω_{III} , c , равен:

$$T_{III} = \frac{1}{2\pi} \frac{Sn}{V} \cdot 10^{-3}, \quad (2.52)$$

где S – подача, мм/об; V – скорость резания, м/мин; n – частота вращения шпинделя, об/мин.

Соответственно частота ω_{III} , 1/с, будет равна величине, обратной периоду,

$$\omega_{III} = 2\pi \cdot \frac{n}{60}. \quad (2.53)$$



Рисунок 2.30 – Изменение тренда относительной величины звукового давления в зависимости от длительности резания

На рис. 2.30 приведены графики, характеризующие изменение тренда относительной величины амплитуды звуковой волны $\bar{E}_{ЗВ}$ (далее по тексту параметра $\bar{E}_{ЗВ}$). Параметр $\bar{E}_{ЗВ}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$\bar{E}_{ЗВ} = \frac{E_{ЗВ}(\tau)}{E_{ЗВ}(\tau_0)}, \quad (2.54)$$

где $E_{ЗВ}(\tau_0), E_{ЗВ}(\tau)$ – амплитуда звуковой волны, измеряемая соответственно в исходный и текущий моменты времени.

Сравнение трендов параметра $\bar{E}_{ЗВ}$, описывающих два различных процесса резания, практически идентично. Это свидетельствует о том, что влияние контактного усилия $P_{БК}$ на поведение тренда параметра $\bar{E}_{ЗВ}$ не зависит от вида процесса резания.

На рис. 2.31 показана трёхмерная диаграмма, иллюстрирующая изменение возмущающего усилия $P_{БК}$ по частоте и по времени.

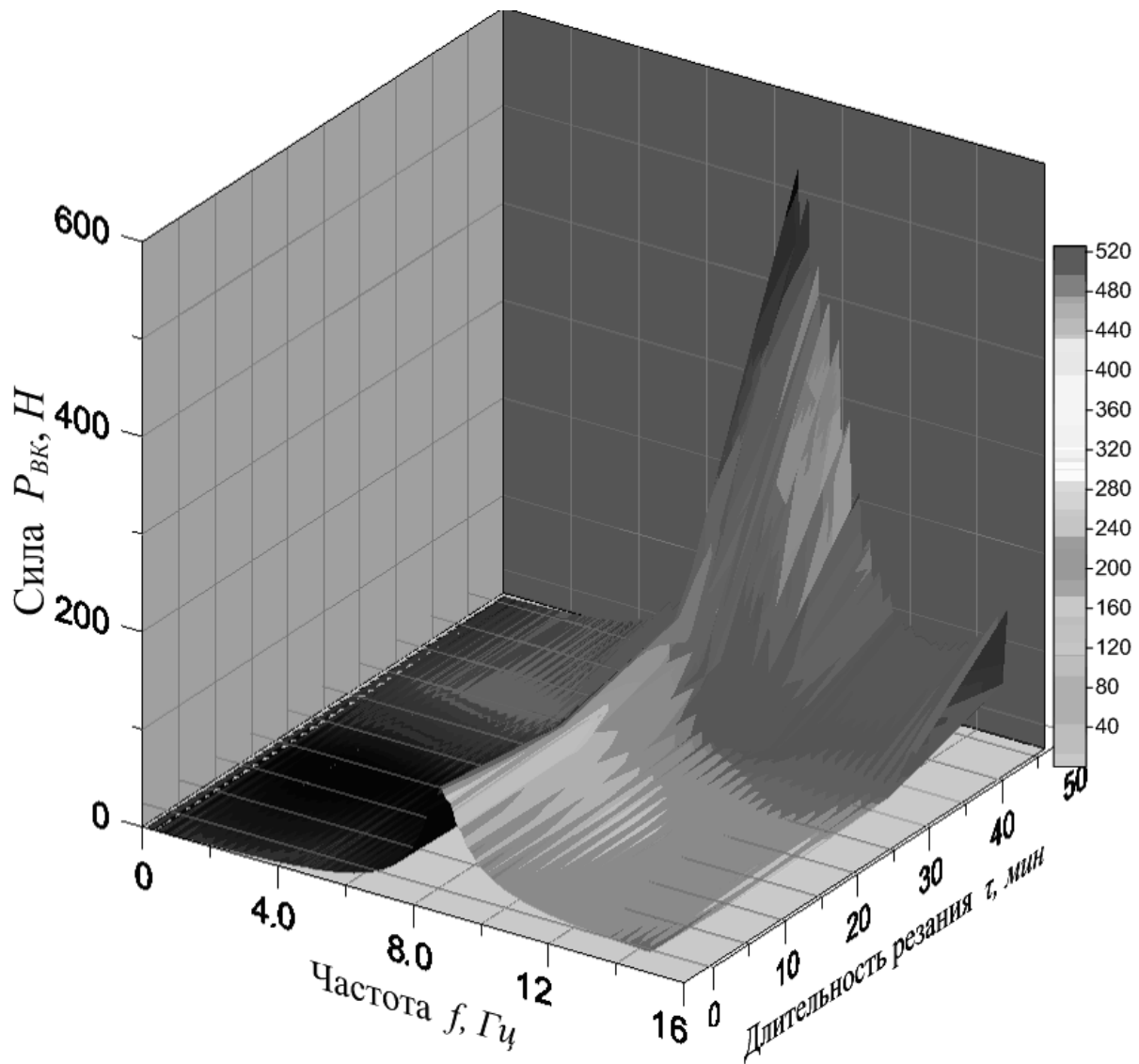


Рисунок 2.31 – Изменение возмущающего усилия P_{BK} по частоте и по времени

Она рассчитана по формуле (2.51) для следующих параметров:

$$\gamma = 4, \eta = 3, T_{HI} = 112 \text{ мин}, T_{KH} = 104 \text{ мин}, \omega_{Ш} = 52 \text{ с}^{-1}, S = 0,05 \text{ мм/об.}$$

Из рис. 2.31 следует, что пик возмущающего усилия, приходящийся на частоту, генерируемую шероховатостью, с течением времени, по мере изменения состояния режущего лезвия инструмента, возрастает.

Полученные выше выражения для возмущающего усилия (2.51) и контактной жёсткости (2.50) были использованы при разработке и анализе колебаний, рассмотренных ниже динамических моделей металлообрабатывающих технологических систем.

2.6. Динамические модели обрабатывающих технологических систем

Масса, коэффициенты жесткости и вязкого сопротивления моделируемых узлов обрабатывающих систем обозначаются на приведенных ниже схемах моделей соответственно через m , k и c . Эти параметры характеризуют парциальные колебания каждого из моделируемых узлов обрабатывающих системы в направлении, перпендикулярном главным для моделируемого узла осям жёсткости и демпфирования. Обобщённая координата ζ_i описывает пространственно ориентированные колебания центра масс каждого из i -х моделируемых элементов технологической системы. Вектор обобщённой координаты связан с координатными осями X , Y , Z (рис. 2.32 и 2.33) своими проекциями: $\bar{\zeta}_i = \bar{i} x_i + \bar{j} y_i + \bar{k} z_i$.

Дифференциальные уравнения посредством метода комплексных амплитуд путем подстановки $\xi(\tau) = \xi_A \cdot \exp(i\omega\tau)$, где ξ_A – амплитуда колебаний центра масс моделируемого элемента технологической системы, m [184], преобразовывались в систему алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами. Данная система алгебраических уравнений решалась методом Гаусса.

2.6.1. Описание динамической модели технологической системы токарного станка

Схема модели приведена на рис. 2.32, а ее параметры – в табл. 2.3. Колебания модели описывались посредством шести дифференциальных уравнений (2.55). При этом рассматривались колебания следующих элементов технологической 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) .

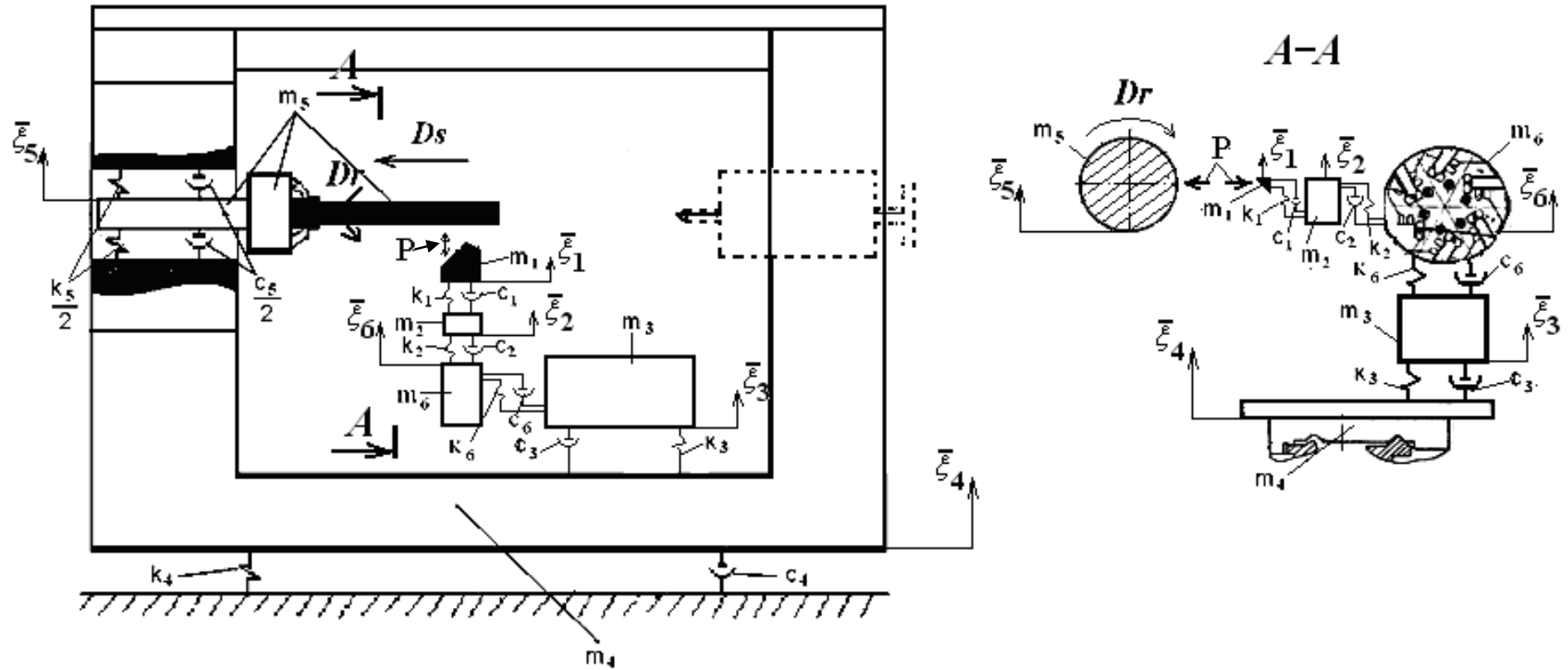


Рисунок 2.32 – Динамическая модель технологической системы токарного станка

Таблица 2.3 – Параметры динамической модели технологической системы токарного станка

Динамический параметр	Моделируемый узел технологической системы (номер массы)					
	лезвие (1)	державка резца (2)	суппорт (3)	станина (4)	шпиндель с патроном и заготовкой (5)	резце- держатель (6)
Масса $m_i, кг$	$0,29 \cdot 10^{-6}$	0,12	37	3 693	29	20
Коэффициент жесткости $k_i, Н/м$ ($f_i, Гц$)	$1,96 \cdot 10^8$ ($4,2 \cdot 10^6$)	$7,75 \cdot 10^{10}$ ($1,28 \cdot 10^5$)	$2,73 \cdot 10^9$ (1 370)	$2,44 \cdot 10^{12}$ (4 083)	$5,47 \cdot 10^{10}$ (6 920)	$3,15 \cdot 10^9$ (2 000)
Коэффициент вязкого сопротивления $c, Н/м \cdot с$ (добротность Q)	0,5 (20)	2 170 (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. Контактное усилие $P_{BK} = 107 Н$; жесткость k определялась по следующей формуле: $k_i = m_i (2\pi f_i)^2$, где f_i – частота собственных парциальных колебаний моделируемого узла вычислялась методом идентификации; демпфирование c_i определялось 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 вычислялась методом идентификации.

Дифференциальные уравнения:

$$\begin{aligned}
 1) & m_1 \ddot{\zeta}_1 + c_1 (\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_2) + k_1 (\zeta_1 - \zeta_2) = P(t); \\
 2) & m_2 \ddot{\zeta}_2 - c_1 (\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_2) - k_1 (\zeta_1 - \zeta_2) + c_2 (\dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_6) + k_2 (\zeta_2 - \zeta_6) = 0; \\
 3) & m_3 \ddot{\zeta}_3 - c_6 (\dot{\zeta}_6 - \dot{\zeta}_3) - k_6 (\zeta_6 - \zeta_3) + c_3 (\dot{\zeta}_3 - \dot{\zeta}_4) + k_3 (\zeta_3 - \zeta_4) = 0; \\
 4) & m_4 \ddot{\zeta}_4 - c_3 (\dot{\zeta}_3 - \dot{\zeta}_4) - k_3 (\zeta_3 - \zeta_4) + c_5 (\dot{\zeta}_4 - \dot{\zeta}_5) + k_5 (\zeta_4 - \zeta_5) \\
 & + c_4 \dot{\zeta}_4 + k_4 \zeta_4 = 0; \\
 5) & m_5 \ddot{\zeta}_5 - c_4 (\dot{\zeta}_4 - \dot{\zeta}_5) - k_4 (\zeta_4 - \zeta_5) = -P(t); \\
 6) & m_6 \ddot{\zeta}_6 - c_6 (\dot{\zeta}_3 - \dot{\zeta}_6) - k_6 (\zeta_3 - \zeta_6) - c_2 (\dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_6) + k_2 (\zeta_2 - \zeta_6) = 0.
 \end{aligned} \tag{2.55}$$

Алгебраические уравнения:

$$\begin{aligned}
 1) & -m_1\omega^2\zeta_1 + i\omega c_1(\zeta_1 - \zeta_2) + k_1(\zeta_1 - \zeta_2) = P(t, \omega) ; \\
 2) & -m_2\omega^2\zeta_2 - i\omega c_1(\zeta_1 - \zeta_2) - k_1(\zeta_1 - \zeta_2) + i\omega c_2(\zeta_2 - \zeta_6) + k_2(\zeta_2 - \zeta_6) = 0; \\
 3) & -m_3\omega^2\zeta_3 - i\omega c_6(\zeta_6 - \zeta_3) - k_6(\zeta_6 - \zeta_3) + i\omega c_3(\zeta_3 - \zeta_4) + k_3(\zeta_3 - \zeta_4) = 0; \\
 4) & -m_4\omega^2\zeta_4 - i\omega c_3(\zeta_3 - \zeta_4) - k_3(\zeta_3 - \zeta_4) + i\omega c_5(\zeta_4 - \zeta_5) + k_5(\zeta_4 - \zeta_5) - \\
 & -i\omega c_4\zeta_4 - k_4\zeta_4 = 0; \\
 5) & -m_5\omega^2\zeta_5 - i\omega c_4(\zeta_4 - \zeta_5) - k_4(\zeta_4 - \zeta_5) = -P(t, \omega); \\
 6) & -m_6\omega^2\zeta_6 - i\omega c_6(\zeta_3 - \zeta_6) - k_6(\zeta_3 - \zeta_6) - i\omega c_2(\zeta_2 - \zeta_6) - k_2(\zeta_2 - \zeta_6) = 0.
 \end{aligned}
 \tag{2.56}$$

2.6.2. Описание динамической модели технологической системы фрезерного станка

Модель (рис. 2.33) посредством пяти дифференциальных уравнений (2.57) описывает произвольно - ориентированные в пространстве колебания следующих элементов технологической системы: 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).

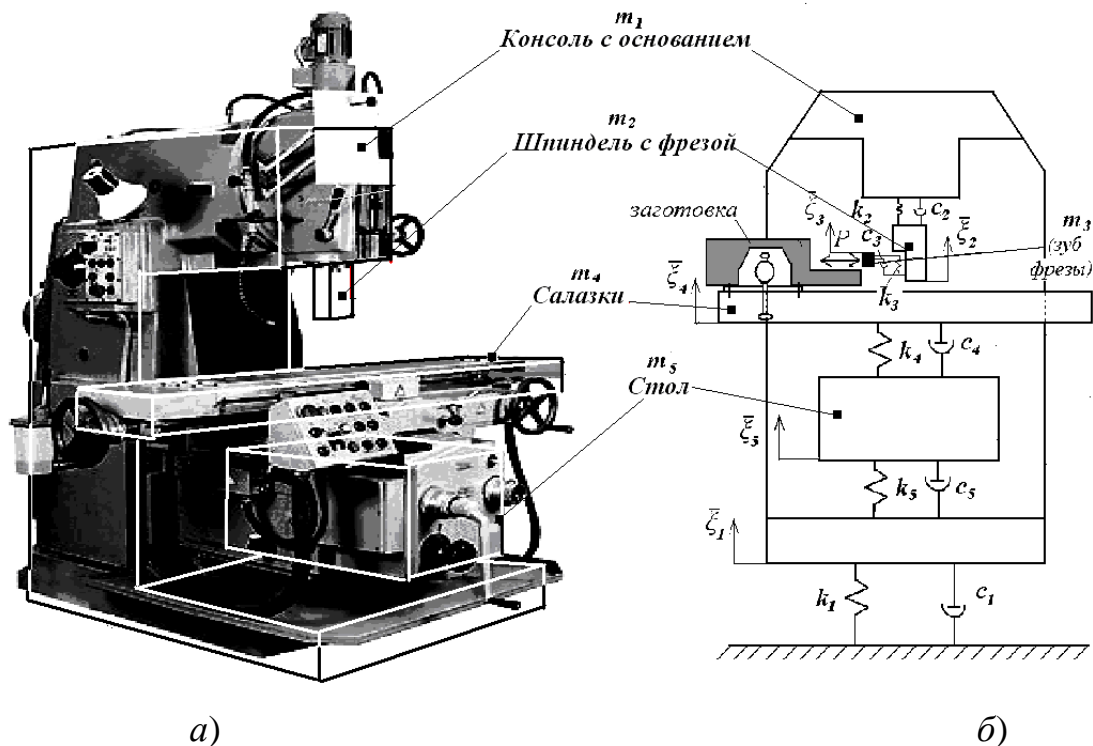


Рисунок 2.33 – Моделируемые узлы обрабатывающей системы фрезерного станка *а)* и его динамическая модель *б)*

Дифференциальные уравнения:

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{\zeta}_1 + c_1 \dot{\zeta}_1 + k_1 \zeta_1 - c_2 (\dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_1) - k_2 (\zeta_2 - \zeta_1) + c_5 (\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_5) + k_5 (\zeta_1 - \zeta_5) &= 0; \\
 m_2 \ddot{\zeta}_2 + c_2 (\dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_1) + k_2 (\zeta_2 - \zeta_1) &= 0; \\
 m_3 \ddot{\zeta}_3 + c_3 (\dot{\zeta}_3 - \dot{\zeta}_2) + k_2 (\zeta_3 - \zeta_2) &= -P(t); \\
 m_4 \ddot{\zeta}_4 + c_4 (\dot{\zeta}_4 - \dot{\zeta}_5) + k_4 (\zeta_4 - \zeta_5) &= P(t); \\
 m_5 \ddot{\zeta}_5 - c_4 (\dot{\zeta}_4 - \dot{\zeta}_5) - k_4 (\zeta_4 - \zeta_5) - c_5 (\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_5) - k_5 (\zeta_1 - \zeta_5) &= 0;
 \end{aligned}
 \tag{2.57}$$

Алгебраические уравнения:

$$\begin{aligned}
 [(k_1 + k_2 + k_5 - \omega^2 m_1) + i\omega(c_1 + c_2 + c_5)]\zeta_1 - (k_2 + i\omega c_2)\zeta_2 - (k_5 + i\omega c_5)\zeta_5 &= 0; \\
 -(k_2 + i\omega c_2)\zeta_1 + [(k_2 - \omega^2 m_2) + i\omega c_2]\zeta_2 &= 0; \\
 [k_2 + i\omega c_2]\zeta_2 - [(k_{3X} - \omega^2 m_2) + i\omega c_{3X}]\zeta_3 &= -P(t, \omega); \\
 [(k_4 - \omega^2 m_4) + i\omega c_4]\zeta_4 - (k_4 + i\omega c_{4Z})\zeta_5 &= P(t, \omega); \\
 -(k_5 + i\omega c_5)\zeta_1 - (k_4 + i\omega c_4)\zeta_4 + [(k_5 + k_4 - \omega^2 m_5) + i\omega(c_5 + c_4)]\zeta_5 &= 0;
 \end{aligned}
 \tag{2.58}$$

Параметры модели приведены в табл. 2.4.

Указанные в таблице массы узлов станка соответствуют данным, приведенным в документации на моделируемый станок.

Таблица 2.4 – Параметры динамической модели технологической системы фрезерного станка

Динамический параметр	Моделируемый узел технологической системы (номер массы)				
	консоль с основанием (1)	шпиндель с патроном и фрезой (2)	зуб фрезы (3)	салазки (4)	стол (5)
Масса m_i , кг	3 494	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 , Н/м/с (добротность Q)	$1,8 \cdot 10^6$ (3)	2 348 (17)	0.5 (10)	$1,4 \cdot 10^5$ (3)	$2,6 \cdot 10^8$ (3)

Примечание. Коэффициент k определяется по следующей формуле: $k = m \cdot (2\pi \cdot f_i)^2$, где f_i – частота собственных парциальных колебаний моделируемого узла; коэффициент c определяется по следующей формуле $c = \frac{\sqrt{k \cdot m}}{Q}$, где Q – добротность (величина пика) собственных парциальных колебаний моделируемого узла.

2.7. Результаты исследований

Целью расчетов было исследование закономерностей изменения звука, сопровождающего процесс резания и косвенно характеризующего динамическое состояние инструмента в процессе металлообработки. При этом для обеспечения наглядности представляемого материала на рисунках рассматривалось изменение либо абсолютной $E_{зв}$, либо относительной величины амплитуды звуковой волны (параметра $\bar{E}_{зв}$). В расчёте моделировались участки нормальных и катастрофических износов инструментов (рис. 2.18), соответствующих стационарному и нестационарному характеру изменения параметра $\bar{E}_{зв}$ (рис. 2.30). Для достижения данной цели решение системы уравнений (2.56) и (2.58) проводилось неоднократно при изменении времени резания от 0 до T , равного периоду стойкости (ресурсу) с шагом по времени $\Delta\tau = 1с$. Одновременно на каждом временном шаге определялись частотные характеристики колебаний модели при последовательном изменении частоты от 0 до 2 500 – 3 000 Гц с шагом по частоте $\Delta f = 10 Гц$.

Для оценки достоверности разработанных моделей в расчете в дополнение к тренду амплитуды звуковой волны исследовались:

- характер изменения с течением времени временной реализации звука;
- профиль шероховатости;
- тренд профиля шероховатости;
- трёхмерные диаграммы изменения одновременно по частоте и по времени спектра звука;
- трёхмерные диаграммы изменения одновременно по частоте и по времени профиля шероховатости.

Результаты экспериментально-расчётных исследований представлены на рис. 2.34 – 2.37 для модели токарного, а на рис. 2.38 – 2.41 – для модели фрезерного станков. На рис. 2.34 а и 2.38 а приведены фактический и расчетный спектры звука, сопровождающего процесс резания, 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 обрабатываемой системы токарного станка и R , равным 0,623 для обрабатываемой системы фрезерного станка. Линия регрессии между фактическим и расчётным спектрами звуковой волны приведена на рис. 2.34 б для токарного станка и 2.38 б – для фрезерного. Из рис. 2.34 в и 2.38 в следует, что максимальный вклад в звуковое поле, сопровождающее процесс резания при точении и фрезеровании, вносит звук, генерируемый режущим лезвием (зубом фрезы). На рис. 2.35 и 2.39 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, уровень звука в паскалях. Эта информация показывает, что модель достаточно хорошо воспроизводит не только частотное наполнение звука, но и близко к реальному описывает характер изменения частотных составляющих во времени.

На рис. 2.36 и 2.40 приведены расчётные параметры шероховатости, на рис. 2.37 и 2.40 представлена информация о величине напряжения в лезвии вблизи от режущей кромки (рис. 2.37а и 2.41 а) и величине контактного усилия (рис. 2.37 б и 2.41 б).

Результаты расчетов показывают, что модель достаточно хорошо воспроизводит не только частотное наполнение звука, но и близко к реальному описывает характеристики процесса металлообработки.

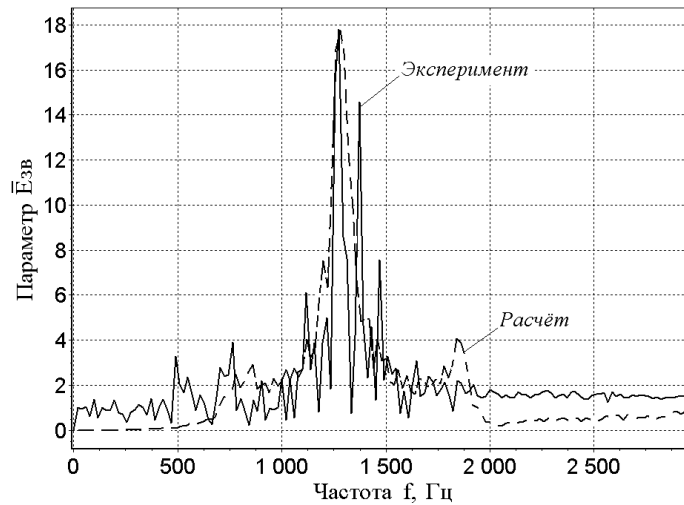
Результаты расчета напряжений, контактных усилий, шероховатости и профиля шероховатости, приведенные на этих рисунках, соответствуют реальным физически реализуемым значениям этих величин. Все это свидетельствует о достоверности разработанных моделей типовых технологических систем, предназначенных для обработки точением и фрезерованием. Наиболее важными являются расчеты, описывающие характер

изменения тренда параметра \bar{E}_{3B} по мере износа и последующего разрушения режущего лезвия. Коэффициенты корреляции между расчетными и экспериментальными значениями параметров \bar{E}_{3B} при точении и фрезеровании соответственно следующие: $R = 0,993$ и $R = 0,965$. Результаты показывают, что на участке нормального износа инструмента (участок AB на кривой износа (см. рис. 2.18)) параметр \bar{E}_{3B} стабилен по величине и даже несколько уменьшается, а далее при переходе на участок катастрофического износа (участок B_1C на рис. 2.18) параметр \bar{E}_{3B} возрастает. Принципиально важным результатом расчётов является также установление факта идентичности трендов параметра \bar{E}_{3B} , контактного усилия и шероховатости.

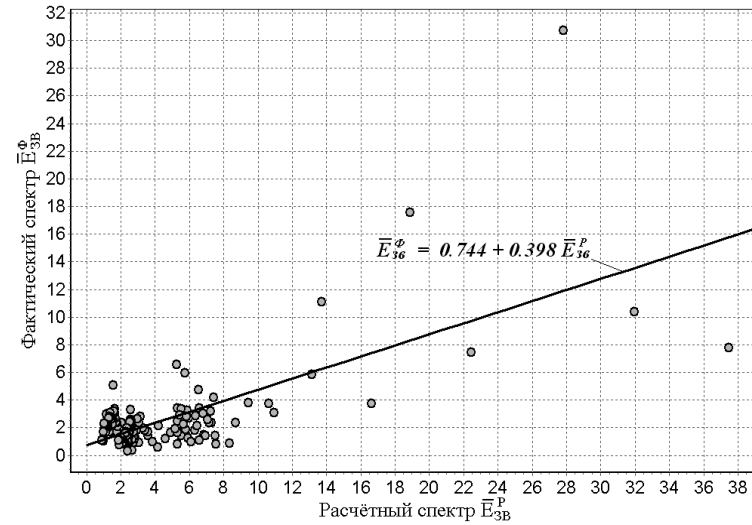
Результаты исследований показывают, что на участке нормального износа инструмента, а также квазистационарного (до критического развития трещины) параметр \bar{E}_{3B} достаточно стабилен по величине, а далее на участке катастрофического износа и развития трещины данный параметр начинает резко возрастать.

Точность прогнозирования момента перехода от участка стабильного изменения тренда параметра \bar{E}_{3B} на участок его резкого изменения (рис. 2.37*в* и 2.41*в*) является ключевой проблемой диагностического контроля состояния инструмента.

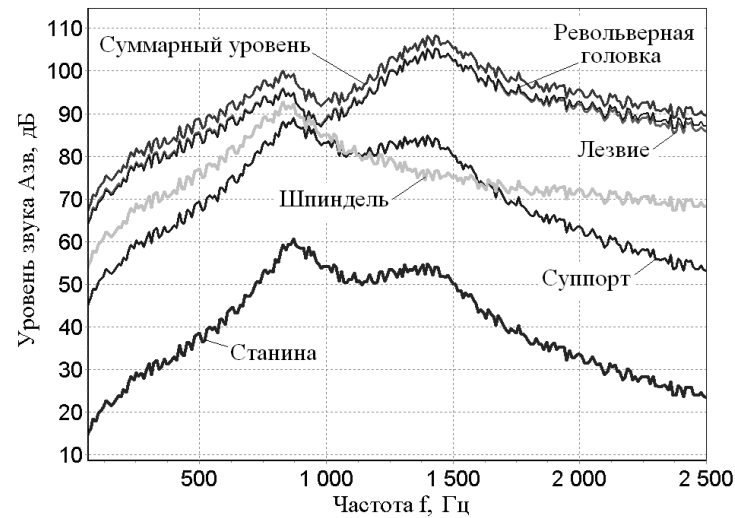
Следует отметить, что подобное поведение тренда звука, сопровождающего процесс обработки различных материалов резанием, достаточно широко освещен в соответствующей технической литературе. Так, в приложении А приведены литературные данные о поведении звука и акустической эмиссии при износе главной задней поверхности лезвия инструмента (рис. А.1–А.3), изменение временной реализации звука в зависимости от стадии износа инструмента (рис. А.4), изменение средней квадратической величины акустической эмиссии от износа h_3 (рис. А.5) и вид трёхмерной диаграммы «уровень звука – частота – число проходов» инструмента (рис. А.6). Эти данные подтверждают результаты настоящего математического моделирования.



а)

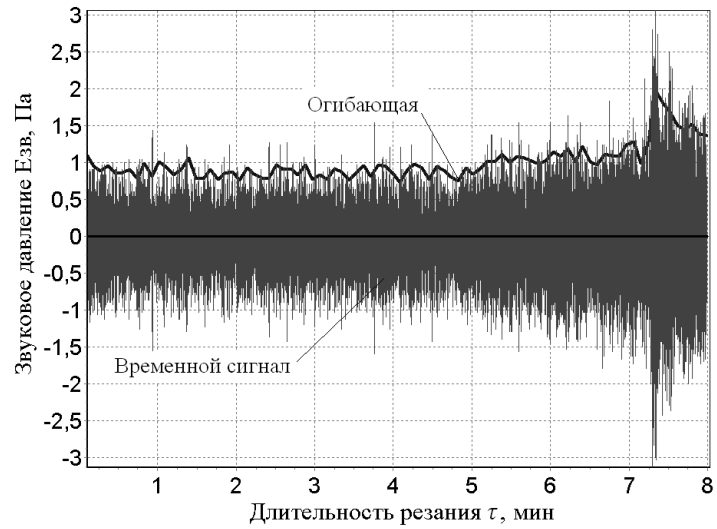


б)

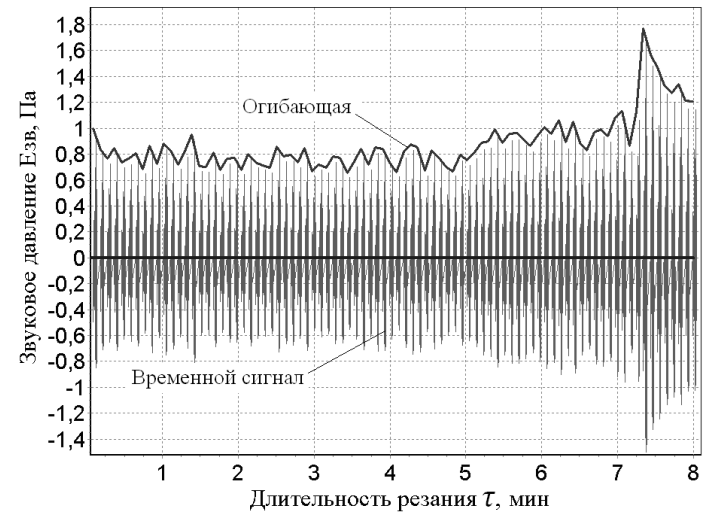


в)

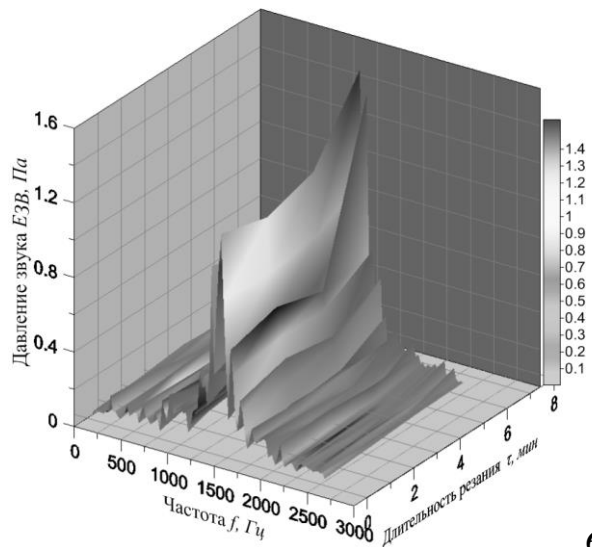
Рисунок 2.34 – Результаты расчёта спектра звука, сопровождающего токарную обработку: а) сравнение расчётного и фактического спектров звука; б) линия регрессионной зависимости между фактическим и расчётным спектрами; в) составляющие суммарной амплитуды звуковой волны, сопровождающего процесс продольного точения



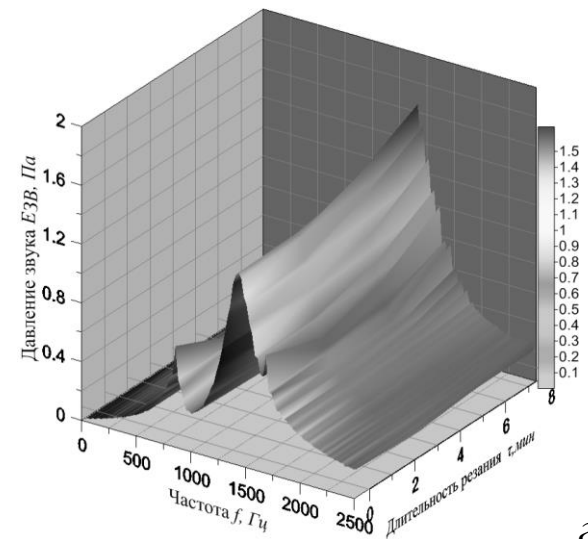
а)



б)



в)



з)

Рисунок 2.35 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных, описывающих токарную обработку:
 а) экспериментальная и б) расчётная временные реализации; в) экспериментальная и з) расчётная диаграммы
 «частота – длительность резания – амплитуда звуковой волны»

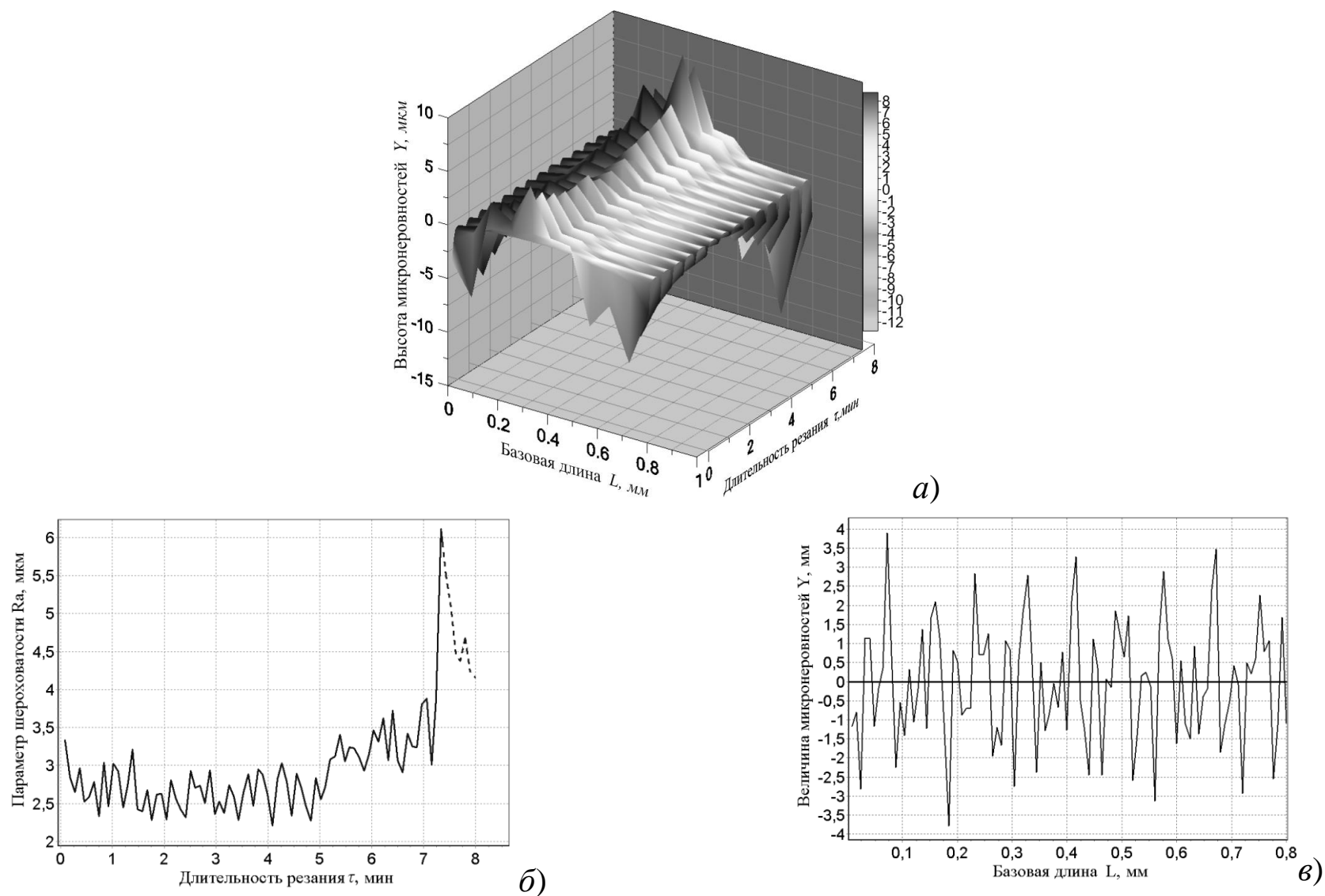


Рисунок 2.36 – Параметры шероховатости, полученные расчётным способом: а) трёхмерная диаграмма «базовая длина - длительность резания - высота микронеровности»; б) изменение параметра шероховатости Ra в зависимости от длительности точения; в) профиль шероховатости

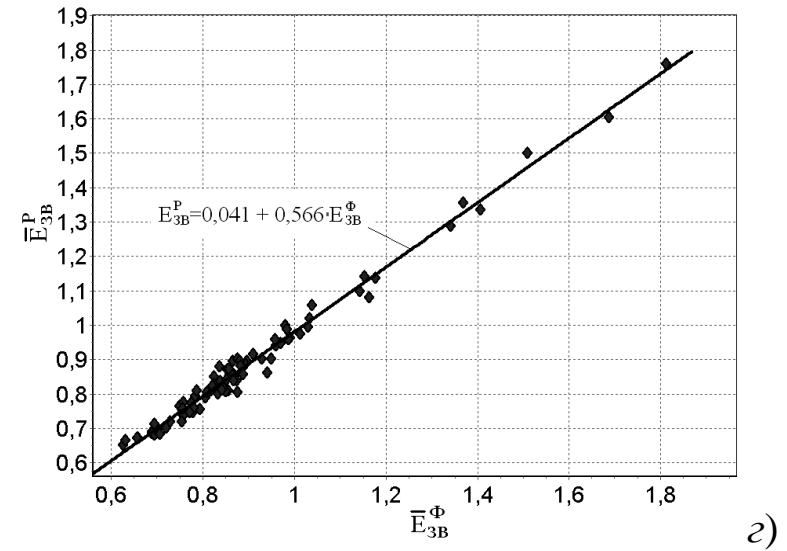
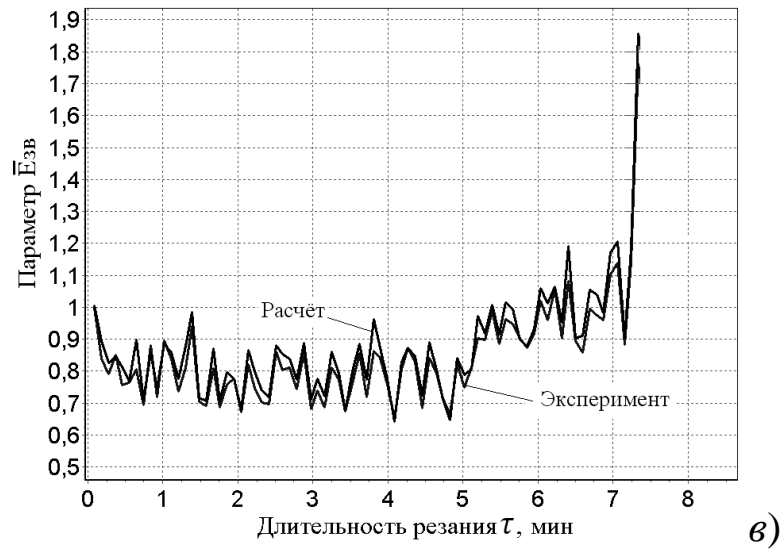
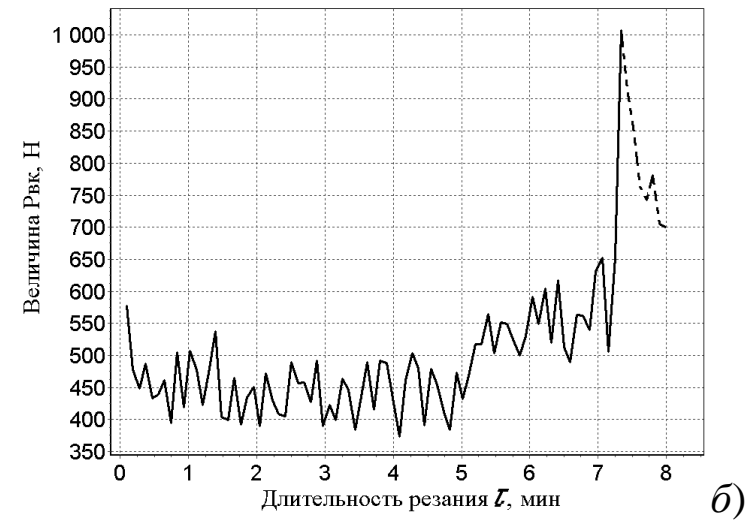
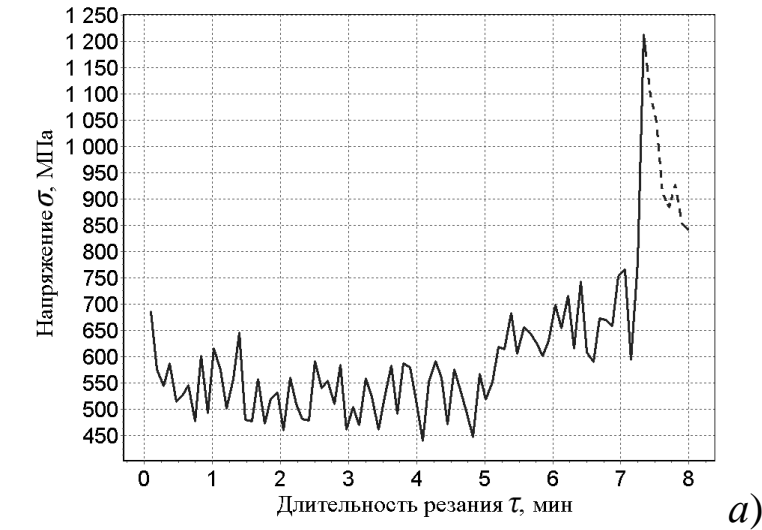


Рисунок 2.37 – Данные, полученные расчётно: а) величина напряжения в лезвии вблизи от режущей кромки; б) величина контактного усилия; в) расчётный и фактический тренды параметра \bar{E}_{3B} ; г) линия регрессионной зависимости между расчётным и фактическим трендами параметра \bar{E}_{3B}

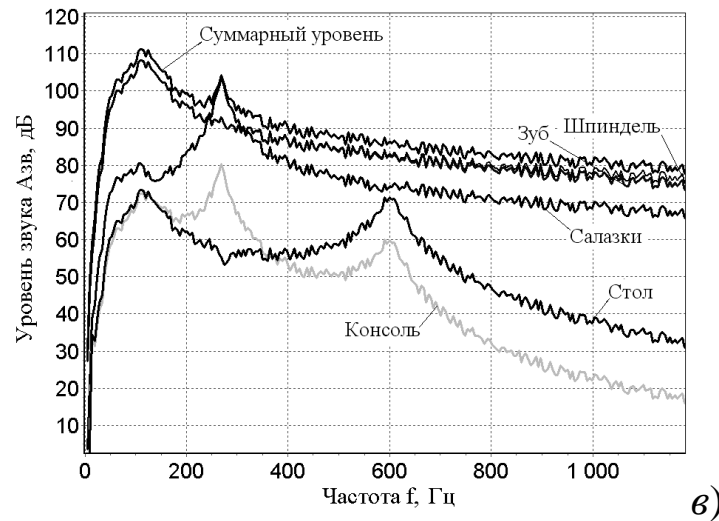
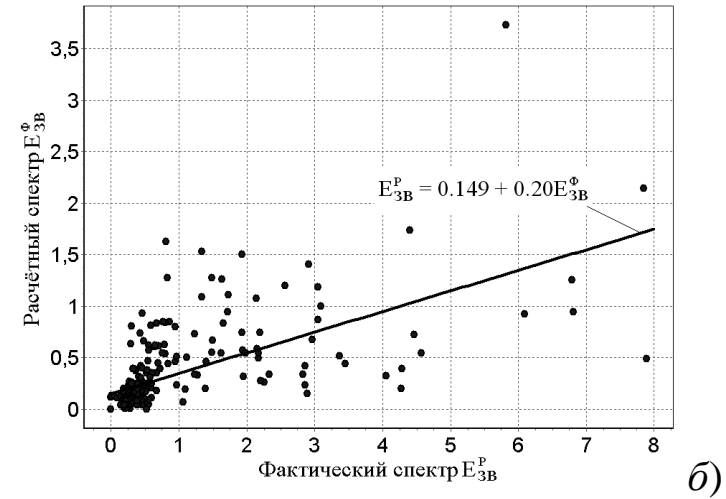
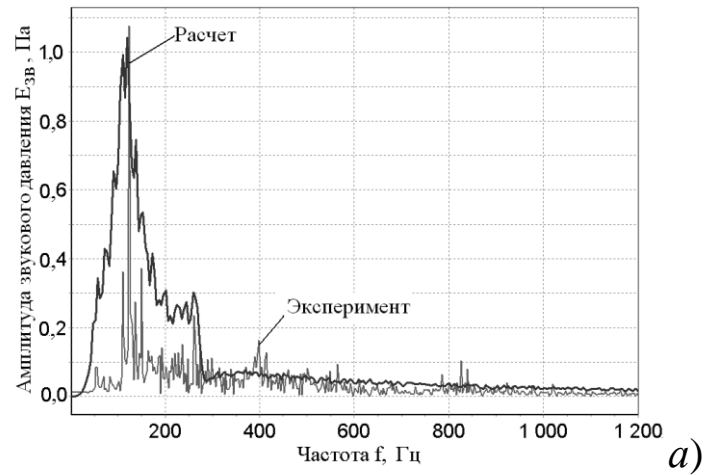
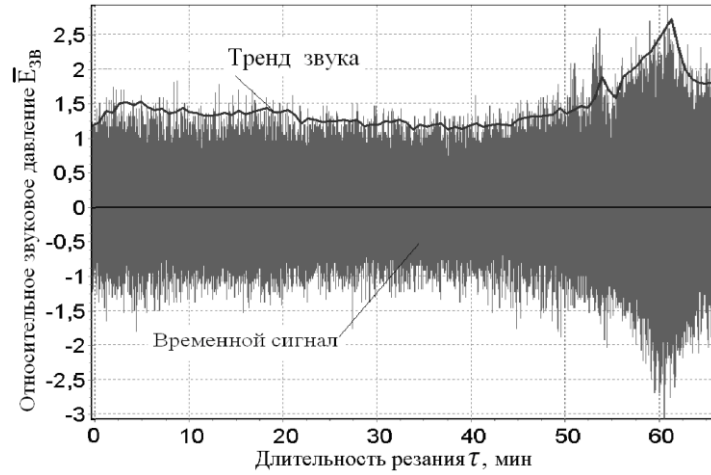
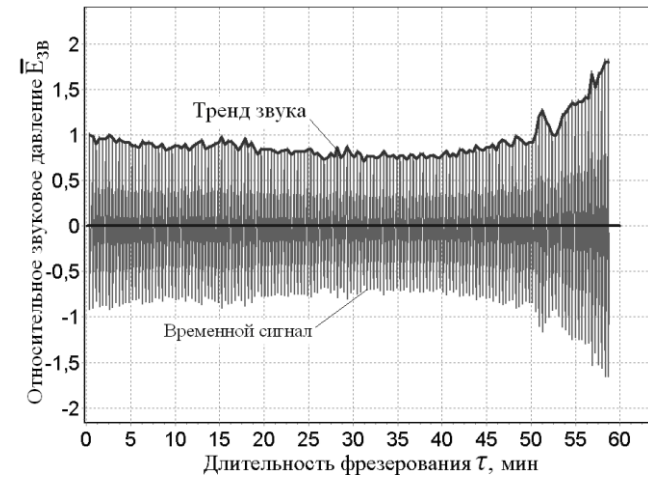


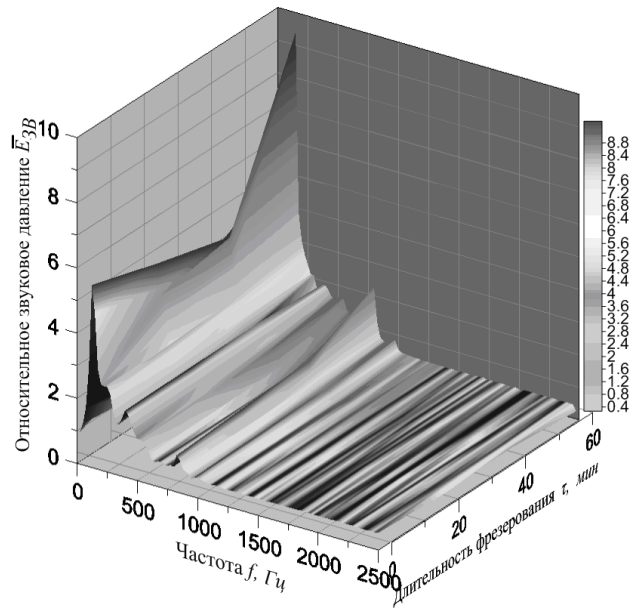
Рисунок 2.38 – Результаты расчёта спектра звука, сопровождающего процесс фрезерования: а) сравнение расчётного и фактического спектров звука; б) линия регрессионной зависимости между фактическим и расчётным спектрами; в) составляющие суммарной амплитуды звуковой волны



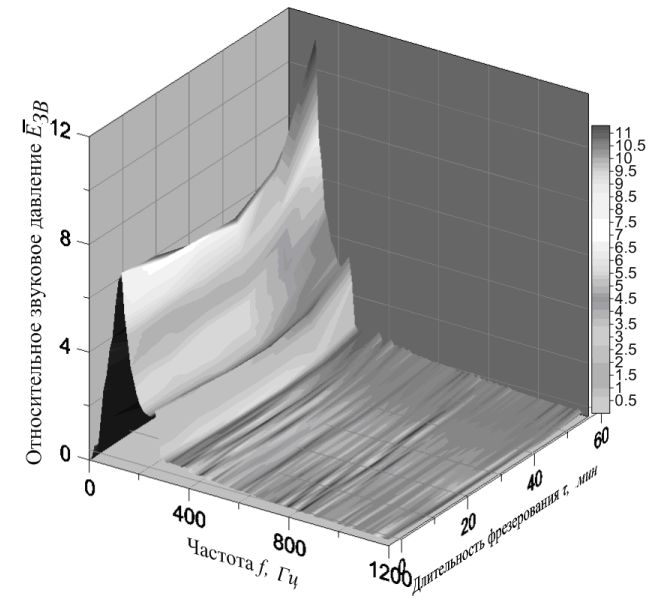
а)



б)



в)



з)

Рисунок 2.39 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных, характеризующих фрезерование: а) экспериментальная и б) расчётная временные реализации; в) экспериментальная и з) расчётная диаграммы «частота – длительность резания- параметр $\bar{E}_{зв}$ »

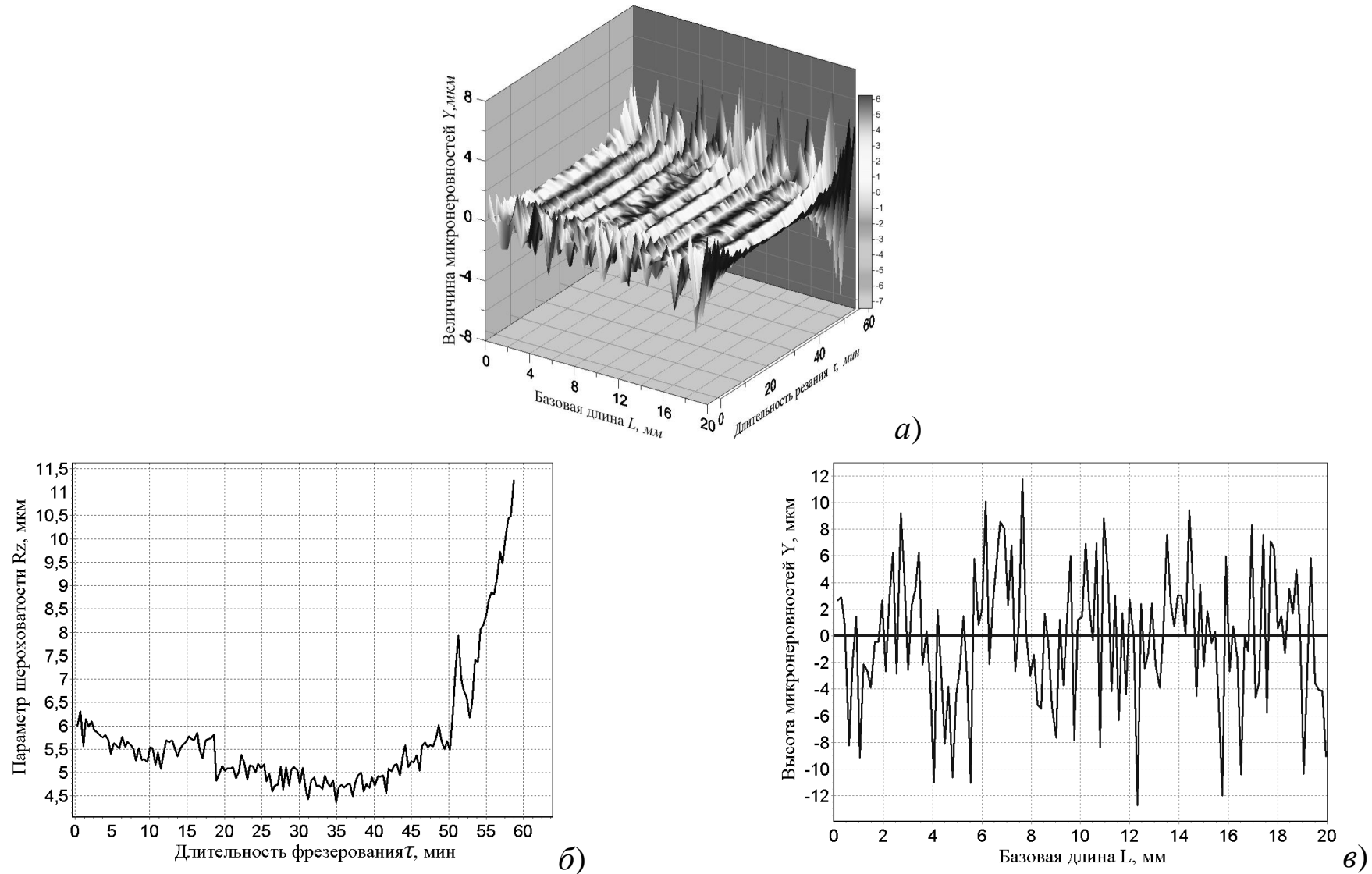
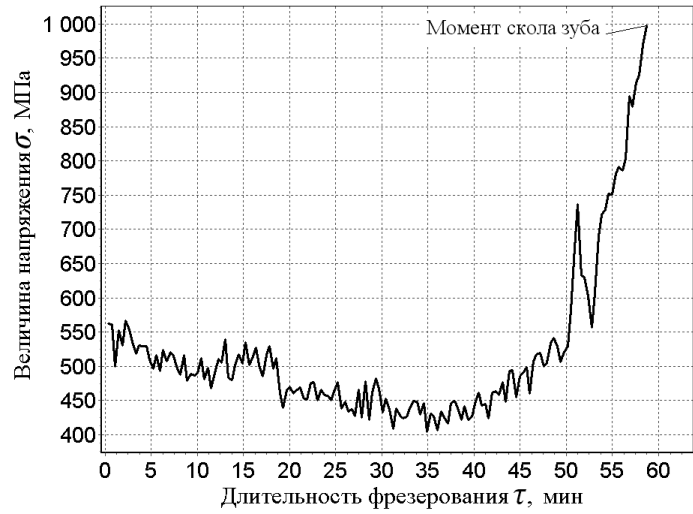
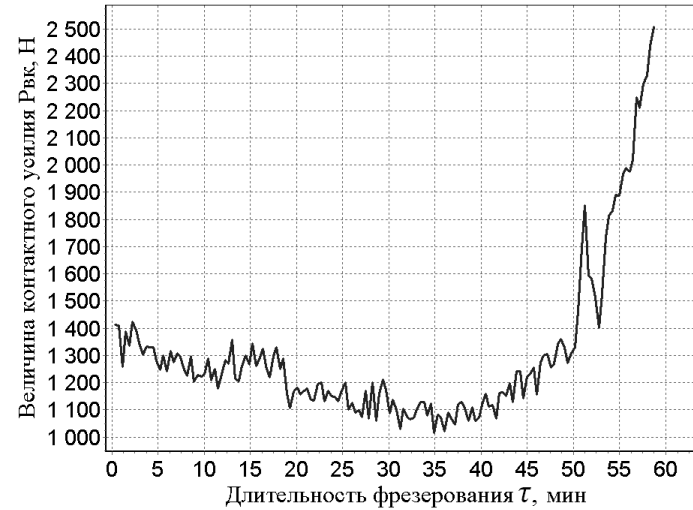


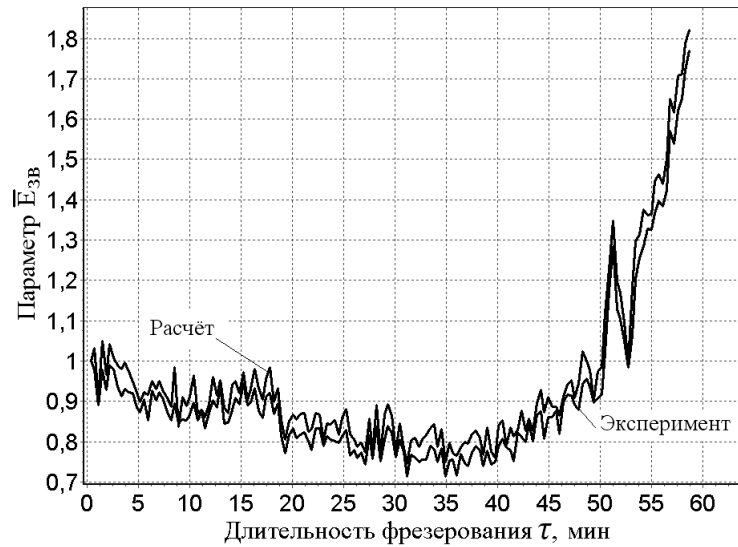
Рисунок 2.40 – Параметры шероховатости, полученные расчётным способом: а) трёхмерная диаграмма «базовая длина - длительность резания - высота микронеровности»; б) изменение параметра шероховатости Ra в зависимости от длительности фрезерования; в) профиль шероховатости



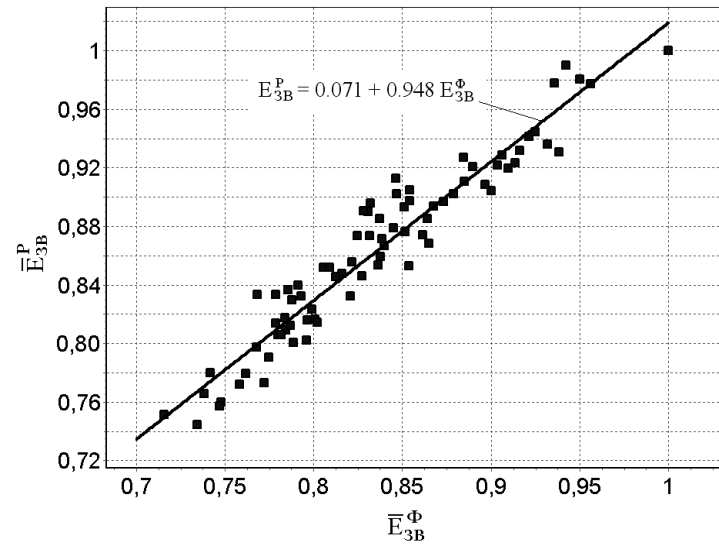
а)



б)



в)



з)

Рисунок 2.41 – Данные, полученные расчётным способом: а) величина напряжения в зубе фрезы вблизи от режущей кромки; б) величина контактного усилия; в) расчётный и фактический (экспериментальный) тренд параметра \bar{E}_{3B} ; з) линия регрессионной зависимости между расчётным и фактическим трендами параметра \bar{E}_{3B}

Для решения задачи оперативного прогнозирования ресурса инструмента, выполняемого непосредственно в процессе резания, необходимо разработать соответствующую прогнозную модель. Модель должна быть функцией времени и иметь минимум параметров, в состав которых в виде числового значения обязательно должен входить искомый ресурс режущего инструмента T .

Для реализации данной модели в практике резания процесс прогнозирования необходимо автоматизировать, используя с этой целью программируемые микропроцессорные устройства, программное обеспечение которых в формализованном виде содержит прогнозную модель, в число параметров которой входит искомый ресурс инструмента T .

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СИСТЕМ РЕСУРСА МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В данном разделе на примере технологической металлообрабатывающей системы разработаны основные методологические принципы прогнозирования в режиме реального времени ресурса разнообразного механического оборудования по результатам контроля, сопровождающего их работу, различным по физической природе информационных сигналов.

Прогнозирование осуществляется путем параметрической идентификации прогнозной модели, составленной таким образом, что искомый ресурс подконтрольного объекта включен в ее математическую структуру. При обработке материалов резанием в качестве информационного сигнала рассматривается звуковая волна, генерируемая процессом резания, а используемая при этом прогнозная модель описывает поведение тренда звука на всех участках кривой изнашивания режущих инструментов.

3.1. Общие положения

Вопросами теории и практики прогнозирования в широком смысле этого слова занимается такая наука, как *прогностика* (от греч. *prógnosis* — предвидение, предсказание), которая является наукой о законах и способах разработки прогнозов. Целью *прогностики*, как научного направления инженерной деятельности, является прогноз, т.е. предсказание возможных результатов рассматриваемого явления.

К основным задачам данной науки (*прогностики*) можно отнести развитие специальной методологии прогнозирования с целью повышения эффективности методов и техники разработки прогнозов.

Научный прогноз – многовариантное суждение о возможных исходах существующей ситуации с оценкой вероятности осуществления каждого из возможных вариантов.

3.2. Инструментарий прогнозирования

В основе прогнозирования лежат три взаимодополняющих источника информации о будущем:

- оценка перспектив развития и будущего состояния прогнозируемого явления на основе опыта, чаще всего при помощи аналогии с достаточно хорошо известными сходными явлениями и процессами;

- условное продолжение в будущее (экстраполяция) тенденций, закономерности развития которых как в прошлом, так и в настоящем достаточно хорошо известны;

- модель будущего состояния того или иного явления, например, процесса, построенная сообразно ожидаемым или желательным изменениям ряда условий, перспективы развития которых достаточно хорошо известны.

В соответствии с этим существуют ряд дополняющих друг друга способов разработки прогнозов:

- интерполирование - выявление промежуточного значения между двумя известными моментами процесса;

- экстраполирование (собственно прогнозирование), т. е. выявление будущих значений в зоне упреждения за пределами рассматриваемого процесса;

- построение динамических рядов развития показателей прогнозируемого явления на протяжении периодов основания прогноза в прошлом и упреждения прогноза в будущем (ретроспекции и проспекции прогнозных разработок);

- моделирование для построения поисковых и нормативных моделей с учетом вероятного или желательного изменения прогнозируемого явления на период упреждения прогноза по имеющимся прямым или косвенным данным о масштабах и направлении изменений.

Одними из наиболее эффективных являются прогнозные модели в виде систем уравнений. Однако большое значение имеют и другие возможные виды моделей в широком смысле этого термина, в частности, аппроксимационные модели [185].

Приведенное разделение способов прогнозирования является достаточно условным, потому что на практике эти способы взаимно перекрещиваются и дополняют друг друга [24, 25].

Задача прогнозирования заключается в изучении характера изменений анализируемых показателей, т. е. исследовании их динамики. Эта задача решается при помощи анализа рядов динамики. Ряд динамики (или динамический ряд) представляет собой ряд расположенных в хронологической последовательности числовых значений анализируемого показателя, характеризующего изменение состояния объекта наблюдения. В случае если эти изменения происходят во времени, то динамический ряд называется временным рядом.

В каждом временном ряду имеются два основных элемента – время и конкретное значение показателя (уровень ряда). Уровни ряда – это показатели, числовые значения которых составляют временной ряд. Время – это моменты или периоды, к которым относятся уровни.

Измерение и анализ временных рядов позволяют выявить закономерности развития контролируемого процесса во времени, которые, как правило, могут четко проявляться не на каждом конкретном уровне, а лишь в тенденции, при анализе в достаточно длительной динамике. На основную закономерность динамики накладываются другие, прежде всего случайные процессы. Выявление основной тенденции в изменении уровней, именуемой трендом, является одной из главных задач анализа временных рядов.

При анализе поведения во времени технологической системы широко используется подход, основанный на использовании определенных сигналов с ее стороны. Будучи зарегистрированными, они представляют собой классический временной ряд. Использование данного временного ряда особенно актуально при оценке ресурса режущего инструмента, т. к. математически описать процесс изменения состояния инструмента сложно, но имеется возможность регистрации процессов, сопутствующих этому явлению. В этом случае анализ системы сводится к обработке регистрируемых сигналов, например, звука, сопровождающего технологический процесс металлообработки. В данном случае звуковой сигнал

называется наблюдаемой величиной (диагностическим параметром), а метод исследования – реконструкцией динамических систем.

Наблюдаемая величина – это последовательность значений некоторой переменной, регистрируемой непрерывно или через некоторые промежутки времени. Достаточно часто вместо термина «наблюдаемая» используется понятие «временной ряд». Использование для анализа динамического состояния (динамики) в данном случае соответствующих элементов технологической системы только лишь временного ряда вместо полного решения дифференциальных уравнений, описывающих его, ограничивает, конечно, знания о рассматриваемой системе, что, в свою очередь, налагает повышенные требования к методу реконструкции искомым параметров динамической системы.

В нашем случае к этим параметрам относятся параметры, характеризующие состояние обрабатываемой детали, режущего инструмента и станка. К ним можно отнести: погрешность формы изготавливаемой детали, соответствие её размеров допуску, степень износа инструмента, наличие и степень критичности размеров трещин в его лезвии, являющихся причиной выкрашиваний и сколов лезвия, фактический ресурс инструмента, наличие дефектов станка, его остаточный ресурс и др.

Задача прогноза заключается в прогнозировании по данным наблюдений будущих значений измеряемых характеристик изучаемого объекта, т. е. составить прогноз на некоторый отрезок времени вперед. Процедура прогноза заключается в определении параметров аппроксимирующей функции, рекуррентно устанавливающей значение временного ряда по нескольким предыдущим его значениям.

Таким образом, изучение динамики системы, параметры которой, как правило, неизвестны, предлагается заменить прогнозированием динамики порождаемого ею временного ряда.

Применительно к металлообработке временной ряд можно рассматривать как выборочную реализацию амплитуд звуковой волны из бесконечной их популяции, генерируемой стохастическим

процессом резания [1-3]. На рис. 3.1 представлен пример временного ряда, сопровождающего процесс продольного точения. Отрезок времени, на котором необходимо определить значения временного ряда, называется временем упреждения [185].

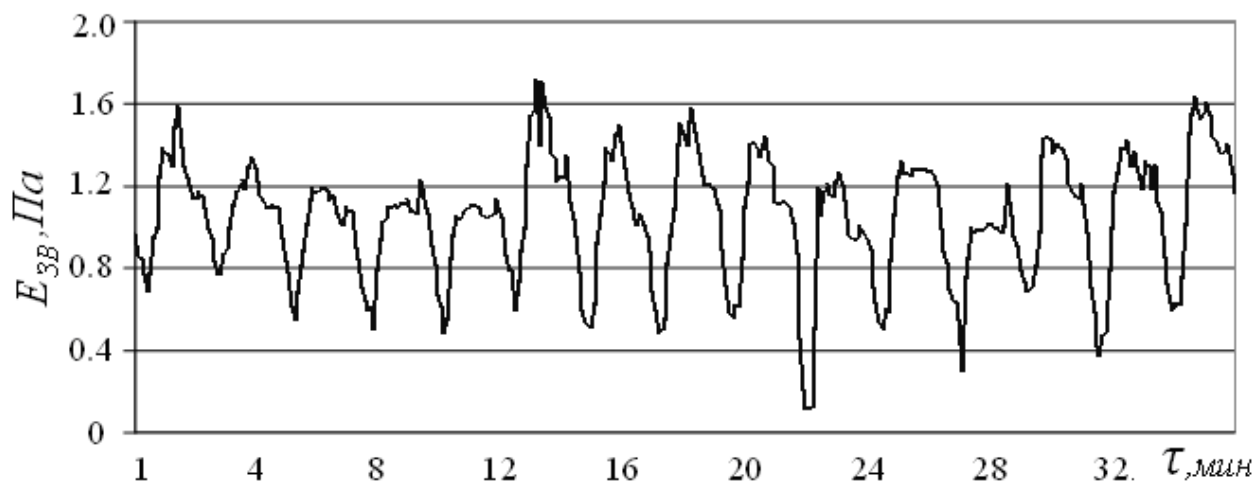


Рисунок 3.1 – Временной ряд амплитуды звуковой волны, генерируемой процессом продольного точения

Говоря о прогнозировании временных рядов, необходимо различить два взаимосвязанных понятия – метод прогнозирования и модель прогнозирования.

Метод прогнозирования представляет собой последовательность действий, которые необходимо совершить для получения модели прогнозирования временного ряда.

Модель прогнозирования – есть функциональное представление, адекватно описывающее временной ряд и являющееся основой для получения будущих значений процесса. Часто, говоря о моделях прогнозирования, используется термин «модель экстраполяции». Если известен вид аппроксимирующей функции, то задача сводится к отысканию входящих в нее коэффициентов.

Цель создания модели прогнозирования состоит в получении такой модели, для которой среднее абсолютное отклонение истинного значения от прогнозируемого стремится к минимальному для заданного времени упреждения. После того, как модель прогнозирования временного ряда определена, требуется вычислить будущие значения временного ряда, а также их доверительные интервалы.

В поведении временного ряда выявляют две основные тенденции – *тренд* и колебания относительно тренда. Колебания относительно тренда могут носить случайный или детерминированный характер. В соответствии с этим методы анализа или прогнозирования временных рядов делятся на случайные (статистические) и детерминированные.

При статистическом анализе определяют статистические параметры ряда: математическое ожидание, среднеквадратическую величину и другие параметры случайного процесса.

При детерминированном анализе определяется вид аналитической зависимости, график которой наиболее близко описывает изменение во времени тренда. Для определения параметров аналитической зависимости, как правило, применяется метод наименьшего квадратического отклонения (*МНК*). Качество описания тренда количественно характеризуется с помощью ряда критериев – Стьюдента, Фишера и др.). На практике два метода анализа временного ряда объединяют, описывая тренд аналитической зависимостью с детерминированными параметрами, а прогнозируемую величину ряда дополняют граничными значениями, охватывающими её с определённой доверительной вероятностью. Граничные значения вычисляются по результатам статистического анализа случайных отклонений ряда от тренда.

Даже при известных прогнозных моделях $\bar{E}_{ЗВ} = \bar{E}_{ЗВ}(\tau)$ формулы, описывающие эти модели, могут быть очень сложными и малоприспособленными для практического использования при математическом анализе физических данных, а также в прикладных задачах, особенно при расчетах ожидаемых результатов измерений и при математическом моделировании физических процессов. Кроме того, практическая регистрация физических данных выполняется, как правило, с определенной погрешностью или с определенным уровнем шумов, которые по своим значениям могут быть выше теоретической погрешности прогнозирования сигналов при расчетах по сложным, хотя и очень точным формулам.

Не имеет смысла и проектирование систем обработки и анализа

сигналов по высокоточным формулам, если повышение точности расчетов не дает эффекта в повышении точности обработки данных. Во всех этих условиях возникает задача аппроксимации. Аппроксимация – это представление сложных функций $E_{ЗВ}(\tau)$ или дискретных выборок из этих функций $E_{ЗВ}(\Delta\tau)$ простыми и удобными для практического использования функциями аппроксимации $f(\tau)$ таким образом, чтобы отклонение $f(\tau)$ от $E_{ЗВ}(\tau)$ в области ее задания было наименьшим по определенному критерию приближения.

Результаты измерений могут содержать погрешности (помехи). В этом случае целесообразно применить аппроксимацию исходных данных методом наименьших квадратов. Выбор аппроксимирующей функции во многом определяется физикой описываемого процесса. Если известен вид аппроксимирующей функции, то задача сводится, как уже отмечалось, к отысканию входящих в нее коэффициентов.

3.3. Разработка модели прогнозирования ресурса инструмента на основе анализа звука, сопровождающего процесс металлообработки

Решение проблемы контроля состояния режущего инструмента является достаточно сложной технической задачей, так как, с одной стороны, процесс изнашивания резца и его последующего разрушения носит весьма сложный характер, трудно поддающийся математическому описанию [1–3], а с другой – для обеспечения оперативности диагностирования необходима модель с минимумом параметров.

В подобных случаях рекомендуется прибегать к моделям, представленным алгебраическими уравнениями [185]. Эти модели называют моделями аппроксимационного типа, так как для их получения используют различные методы аппроксимации имеющихся экспериментальных данных о поведении выходных параметров объекта.

Аппроксимационная (далее – прогнозная) модель должна описывать изменение с течением времени амплитуды звуковой волны, генерируемой процессом резания и реагирующей на износ лезвия и его

выкрашивание (скол). Рассмотрим каждый из этих процессов отдельно.

3.3.1. Разработка аналитического выражения прогнозной модели

Кривая, описывающая механический износ лезвия инструмента приведена на рис. 2.18 и, как уже указывалось в разд. 2, характеризуется тремя периодами: периодом приработки (участок OA), периодом нормального износа (участок AB) и периодом катастрофического износа (участок B_1C).

Рассмотрим каждый из участков отдельно.

3.3.1.1. Участок приработочного износа инструмента

На участке приработочного износа инструмента амплитуда звуковой волны, генерируемой процессом резания, возрастает. Это подтверждается практикой резания [1– **Ошибка! Источник ссылки не найден.**] и расчетами, приведенными в разд. 2. Образование площадки приработочного износа в значительной мере определяется уровнем шероховатости рабочих поверхностей лезвия после заточки. Микровыступы как на главной, так и на вспомогательной задних поверхностях (рис. 3.1) за счет малой площади контакта (только по вершинам выступов (рис. 3.1а), а следовательно, больших нормальных давлений, контактируя с поверхностями на обрабатываемой детали (заготовке) начинают интенсивно разрушаться, в результате чего фактическая глубина резания t_0 в этот период несколько меньше заданного, требуемого по техпроцессу, $t_{НОР}$. Далее за счет уменьшения высоты микронеровностей, а следовательно, увеличения площади контакта (рис. 3.1б) давление и интенсивность изнашивания уменьшаются (рис. 2.18, зона около точки A), изменения величин площадок в зонах контакта лезвия со стружкой и поверхностями на заготовке стабилизируются и начинают приближаться к своим номинальным значениям $l_{НОМ}$ (рис. 3.1б), и период приработки практически заканчивается.

Изменение глубины резания на участке приработки можно описать следующим образом:

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

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

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

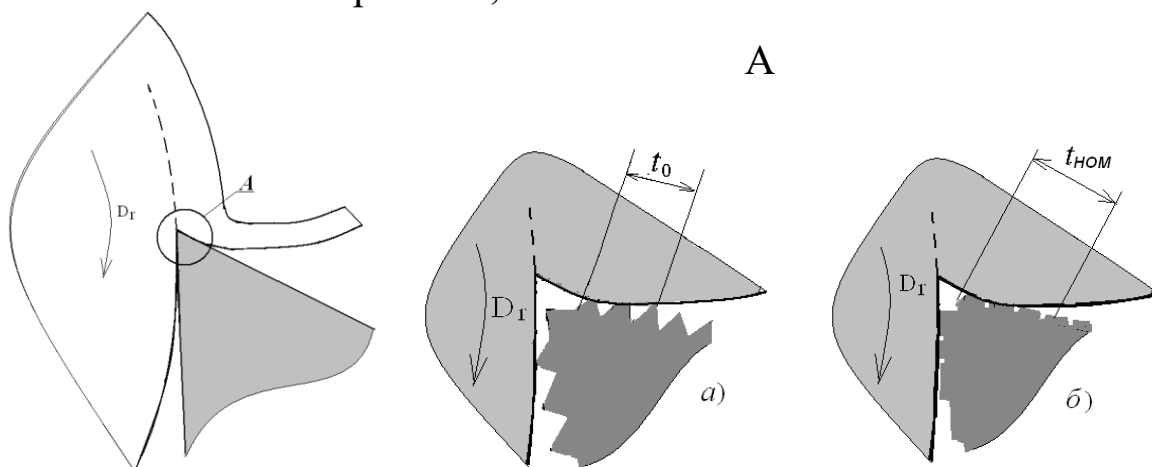


Рисунок 3.2 – Схема взаимодействия лезвия инструмента, имеющего микронеровности, с обрабатываемой деталью: *а*) резец до приработки; *б*) резец после приработки

Изменение глубины резания на участке приработки можно описать следующим образом:

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

где t_0 – исходная (фактическая) глубина резания, определяющая величину фактической площади срезаемого слоя; $v_{\text{ПР}}$ – скорость изменения радиального износа инструмента, характерная для данного сочетания материалов пар трения «заготовка - инструмент»; τ – текущее время механической обработки, с.

При окончании периода приработки (см. рис. 2.18, точка *A*) длительность резания равна времени приработки ($\tau = \tau_{\text{пр}}$), а скорость последующего износа в радиальном направлении на участке нормальной работы инструмента (см. рис. 2.18, участок *AB*) можно определить следующим образом:

$$v_{\text{ПР}} = \frac{t_{\text{НОР}} - t_0}{\tau_{\text{пр}}}, \quad (3.2)$$

где $t_{\text{НОР}}$ - нормативная (принятая) глубина резания.

Учитывая, что в этот момент величина радиального износа еще пренебрежимо мала, можно принять текущее значение глубины

резания t равным нормативной величине $t_{НОР}$.

На участке AB (см. рис. 2.18) 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:

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

С учетом (3.2) выражение (3.3) переписывается следующим образом:

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

Все указанные изменения этого параметра режима резания (t) на участках кривой изнашивания OA и AB (см. рис. 2.18) сопровождаются изменением и динамического состояния обрабатываемой системы, а следовательно, и амплитуды давления звука. Возрастание амплитуды давления звука на участке приработки OA можно описать уравнением:

$$E_{ЗВ} = E_{0ЗВ} + g_{ПП} \cdot \tau, \quad (3.5)$$

где $E_{0ЗВ}$ – величина звукового давления $Па$, регистрируемого в начале периода приработки инструмента (точка O на рис. 2.18); τ – время резания; $g_{ПП}$ – скорость изменения амплитуды давления звука на участке приработки инструмента (участок OA , рис. 2.18):

$$g_{ПП} = \frac{E_{ЗВ}^{ПП} - E_{0ЗВ}}{\tau_{np}}, \quad (3.6)$$

где $E_{ЗВ}^{ПП}$ – амплитуда давления звука, достигаемая в конце участка приработки инструмента, $Па$ (см. рис. 2.18, точка A).

Функциональная зависимость (3.6) позволяет получить оценку среднего значения скорости изменения амплитуды давления звука на участке приработки. На самом же деле изменение скорости, $Па/с$, носит более сложный характер (рис. 2.4), поэтому это изменение предлагается определять по следующей зависимости:

$$g = g_{ПП} \cdot \frac{\tau}{\sqrt{g_{ПП}^2 \cdot (\tau_{np}^2 - \tau^2) + \tau^2}}. \quad (3.7)$$

Выражение (3.5) с учетом (3.7) в безразмерном виде запишется следующим образом:

$$\bar{E}_{3B} = 1 + \frac{g_{ПП}}{E_{03B}} \cdot \frac{\tau^2}{\sqrt{\left(\frac{g_{ПП}}{E_{03B}}\right)^2 \cdot (\tau_{np}^2 - \tau^2)^2 + \tau^2}}. \quad (3.8)$$

3.3.1.2. Участок нормального и катастрофического износа (выкрашивания) инструмента

Износ, ограничивающий ресурс инструмента T , характеризуется, как уже указывалось (см. разд. 2.5.2.1), износостойкостью I инструментального материала, являющаяся величиной, обратной интенсивности износа Δ , определяемой по формуле (2.16) и характеризующей степень изменения текущего значения величины износа на участке нормального износа и определяемого по формуле (2.20). Если в данной формуле в качестве начального времени работы инструмента принять время, соответствующее концу периода приработки τ_{np} , в качестве максимально допустимой величины износа принять его оптимальное (рекомендуемое) значение h_{3on} , то выражение (2.20) примет вид

$$h_i = h_{3on} \frac{\tau_i - \tau_{np}}{T_{НИ} - \tau_{np}}, \quad (3.9)$$

где $T_{НИ}$ – ресурс инструмента, ограничиваемый предельно допустимым износом его лезвия (точка B на рис. 2.18).

Для удобства использования выражения (3.9) в практике резания его следует представить в безразмерном виде

$$\bar{h}_{zi} = \frac{h_{zi}}{h_{3on}} = \frac{\tau_i - \tau_{np}}{T_{НИ} - \tau_{np}}. \quad (3.10)$$

Выражение (3.10) имеет диапазон значений от 0 до 1 и позволяет при известном текущем значении износа h_{zi} и заданной, как правило, среднестатистической величине предельно допустимого износа h_{3on} определять степень критичности текущего состояния инструмента. Полученную зависимость (3.10) можно применять в исследовательских целях для оценки состояния инструмента при периодическом контроле текущего значения абсолютной величины износа h_{zi} . Для определения этой величины, естественно, приходится прерывать процесс резания для проведения необходимых измерений, при этом кардинально изменяя тепловое состояние всех элементов системы резания.

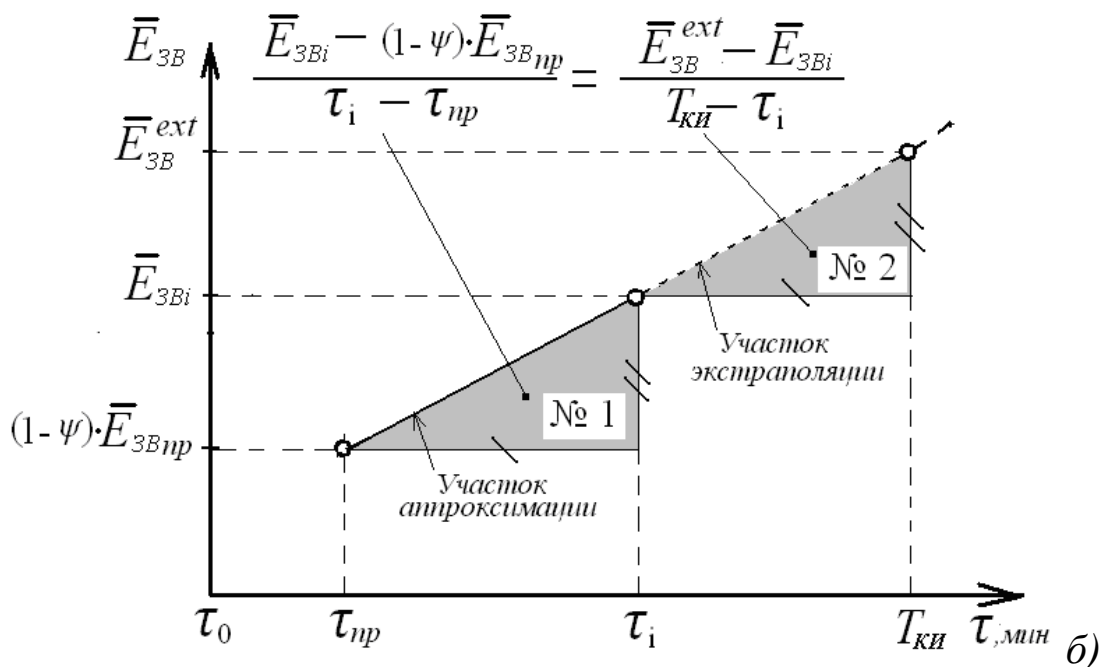
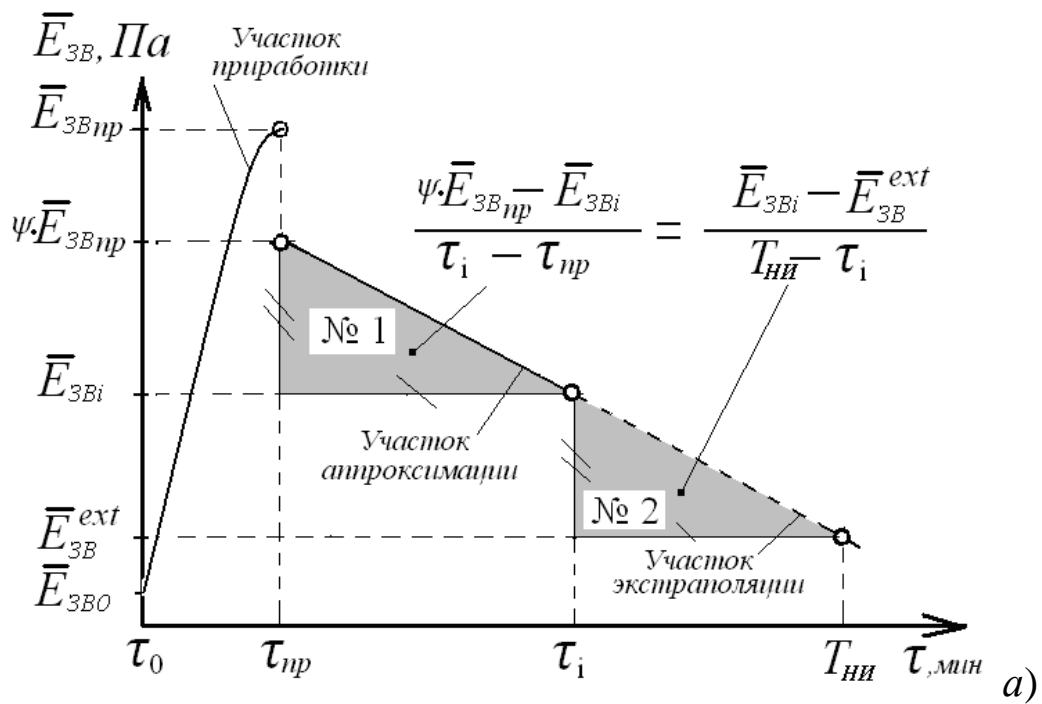


Рисунок 3.3 – Тренд параметра \bar{E}_{3B} : а) участок нормального износа; б) участок катастрофического износа

Диагностический контроль звука непосредственно в процессе резания позволяет избегать подобных перерывов, а следовательно, и этих изменений, в значительной мере определяющих характер последующей работы инструмента.

Как показывает практика, расчеты и литературные данные, приведенные в разд. 2, тренд амплитуды звуковой волны, сопровождающей процесс механической обработки резанием, складывается из квазистационарного участка, наблюдающегося при нормальном износе инструмента (рис. 2.18б), и участка резкого изменения при катастрофическом износе (выкрашивание, разрушение инструмента).

Опишем аналитически подобное поведение звукового тренда с переходом от абсолютной величины давления звука E_{3B} к ее относительной величине – параметру \bar{E}_{3B} .

Рассмотрим отдельно стационарный участок (рис. 3.2а) и участок возрастания (рис. 3.2б) параметра \bar{E}_{3B} .

На обоих участках серым цветом выделены геометрически подобные треугольники. Треугольники №1 соответствуют участку аппроксимации, а №2 – участку экстраполяции. Следует отметить, что их подобие имеет и обоснование в соответствии с постулатом физики, сформулированным К. Шенноном: «основные закономерности, наблюдавшиеся в прошлом, будут сохранены в будущем» [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Известно, что на данном утверждении основываются методы экстраполяционного прогнозирования. Преобразуем приведенные на рисунке пропорции в уравнения (3.11) для участка нормального износа и (3.12) для участка катастрофического износа:

$$\bar{E}_{3Bi} = \psi \cdot \left(\bar{E}_{3Bnp} + \eta \cdot \left(\frac{\tau_i - \tau_{np}}{T_{HH} - \tau_i} \right)^\gamma \right), \quad (3.11)$$

где $\eta = \bar{E}_{3B}^{ext} - \bar{E}_{3Bi}$, $\eta < 0$,

$$\bar{E}_{3Bi} = (1 - \psi) \cdot \left(\bar{E}_{3Bnp} + \alpha \cdot \left(\frac{\tau_i - \tau_{np}}{T_{KH} - \tau_i} \right)^\beta \right), \quad (3.12)$$

где $\alpha = \bar{E}_{3B}^{ext} - \bar{E}_{3Bi}$, $\alpha > 0$.

Показатели степеней в данных выражениях введены для учета нелинейности тренда, неминуемо проявляющейся в практике звукообразования. С точки зрения математики это увеличивает число степеней свободы (количество параметров прогнозной модели) и тем самым повышает точность аппроксимации ее графиком тренда звука, а следовательно, увеличивает достоверность определения параметров модели при ее идентификации.

Таким образом, прогнозная модель, описывающая изменения диагностического признака износа инструмента – амплитуды давления звука – от начала эксплуатации «острого» инструмента до его замены (при $\tau = T_{IP}$) согласно (3.8), (3.11) и (3.12) можно описать следующим комплексным выражением:

$$\bar{E}_{3B} = \begin{cases} 1 + \frac{\mathcal{G}_{IP}}{E_{03B}} \cdot \frac{\tau^2}{\sqrt{\left(\frac{\mathcal{G}_{IP}}{E_{03B}}\right)^2 \cdot (\tau_{np}^2 - \tau^2)^2 + \tau^2}} & \text{при } 0 \leq \tau \leq \tau_{np}, \\ \left(1 + \frac{\mathcal{G}_{IP} \cdot \tau_{np}}{E_{03B}}\right) \left[\psi \left(1 + \eta \cdot \left(\frac{\tau - \tau_{np}}{T_{НИ} - \tau}\right)^\gamma\right) + (1 - \psi) \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{\tau - \tau_{np}}{T_{КИ} - \tau}\right)^\beta\right) \right] & \text{при } \tau > \tau_{np}, \end{cases} \quad (3.13)$$

где $T_{НИ}, T_{КИ}$ – ресурс инструмента при нормальном и катастрофическом износах соответственно, *мин*; E_{03B} – исходное (абсолютное) значение звукового сигнала; $\psi, \alpha, \beta, \gamma, \eta, \mathcal{G}_{IP}$ – параметры, экспериментально определяемые в процессе идентификации данной модели.

Прогнозная модель (3.13) 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 рациональная аппроксимирующая функция терпит разрыв, т. к. её знаменатель обращается в ноль. Данное свойство рациональной функции использовано в прогнозной модели (3.13) путём введения в знаменатель представленных в ней дробей искомых параметров, характеризующих ресурс инструмента в условиях нормального $T_{НИ}$ и

катастрофического $T_{ки}$ износов. При достижении длительности применения инструмента τ величины какого-либо из этих параметров ($\tau = T_{ни}$ или $\tau = T_{ки}$) прогнозная функция претерпевает разрыв. Данное свойство дробей обеспечивает высокую чувствительность прогнозной модели к поведению тренда информационного сигнала, позволяя заранее прогнозировать момент разрыва функции. В практике резания это означает, что прогнозная модель обеспечивает прогноз момента резкого изменения (убывания или возрастания) звука, сопровождающего процесс резания, свидетельствующего о недопустимом состоянии инструмента, т. е. его предельном износе или поломке.

Параметры прогнозной модели определяются в процессе ее параметрической идентификации по результатам контроля тренда звука (тренда параметра $\bar{E}_{зв}$). Идентификация заключается в минимизации функции невязки (3.14) фактически зарегистрированных и расчетных значений параметра $\bar{E}_{зв}$, полученных с помощью (3.13):

$$U = \sum_i^m [\bar{E}_{зв}^{\phi} - \bar{E}_{зв}^p]^2, \quad (3.14)$$

где m – количество измерений, проведенных за все время контроля состояния инструмента; $\bar{E}_{зв}^{\phi}, \bar{E}_{зв}^p$ – соответственно фактическое и расчетное значение параметра $\bar{E}_{зв}$.

Главными параметрами прогнозной модели являются параметры $T_{ни}$ и $T_{ки}$, определяющие поведение тренда звука в период нормального и катастрофического износа инструмента.

Искомый ресурс $T_{пр}$ характеризует суммарную повреждаемость инструмента и определяется путем приравнивания суммарной повреждаемости $\left(\frac{1}{T_{пр}}\right)$ сумме повреждаемостей, полученных инструментом в период его нормального $\left(\frac{1}{T_{ни}}\right)$ и катастрофического $\left(\frac{1}{T_{ки}}\right)$ износов:

$$\frac{1}{T_{\text{ПР}}} = \frac{1}{T_{\text{КИ}}} + \frac{1}{T_{\text{НИ}}} \quad (3.15)$$

Окончательно выражение для прогнозной наработки инструмента до истощения ресурса запишется в следующем виде:

$$T_{\text{ПР}} = \frac{T_{\text{НИ}} \cdot T_{\text{КИ}}}{T_{\text{КИ}} + T_{\text{НИ}}} \quad (3.16)$$

Остаточный ресурс инструмента $T_{\text{ост}}$, мин, определяется по формуле

$$T_{\text{ост}} = T_{\text{ПР}} - \tau_i$$

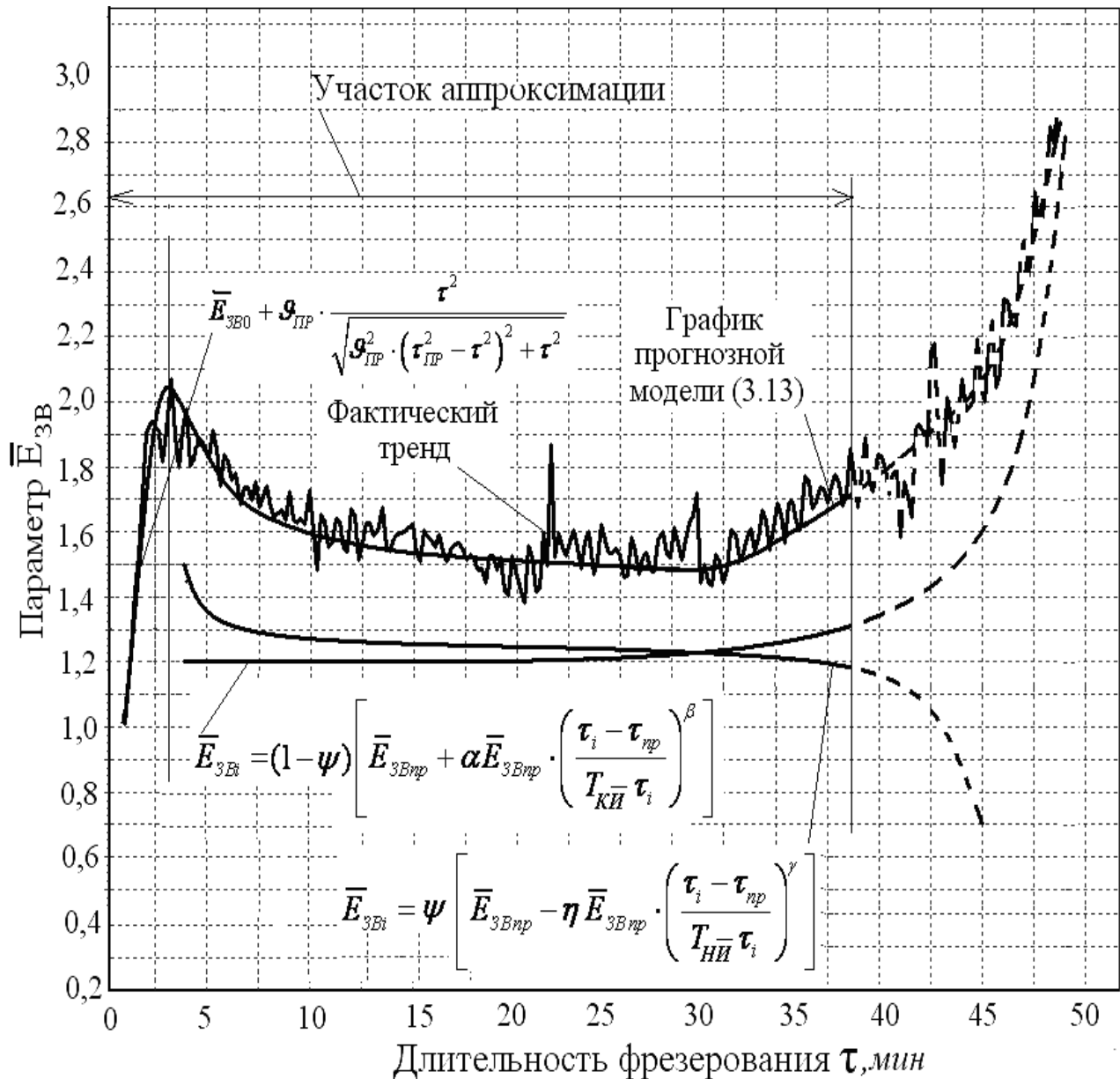


Рисунок 3.4 – Фактический тренд параметра $\bar{E}_{\text{ЗВ}}$ и график модели прогнозирования ресурса инструмента на примере фрезерования

Применение прогнозной модели (3.13) проиллюстрировано на рис. 3.4 на примере данных, полученных при фрезеровании цилиндрической фрезой на режимах, приведенных в табл. 5.2.

3.4. Определение износа инструмента по результатам прогнозирования его ресурса

Основываясь на основном постулате диагностики – коррелированности структурного параметра, характеризующего состояние объекта диагностирования, и его диагностического признака, можно составить следующую пропорцию:

$$\frac{t_{нор} - t_i}{t_{нор} - t_{крит}} = \frac{\bar{E}_{3B}^{ПП} - \bar{E}_{3Bi}}{\bar{E}_{3B}^{ПП} - \bar{E}_{3B}^{КР}}, \quad (3.17)$$

где $t_{нор}$ – заданная глубина резания, мм; $t_{крит} = t_{нор} - h_{рон}$ – предельная (критическая) глубина резания, мм, при которой инструмент во избежание брака детали должен быть заменен (см. рис. 2.18, точка B_1); $h_{рон}$ – заданная (оптимальная) величина радиального износа, мм (см. рис. 1.3); $\bar{E}_{3B}^{ПП}, \bar{E}_{3Bi}, \bar{E}_{3B}^{КР}$ – величины параметра \bar{E}_{3B} соответственно на момент приработки инструмента, текущее и критическое его значения на момент замены инструмента при достижении им заданной (оптимальной) величины радиального износа $h_{рон}$ в точке B_1 .

Разрешим равенство (3.17) относительно текущей глубины резания t , мм:

$$t = t_{нор} - \frac{\bar{E}_{3B}^{ПП} - \bar{E}_{3B}}{\bar{E}_{3B}^{ПП} - \bar{E}_{3B}^{КР}} \cdot (t_{нор} - t_{крит}). \quad (3.18)$$

Использование в выражении (3.18) экспериментально определенных величин параметра \bar{E}_{3B} , на которые влияют погрешность измерений и нестабильность процесса резания, приводит к искажениям расчетной оценки глубины резания, выполняемой по этой формуле. Для исключения данных искажений заменим измеренную величину параметра \bar{E}_{3B} , мм, расчетной

(аппроксимационной) оценкой, выполняемой по формуле (3.13):

$$t = t_{нор} - \frac{(\tau - \tau_{нр})^\alpha}{(\tau - \tau_{нр})^\alpha + (T_{НИ} - \tau)^\alpha} \cdot (t_{нор} - t_{крит}), \quad (3.19)$$

Для определения износа перейдем в (3.19) от глубины резания t к величине износа по задней поверхности h_3 :

$$\frac{(t_0 + h_{3нр}) - (t_0 + h_{3i})}{(t_0 + h_{3нр}) - (t_0 + h_{3он})} = \frac{\bar{E}_{3B}^{ПП} - \bar{E}_{3B}}{\bar{E}_{3B}^{ПП} - \bar{E}_{3B}^{КР}}, \quad (3.20)$$

где t_0 - величина глубины резания в момент начала эксплуатации инструмента (точка O на рис. 2.18).

После раскрытия скобок в левой части равенства (3.20) оно примет следующий вид:

$$\frac{h_{3нр} - h_{3i}}{h_{3нр} - h_{3он}} = \frac{\bar{E}_{3B}^{ПП} - \bar{E}_{3B}}{\bar{E}_{3B}^{ПП} - \bar{E}_{3B}^{КР}}. \quad (3.21)$$

Выражение (3.21) надо разрешить относительно величины текущего износа h_{3i} , мкм:

$$h_{3i} = h_{3нр} + \frac{\bar{E}_{3B}^{ПП} - \bar{E}_{3B}}{\bar{E}_{3B}^{ПП} - \bar{E}_{3B}^{КР}} \cdot (h_{3он} - h_{3нр}). \quad (3.22)$$

Для исключения искажающего влияния нестабильности экспериментальных данных, как и в предыдущем случае, перейдем от экспериментальных значений параметра \bar{E}_{3B} к их расчетным значениям. Расчеты выполняются по первому слагаемому прогнозной модели (3.17), описывающему нормальный износ инструмента, мкм:

$$h_{3i} = h_{3нр} + \frac{(\tau_i - \tau_{нр})^\beta}{(\tau_i - \tau_{нр})^\beta + (T_{НИ} - \tau_i)^\beta} \cdot (h_{3он} - h_{3нр}). \quad (3.23)$$

На рис. 3.5 приведены графики тренда амплитуды звуковой волны в дБ и износа, рассчитанного по зависимости (3.27). Данные получены при продольном точении на режимах, приведенных в табл. 5.1.

Из рисунка следует, что прогнозная модель (3.13) и полученное на ее основе уравнение (3.27) достаточно хорошо описывают как тренд звука, так и износ инструмента. Последнее обстоятельство открывает возможность для определения абсолютной величины износа инструмента непосредственно в процессе резания без его прерывания.

Прогнозная модель (3.13) прошла экспериментальную проверку,

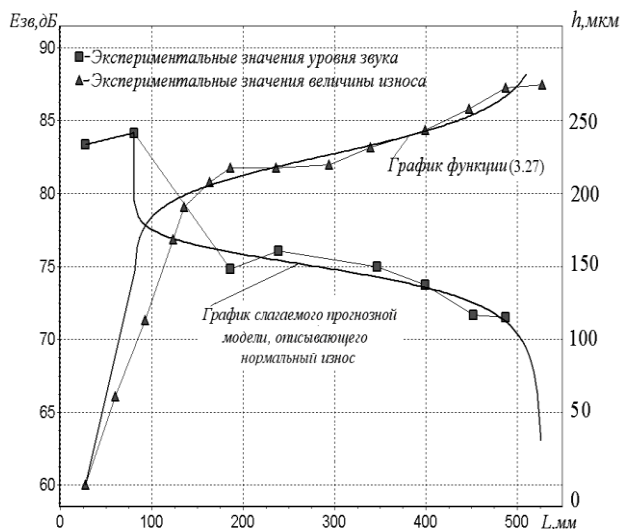


Рисунок 3.5 – Расчетные и фактические тренды звука и износа инструмента

подтвердившую ее эффективность [55 – 57]. Оценка статистической значимости прогнозной модели показала, что коэффициенты модели согласно F - критерию Фишера статистически значимы. Коэффициент корреляции R между фактическим трендом звука и графиком прогнозной модели составил:

– на участке нормального износа инструмента при продольном тчении (обточке) 0,852, при фрезеровании

цилиндрической фрезой – 0,993;

– на участке катастрофического износа инструмента при продольном тчении 0,903 и при фрезеровании цилиндрической фрезой – 0,992.

Результаты статистического анализа представлены в разд. 5 и в приложении Г.

3.5. Метод прогнозирования ресурса лезвийного инструмента

Из-за исключительной сложности и взаимосвязи явлений, протекающих при обработке резанием [1, 2], физическая природа изнашивания инструмента в широком смысле этого понятия изучена еще не до конца. Для адекватного описания изменения состояния инструмента требуется многопараметрическая модель. Однако решение проблемы облегчается тем, что изменение качества инструмента протекает во времени. Этим обстоятельством как раз и объясняется то, что среди ограниченного числа параметров разработанной прогнозной модели доминирующими является именно временные параметры $T_{НИ}$ и $T_{КИ}$, используемые для расчета искомого ресурса подконтрольного объекта.

Однако при рассмотрении этих параметров в практике их прогнозирования приходится сталкиваться с одним неприятным

обстоятельством – нестабильностью их прогнозной оценки. Для поиска метода компенсации отрицательного влияния данной нестабильности на результаты определения ресурса был проведен ряд опытов как по обтачиванию (продольному точению), так и по обработке цилиндрической фрезой (табл. 5.1 и 5.2). В экспериментах процесс обработки производился либо до разрушения инструмента, либо до предельно допустимой степени его износа. В процессе металлообработки производилась непрерывная запись на компьютер звукового сигнала, регистрируемого посредством микрофона, устанавливаемого в непосредственной близости от зоны резания (рис. 2.11).

3.5.1. Компенсация нестабильности прогнозирования ресурса инструмента

Одной из существенных причин нестабильности может являться неоднородность структуры материала обрабатываемой заготовки. Так, например, локальное повышение твердости вызывает, как правило, рост нагрузки и соответственно локальный рост градиента амплитуды звуковой волны. Рост градиента нагрузки влечет за собой увеличение скорости повреждения инструмента, а также и более пессимистический прогноз его ресурса.

Пример подобной нестабильности прогноза ресурса инструмента, отмечавшейся при продольном точении (табл. 5.1) приведен на рис. 3.6.

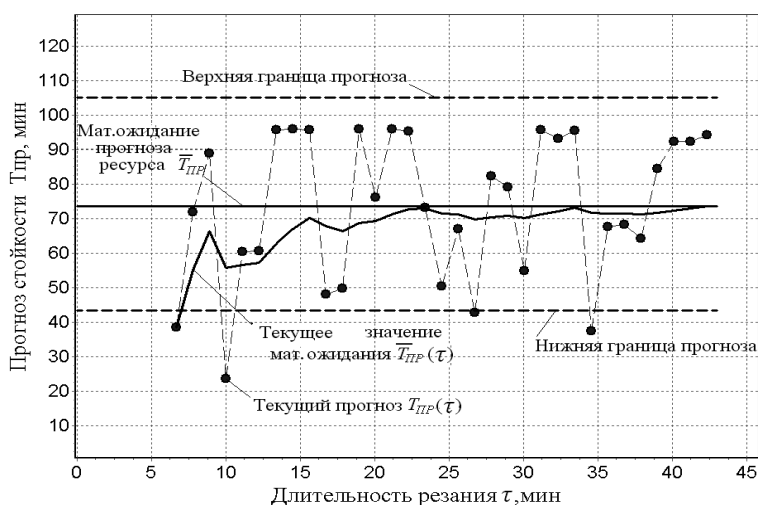


Рисунок 3.6 – Изменение в процессе продольного точения статистических параметров прогноза

Статистический анализ данных прогноза, приведенных на рис. 3.6, позволил получить следующие результаты:

- математическое ожидание прогноза ресурса $\bar{T}_{PP} = 73 \text{ мин}$;
- среднее квадратическое отклонение прогноза $\sigma_T = 10 \text{ мин}$;
- коэффициент вариации $\nu = \frac{\sigma_T}{\bar{T}_{PP}} = 0,136$;
- верхняя граница прогноза при доверительной вероятности $P_{\text{ДОВ}} = 0,997$ $T_{PP}^{BG} = \bar{T}_{PP} + 3\sigma_T = 103 \text{ мин}$;
- нижняя граница прогноза при доверительной вероятности $P_{\text{ДОВ}} = 0,997$ $T_{PP}^{HG} = \bar{T}_{PP} - 3\sigma_T = 43 \text{ мин}$.

Результаты статистического анализа показывают, что разброс текущего значения прогноза ресурса $T_{PP}(\tau)$ достаточно велик (43–103 мин). Классическим методом борьбы с этим явлением является ориентация на благоприятное математическое ожидание обрабатываемой статистики. Выше рассмотрено математическое ожидание всех статистических данных в целом \bar{T}_{PP} , собранных за 43 минуты резания. На практике объем базы статистических данных (объем статистики) меняется (пополняется), начиная с первого замера и заканчивая текущим. В соответствии с изменением объема статистики следует пересчитывать ее математическое ожидание, т.е. периодически определять текущее значение ресурса $\bar{T}_{PP}(\tau_n)$, мин:

$$\bar{T}_{PP}(\tau_n) = \frac{[\bar{T}_{PP}(\tau_{n-1})(n-1) + T_{PP}(\tau_n)]}{n}. \quad (3.24)$$

Пример подобного пересчета показан на рис. 3.6. В соответствии с законами статистического анализа текущее значение математического ожидания прогнозируемого значения ресурса в данный момент времени $\bar{T}_{PP}(\tau)$ изменяется в пределах

$$T_{PP}(\tau_1) \leq \bar{T}_{PP}(\tau_n) \leq \bar{T}_{PP}, \quad (3.25)$$

где $T_{PP}(\tau_1)$ – первое значение прогнозной статистики; \bar{T}_{PP} – математическое ожидание прогноза полной статистики.

Математическое ожидание в соответствии с его свойствами характеризуется меньшей вариацией (средним квадратическим

отклонением $\sigma_{\bar{T}}$) по сравнению с вариацией текущего прогноза (средним квадратическим отклонением σ_T):

$$\sigma_{\bar{T}} = \frac{\sigma_T}{\sqrt{n}}, \quad (3.26)$$

где n – количество прогнозных значений ресурса.

Существенно меньшая изменчивость (непостоянство) текущего значения математического ожидания $\bar{T}_{PP}(\tau)$ наглядно показана на рис. 3.7. Это можно показать и чисто математически, представив выражение (3.24) в следующем виде:

$$\bar{T}_{PP}(\tau_n) = \frac{(n-1)}{n} \bar{T}_{PP}(\tau_{n-1}) + \frac{1}{n} T_{PP}(\tau_n). \quad (3.27)$$

Коэффициенты, стоящие перед слагаемыми в (3.27), являются, по своей сути, весовыми коэффициентами. Первый коэффициент при увеличении 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 прогнозных значений ресурса инструмента.

Однако уменьшение непостоянства математического ожидания автоматически приводит к уменьшению его чувствительности к текущему изменению

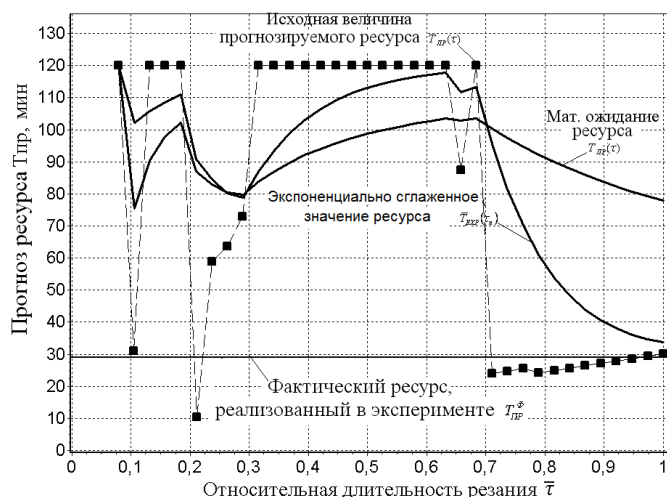


Рисунок 3.7 – Сравнительный анализ прогноза ресурса инструмента в процессе резания

амплитуды давления звука. Данный недостаток математического ожидания наглядно показан на рис. 3.7. Из рисунка следует, что в данном примере металлообработки после достижения инструментом 70 % его наработки до замены из-за предельного износа, прогноз ресурса стабилизировался и изменялся 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 значение прогнозной ресурса определялось по следующей формуле [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$\bar{T}_{EXP}(\tau_n) = (1 - \alpha)\bar{T}_{EXP}(\tau_{n-1}) + \alpha T_{ПП}(\tau_n), \quad (3.28)$$

где α – параметр сглаживания ($\alpha = 0,2$).

Сравнение (3.27) и (3.28) показывает, что при экспоненциальном 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, т. е. длительности резания.

Результат экспоненциального сглаживания показан на рис. 3.8. Как видим, скользящее среднее имеет относительно незначительную

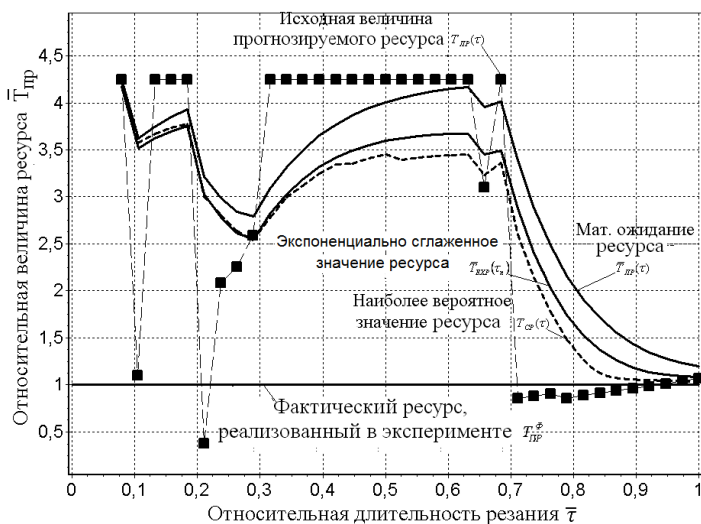


Рисунок 3.8 – Интервальная оценка ресурса режущего инструмента

вариацию (колеблемость) и, практически сохраняя свойства математического ожидания, более точно описывает текущую величину прогнозного ресурса $T_{ПП}(\tau)$ на самом ответственном завершающем участке эксплуатации инструмента.

Как уже выше указывалось, на ресурс инструмента оказывает

влияние множество факторов, в результате чего прогнозный ресурс является случайной величиной. Поэтому данному параметру – ресурсу, – как случайной величине, надо давать интервальную оценку. В качестве верхней границы интервала предлагается принять скользящую среднюю $\bar{T}_{EXP}(\tau_n)$, а нижней – наиболее вероятное значение ресурса $T_{CP}(\tau)$.

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

$$T_{CP}(\tau) = \tau_n Q(\tau) + \bar{T}_{EXP}(\tau_n) P(\tau), \quad (3.29)$$

где $Q(\tau)$ – текущее значение вероятности замены (отказа) режущего инструмента ($Q(\tau)=1-P(\tau)$); $P(\tau)$ – текущее значение надежности режущего инструмента $\left(P(\tau) = \exp\left(-\frac{\tau_n}{\bar{T}_{EXP}(\tau_n)}\right) \right)$.

Интервальная оценка ресурса проиллюстрирована на рис. 3.7. Там же для сравнения приведено экспериментально определенное значение фактического ресурса инструмента T_{PP}^{ϕ} , а также исходная величина прогнозной оценки ресурса и ее математическое ожидание.

Все прогнозные величины пронормированы фактической величиной ресурса T_{PP}^{ϕ} . Из рис. 3.7 следует, что на заключительном этапе эксплуатации инструмента прогнозные оценки его ресурса практически совпадают по величине с фактически реализованной в эксперименте оценкой:

$$T_{CP}(\tau) \approx T_{PP}^{\phi} \approx T_{EXP}(\tau). \quad (3.30)$$

Оценим статистическую значимость (достоверность) рассмотренных оценок прогноза ресурса.

3.5.2. Достоверность прогноза ресурса режущего инструмента

3.5.2.1. Корреляционный метод

Прогнозирование ресурса режущего инструмента, как уже отмечалось выше, с точки зрения математики заключается в аппроксимации графиком принятой трендовой модели результатов контроля давления звука, сопровождающего процесс резания. Качество аппроксимации оценивается по величине корреляции расчетного и фактического трендов амплитуды звуковой волны. Причем при прогнозировании решающее значение имеет корреляция между расчетными и фактическими данными на участке упреждения (прогнозирования) поведения тренда. Приемлемый уровень корреляции на данном участке, в свою очередь, определяет качество (достоверность) прогнозирования ресурса T_{PP} . Текущее значение

коэффициента корреляции $R(\tau)$ определяется по следующему выражению:

$$R(\tau) = \frac{(m-n) \sum_{i=m-n-3}^{m-n} \bar{E}_{3B}^P \bar{E}_{3B}^\Phi - \sum_{i=m-n-3}^{m-n} \bar{E}_{3B}^P \sum_{i=m-n-3}^{m-n} \bar{E}_{3B}^\Phi}{\sqrt{\left[(m-n) \sum_{i=m-n-3}^{m-n} (\bar{E}_{3B}^P)^2 - \left(\sum_{i=m-n-3}^{m-n} \bar{E}_{3B}^P \right)^2 \right] \left[(m-n) \sum_{i=m-n-3}^{m-n} (\bar{E}_{3B}^\Phi)^2 - \left(\sum_{i=m-n-3}^{m-n} \bar{E}_{3B}^\Phi \right)^2 \right]}}, \quad (3.31)$$

где $\bar{E}_{3B}^P, \bar{E}_{3B}^\Phi$ – соответственно расчетная и фактическая амплитуды давления звука; m – число замеров амплитуды давления звука, проведенных в контрольном эксперименте; n – число расчетных точек; $(m-n)$ – число точек, приходящихся на участок экстраполяции.

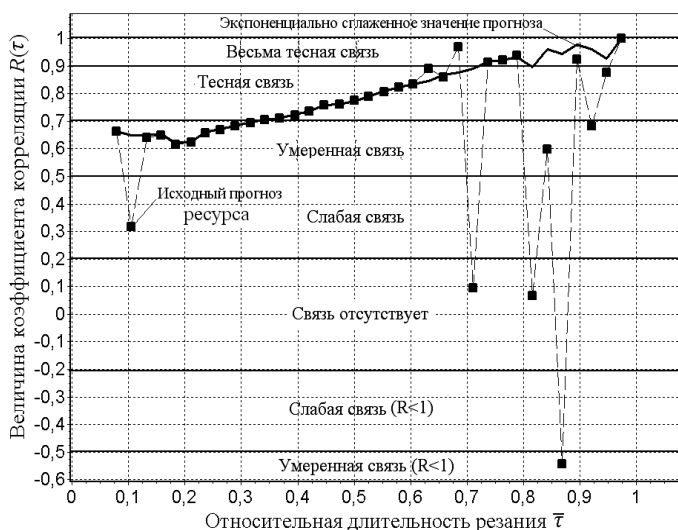


Рисунок 3.9 – Изменение коэффициентов корреляции прогнозных кривых с участком аппроксимации фактического тренда параметра \bar{E}_{3B}

На рис. 3.9 приведены графики коэффициентов корреляций фактического тренда параметра \bar{E}_{3B} и графика прогнозной модели (3.13). В качестве параметра T в модели использовалось исходное прогнозное значение ресурса T_{PP} и его экспоненциально сглаженная величина $\bar{T}_{EXP}(\tau_n)$. Из рис. 3.9 следует, что график коэффициента корреляции

фактической и расчетной кривых, где в качестве параметра T_{PP} 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 прогнозной модели имеет те же качества нормальности и достоверности своей величины. Собственно, подобный вывод следует и из информации, приведенной на рис. 3.8.

Корреляционный анализ выполнен в предположении, что повреждаемость режущего инструмента отсутствует, и изменения его

ресурса носят вероятностный характер. В практике обработки материалов повреждаемость инструмента в процессе резания возрастает, что и является, в конечном счете, причиной его замены. Развитие с течением времени дефектов инструмента частично учтено введением интервальной оценки прогноза ресурса, нижняя граница которой равна наиболее вероятной наработке инструмента до его замены. Для повышения достоверности оценки технического состояния обрабатываемой системы следует воспользоваться методами теории нечетких множеств, которые будут рассмотрены в разд. 4, и подкрепить таким образом формальные математические оценки ресурса инструмента методами, учитывающими возможные изменения состояния инструмента на участке его эксплуатации от текущего момента времени до прогнозируемого момента его замены.

Прогноз индивидуального ресурса режущего инструмента, отвечающего текущим условиям его эксплуатации, следует применить и при адаптивном управлении процессом резания. Это позволит существенно увеличить эффективность адаптивного управления процессом металлообработки, т.к. позволяет напрямую управлять длительностью бездефектной обработки резанием. Один из вариантов подобного адаптивного управления с использованием прогнозной оценки фактического ресурса инструмента будет рассмотрен в разд.4.

Выводы к разделу 3

1. На примере металлообрабатывающих технологических систем предложена существенно отличающаяся от принятых методология прогнозирования ресурса механического оборудования, заключающаяся в идентификации прогнозной модели, в математическую структуру которой включены параметры, используемые для определения искомого ресурса подконтрольного оборудования.

2. Исходные для прогноза ресурса инструмента данные, получаемые в результате непрерывного контроля звука,

сопровождающего процесс резания, учитывают индивидуальные особенности нагружения инструмента за время выполнения заданной технологической операции, существенно повышая тем самым достоверность прогноза.

3. Оценка статистической значимости прогнозной модели показала, что коэффициент модели согласно F -критерию Фишера статистически значимы. Коэффициенты корреляции R между фактическими параметрами тренда звука и графиками прогнозной модели составил:

– на участке нормального износа инструмента при продольном точении (обточке) 0,852 , при фрезеровании цилиндрической фрезой 0,993;

– на участке катастрофического износа инструмента при продольном точении 0,903, при фрезеровании цилиндрической фрезой 0,992.

РАЗДЕЛ 4

Разработка и программная реализация методов и алгоритмов прогнозирования ресурса, диагностирования технического состояния и адаптивного управления работой обрабатывающих систем

В настоящем разделе представлены результаты разработки прогнозно-диагностического комплекса, позволяющего в режиме реального времени без прерывания процесса обработки материалов резанием контролировать техническое состояние и осуществлять адаптивное управление работой обрабатывающих систем. Комплекс представляет из себя комбинацию программного продукта и аппаратных средств и предназначен для оперативного контроля параметры звуковой волны и вибрации, сопровождающих работы данного типа промышленного оборудования.

По результатам этого контроля комплекс прогнозирует реализующийся в данных технологических условиях резания ресурс инструмента и станка. Далее рассчитываются показатели состояния основных элементов обрабатывающей системы – детали, инструмента, элементов станочного оборудования и, исходя из их величин, предлагается решение (ставится диагноз) о целесообразности продолжения процесса резания на заданных режимах или же о необходимости их коррекции с целью бездефектного завершения текущего технологического перехода.

Прогнозно-диагностический комплекс автоматизирован посредством применения микропроцессорного устройства, что обеспечивает внедрение комплекса в машиностроительное производство.

Микропроцессорное устройство содержит оригинальный программный продукт, воспроизводящий в формализованном виде алгоритм работы рассмотренного в разд. 3 метода прогнозирования ресурса обрабатывающей системы и разработанного в данном разделе метода диагностирования технического состояния обрабатывающей системы и адаптированного управления ею в процессе обработки материалов резанием.

4.1. Основные положения метода диагностирования технического состояния обрабатывающих систем

При разработке метода, составляющего алгоритмическую основу прогнозно-диагностического комплекса, руководствовались следующими положениями, согласно которым метод должен обеспечивать:

- оперативное представление информации о ресурсе обрабатывающей системы и, исходя из этого, указывать момент ее своевременной подналадки с целью корректировки режима резания или замены инструмента для предотвращения непредвиденного отказа (поломки) инструмента и появления брака обрабатываемой детали;

- непрерывный контроль качества обработки детали, технического состояния режущего инструмента и станочного оборудования.

Метод разработан с учетом требований соответствующих ГОСТов, например, [69], нормирующих отдельные характеристики технического состояния технологической обрабатывающей системы и ее отказы:

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

- «параметрические отказы» наблюдаются при чистовой обработке на участке AB кривой износа инструмента (рис. 2.18 и рис. 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 $h_{зоп}$;

- точность чистовой и получистовой (достаточно часто) видов обработки косвенно характеризуется размерным (радиальным) износом лезвия инструмента, а качество поверхности описывается величиной ее шероховатости;

- «функциональные отказы» происходят при черновой (чаще

всего) или полуволновой (реже) видах обработки, когда процесс резания не прекращается в точке B_1 кривой износа, а может продолжаться даже до точки C , где износ лезвия достигает недопустимой величины $h_{3нд}$ (рис. 2.18 и 4.1).

К функциональным отказам также относят сколы и выкрашивания режущей кромки, приводящие в конечном счете к выходу инструмента из строя и его замене; наряду с отказами инструмента возможен также отказ обрабатывающей системы из-за дефектов станочного оборудования, что также требует постоянного контроля его состояния.

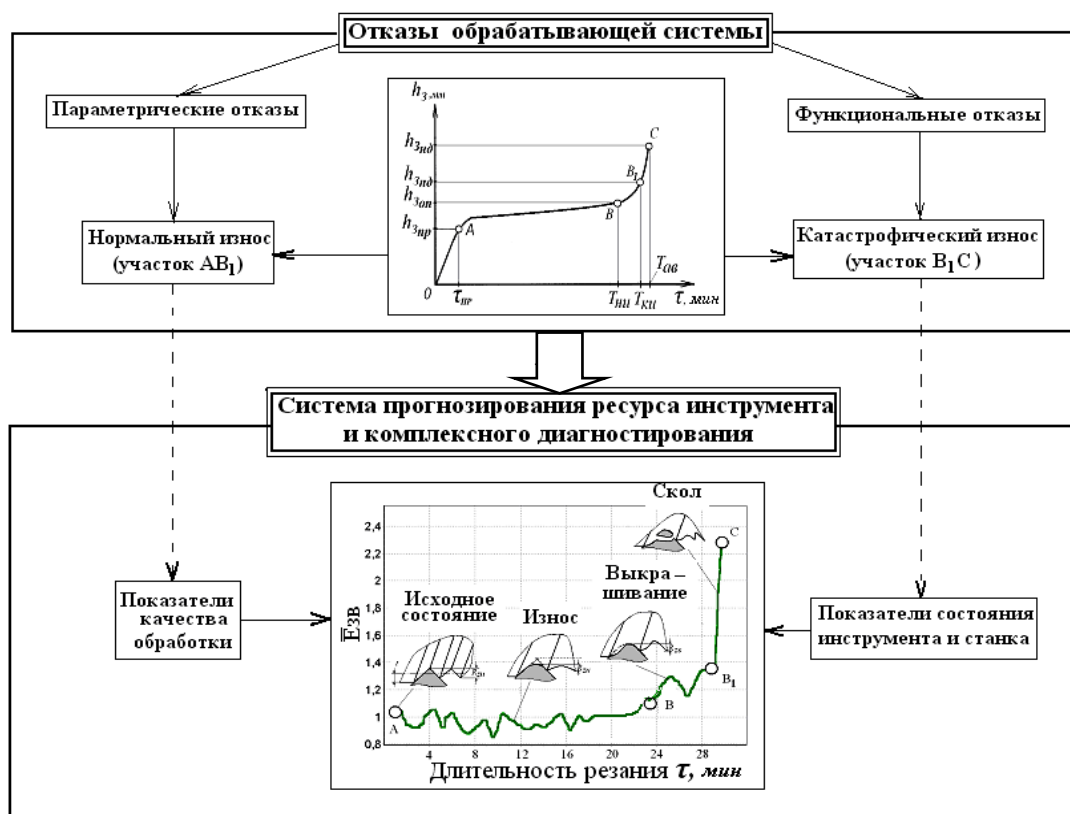


Рисунок 4.1 – Основные положения метода диагностирования технического состояния обрабатывающих систем

Структурно–логическая схема алгоритма функционирования системы диагностирования технического состояния и прогнозирования ресурса представлена на рис. 4.2.

Как следует из схемы, процесс диагностирования начинается с измерения и первоначальной обработки исходных данных, необходимых для прогнозирования и оценки технического состояния

обрабатывающей системы.

В качестве исходных данных используются относительная величина амплитуды звуковой волны, сопровождающей процесс резания (параметр $\bar{E}_{зв}$), и уровни вибрации станка. Параметр $\bar{E}_{зв}$, послужил основой для прогнозирования ресурса элементов обрабатывающей системы в соответствии с методикой, изложенной в разд. 3. По этой же методике определяется наработка станка до остановки его на ремонт (осмотр, подналадку). В этом случае вместо параметра $\bar{E}_{зв}$ используется амплитуда вибрации A_B (амплитуда виброскорости).

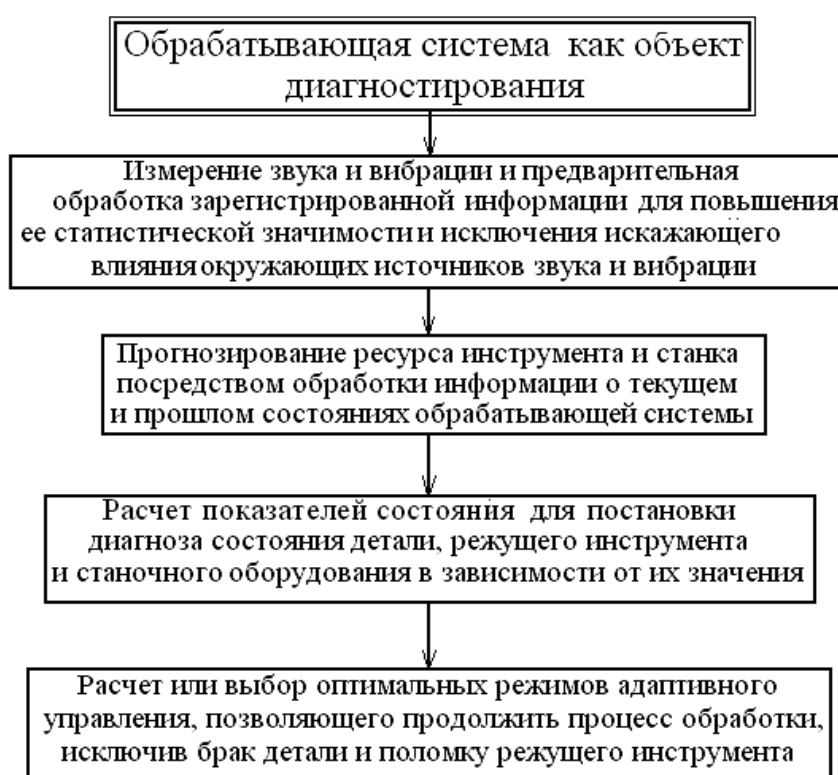


Рисунок 4.2 – Структурно–логическая схема алгоритма функционирования системы диагностирования и прогнозирования ресурса обрабатывающей системы

На основании прогноза ресурса обрабатывающей системы диагностируется ее техническое состояние согласно рассмотренной ниже методологии.

4.2. Методология диагностирования состояния обрабатывающей системы

При разработке методологии диагностирования технического

состояния обрабатывающей системы были использованы основные положения теории «нечетких множеств» [206]. Согласно этой теории степень критичности состояния инструмента и конструктивных узлов станка оценивается посредством безразмерных показателей состояния $a_{\text{сост}}$. Функции, посредством которых рассчитываются показатели состояния, в теории «нечетких множеств» называются «функциями принадлежности» [206].

«Функция принадлежности» трансформирует исходные значения входных переменных (параметра \bar{E}_{3B} , уровня вибрации узлов станка A_B , текущую наработку инструмента τ и прогноз их ресурса $T_{\text{пр}}$) в значения лингвистических переменных «термов» – диагнозов текущего состояния объекта диагностирования. Важным свойством «функции принадлежности» является то, что она представляет собой безразмерную функцию, изменяющуюся от нуля до единицы. В этих же пределах за время обработки материала изменяются и показатели состояния, проходя последовательно ряд значений лингвистической переменной.

Лингвистическая переменная, называемая в данном случае «показателем состояния объекта контроля», имеет ряд значений «термов». «Термы» представляют собой набор вербальных величин, описывающих постепенно ухудшающийся диагноз состояния объекта диагностического контроля. В табл. 4.1 приведены интервалы, в которых в рассматриваемом случае изменяются физические 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 состояния объекта контроля»

Вербальное значение «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

«Терм» под названием «Требуется подналадка» соответствует, в частности, промежуточному участку BB_1 кривой износа (рис. 2.18 а) и

тренда параметра \bar{E}_{3B} (рис. 2.18 б). Прекращение обработки детали при попадании значения «функции принадлежности» в этот «терм» обеспечивает выполнение дополнительных условий безопасности и может быть рекомендованным к применению при изготовлении ответственных изделий, а также при адаптивном управлении резанием.

Процедура диагностирования заключается в сравнении фактического значения лингвистических переменных с их стандартными интервальными значениями, приведенными в табл. 4.1. В зависимости от стандартного интервала, куда попадает текущее фактическое значения лингвистической переменной, текущее состояние объекта диагностирования относится к тому или иному «терму» и таким образом ставится тот или иной диагноз его технического состояния.

В результате будут получены выражения для «функций принадлежности», описывающие состояние инструмента, качество обработки детали и техническое состояние станочного оборудования. Эти показатели, в свою очередь, являются составляющими вектора, описывающего степень критичности технического состояния обрабатывающей системы в целом.

4.2.1. Диагностирование технического состояния режущего инструмента

В процессе обработки резанием режущий инструмент переходит из одного состояния в другое. Соответственно изменяется и тренд параметра \bar{E}_{3B} . Состояние инструмента можно изобразить в виде точки на плоскости с координатами «параметр $\bar{E}_{3B}(\tau_n)$ – время τ_n » (рис. 4.3). Степень изменения \hat{E}_{3B} параметра \bar{E}_{3B} за время протекания технологического процесса обработки описывается следующей «функцией принадлежности»:

$$\hat{E}_{3B} = \frac{\bar{E}_{3B}(\tau_n) - \bar{E}_{3B}(\tau_0)}{\bar{E}_{3B}^{KP} - \bar{E}_{3B}(\tau_0)}, \quad (4.1)$$

где: $\bar{E}_{3B}(\tau_n)$, $\bar{E}_{3B}(\tau_0)$, \bar{E}_{3B}^{KP} – текущее, исходное ($\bar{E}_{3B}(\tau_0) = 1$) и предельно

допустимое (критическое) значение параметра \bar{E}_{3B} ($\bar{E}_{3B}^{KP} = \bar{E}_{3B}(T_{PP})$), где T_{PP} – ресурс инструмента).

Функция (4.1) согласно классификации, применяемой в теории «нечетких множеств» [206], относится к разряду «S–линейных функций» и имеет ясный физический смысл. Она характеризует часть допуска ($\bar{E}_{3B}^{KP} - \bar{E}_{3B}(\tau_0)$), которой соответствует разность между текущим значением параметра \bar{E}_{3B} и его исходным значением ($E_{3B}(\tau) - E_{3B}(\tau_0)$). В момент достижения текущим значением параметра \bar{E}_{3B} границы допуска ($E_{3B}(\tau) = E_{3B}^{KP}$) «функция принадлежности» (4.1) равна единице.

Для исключения влияния на оценку состояния инструмента нестабильности параметра \bar{E}_{3B} параметр $E_{3B}(\tau_n)$ в выражении (4.1) заменяем его сглаженными значениями. Сглаживание осуществляется путём аппроксимации дискретных значений параметра \bar{E}_{3B} графиком прогнозной модели (3.13). В этом случае функция (4.1) примет следующий вид:

$$\hat{E}_{3B} = \frac{\left(\frac{\tau_n - \tau_0}{T_{PP} - \tau_n}\right)^\alpha}{1 + \left(\frac{\tau_n - \tau_0}{T_{PP} - \tau_n}\right)^\alpha} = \frac{(\tau_n - \tau_0)^\alpha}{(T_{PP} - \tau_n)^\alpha + (\tau_n - \tau_0)^\alpha}. \quad (4.2)$$

Параметр \hat{E}_{3B} в соответствии со свойствами «функций принадлежности» изменяется от нуля до единицы, достигая предельной величины к моменту замены режущего инструмента ($0 < \bar{E}_{3B} \leq 1$). Лингвистическая переменная в данном случае называется «*степень изменения параметра \bar{E}_{3B}* » 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 параметра \bar{E}_{3B} »

Вербальное значение «термов»			
«ниже средней»	«средняя»	«выше средней»	«недопустимая»
$0 < \hat{E}_{3B} \leq 0,41$	$0,41 < \hat{E}_{3B} \leq 0,63$	$0,63 < \hat{E}_{3B} < 1,0$	$\hat{E}_{3B} \geq 1,0$

Для удобства применения в практике контроля процесса резания вводится «терм» «недопустимая степень изменения»,

свидетельствующий об исчерпании инструментом своих эксплуатационных качеств, приводящих к его разрушению и появлению брака детали. Рассмотренная лингвистическая переменная характеризует текущее техническое состояние инструмента. 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 амплитуды звуковой волны, сопровождающей процесс резания (градиентом тренда параметра $\bar{E}_{ЗВ}$).

На рис. 4.3 показаны три возможных варианта тренда параметра $\bar{E}_{ЗВ}$, отличающихся в рассматриваемый момент времени τ_n углом наклона φ_i . Тангенсы этих углов представляют собой разные градиенты тренда параметра $\bar{E}_{ЗВ}$, 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.

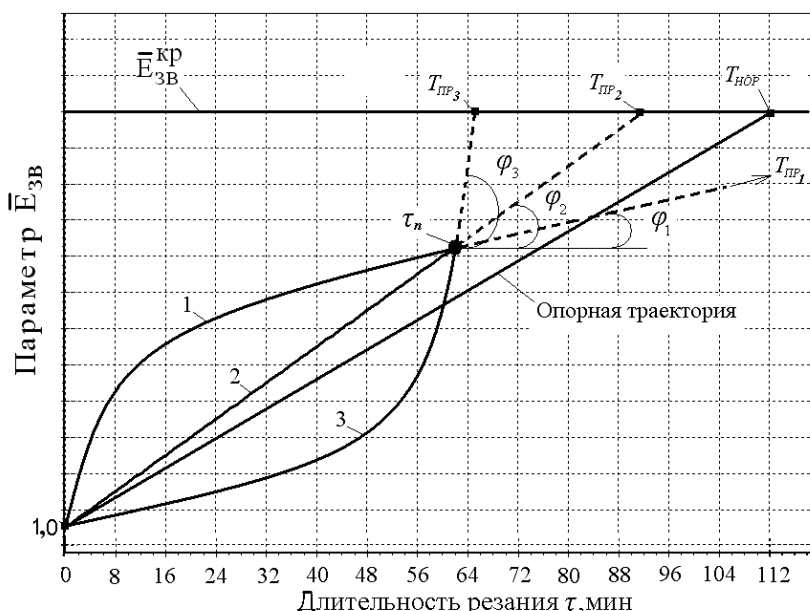


Рисунок 4.3 – Возможные варианты трендов параметра $\bar{E}_{ЗВ}$, проходящих через точку, описывающую текущее состояние инструмента

Под опорным трендом понимается такая траектория изменения

параметра $\bar{E}_{ЗВ}$, а соответственно и состояния инструмента (рис. 4.3 и рис. 4.4), при которой инструмент достигнет предельно допустимого состояния, отработав нормативное время ($T_{НОР} = 60, 90, 120$ мин) без появления брака детали.

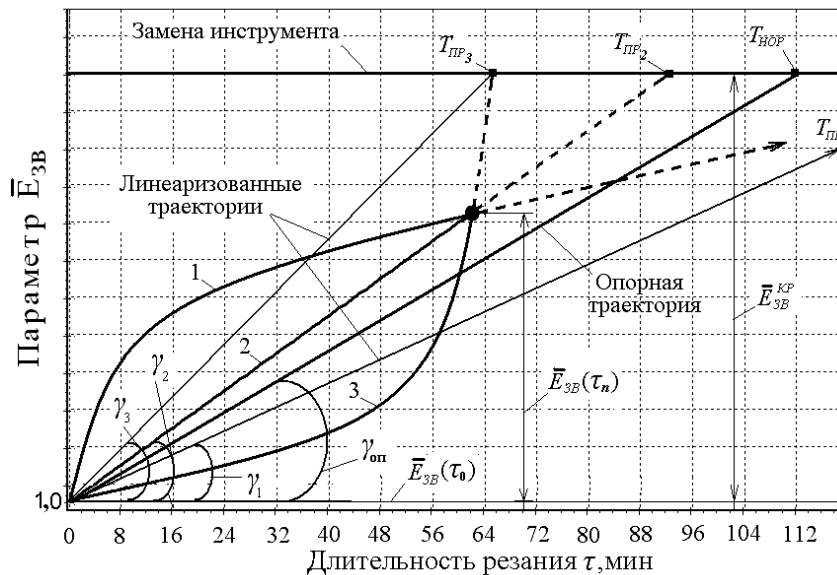


Рисунок 4.4 – Опорный и фактические тренды параметра $\bar{E}_{ЗВ}$

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 проводится замена режущего инструмента.

Наклоны этих линеаризованных трендов характеризуются углом γ_i . Тангенсы этих углов и угла наклона опорной траектории соответственно равны:

$$\operatorname{tg}(\gamma_i) = \frac{\bar{E}_{ЗВ}^{KP} - \bar{E}_{ЗВ}(\tau_0)}{T_{ПРi} - \tau_0}, \quad \operatorname{tg}(\gamma_{оп}) = \frac{\bar{E}_{ЗВ}^{KP} - \bar{E}_{ЗВ}(\tau_0)}{T_{НОР} - \tau_0}. \quad (4.3)$$

Разделим первое выражение на второе и тем самым пронормируем фактическую скорость $V_{ЗВi}$ изменения параметра $\bar{E}_{ЗВ}$ (градиент его тренда) опорной скоростью $V_{ЗВ}^{оп}$ (градиентом опорного тренда):

$$\bar{V}_{ЗВ} = \frac{V_{ЗВi}}{V_{ЗВ}^{оп}} = \frac{T_{НОР} - \tau_0}{T_{ПРi} - \tau_0}. \quad (4.4)$$

Формула (4.4) представляет собой «функцию принадлежности», которая изменяется от нуля до единицы ($0 < \bar{V}_{ЗВ} \leq 1$) и дает количественную оценку градиента тренда звука, а косвенно и градиента изменения состояния инструмента. Лингвистическая переменная в данном случае называется «*скорость изменения параметра $\bar{E}_{ЗВ}$* ». «Термы» этой переменной и их граничные значения приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3 – Базовая шкала лингвистической переменной «*скорость изменения параметра $\bar{E}_{ЗВ}$* »

Вербальное значение «термов»			
«медленная»	«умеренная»	«быстрая»	«недопустимая»
$0 < \bar{V}_{ЗВ} \leq 0,41$	$0,41 < \bar{V}_{ЗВ} \leq 0,63$	$0,63 < \bar{V}_{ЗВ} < 1,0$	$\bar{V}_{ЗВ} \geq 1,0$

Рассмотренные лингвистические переменные $\bar{E}_{ЗВ}$ и $\bar{V}_{ЗВ}$ объединены в обобщенную лингвистическую переменную $a_{ИН}$, именуемую «*техническое состояние режущего инструмента*» (4.5), куда они входят в виде слагаемых с весовыми коэффициентами:

$$a_{ИН} = \psi \bar{E}_{ЗВ} + (1 - \psi) \bar{V}_{ЗВ}. \quad (4.5)$$

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

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

С учетом (4.2) и (4.4) выражение (4.5) примет следующий вид:

$$a_{ИН} = \psi \frac{(\tau - \tau_0)^\alpha}{(T_{ПР} - \tau)^\alpha + (\tau - \tau_0)^\alpha} + (1 - \psi) \frac{T_{НОР} - \tau_0}{T_{ПР} - \tau_0}, \quad (4.6)$$

где $T_{НОР}$ – нормативное (заданное в паспорте или каталогах) время эксплуатации инструмента до затупления, т. е. равное периоду стойкости; $T_{ПР}$ – прогноз фактического ресурса инструмента.

Выражение (4.6) 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.

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

Вербальное значение «термов»			
«хорошее»	«удовлетворительное»	«требующее подналадки»	«требующее замены»
$0 < a_{ИН} \leq 0,41$	$0,41 < a_{ИН} \leq 0,63$	$0,63 < a_{ИН} < 1,0$	$a_{ИН} \geq 1,0$

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

$$a_{КОМП} = a_{ИЗ} + a_{ВК} - a_{ИЗ} \cdot a_{ВК}, \quad (4.7)$$

где $a_{ИЗ}$ и $a_{ВК}$ – показатели, описывающие состояние инструмента при нормальном и катастрофическом износах (выкрашивании).

Параметры $a_{ИЗ}$ и $a_{ВК}$ рассчитываются по формуле (4.6) при подстановке в нее вместо величины ресурса $T_{ПР}$ параметров прогнозной функции (3.13) $T_{НИ}$ и $T_{КИ}$, определяемых при ее параметрической идентификации.

4.2.2. Контроль качества обработки деталей резанием

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

$$a_{КАЧ} = \varphi \cdot a_{ТОЧ} + (1 - \varphi) \cdot a_{Ш}, \quad (4.8)$$

где $a_{\text{точ}}$ – лингвистическая переменная – «показатель точности обработки»; $a_{\text{ш}}$ – лингвистическая переменная – «показатель шероховатости поверхности»; φ – весовой коэффициент ($\varphi = 0,1-0,9$).

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 слагаемых «функции принадлежности» (4.8).

4.2.2.1. 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. 4.5).

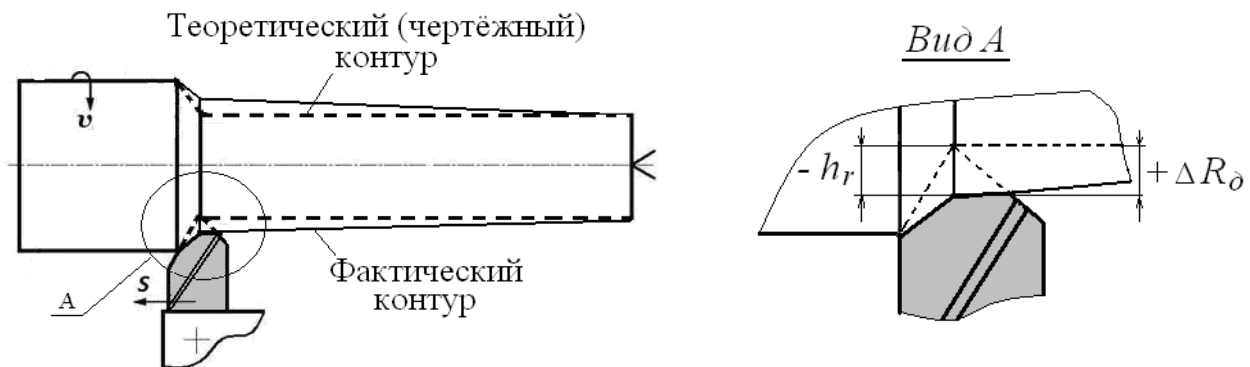


Рисунок 4.5 – Ухудшение точности обработанной поверхности из-за размерного износа лезвия инструмента

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} .

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:

$$a_{точ} = f(h_r(\tau_0), h_r(\tau), \tau, \bar{T}_{exp}) = h_r^\alpha(\tau_0) \cdot h_r^\beta(\tau) \cdot \tau^\gamma \cdot \bar{T}_{exp}^\lambda. \quad (4.9)$$

Далее определяем значения показателей степени. Для этого заменяем величины, стоящие в выражении, их размерностями и подставляем в формулу (4.9):

$$1 = L^\alpha L^\beta T^\gamma T^\lambda = L^{\alpha+\beta} T^{\gamma+\lambda}. \quad (4.10)$$

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

$$\alpha + \beta = 0, \gamma + \lambda = 0. \quad (4.11)$$

Дополняем данную систему двух уравнений с четырьмя неизвестными до 4 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:

$$a_{точ} = \frac{h_r(\tau)}{h_r(\tau_0)} \frac{\tau}{\bar{T}_{exp}}. \quad (4.12)$$

Используя определенную в разд. 2 тесную корреляционную зависимость между кривой износа инструмента и трендом звука, перепишем соотношение (4.12) в следующем виде:

$$a_{точ} = \frac{E_{зв}(\tau)}{E_{зв}(\tau_0)} \frac{\tau}{\bar{T}_{exp}} = \bar{E}_{зв}(\tau) \frac{\tau}{\bar{T}_{exp}}. \quad (4.13)$$

Выражение (4.13) 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:

$$\delta = \frac{D_{\phi} - D_n}{D_n^{+\Delta B} - D_n}, \quad (4.14)$$

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:

$$\delta = \frac{D_n + 2 \cdot h_r - D_n}{D_n + \Delta B - D_n} = \frac{2 \cdot h_r}{\Delta B}. \quad (4.15)$$

Выражение (4.15) изменяется от нуля при острозаточенном 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 $a_{\text{точ}}$, изменяясь от нуля до единицы, адекватно описывает степень изменения геометрии детали по мере затупления режущего инструмента.

4.2.2.2. Показатель шероховатости обработанной поверхности

Для получения выражения для показателя качества (показателя шероховатости) обработанной поверхности детали $a_{\text{ш}}$ были проведены специально поставленные эксперименты. Целью эксперимента было установление корреляционной зависимости между параметром $\bar{E}_{\text{ЗВ}}$ и параметром R_a , характеризующим шероховатость. Шероховатость измерялась при продольном точении Ст.40х на режимах, приведенных во второй строке табл. 5.1.

Измерения параметра R_a проводились периодически через каждые пять проходов резца с помощью профилометра типа 283. Результаты измерений фиксировались посредством стрелочного индикатора прибора и дополнительно записывались на ноутбук.



Рисунок 4.6 – Регистрация параметра шероховатости R_a посредством профилометра типа 283 и ноутбука

Схема измерений приведена на рис. 4.6. Сигнал, зарегистрированный на ноутбук, подвергался дальнейшей обработке с целью определения спектра и профиля шероховатости. Результаты экспериментов, приведенные на рис. 4.7 – 4.10, позволили установить тесную корреляцию амплитуды звуковой волны E_{3B} и параметра шероховатости R_a .

Так, на рис. 4.7 приведены тренды параметра \bar{E}_{3B} и параметра шероховатости. При этом для наглядности параметр шероховатости приведен к безразмерному виду \bar{R}_a ($\bar{R}_a = \frac{Ra(\tau)}{Ra(\tau_0)}$), где $Ra(\tau_0), Ra(\tau)$ – параметр шероховатости, определенный соответственно в начале процесса резания и в текущий момент времени. Коэффициент корреляции R между обоими трендами довольно высокий ($R = 0,944$).

Эксперимент позволил также установить:

- корреляционную зависимость спектров шероховатости и звуковой волны (рис. 4.8, 4.9, коэффициент корреляции $R = 0,783$);
- совпадение как по уровню, так и по шагу следования пиков профиля шероховатости и временной реализации звуковой волны (рис. 4.10, ось ординат в данном случае промасштабирована в абсолютных значениях микронеровностей Y , мкм, на рисунке указаны также величина подачи S и значение Ra шероховатости, измеренное профилометром).

Результаты экспериментов позволили составить следующую пропорцию, характеризующую согласованное развитие амплитуды звуковой волны и высотного параметра шероховатости за время работы обрабатывающей системы:

$$\frac{R_z(\tau)}{R_z(\tau_0)} \approx \frac{E_{3B}(\tau)}{E_{3B}(\tau_0)}, \quad (4.16)$$

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 (4.16), в качестве аналитического выражения для искомой «функции принадлежности», то получим следующую формулу для расчета численного значения показателя шероховатости $a_{ш}(\tau)$:

$$a_{ш}(\tau) = \frac{E_{3B}(\tau)}{E_{3B}(\tau_0)}. \quad (4.17)$$

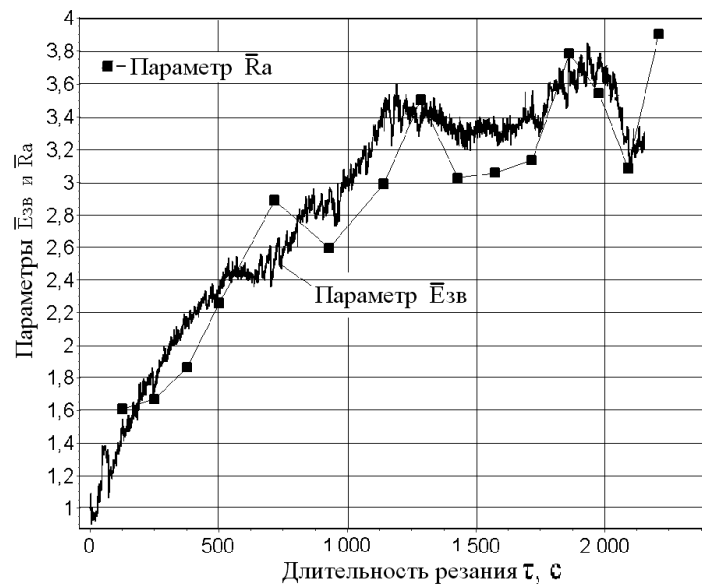


Рисунок 4.7 – Сравнение трендов параметров $\bar{E}_{зв}$ и \bar{Ra}

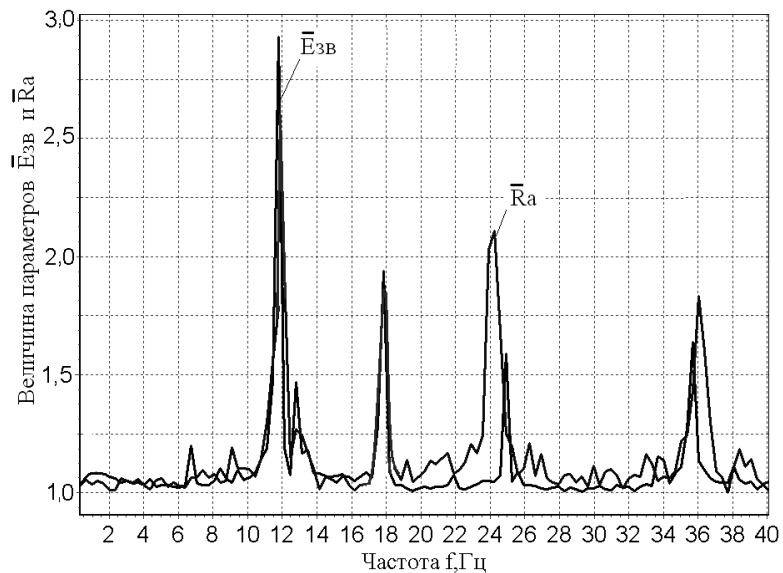


Рисунок 4.8 – Спектры параметров шероховатости \bar{Ra} и звука $\bar{E}_{зв}$

146

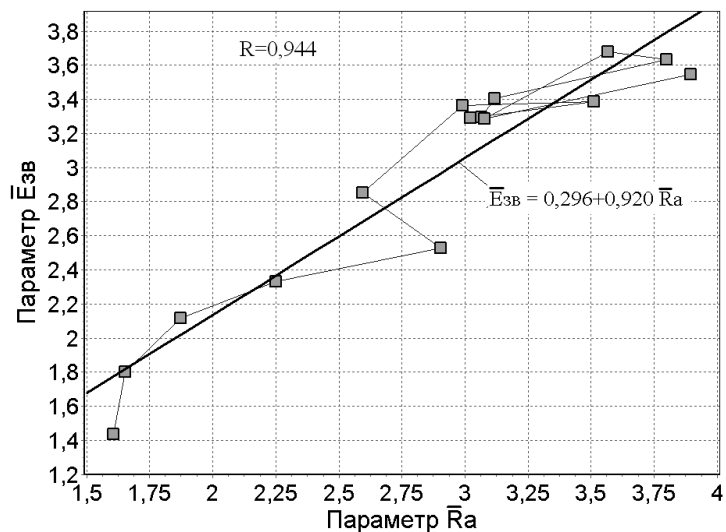


Рисунок 4.9 – Регрессионная зависимость между параметрами шероховатости \bar{Ra} и звука $\bar{E}_{зв}$

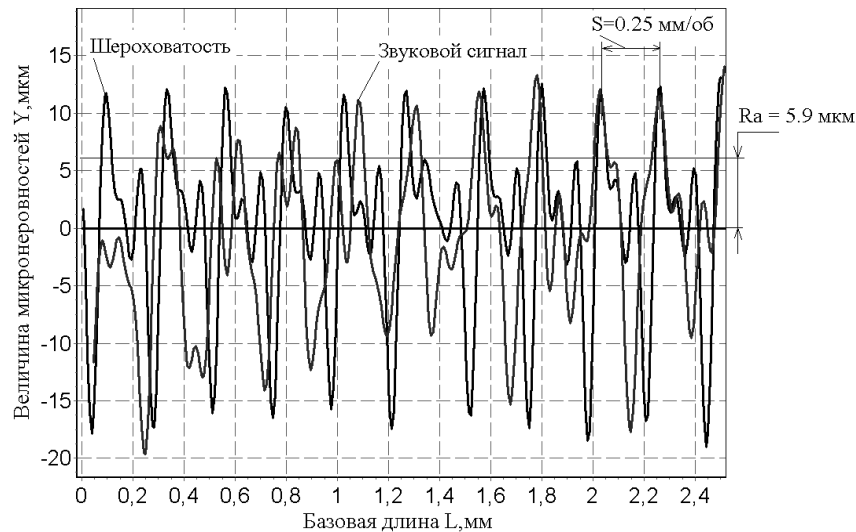


Рисунок 4.10 – Профиль шероховатости и форма звуковой волны

Если пропорцию (4.9) разрешить относительно текущего значения высотного параметра $R_z(\tau)$, то получим выражение для показателя шероховатости, имеющего размерность длины, *мкм*:

$$a_{ш}(\tau) = R_z(\tau_0) \frac{E_{3B}(\tau)}{E_{3B}(\tau_0)} = R_z(\tau_0) \bar{E}_{3B}(\tau). \quad (4.18)$$

Исходное значение параметра шероховатости $R_z(\tau_0)$, *мкм*, в зависимости от величины радиуса вершины резца r_6 определяется следующим образом:

– при $r_6 = 0$

$$R_z = \frac{S \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \operatorname{tg} \phi_1}{\operatorname{tg} \phi + \operatorname{tg} \phi_1} = \frac{S \cdot \sin \phi \cdot \sin \phi_1}{\sin(\phi + \phi_1)}, \quad (4.19)$$

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

– при $r_6 \neq 0$

$$R_z = 1000 \left(r_6 - r_6 \sqrt{1 - \frac{S^2}{4r_6^2}} \right) \approx 1000 \frac{S^2}{8r_6}. \quad (4.20)$$

При интерактивном контроле динамического поведения обрабатываемой системы показатель шероховатости удобнее рассчитывать по формуле (4.18), сохраняющей размерность шероховатости. При автоматическом контроле, наоборот, удобно применять безразмерную форму его представления (4.17) (она используется в выражении (4.8)), т. к. она проще поддается формализации при составлении программного продукта, включаемого в программную среду указанной автоматической системы контроля динамического поведения обрабатываемой системы.

4.2.3. Диагностирование технического состояния станочного оборудования

Диагностирование технического состояния станочного оборудования осуществляется с помощью экспертной системы диагностирования, в соответствии 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.

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 в зависимости от того, где они применяются.

Зубчатые передачи

Наличие значительного количества разнообразных зубчатых передач является характерной особенностью кинематической схемы традиционно применяемого металлообрабатывающего станочного оборудования (рис. В.3).

Работу зубчатой пары сопровождает целый ряд характерных вибраций, вызываемых трением и ударами при обкатывании зубьями одной шестерни зубьев 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, а также 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. в результате чего, например, при работе редуктора возникают шумы и удары. Кроме того, изменению динамического состояния зубчатых передач, повышению вибраций в значительной мере способствуют нагрузки, обусловленные износом деталей редуктора. Особенно ситуация усугубляется при износе зубчатых венцов деталей, когда изменяются отдельные элементы профилей 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, например 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 (перекосы осей валов) вызывают вибрацию на частотах вращения валов обоих колес и/или на модуляционных частотах.

Обычно в спектре вибраций 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 этот компонент является практически неизменным и начинает расти по экспоненте только 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, то 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);

– определяется ресурс работы каждого из контролируемых узлов станка путем идентификации прогнозной модели (4.21) по результатам анализа тренда параметра диагностического признака каждого из контролируемых дефектов интересующего станочного узла. Прогнозная модель (4.21) представляет собой модификацию прогнозной модели (3.13), используемой для прогнозирования ресурса инструмента:

$$A_j^p(\tau) = A_j^p(\tau_0) \left\{ \eta \left[1 + \alpha \left(\frac{\tau_i - \tau_0}{T_v - \tau_i} \right)^\gamma \right] + (1 - \eta) \left[1 - \beta \left(\frac{\tau_i - \tau_0}{T_{II} - \tau_i} \right)^\lambda \right] \right\}, \quad (4.21)$$

где τ_0, T_v, T_{II} – наработка станка соответственно на момент первого контроля его технического состояния и прогноз наработки до остановки станка на ремонт по причине износа его узлов; $A_j^p(\tau)$ – уровень частотной составляющей вибрации станка, реагирующей на j -й 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» (4.22), аналогичной функции (4.6):

$$a_{j\text{узл}} = \xi \bar{A}_{j\Gamma} + (1 - \xi) \bar{V}_{j\Gamma}, \quad (4.22)$$

где $\bar{A}_{j\text{узл}} = \left(\frac{\tau - \tau_0}{\hat{T}_{j\text{УСТ}, j\text{ИЗН}} - \tau} \right)^{\beta, \alpha}$ – степень изменения уровня вибрации на

j -й информационной гармонике, выраженная через параметры прогнозной модели (4.21); $\bar{V} = \frac{T_{\text{НОР}}}{\hat{T}_{j\text{УСТ}, j\text{ИЗН}}}$ – безразмерная скорость

изменения уровня вибрации на j -й информационной гармонике; $\hat{T}_{j\text{УСТ}, j\text{ИЗН}}$ – прогноз ресурса j -го узла станка, ограниченный соответственно его прогнозируемым разрушением из-за усталости материала и достижением предельной величины износа; $T_{\text{НОР}}$ – принятый (нормативный) срок службы (наработки до ремонта) диагностируемого узла; ξ – весовой коэффициент ($\xi = 0,1 - 0,9$).

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.

Величину (уровень) вибрации, соответствующую оставшейся части спектра, предложено рассчитывать по следующей формуле:

$$V_{\text{ПРОЧ}} = \sqrt{V_{\text{СУМ}}^2 - \sum_{i=1}^k V_{j\Gamma}^2}, \quad (4.23)$$

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

Таблица 4.5 – Аналитические выражения «функций принадлежности», используемых при диагностировании технического состояния обрабатывающей системы

Элемент обрабатывающей системы	Показатель состояния	
	характеризует	«функция принадлежности»
Деталь	качество обработки	$a_{\text{КАЧ}} = \varphi \cdot \bar{E}_{\text{ЗВ}}(\tau) \frac{\tau}{T_{\text{exp}}} + (1 - \varphi) \cdot \bar{E}_{\text{ЗВ}}(\tau)$
Инструмент	износ рабочих поверхностей	$a_{\text{ИЗ}} = \varphi \frac{(\tau - \tau_0)^{\eta}}{(\tau - \tau_0)^{\eta} + (T_{\text{НИ}} - \tau)^{\eta}} + (1 - \varphi) \frac{T_{\text{НОР}}}{T_{\text{НИ}}}$
	выкрашивание режущих кромок	$a_{\text{ВК}} = \varphi \frac{(\tau - \tau_0)^{\beta}}{(\tau - \tau_0)^{\beta} + (T_{\text{КН}} - \tau)^{\beta}} + (1 - \varphi) \frac{T_{\text{НОР}}}{T_{\text{КН}}}$
	комплексное воздействие износа и выкрашивания	$a_{\text{КОМП}} = a_{\text{ИЗ}} + a_{\text{ВК}} - a_{\text{ИЗ}} \cdot a_{\text{ВК}}$
Станок	степень развития дефектов станка	$a_{\text{СТ}} = \varphi \bar{A} + (1 - \varphi) \bar{V}$

Примечание. $\bar{A} = \frac{A_g(\tau) - A_g(\tau_0)}{A_g(T_{\text{ПР}}) - A_g(\tau_0)}$; $\bar{V} = \frac{T_{\text{НОР}}}{T_{\text{ПР}}}$; $\varphi = 0,1 - 0,9$ – весовой коэффициент

Таким образом, согласно вышеизложенному подходу, удастся контролировать практически все дефекты 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 «дообучаться», уменьшая тем самым число дефектов, имеющих неизвестную природу.

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.

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

Процедура диагностирования состояния обрабатывающей системы для создания условий внедрения ее в практику резания автоматизирована.

4.3. Адаптивное управление режимом резания

Целью адаптивного управления процессом резания является обеспечение заданной по технологическому процессу длительности обработки детали при одновременном обеспечении качества обработки - соответствие геометрии детали и шероховатости ее поверхности требованиям чертежа. В качестве регулируемых параметров в данном случае рассматриваются скорость резания V 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 ширина фаски износа h_3 по задней поверхности лезвия режущего инструмента. Так как величина

h_3 и ресурс инструмента T связаны соотношением (2.15), то управление длительностью эксплуатации инструмента можно осуществлять только за счет изменения скорости (интенсивности) износа γ , так как сама величина износа h_3 искусственной регулировке практически не подлежит. Поэтому алгоритм управления резанием основывается на уменьшении скорости износа инструмента γ до величины, обеспечивающей реализацию на практике его требуемого ресурса T_{TP} . При этом под требуемым ресурсом в данном случае будем понимать ресурс инструмента, обеспечивающий выполнение заданной технологической операции. Ключевой проблемой при управлении резанием является определение фактической (прогнозной) величины ресурса T_{TP} инструмента. Эти два параметра связаны между собой следующим соотношением:

$$\frac{T_{TP}}{T_{TR}} = \frac{\gamma_{TP}}{\gamma_{\Phi}}, \quad (4.24)$$

где γ_{Φ} , γ_{TP} - соответственно фактическая (исходная) скорость износа, обеспечивающая фактический ресурс инструмента T_{TP} и требуемая скорость износа, которая обеспечит требуемую при данной износостойкости инструмента продолжительность резания T_{TR} .

Скорость износа γ пропорциональна произведению усилия прижатия P_{np} , действующего в трущейся паре, и скорости их относительного скольжения $V_{ск}$ [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

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

В данном случае трущейся парой является «задняя поверхность лезвия – поверхность резания на заготовке», а приложенная к площадке износа нормальная сила является одной из составляющих 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, H , определяемые по эмпирической степенной зависимости вида [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.

Значения поправочных коэффициентов и показателей степеней, содержащихся в этих формулах, так же, как и рекомендуемые значения ресурса T инструмента, применяемого для данного вида обработки, приводятся в соответствующих справочниках, например, в [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Для изменения степени износа инструмента необходимо изменять скорость износа Δ , следовательно, необходимо изменять величину множителей P_{np} и $V_{ск}$ в (4.25). Это, в свою очередь, требует изменения параметров режима резания S и V (при $t = const$) в (4.27).

Скорость резания, жестко связанная с частотой вращения, и подача зависят от кинематики станка и могут изменяться либо плавно (например, на станке с ЧПУ), либо ступенчато (на универсальном станке). При варьировании этих режимов глубина резания t для сохранения качества обрабатываемой поверхности должна оставаться постоянной по величине ($t(\tau) = t_0$). Подставляя (4.25) с учетом (4.27) в (4.24), получим

$$\frac{T_{ПП}(\tau)}{T_{TP}} = \frac{P(\tau)V(\tau)}{P_0V_0} = \left[\left(\frac{V(\tau)}{V_0} \right)^n \left(\frac{S(\tau)}{S_0} \right)^y \right] \cdot \frac{V(\tau)}{V_0}, \quad (4.28)$$

где S_0, V_0 – исходные (фактические) значения параметров режима резания, задаваемые традиционным способом [190] при выборе (назначении, расчете и т.п.) режимов резания; $S(\tau), V(\tau)$ – регулируемые (оптимальные) параметры режимов резания, обеспечивающие заданную (требуемую по техпроцессу) длительность обработки.

Требуемые параметры режима резания определяются путем минимизации следующего функционала (целевой функции):

$$U = \left(\frac{T_{ПП}(\tau)}{T_{TP}} - \bar{\gamma}(\tau) \right)^2, \quad (4.29)$$

где $\bar{\gamma}(\tau) = \left(\frac{V(\tau)}{V_0} \right)^{n+1} \left(\frac{S(\tau)}{S_0} \right)^y$ – относительная скорость износа.

Прогнозный ресурс $T_{ПР}(\tau)$ находится по описанному в разд.3 методу и алгоритму по формуле (3.16) по результатам регулярного контроля амплитуды звуковой волны, генерируемой процессом резания.

Адаптивное управление режимом работы обрабатывающей системы осуществляется по следующему алгоритму:

– по принятой методике [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] назначается исходный режим резания, т. е. определяются параметры t_0, S_0, V_0 ;

– регулярно контролируется амплитуда звуковой волны ($E_{ЗВ}^{\phi}$), генерируемая процессом резания;

– результаты контроля (тренд звука $E_{ЗВ}^{\phi}(\tau)$ аппроксимируются уравнением прогнозной модели (3.13), в результате чего определяется ресурс инструмента $T_{ПР}(\tau)$;

– если параметр $T_{ПР}(\tau)$ превышает требуемое для обработки детали (деталей) время, т.е. выполняется условие $T_{ПР}(\tau) > T_{ТР}$, то возможны два варианта развития событий:

- если резание осуществляется в условиях единичного или мелкосерийного производства дорогостоящих изделий, то резание продолжается на исходном режиме;

- если резание осуществляется в условиях серийного производства недорогостоящих деталей, то возможно форсирование (ужесточение) режимов резания с целью повышения производительности (решение принимает оператор);

– если же выполняется условие $T_{ПР}(\tau) < T_{ТР}$, то для обоих типов производств режим резания изменяется таким образом, чтобы выполнялось условие $T_{ПР}(\tau) \geq T_{ТР}$.

Требуемый ресурс $T_{ТР}$ в условиях единичного и мелкосерийного производств принимается равным продолжительности резания $\tau_{РЕЗ}$, рассчитываемой по следующей формуле [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$\tau_{РЕЗ} = \frac{\pi DL}{1000 V_0 S_0} \cdot \quad (4.30)$$

Варьирование параметров режима резания позволит доводить фактический ресурс инструмента T_{IP} до величины, позволяющей выполнить текущее технологическое задание.

На искомые параметры n и S необходимо наложить ограничения. Первым ограничением является шероховатость обработанной поверхности, характеризуемая параметром шероховатости R_a , мкм. Этот параметр связан с регулируемым параметром резания S следующей зависимостью [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$R_a = 1000 \frac{S^2}{8 r_e}, \quad (4.31)$$

где r_e – радиус вершины лезвия резца.

Перейдем к безразмерному виду формулы (4.31):

$$\bar{R}_a = \left(\frac{S(\tau)}{S_0} \right)^2. \quad (4.32)$$

Условием сохранения качества обработки является степень приближения выражения (4.31) к единице. С учетом этого целевая функция (4.29) примет следующий вид:

$$U = \left(\frac{T_{IP}(\tau)}{T_{TP}} - \bar{\gamma}(\tau) \right)^2 + \left(1 - \left(\frac{S(\tau)}{S_0} \right)^2 \right)^2. \quad (4.33)$$

Второе ограничение касается производительности металлообработки, согласно которому произведение варьируемых параметров $V(\tau) \cdot S(\tau)$ должно быть максимальным. Это условие можно записать в безразмерном виде

$$\left(\frac{V_0}{V(\tau)} \right) \cdot \left(\frac{S_0}{S(\tau)} \right) \rightarrow \min. \quad (4.34)$$

С учетом (4.34) целевая функция примет следующий окончательный вид:

$$U = \left[\left(\frac{T_{IP}(\tau)}{T_{TP}} - \bar{\gamma}(\tau) \right)^2 + \left(1 - \left(\frac{S(\tau)}{S_0} \right)^2 \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{V_0}{V(\tau)} \right) \cdot \left(\frac{S_0}{S(\tau)} \right). \quad (4.35)$$

Эффективность регулирования режима, выполняемого посредством минимизации целевой функции (4.35), была проверена

путём компьютерного моделирования. Исходные для моделирования данные были получены экспериментально при продольном точении на станке 16К20Т1. Кинематическая схема станка с ЧПУ 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 40Х обрабатывалась 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 степеней в формуле (3.37) имели следующие значения: $n_{P_x} = -0,4$ (для P_x); $n_{P_y} = -0,3$ (для P_y), $n_{P_z} = -0,15$ (для P_z); $u_{P_x} = 0,2$ (для P_x), $u_{P_y} = 0,8$ (для P_y), $u_{P_z} = 0,9$ (для P_z).

Требуемый ресурс T_{TR} принимался равным средне-статистическому ресурсу режущего инструмента – 120 мин.

Контроль звука осуществлялся в течение всего процесса обработки детали с помощью микрофона, установленного вблизи зоны резания [35]. Сигнал с микрофона подавался на «звуковую карту» компьютера, где подвергался оцифровке и дальнейшей обработке с целью определения фактического ресурса инструмента и сравнения его с требуемым ресурсом и расчетом на основании минимизации целевой функции (4.35) необходимого режима резания.

Результаты эксперимента и их компьютерной обработки приведены на рис. 4.11 и 4.12. На рис. 4.11 показаны характеристики звука, генерируемые процессом резания на исходном и скорректированном режимах резания. На рис. 4.11г представлено соотношение между требуемым ($T_{TR} = 120$ мин) и прогнозным ($T_{TP} = 20 - 100$ мин) ресурсами инструмента.

Как видим, прогнозный ресурс нестабилен по величине, что можно объяснить в т. ч. и неоднородностью структуры материала обрабатываемой заготовки. Так, локальное повышение твердости вызывает рост нагрузки и соответственно локальный рост градиента амплитуды звуковой волны.

Рост градиента нагрузки влечет за собой увеличение скорости износа инструмента и более пессимистический прогноз его ресурса. Нестабильность прогнозной величины ресурса (см. рис. 3.5), в свою очередь, обуславливает нестабильность величин регулируемых параметров режима резания.

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 – использовался текущий прогноз ресурса инструмента $T_{пр}$, а при втором – усредненная относительная прогнозная величина $\bar{T}_{пр}$ (рис. 4.11 з). Как и следовало ожидать, усреднение позволило существенно повысить стабильность выбора регулируемых параметров (рис. 4.12).

На рис. 4.12 приведены графики изменения относительных (безразмерных) значений скорости износа и силы резания, обеспечивающих выполнение технологического задания. 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. 4.12 а, б).

Внедрение в практику резания данного метода управления позволит избежать появления брака, так как, образно говоря, он позволяет «держать руку на пульсе» и гибко менять режим резания в зависимости от прогноза ресурса инструмента. Кроме того, при этом обеспечивается завершение текущего технологического перехода без потери качества обработки.

4.4. Автоматизация работы прогнозно-диагностического комплекса

Алгоритм работы комплекса послужил основой для разработки программного продукта, построенного по модульному принципу (рис. 4.11).

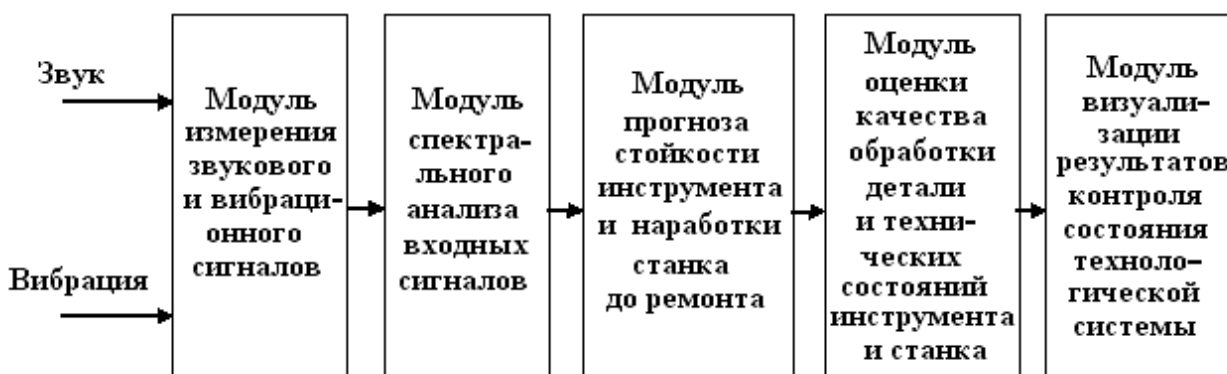
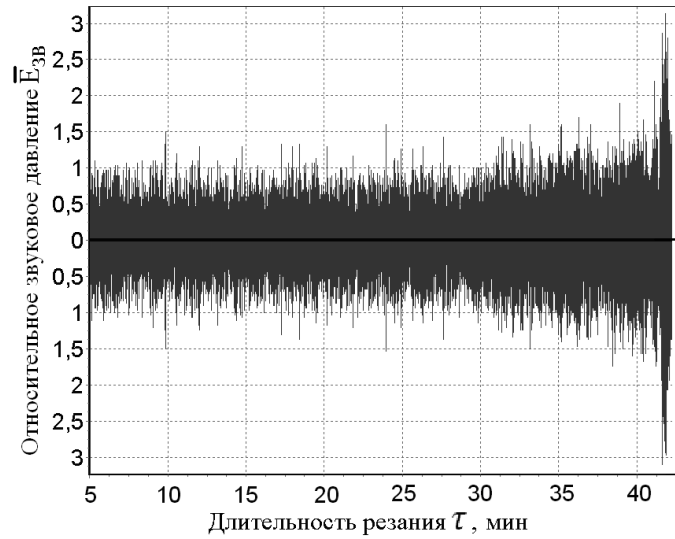
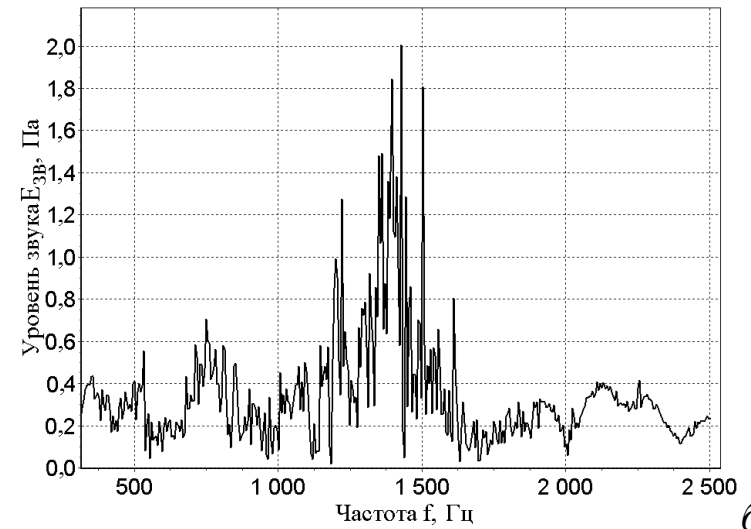


Рисунок 4.11 – Модули, из которых состоит программная часть комплекса



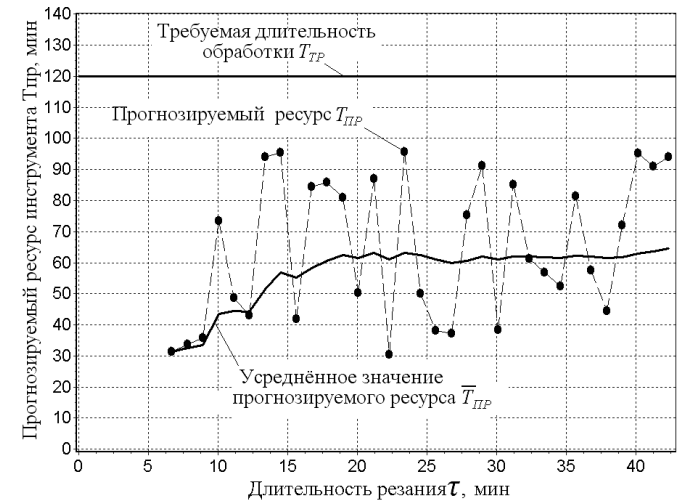
а)



б)

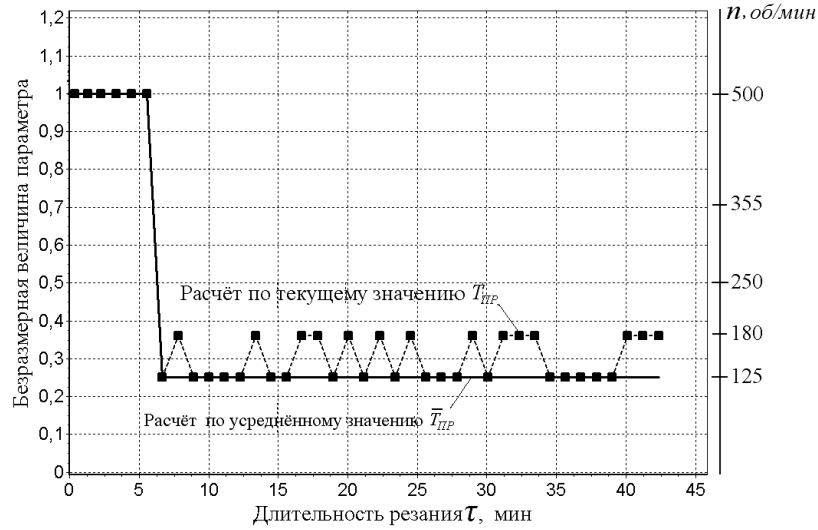


в)

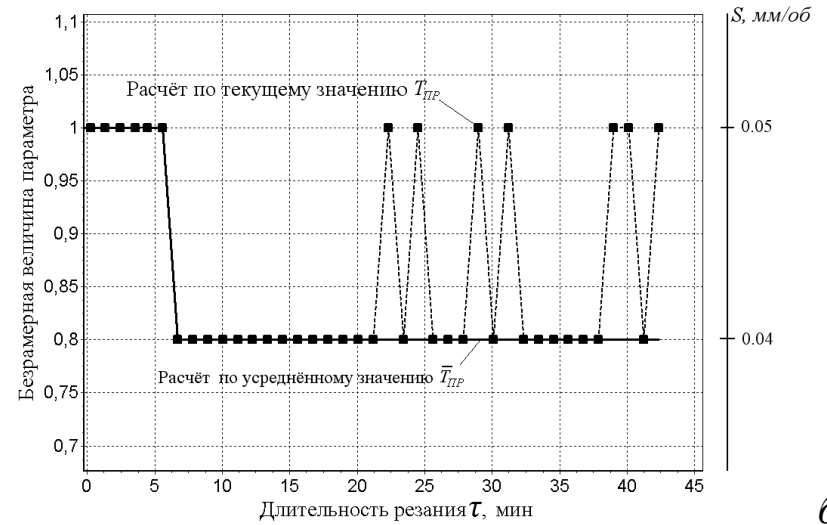


г)

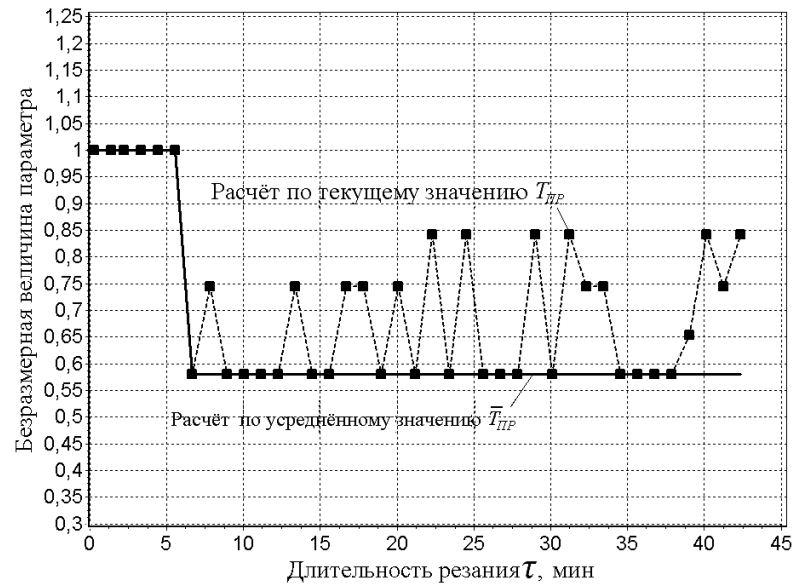
Рисунок 4.12— Характеристики звука: а) временная реализация звука; б) спектр звука; в) тренд параметра $\bar{E}_{зв}$ на исходном и скорректированном режимах резания; г) сравнение требуемого и прогнозируемого ресурса инструмента



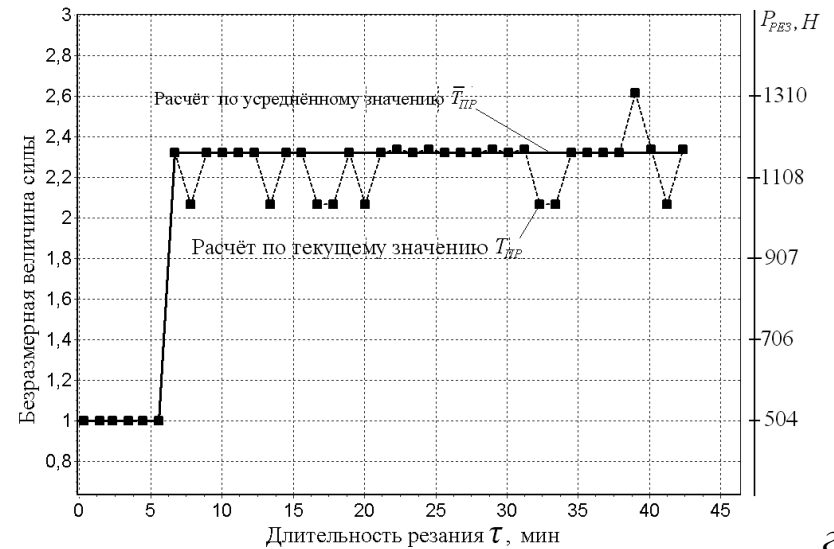
а)



б)



в)



з)

Рисунок 4.13 – Характеристика режима резания при двух способах оценки прогнозной величины ресурса инструмента: а) скорость резания V (обороты шпинделя n); б) подача S ; в) скорость износа $\bar{\gamma}$; з) сила резания

Модульный принцип построения программного продукта позволяет гибко менять его структуру применительно к особенностям подконтрольного объекта. Для обеспечения универсальности программного комплекса по отношению к аппаратным средствам (рис. 4.16) он реализован на нескольких алгоритмических языках: Турбо Паскаль, Делфи, Си и JAVA. Последний вариант комплекса рассчитан на микропроцессорные устройства, работающие на платформе Android.

Принципиальная схема и алгоритм функционирования прогнозно-диагностического комплекса приведен на рис. 4.14. Комплекс обеспечивает: регистрацию, накопление, обработку информации и адаптивное управление на основе этого работой подконтрольного оборудования.

В соответствии с алгоритмом функционирования прогнозно-диагностического комплекса работа программного продукта (рис. 4.15) 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_{TP}). Далее проводится регистрация амплитуды звуковой волны и прогнозирование ресурса ($T_{ПР}$). Если прогнозное значение ресурса превышает требуемое ($T_{ПР} > T_{TP}$), то осуществляется расчёт показателей состояния обрабатывающей системы, которые выдаются на экран устройства.

В противном случае рассчитываются режимы работы, обеспечивающие выполнение условия ($T_{ПР} \geq T_{TP}$).

Работа программного продукта прекращается при выполнении условия, когда текущая наработка обрабатывающей системы ($T_{ТЕК}$) достигает требуемой по техпроцессу (T_{TP}).

Варианты реализации аппаратной части комплекса приведены на рис. 4.16.

Исходная информация, необходимая для работы прогнозно-диагностического комплекса информация, регистрируется следующим образом (рис. 4.17): в процессе работы обрабатывающей системы (например, токарного станка) режущим инструментом 1, установленным в резцедержателе 2, генерируются звуковые волны 3, измеряемые микрофоном 4.

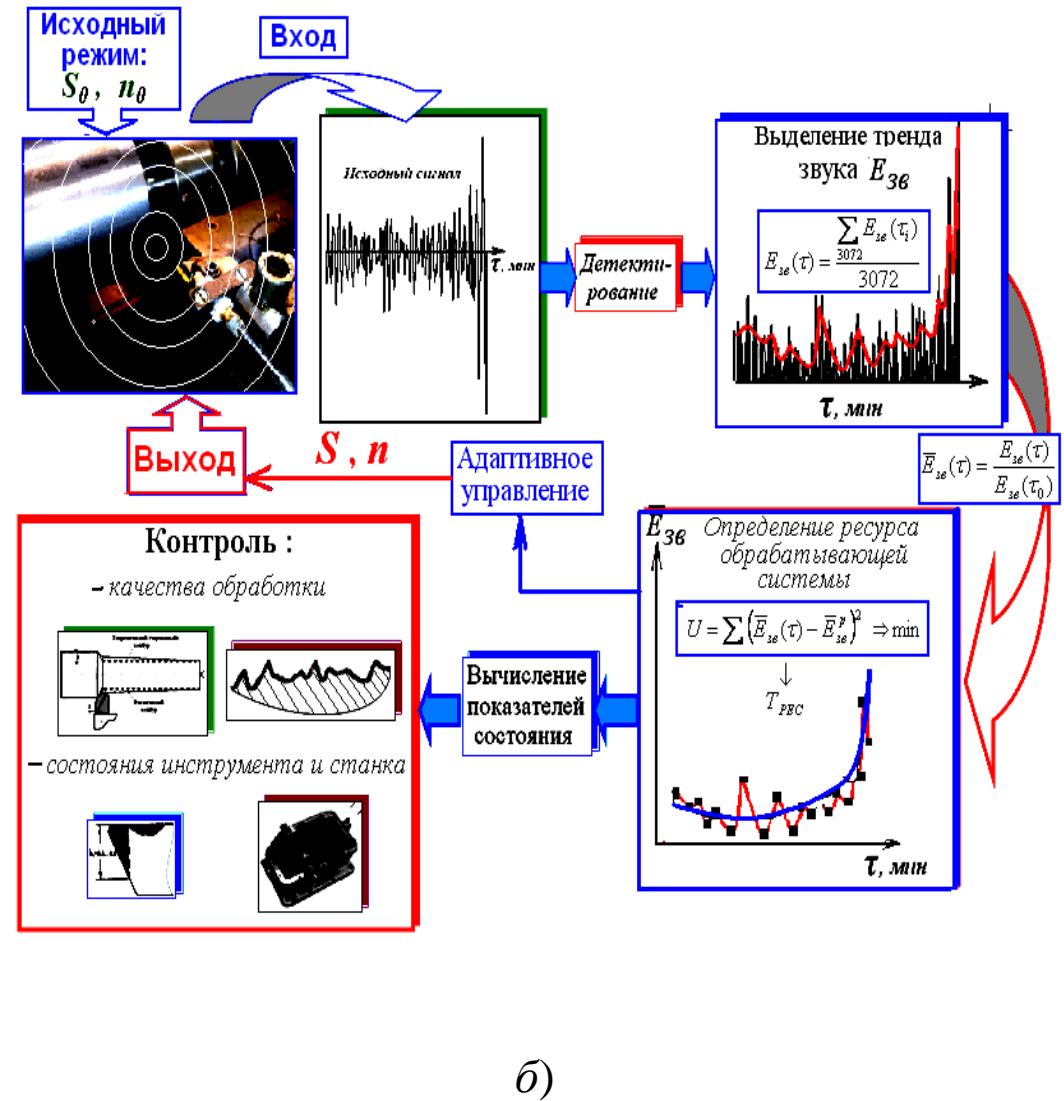
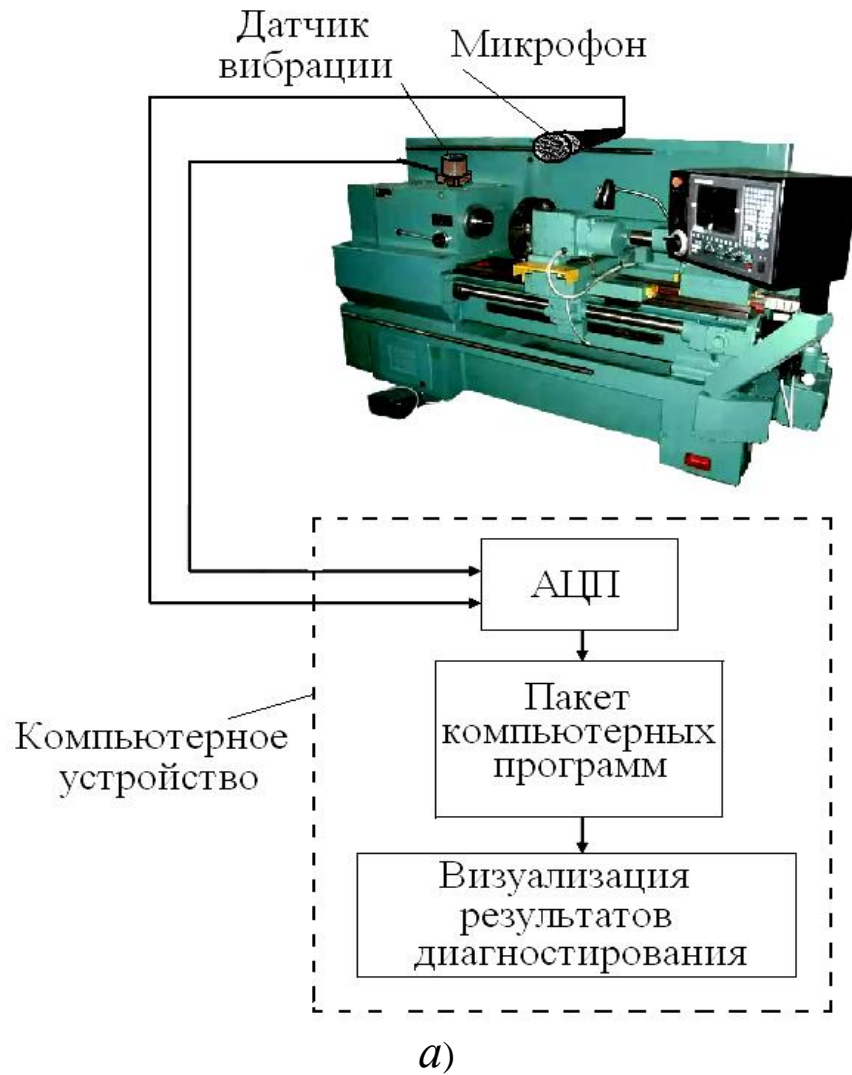


Рисунок 4.14 – Принципиальная схема (а) и алгоритм функционирования прогнозно-диагностического комплекса (б)

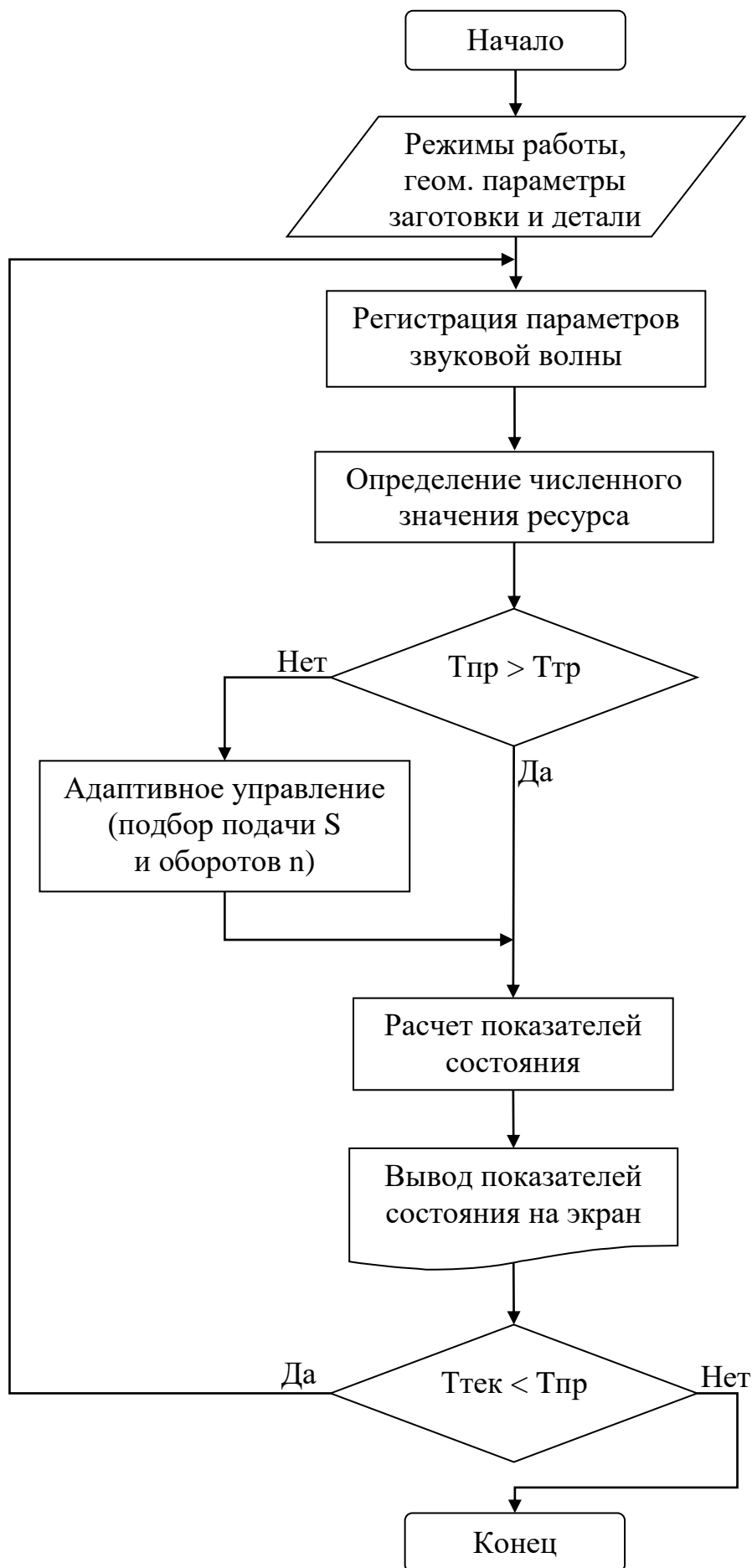
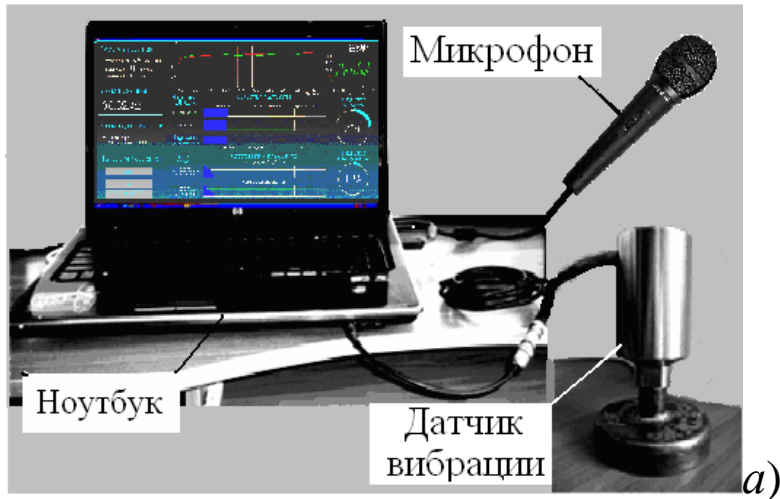
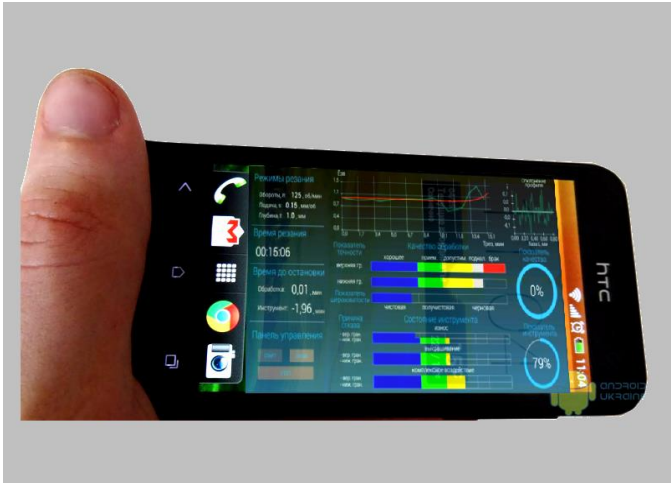


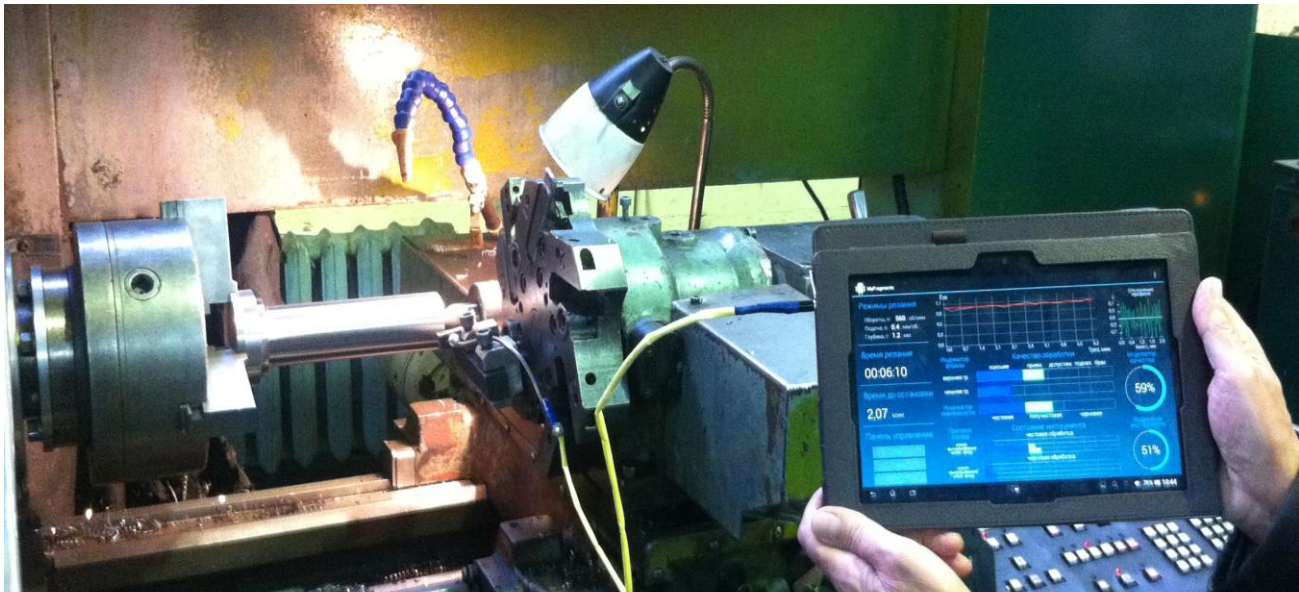
Рисунок 4.15 – Блок-схема алгоритма программного продукта



а)



б)



в)

Рисунок 4.16 – Варианты реализации аппаратной части прогнозно-диагностического комплекса: а) на базе ноутбука; б) на базе смартфона; в) на базе планшета

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 рассмотренных выше методов диагностирования технического состояния обрабатывающей системы и прогнозирования ее ресурса.

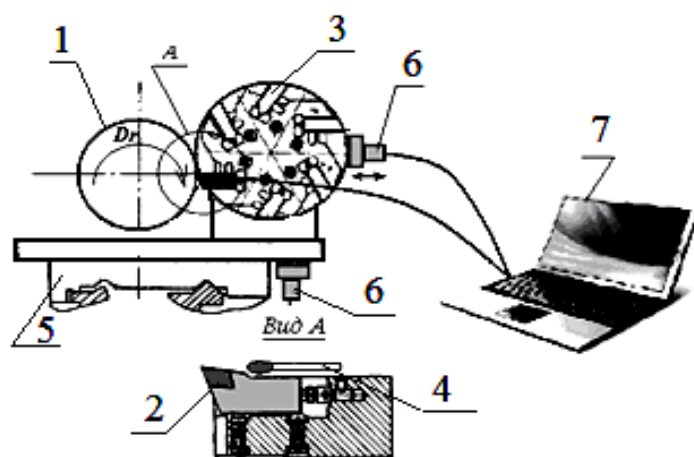


Рисунок 4.17 – Структурная схема получения исходной информации, необходимой для работы прогнозно-диагностического комплекса

Прогнозно-диагностический комплекс позволяет (рис. 4.18):

- регистрировать изменения звука и вибрации во времени;
- определять тренд параметра $\bar{E}_{зв}$ звука;
- рассчитывать спектр вибраций станка и выделять из него информационные гармоники;
- прогнозировать ресурс режущего инструмента, рассчитывать величины показателей состояния и определять на основе этого при чистовой обработке (участок кривой износа AB) продолжительность бездефектной работы обрабатывающей системы, а при катастрофическом износе инструмента (участок кривой износа BC) – момент своевременной замены инструмента при достижении им оптимального износа;
- прогнозировать наработку станка до остановки на ремонт или подналадку с указанием причин ремонта или подналадки;
- контролировать в режиме текущего времени качество обработки детали, технического состояния инструмента и станка;
- рассчитывать (выбирать при их ступенчатом изменении)

непосредственно в процессе резания оптимальные режимы резания, позволяющие завершить текущий технологический переход, исключив тем самым поломку инструмента и брак детали; отображать результаты контроля в наглядной форме на экране микропроцессорного устройства;

- генерировать звуковой сигнал при достижении обрабатываемой системой критического состояния, связанного с качеством обработки детали, техническими состояниями режущего инструмента или станка;

- документировать результаты диагностирования в виде «Протокола диагностирования...», сохраняемого в текстовом файле.

Алгоритм работы комплекса следующий:

- функционирование комплекса начинается с оперативной, выполняемой в режиме реального времени, регистрации исходной информации, выполняемой с помощью микрофона и датчиков вибраций (рис. 4.14, 4.16, 4.17), которые превращают переменное по своей природе звуковое давление и механические колебания узлов станка в электрические сигналы;

- измерения для повышения их статистической достоверности проводятся трижды в 1 024 точках отсчета с частотой дискретизации 11 025 Гц с последующим усреднением получаемых при этом 3 072 измеренных значений, что позволяет избежать искажающего влияния окружающих обрабатываемую систему звуковых полей (шумов);

- аналогично при диагностировании станочного оборудования спектр колебаний в контролируемой точке (месте расположения датчика вибраций) определяется также трижды и усредняется по такой же методике;

- измеренные сигналы подаются на компьютерное программируемое устройство (ноутбук, планшет, смартфон и т.п.), где подвергаются обработке с целью прогноза ресурса инструмента и конструктивных узлов станка и вычисления на основе этого показателей состояния, приведенных в табл. 4.2;

- если ресурс инструмента меньше требуемой по техпроцессу длительности выполнения заданной технологической операции, то осуществляется выбор режимов резания, позволяющих продлить срок работоспособности инструмента, как минимум, до завершения текущего прохода;

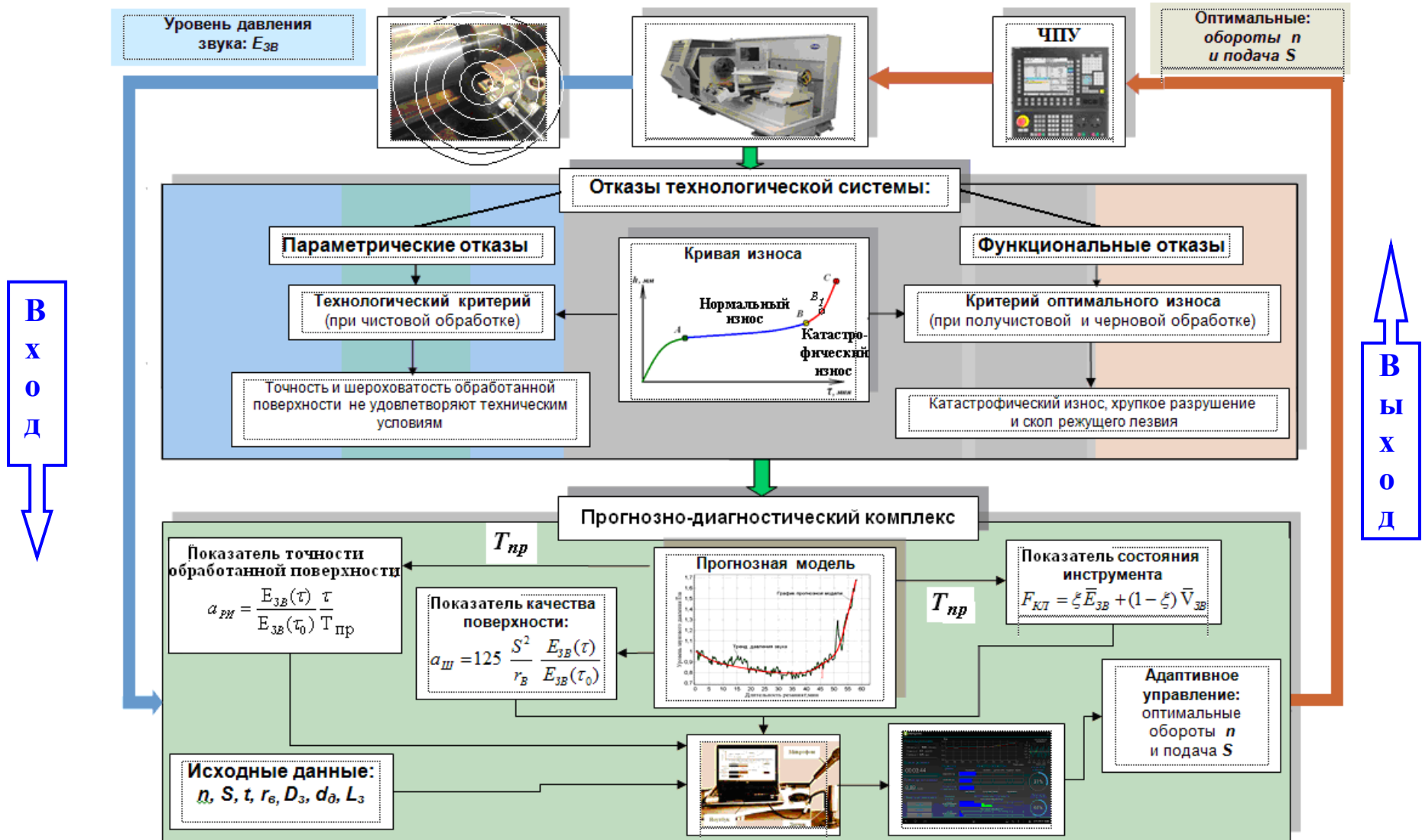


Рисунок 4.18 – Структурно-логическая схема автоматизированного прогнозно-диагностического комплекса

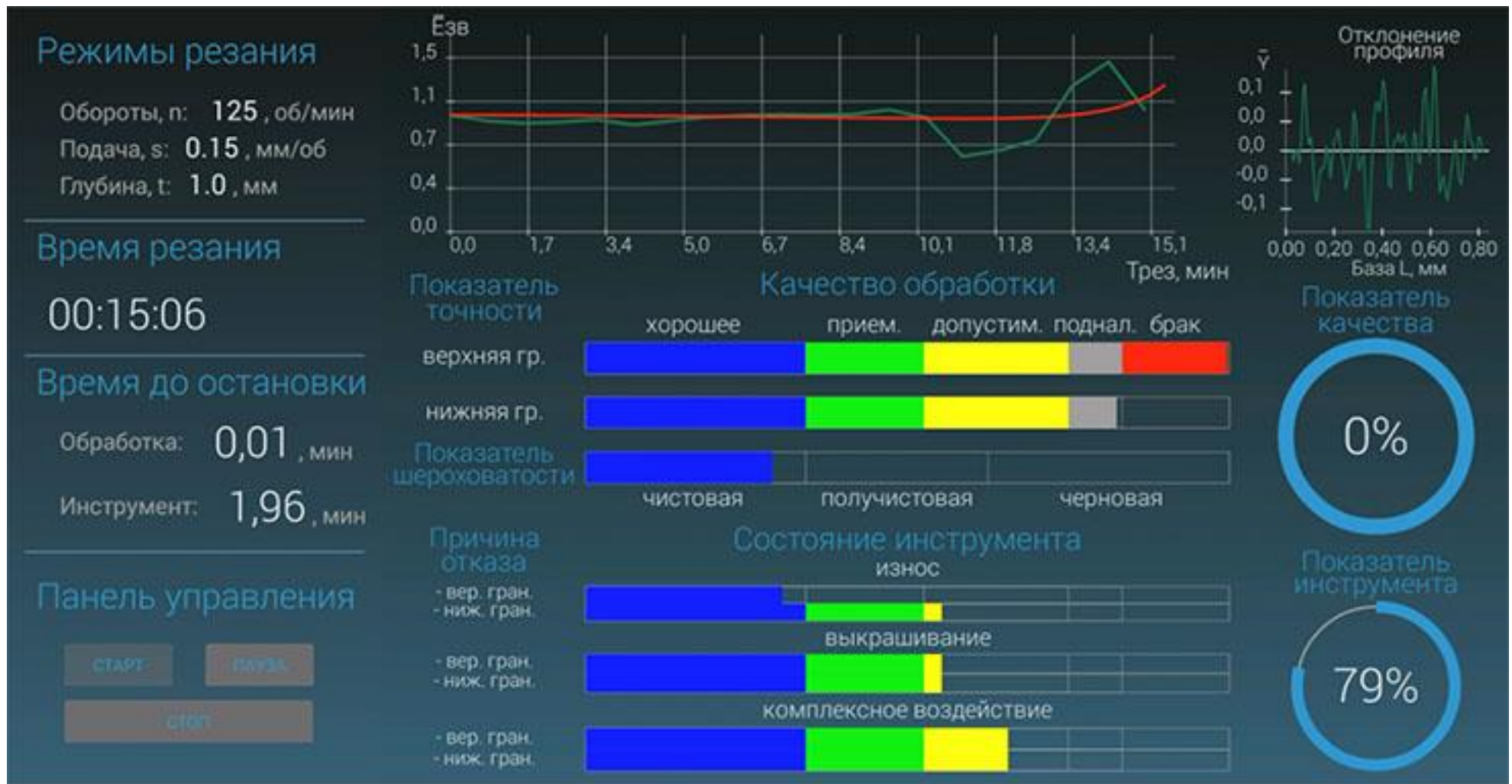


Рисунок 4.19 – Визуализация результатов работы прогнозно-диагностического комплекса

– результаты обработки текущей информации для наглядности и для осуществления интерактивного взаимодействия с автоматизированной системой контроля изображаются на экране микропроцессорного устройства (пример подобной визуализации результатов контроля приведен на рис. 4.19).

На экран устройства в виде цветных линий выводятся графики изменения во времени рассмотренных выше показателей качества обработки, качества поверхности и технического состояния инструмента и станка.

По мере ухудшения качества обработки детали и состояния инструмента в соответствии со стандартными состояниями, приведенными в табл. 4.1, цвет линий меняется от синего до красного. Там же приводятся тренд параметра $\bar{E}_{ЗВ}$ (кривая зеленого цвета), график прогнозной модели (3.13) (график красного цвета) и профиль шероховатости. Вариант визуализации результатов диагностирования всех элементов обрабатывающей системы, включая и станочное оборудование, приведен на рис. В.2.

Выводы к разделу 4

1. Разработан автоматизированный прогнозно-диагностический комплекс, предназначенный для контроля и прогнозирования технического состояния обрабатывающих систем, алгоритмическую основу которого, согласно теории «нечетких множеств», составляют лингвистические переменные, позволяющие дать вербальную характеристику степени критичности динамического поведения поднадзорного оборудования, оценивая одновременно качество обработки детали, работоспособность режущего инструмента и станочного оборудования.

2. Рассчитанные посредством полученных в работе «функций принадлежности» показатели состояния 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, что позволяет компенсировать отсутствие нормативной документации, регламентирующей степень критичности технического состояния металлообрабатывающих технологических систем.

3. Подобие между временными и частотными характеристиками шероховатости обработанной поверхности детали и аналогичными характеристиками звуковой волны, сопровождающей работу обрабатывающих систем, а также 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 – $\bar{E}_{3\sigma}$ 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 на основе данного подобия показателей состояния.

4. «Функции принадлежности», используемые для расчета показателей состояния, составлены таким образом, что обеспечивают одновременный учет 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 адаптивного управления процессом резания.

5. Отличительной особенностью метода диагностирования является то, что он рассматривает поведение обрабатывающих систем на всем протяжении выполнения ими заданной технологической операции, что дает возможность своевременно корректировать режим работы данных системы для продления в требуемых пределах их работоспособного состояния, обеспечивая тем самым выполнение производственного задания с требуемым качеством и в необходимом объеме.

6. Для внедрения метода в практику производства разработан программный продукт, который отражает алгоритм функционирования комплекса и предназначен для применения в составе компьютерных устройств (ноутбук, планшет, смартфон), созданных на базе Android, обеспечивающих автоматизацию процесса прогнозирования ресурса и диагностирования технического

состояния обрабатывающих систем на уровне, соответствующем требованиям современных информационных технологий.

7. Прогнозно-диагностический комплекс позволяет реализовать в практике машиностроения одну из важных задач современного производства – его автоматизацию. Комплекс 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 современной металлообрабатывающей отрасли машиностроительного производства.

РАЗДЕЛ 5

Экспериментальная апробация разработанного прогнозно-диагностического комплекса

В разделе приведены результаты экспериментальной проверки, рассмотренной в разделе 4 прогнозно-диагностического комплекса. В эксперименте проверялась эффективность алгоритма, положенного в основу программного обеспечения микропроцессорного устройства, а также исследовались функциональные возможности этого устройства, представляющего собой планшет.

5.1. Цель и методика эксперимента

Целью экспериментов было следующее:

- экспериментальное подтверждение полученной в разд. 2 аналитической закономерности, описывающей поведение элементов обрабатывающей системы в зависимости от наработки (износа) инструмента, путем анализа тренда параметра $\bar{E}_{ЗВ}$, характеризующего звуковую волну, сопровождающую процесс обработки материалов резанием;
- апробация разработанной в разд. 3 прогнозной модели, предназначенной для определения ресурса режущего инструмента и элементов станочного оборудования;
- проверка эффективности применения показателей состояния, получаемых методом «теории нечетких множеств», для оценки степени критичности текущего состояния инструмента и обрабатывающей системы;
- проверка функциональных возможностей разработанного микропроцессорного прогнозно-диагностического комплекса, предназначенного для автоматизации процесса контроля качества функционирования обрабатывающей системы.

Эксперименты проводилась на двух типовых обрабатывающих системах токарного и фрезерного станков. При работе обрабатывающей системы токарного станка 16К20Т1 (рис. 5.1, 5.2) эксперименты осуществлялись на режимах, приведенных в табл. 5.1,

а обрабатывающей системы фрезерного станка 6P13 (рис. 5.3) – на режимах, приведенных в табл. 5.2.

Таблица 5.1 – Условия эксперимента

Режим резания				Материал	
обороты шпинделя n , об/мин	скорость резания V , мм/мин	глубина резания t , мм	подача S , мм/об	пластинка	заготовка
970	91	0,3	0,15	T15K6	Сталь Ст 45
970	91	0,3	0,25	T15K6	Сталь Ст 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



Рисунок 5.1 – Регистрация звукового и вибрационного сигналов в эксперименте

При проведении эксперимента с обрабатывающей системой токарного станка звук измерялся в непосредственной близости от зоны резания с помощью микрофона, установленного на державке резца (рис. 5.1, 5.2). Дополнительно с помощью вибродатчика, установленного на револьверной головке (рис. 5.2 б), в направлении, перпендикулярном продольной оси станка, измерялся вибросигнал.

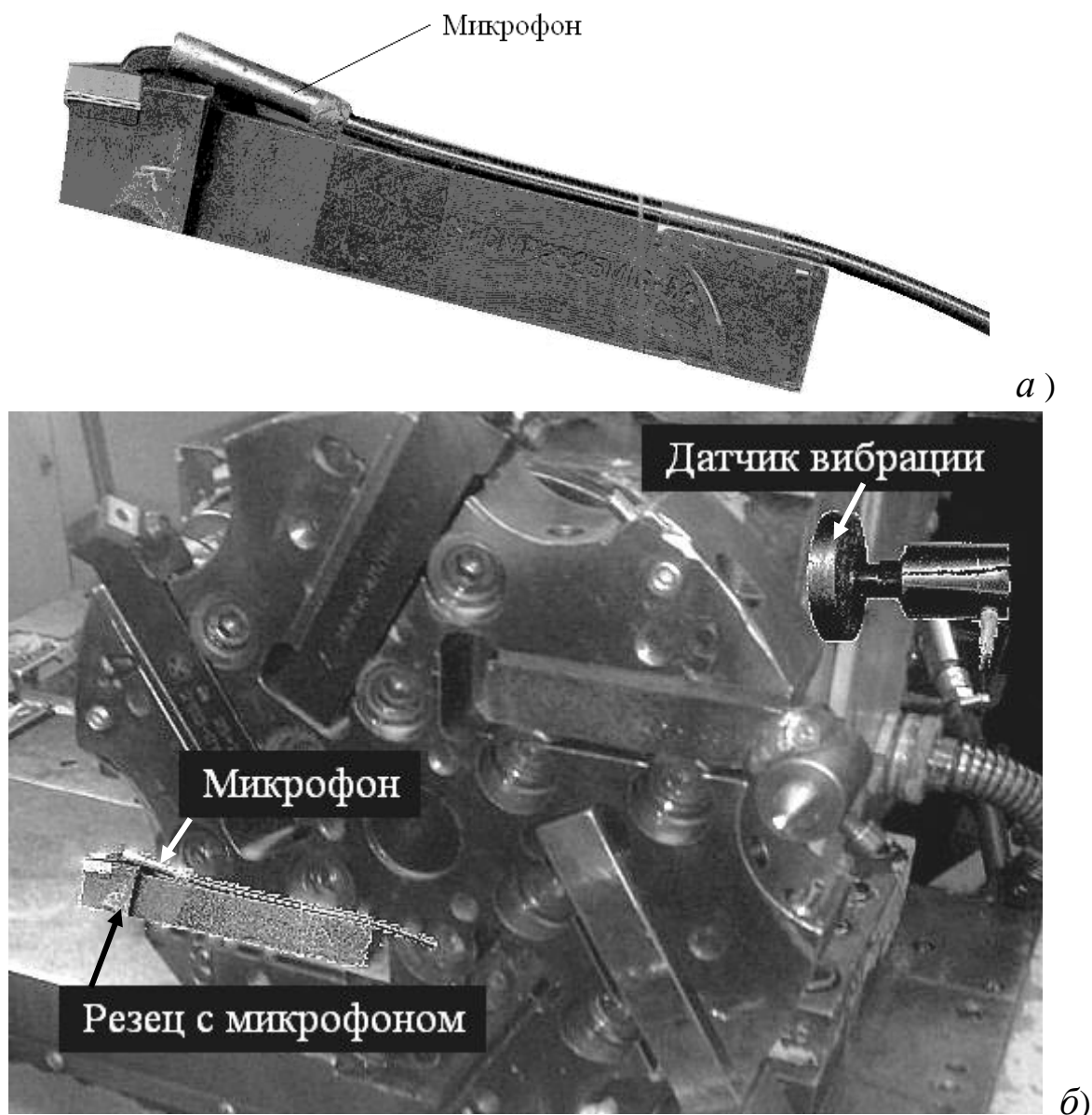


Рисунок 5.2 – Размещение датчиков на токарном станке: микрофон на державке резца (а); датчик вибрации на револьверной головке (б)

При проведении эксперимента на обрабатывающей системе фрезерного станка звук измерялся с помощью микрофона, установленного на консоли фрезерного станка (рис. 5.3).



Рисунок 5.3 – Общий вид экспериментальной установки обрабатывающей системы фрезерного станка

5.2. Результаты экспериментов

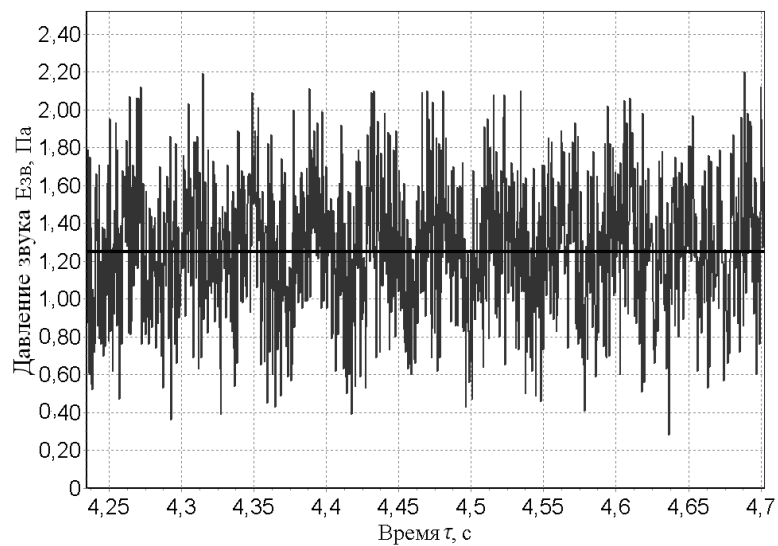
Примеры типовых временных реализаций звуковой волны и вибрации, а так же их спектры, зафиксированные в эксперименте при работе обрабатывающей системы токарного станка, приведены на рис. 5.4. Эти исходные данные подвергались дальнейшей обработке для прогнозирования ресурса обрабатывающих систем и оценки на основе этого степени критичности их технического состояния.

5.2.1. Закономерности поведения тренда параметра $\bar{E}_{ЗВ}$ и прогноз ресурса инструмента

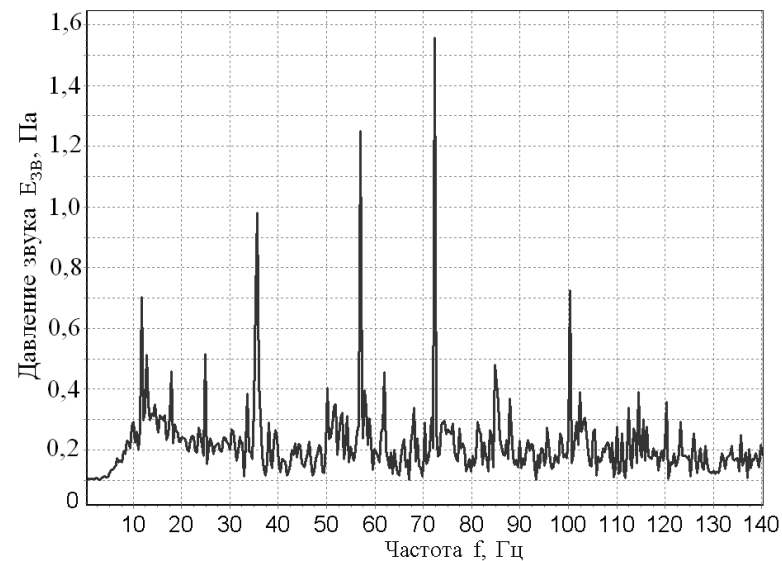
На рис. 5.5 и 5.6 приведены экспериментально зарегистрированные тренды звука, сопровождающего работу обрабатывающих систем токарного (рис. 5.5) и фрезерного (рис. 5.6) станков. На обоих трендах присутствуют участки постепенного (1, 2) и резкого (3) изменения амплитуды звуковой волны, что подтверждают приведенные в разд. 2 результаты математического моделирования динамического поведения обрабатывающих систем, а также приведенные там же литературные сведения по данной тематике.

На рисунке 4 указан также диапазон, куда укладывается численное значение ресурса обрабатывающей системы. Верхняя граница $T_{ВГ}$ равна параметру $T_{ПР}$, рассчитываемому по формуле (3.16). Исходные данные $(T_{НИ}, T_{КИ})$ для формулы (3.16) получены при параметрической идентификации прогнозной модели (3.13) по результатам контроля тренда звука $\bar{E}_{ЗВ}$ (рис. 5.5, 5.6). Нижняя граница $T_{НГ}$ равна экспоненциально среднему значению $\bar{T}_{exp}(\tau_n)$, рассчитываемому по формуле (3.28). Из рисунков следует, что этот диапазон охватывает полностью участок резкого изменения тренда звука и частично захватывает конечный участок медленного изменения тренда звука.

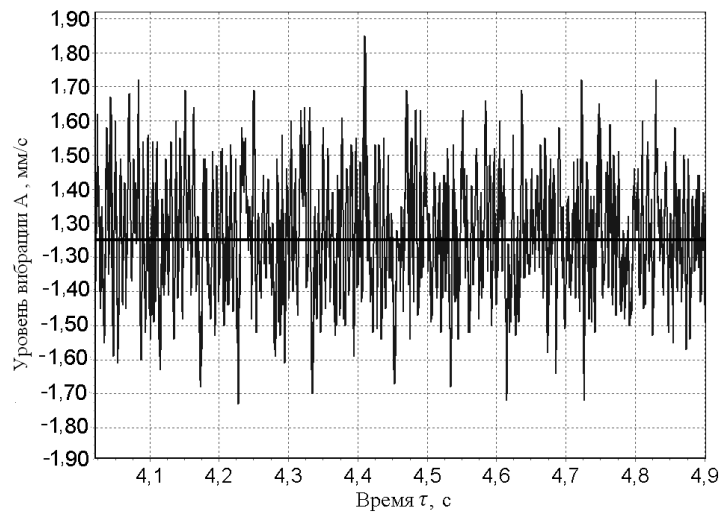
В практике резания достижение временного интервала 4, практически совпадающего с переходным участком 2, требует принятия решения о коррекции режима резания. В экспериментах коррекция режима резания не проводилась, т. к. инструмент доводился до предельно допустимого состояния (поломки) с целью определения фактического ресурса инструмента и его сравнения с прогнозом.



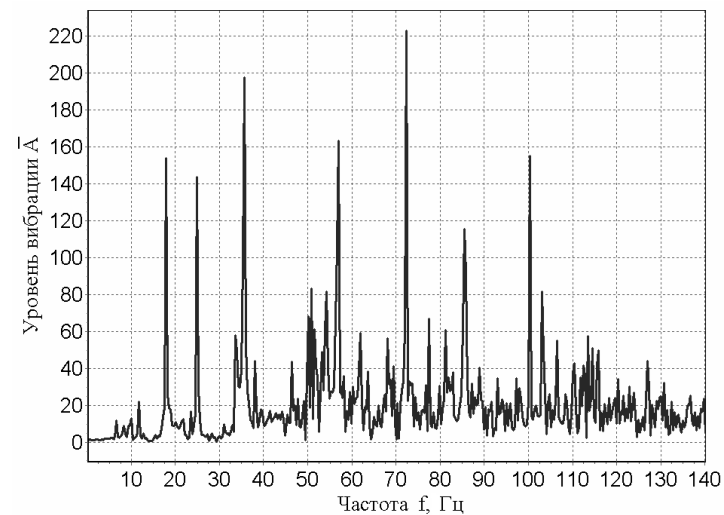
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.4 – Результаты обработки зарегистрированного сигнала: а) временная реализация звукового сигнала; б) спектр звукового сигнала; в) временная реализация вибрационного сигнала; г) спектр вибрационного сигнала

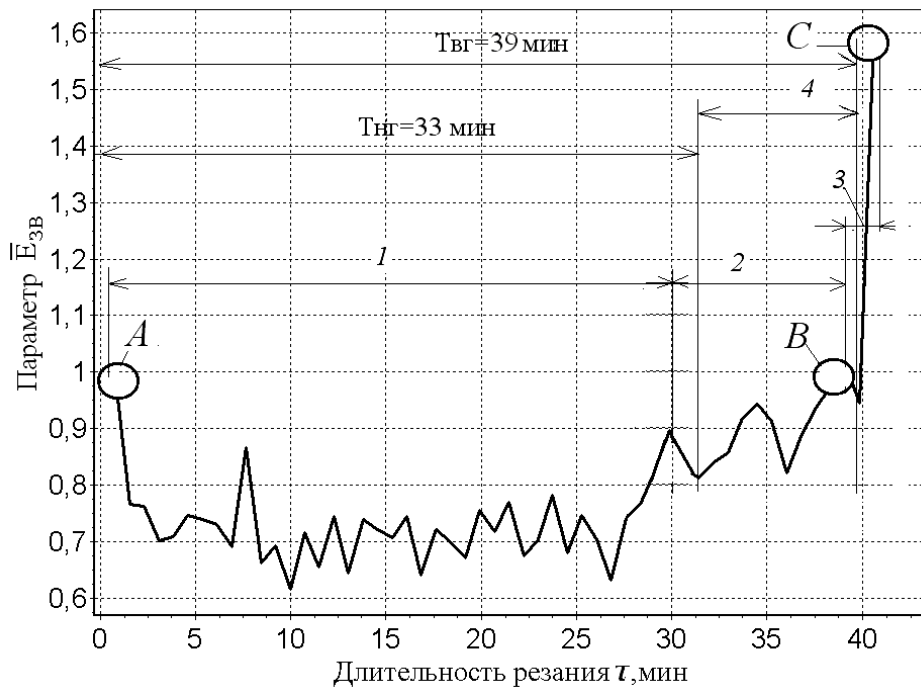


Рисунок 5.5 – Тренд параметра $\bar{E}_{зв}$, сопровождающего работу обрабатывающей системы токарного станка

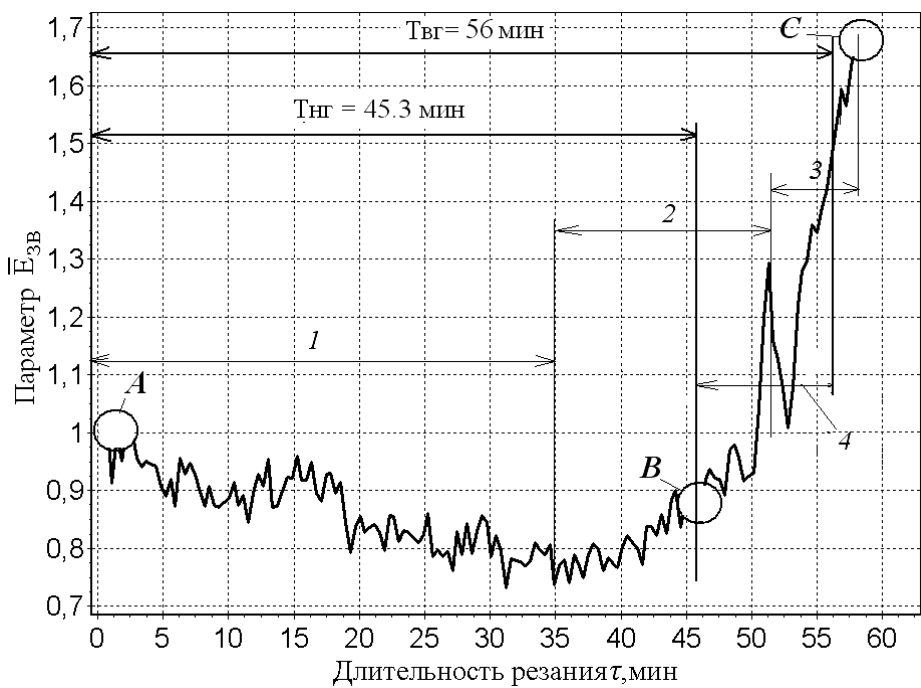


Рисунок 5.6 – Тренд параметра $\bar{E}_{зв}$, сопровождающего работу обрабатывающей системы фрезерного станка

На рис. 5.7 показано: изменение прогноза в зависимости от длительности резания; экспоненциально среднее значение прогноза; границы доверительного интервала прогноза, куда с вероятностью 0,95 укладывается искомый прогноз ресурса инструмента. Как видим, примерно с середины процесса резания прогноз ресурса стабилизируется, соответственно сужаются и границы его изменения, показывая, что прогноз укладывается в 5-процентное отклонение от экспоненциального среднего значения.

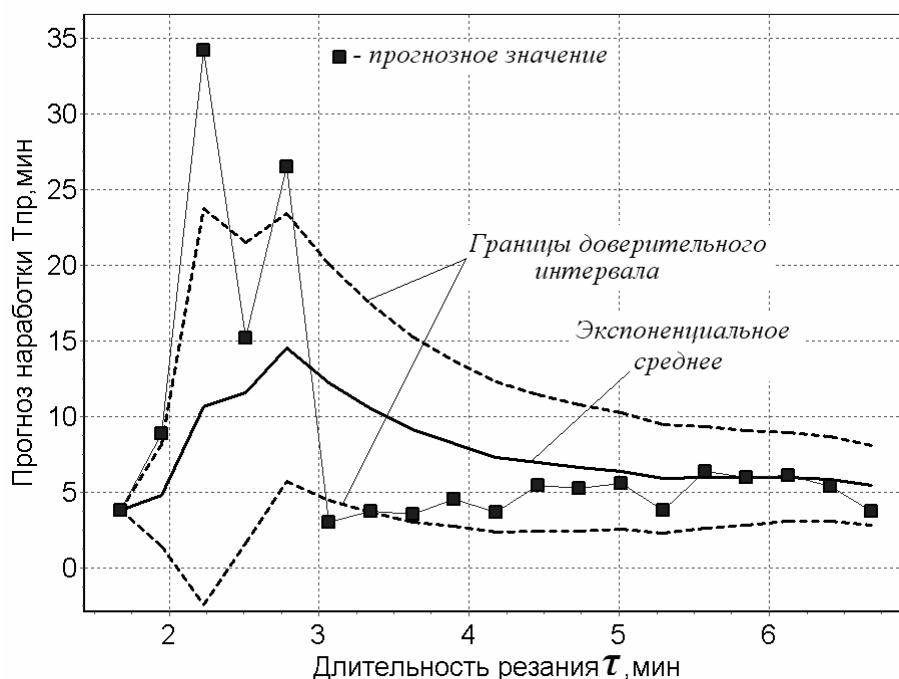


Рисунок 5.7 – Прогноз ресурса инструмента

Результаты апробации прогнозной модели (3.13) при различном поведении тренда давления звука приведены на рис. В.1 – В.6. На рис. В.1 и В.2 приведена аппроксимация уравнением (3.13) экспериментальных данных изменения тренда звука на заключительном этапе эксплуатации инструмента, т. е. при его катастрофическом износе (рис. 5.5, 5.6 временной интервал 3).

Результаты статистической оценки качества аппроксимации экспериментальных данных, осуществленной по методике, изложенной в разд. 3, приведены в табл. В.1 и В.2. Из этих таблиц следует, что остаточная дисперсия меньше общей дисперсии, т. е. разброс расчетных данных относительно экспериментальных

является меньшим, чем рассеяние экспериментальных данных относительно друг–друга. Коэффициенты корреляции и детерминации имеют высокие значения. F – критерий Фишера значительно превышает его табличное значение. Это свидетельствует о том, что расчетные данные намного лучше описывают экспериментальные данные по сравнению с оценкой этих же экспериментальных данных по их среднестатистическому значению. Результаты статистической оценки точности прогнозирования ресурса инструмента для доверительной вероятности $P = 0,95$ приведены в табл. В.3 и В.4 и проиллюстрированы на рис. В.3 – В.6. Они достаточно убедительно свидетельствуют о их статистической значимости прогноза. Из табличных данных следует, что прогноз ресурса инструмента T с доверительной вероятностью $P = 0,95$ является статистически значимым и надежным. Об этом свидетельствует и незначительное по абсолютной величине отклонение доверительных границ от их матожидания и значительное превышение фактическим коэффициентом Стьюдента $\gamma_{ФАКТ}$ его табличного значения $\gamma_{(n-1;P)}^{табл}$ и незначительная величина коэффициента корреляции ν . Высокая точность выполненного прогноза наглядно показана на рис. В.3 - В.6.

5.2.2. Проверка эффективности алгоритма работы прогнозно-диагностического комплекса

Эффективность алгоритма работы прогнозно-диагностического комплекса определялась путем определения степени соответствия между информацией о качестве обработки детали и состоянии режущего инструмента, получаемой посредством тестируемого комплекса, и фактическим состоянием детали и инструмента (рис. 5.8).

В соответствии с алгоритмом работы комплекса в эксперименте осуществлялся контроль с помощью микрофона параметров звуковой волны, генерируемой процессом резания, а с помощью вибродатчика – уровня возникающих при этом вибраций станка.

На базе этой информации в соответствии с разработанным в разд. 3 методом прогнозировались ресурс инструмента, наработка станка до осмотра (ремонта), а согласно методу, рассмотренному в разд. 4, оценивались качество обработки детали и техническое состояние инструмента и станка.



Рисунок 5.8 – Автоматизированный контроль технического состояния обрабатывающей системы токарного станка

С этой целью процесс резания регулярно прерывался для измерения величины фаски износа h_3 и ее фотографирования.

Условия эксперимента приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3 – Условия эксперимента, реализованные при точении

Материал режущей пластинки	Режимы резания			$D_{\text{заг}}$, 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		

5.2.2.1. Эксперимент с режущей пластинкой P 25

Результаты обработки информации, зарегистрированной при резании, выполненном инструментом с режущей пластинкой из материала P25, приведены на рис. 5.9 – 5.13.

На рис. 5.9 приведены тренд параметра $\bar{E}_{ЗВ}$ и кривая износа инструмента (величина фаски h_3), а на рис. 5.10 – информация, свидетельствующая об их высокой корреляционной зависимости.

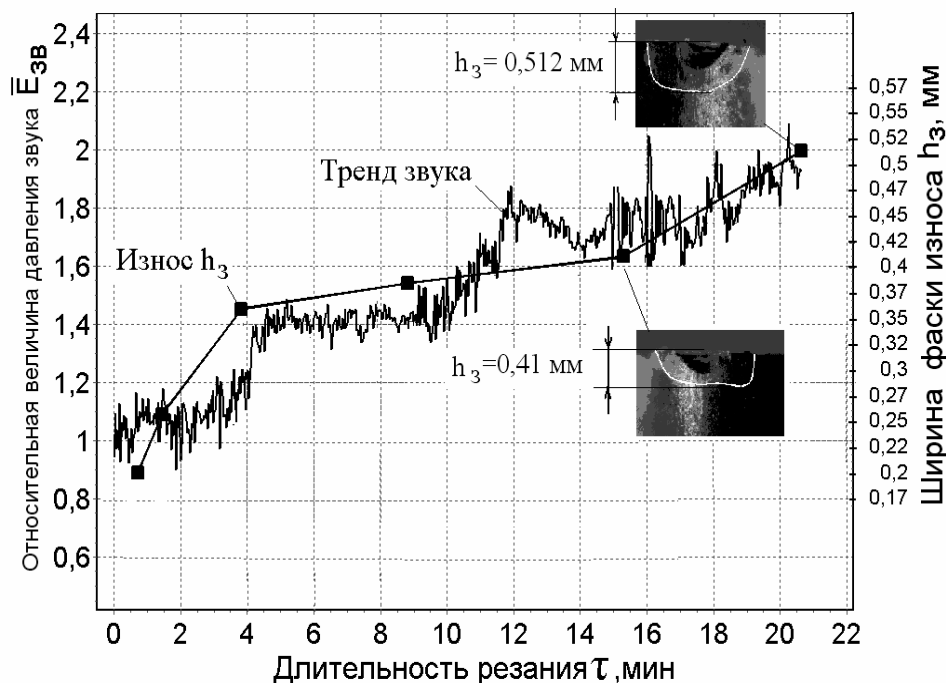


Рисунок 5.9 – Тренд параметра $\bar{E}_{ЗВ}$ и кривая износа h_3

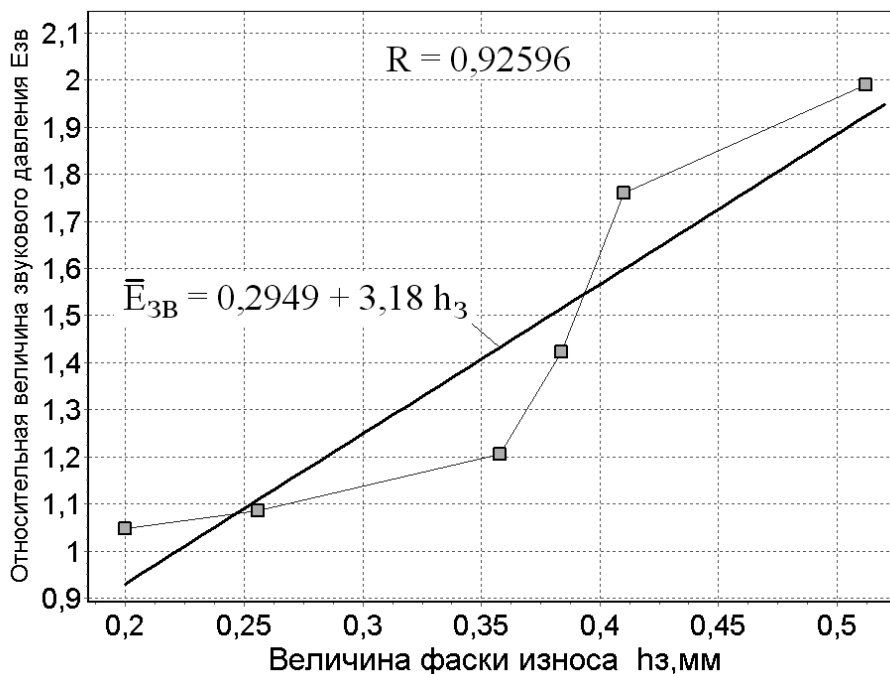


Рисунок 5.10 – Корреляционная зависимость между параметром $\bar{E}_{ЗВ}$ и величиной фаски износа h_3

Из рис. 5.9 следует, что на 15-й минуте кривая износа переходит от участка нормального износа на участок катастрофического износа,

что требует прекращения процесса обработки. Об этом же свидетельствуют информация о показателе качества обработки детали (рис. 5.11) и прогноз ресурса инструмента (рис. 5.12).

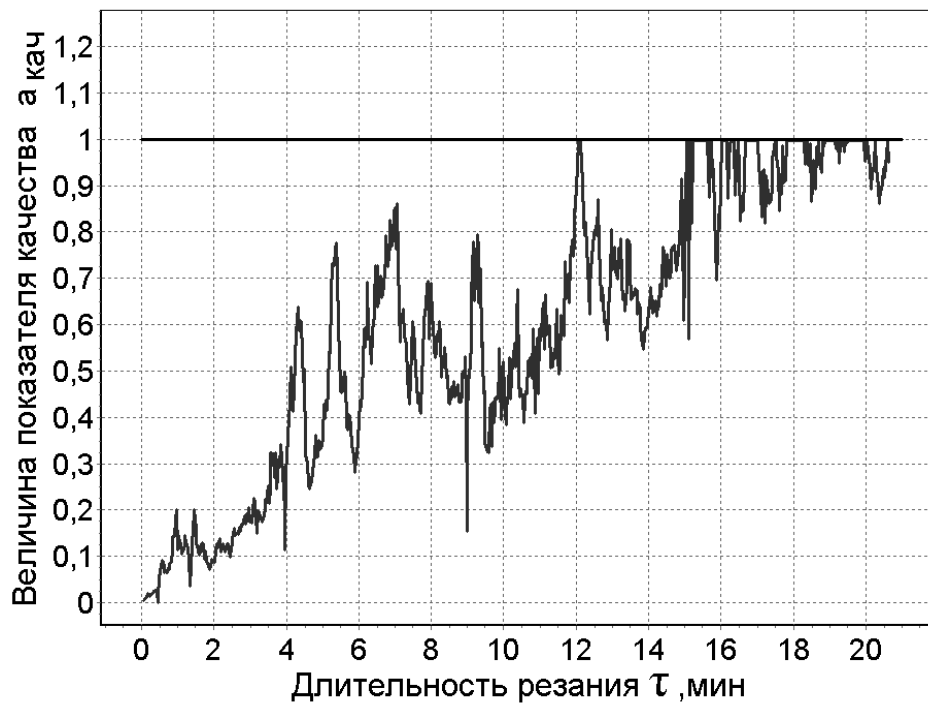


Рисунок 5.11 – Показатель качества обработки детали $a_{\text{кач}}$

Как следует из рис. 5.11, показатель качества $a_{\text{кач}}$ на 15-й минуте достигает единицы, т.е. своего критического значения.

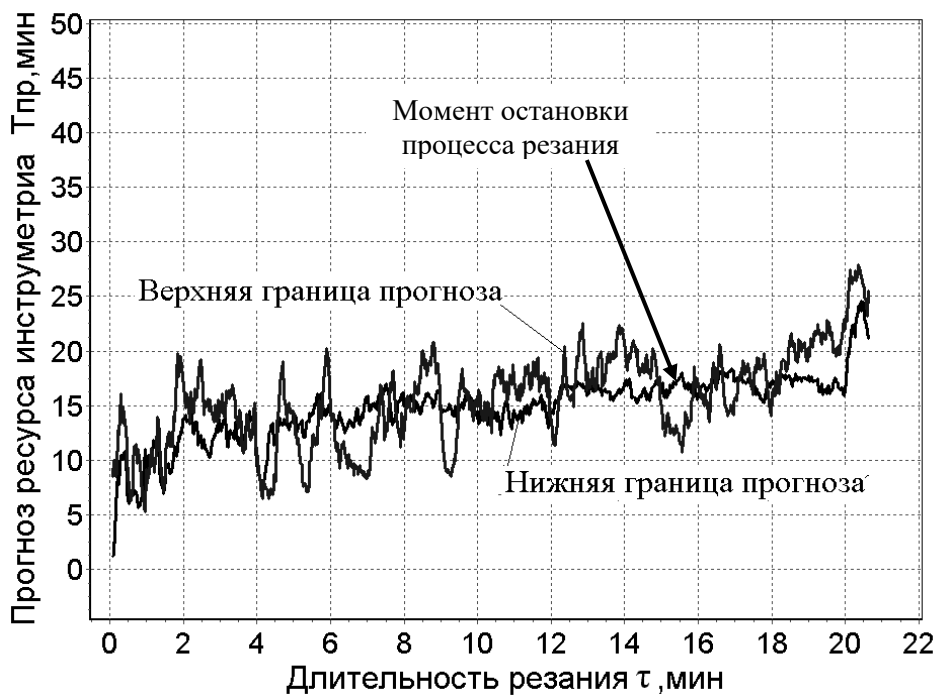


Рисунок 5.12 – Прогноз ресурса инструмента

На рис. 5.12 показано, что на 15-й минуте прогноз ресурса инструмента и текущая наработка совпадают, что свидетельствует о необходимости замены инструмента.

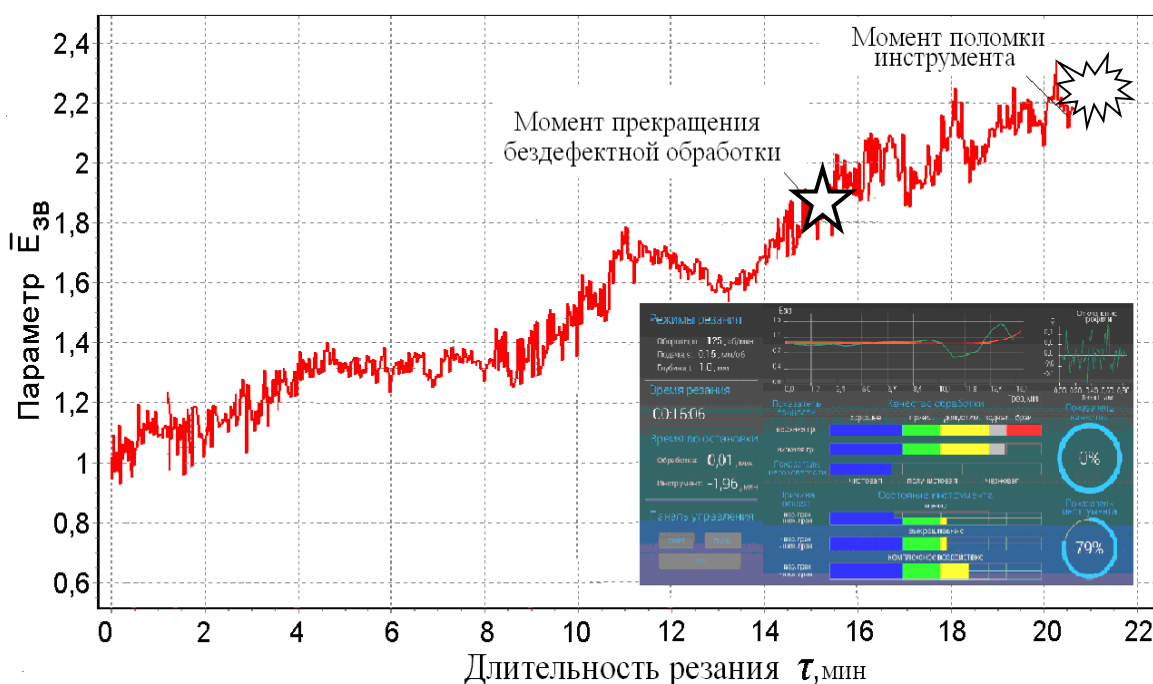


Рисунок 5.13 – Сопоставление «скриншота» экрана микропроцессорного устройства и тренда параметра $\bar{E}_{зв}$

На рис. 5.13 сопоставляется «скриншот» экрана микропроцессорного устройства (планшета) на момент отказа (предельно допустимого износа) инструмента и тренд параметра $\bar{E}_{зв}$. Момент времени, соответствующий переходу от бездефектного функционирования обрабатывающей системы к дефектному состоянию, обозначен на тренде звездочкой, а момент отказа (появление брака детали) – квадратом. Со скриншота следует, что на момент отказа инструмента показатель качества обработки $a_{кач}$ превысил свой предельно допустимый уровень. Это свидетельствует о согласованности параметров, характеризующих фактическое состояние обрабатывающей системы и информации, представленной на экране микропроцессорного устройства.

5.2.2.2. Эксперимент с режущей пластинкой T15K6

Тренд величины $\bar{E}_{зв}$ и кривая износа режущей пластинки (ширина фаски износа h_3) приведены на рис. 5.14, а на рис. 5.15

показана информация, свидетельствующая об их высокой корреляционной зависимости.

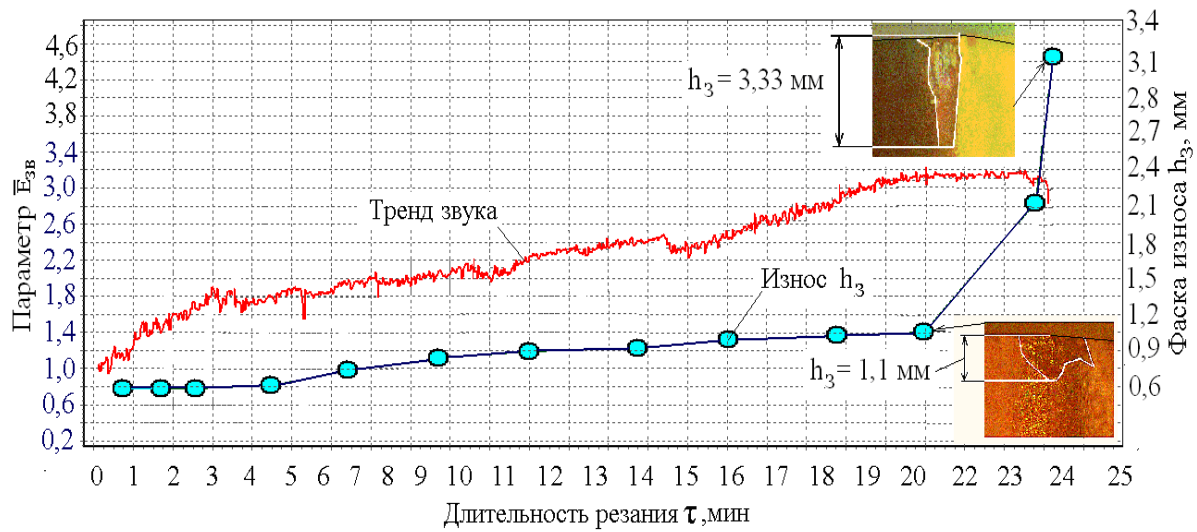


Рисунок 5.14 – Тренд параметра $\bar{E}_{зв}$ и кривая износа

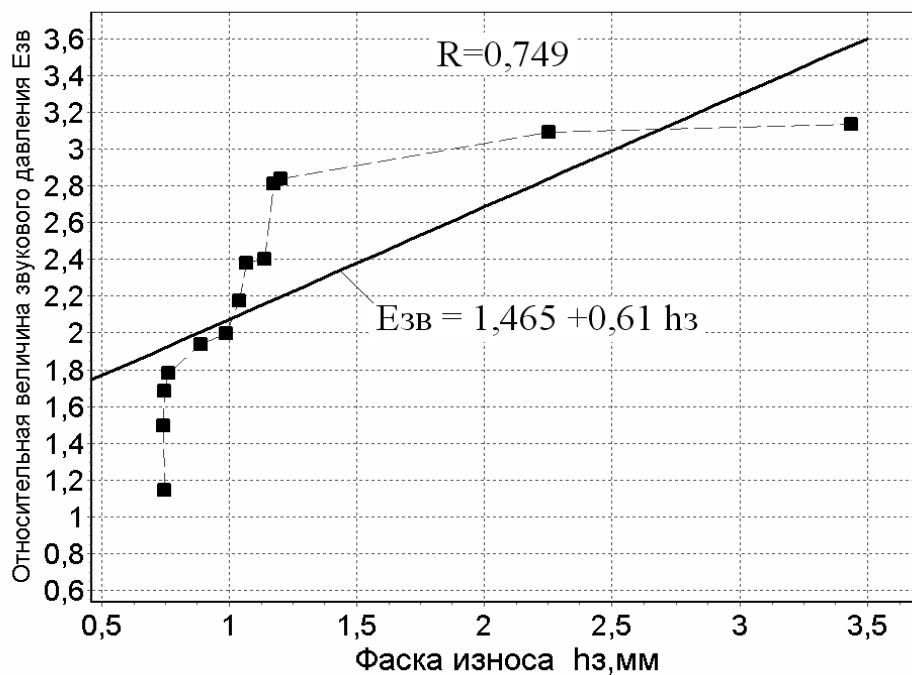


Рисунок 5.15 – Корреляционная зависимость между параметром $\bar{E}_{зв}$ и шириной фаски износа $h_з$

Анализ показывает, что на 20–й минуте кривая износа переходит от участка нормального износа на участок катастрофического износа, что требует прекращения процесса обработки.

Об этом же свидетельствует информация об изменении показателя качества обработки $a_{кач}$, достигшего к этому времени

критического значения ($a_{\text{кач}} = 1$, рис. 5.16), и прогнозная величина ресурса инструмента (рис. 5.17), нижняя граница которого при длительности резания 20,38 мин составила величину 24 мин.

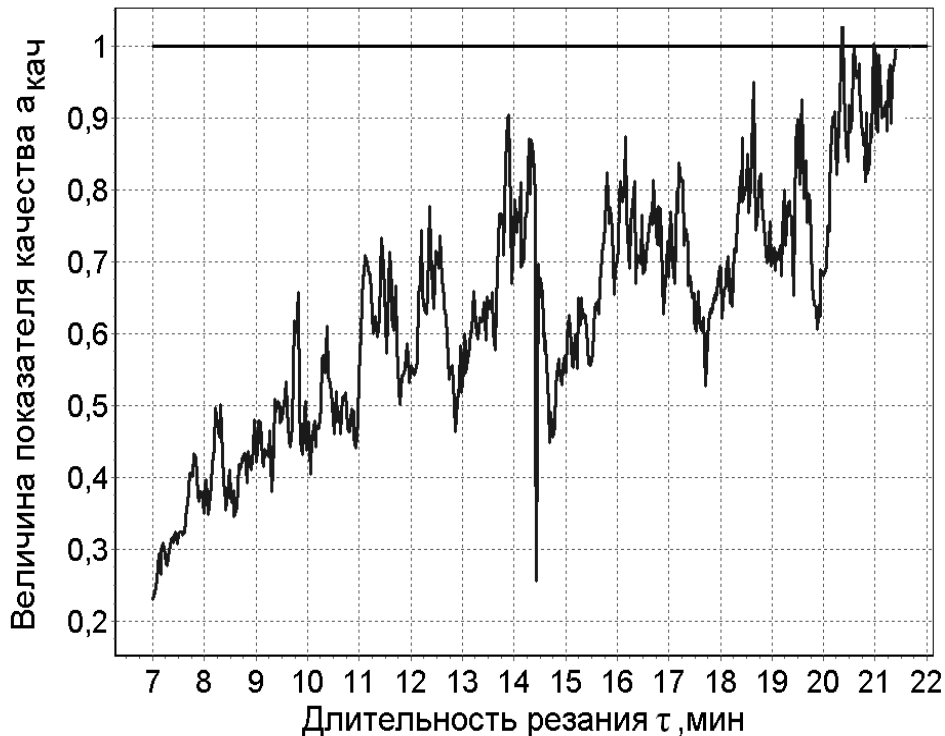


Рисунок 5.16 – Показатель качества обработки детали $a_{\text{кач}}$



Рисунок 5.17 – Прогноз ресурса инструмента $T_{\text{пр}}$

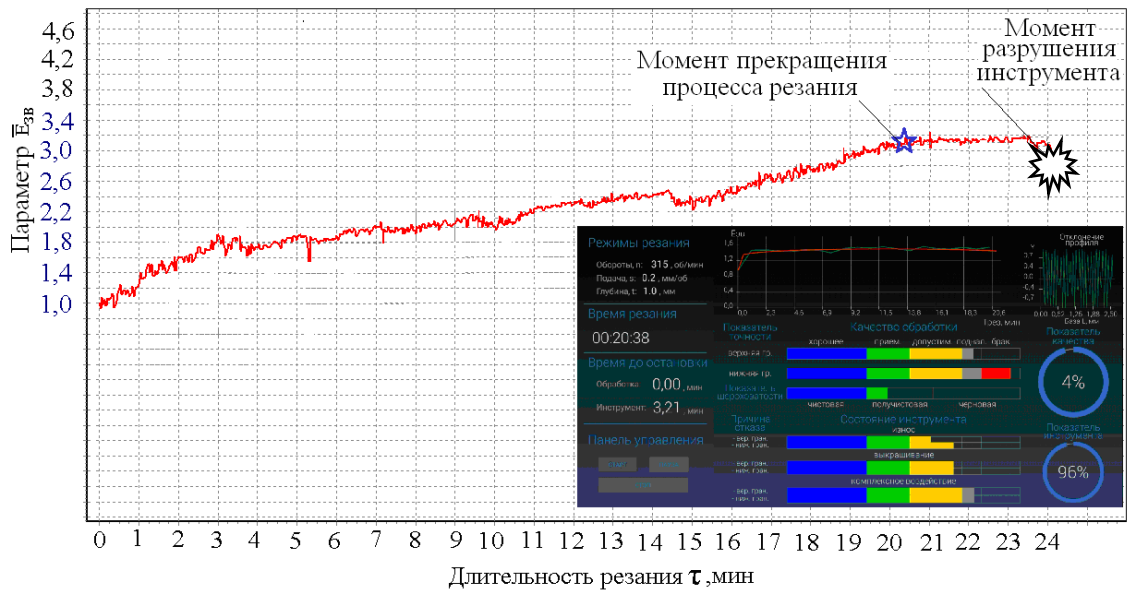


Рисунок 5.18 – Сопоставление «скриншота» и тренда параметра $\bar{E}_{ЗВ}$

На рис. 5.18 сопоставлен тренд параметра $\bar{E}_{ЗВ}$ и «скриншот» микропроцессорного устройства, показывающий, что на момент резания 20,38 мин время бездефектной обработки было исчерпано, а до выхода из строя режущей пластинки осталось меньше 4 минут, что и было подтверждено на практике.

На рис. 5.19 и 5.20 приведены графики показателей состояния, описывающих качество обработки заготовки из сталей Ст 40х и Ст 45 на режимах, приведенных в табл.5.1, соответственно при нормальном и катастрофическом износах режущих пластинок из материала T15K6.

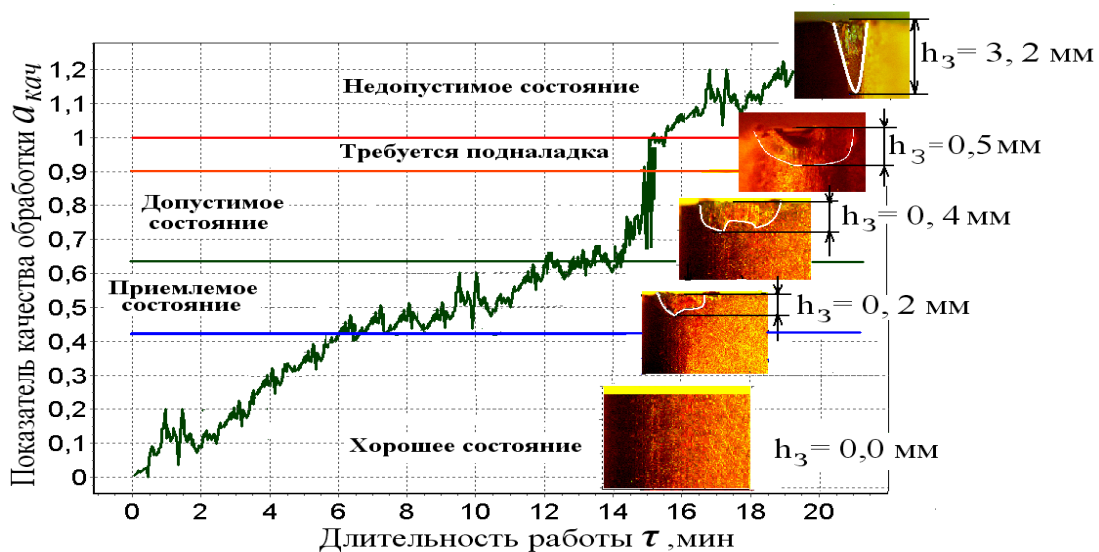


Рисунок 5.19 – Изменение показателя качества $a_{кач}$ и состояния инструмента при обработке детали из стали Ст 40Х

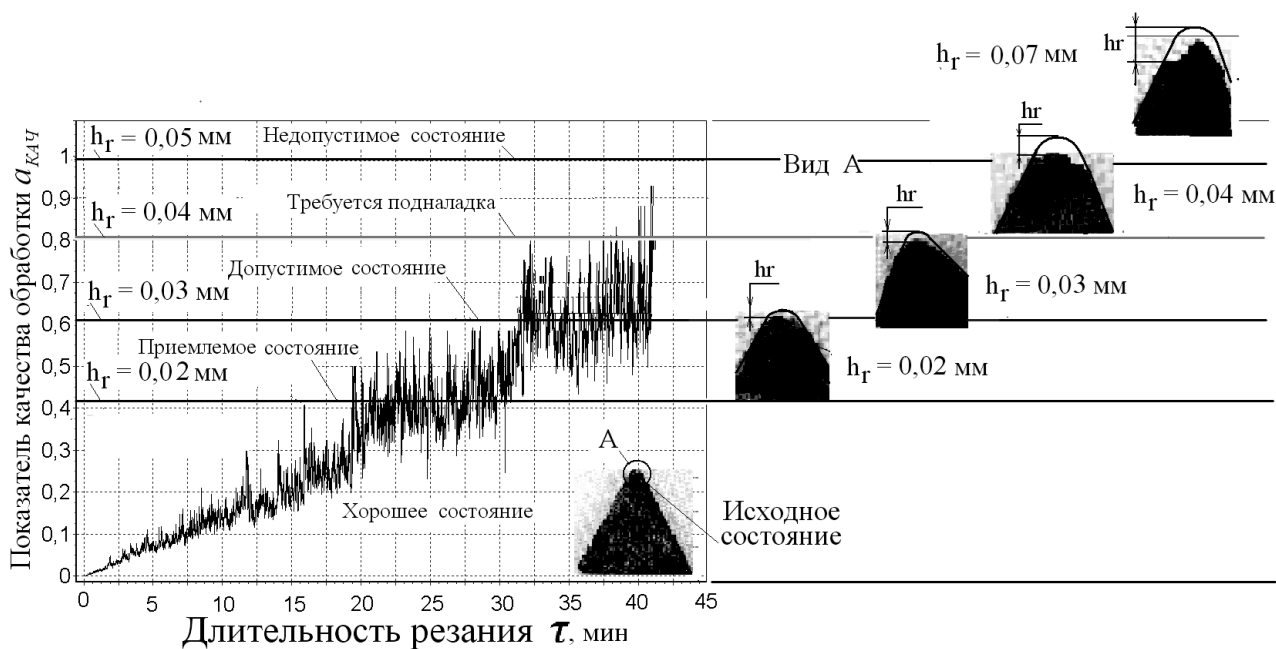


Рисунок 5.20 – Изменение показателя качества $a_{\text{кач}}$ и состояния инструмента при обработке детали из стали Ст 45

Из рисунков следует, что изменение показателя качества обработки и состояния режущих пластинок согласованы. Для статистического подтверждения выявленной зависимости между показателем качества и износом инструмента были проведены эксперименты при обработке сталей Ст 45 и Ст 40Х на различных режимах резания и с применением различного типа режущих пластинок. Результаты этих экспериментов в виде сводной таблицы представлены на рис. 5.21. Таблица содержит информацию о величине показателя качества $a_{\text{кач}}$, величине износа пластинок: радиального (h_r) и главной задней поверхности (h_3). В таблице представлено также фото режущих пластинок на разных стадиях их эксплуатации.

Результаты экспериментов свидетельствуют, что при достижении в процессе чистовой обработки показателем качества величины 0,9 пластинка, согласно «технологическому критерию», достигает предельно допустимой величины износа и требует замены.

Дальнейшее увеличение показателя качества допустимо при получистовой или черновой обработке.

Вид обработки	$a_{\text{Кач}}$	$h_3, \text{ мм}$	$h_2, \text{ мм}$	Состояние пластинок	Вершина пластинки						
Черновая, полуцистовая	1,0	2,0	0,2	Недопустимое состояние							
	0,9	0,5	0,05	Требуется подналадка							
Ч И С Т О В А Я	0,6	0,36	0,04	Допустимое состояние							
	0,4	0,25	0,02	Приемлемое состояние							
	0,0	0,0	0,0	Хорошее состояние							
Тип пластинки					CNMG	GNMG	T15K6	VNMG	KHT16	T30K4	
Материал заготовки:					Сталь 40X			Сталь 45			
Режимы резания:					$S, \text{ м/об}$	0,05	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15
					$V, \text{ м/мин}$	170	380	550	170	380	550
					$f, \text{ мм}$	0,25	1,2	2,0	0,25	1,2	2,0

Рисунок 5.21 – Результаты экспериментов по статистическому подтверждению взаимосвязи между показателем качества $a_{\text{Кач}}$ и износом режущей пластинки

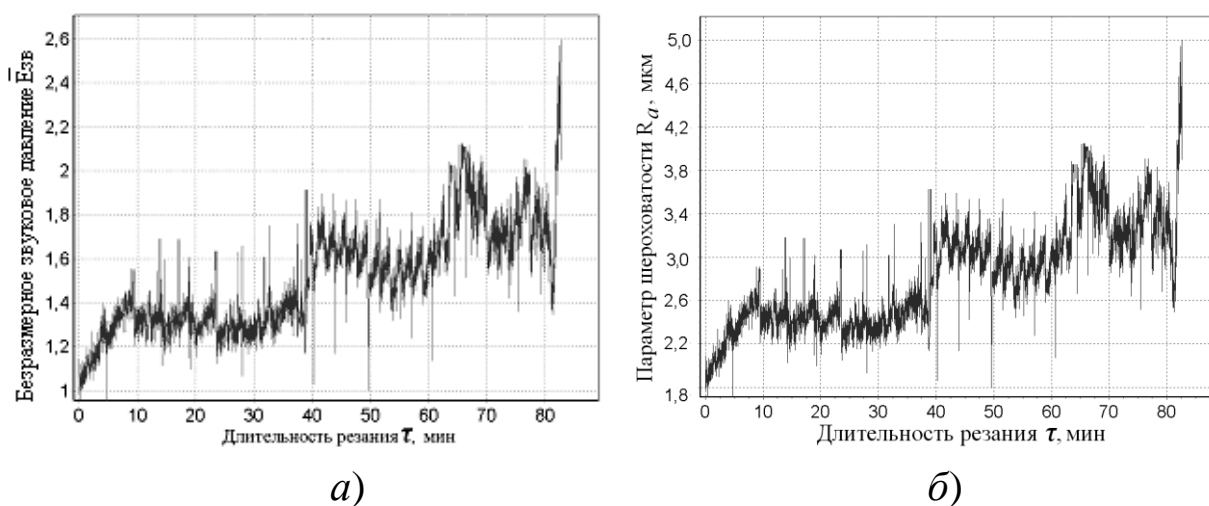


Рисунок 5.22 – Тренд параметра $\bar{E}_{зв}$ (а) и изменение параметра шероховатости R_a (б)

На рис. 5.22 приведены тренды параметра $\bar{E}_{зв}$ и параметра шероховатости R_a . Сравнение графиков показывает, что график шероховатости изменяется адекватно с графиком тренда параметра $\bar{E}_{зв}$, что подтверждает ранее установленный факт о тесной корреляции шероховатости обработанной поверхности и генерируемого при этом звука.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов наглядно показывают эффективность работы прогнозно-диагностического комплекса.

5.2.3. Диагностика технического состояния конструктивных узлов токарного станка

На рис. 5.22 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.

Согласно «Протоколу диагностирования технического состояния станка», приведенному в приложении В, состояние станка изменяется в худшую сторону. Правда, процесс этого изменения не так скоротечен, как у инструмента, и «растянут» во времени на существенно большем интервале.

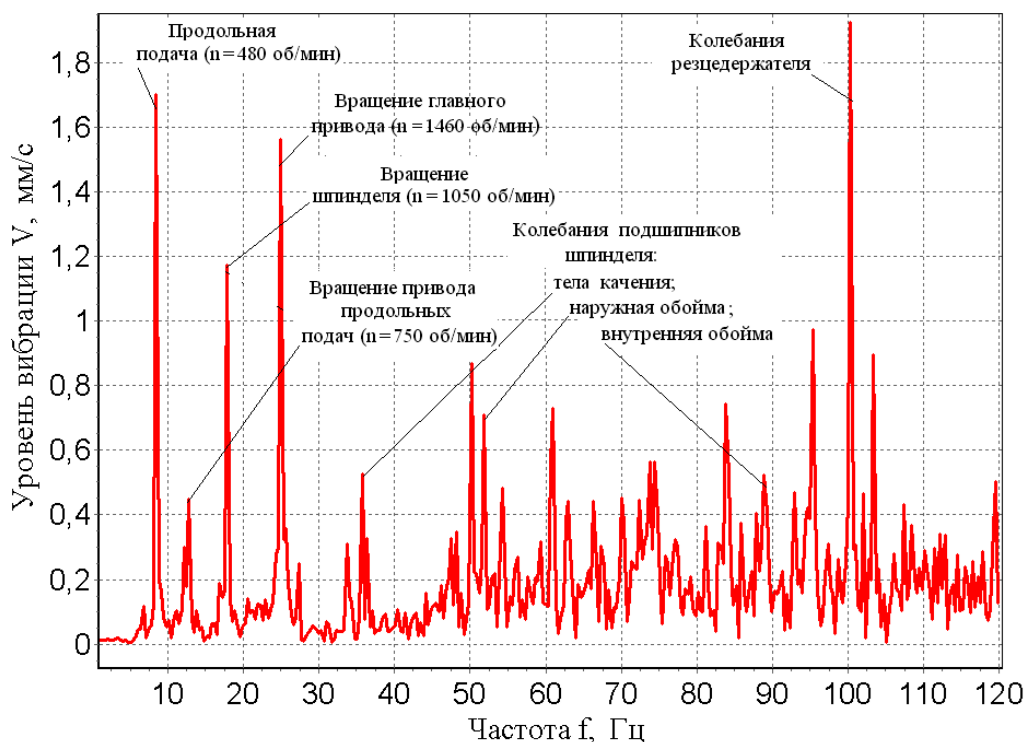


Рисунок 5.23 – Спектр вибраций станка 16K20T1 в процессе продольного точения на режимах: $V = 91$ м/мин, $S = 0,25$ мм/об, $t = 0,3$ мм

Следует отметить, что процесс изменения технического состояния конструктивных узлов станка не так скоротечен, как у инструмента, и происходит на существенно большем временном интервале.

Выводы к разделу 5

1. Апробация на примере типового станочного оборудования – токарного и фрезерного станков – прогнозно-диагностического комплекса подтвердила правомерность выбора в качестве информационных сигналов звука и вибрации, генерируемых в процессе работы данных обрабатывающих систем и косвенным образом характеризующих степень критичности их технического состояния.

2. Экспериментально подтверждены установленные посредством математического моделирования (разд. 2), особенности тренд звука, сопровождающего работу обрабатывающих систем по мере ухудшения технического состояния их основных элементов (износа режущего инструмента).

3. Результаты экспериментов показали, что погрешность определения ресурса обрабатывающих систем в соответствии 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 при отсутствии необходимых для этого норм, показателей состояния для косвенной оценки качества обработки и степени критичности технического состояния металлообрабатывающих технологических систем.

5. Апробация автоматизированного прогнозно-диагностического комплекса показала, что комплекс соответствует предъявленным к нему требованиям, что позволяет рекомендовать его для широкого внедрения в практику оперативного контроля качества обработки материалов резанием, решая тем самым насущную задачу автоматизации машиностроительного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение ресурса является важной и до конца не решенной проблемой эксплуатации разнообразного промышленного оборудования, среди которого значительное место занимают металлообрабатывающие технологические системы. В последнем случае проблема осложняется тем, что различные элементы обрабатывающей системы имеют различные сроки службы, изменяющиеся от минут (для режущих инструментов) до месяцев и лет (для конструктивных узлов станка).

Ресурс инструмента, ограничивающий в подавляющем числе случаев ресурс обрабатывающей системы, определяется наработкой инструмента до его предельно допустимого состояния (предельного износа или поломки). Предельное состояние инструмента, характеризуемое предельно допустимой величиной износа его рабочих поверхностей, пронормировано. Однако на данный момент времени не удастся контролировать степень соответствия между фактической величиной износа инструмента и его предельно допустимым нормативным значением без прерывания с этой целью рабочего процесса металлообработки.

Попытки воспользоваться косвенными методами контроля, позволяющими по характеристикам разнообразных по физической природе информационных сигналов, сопровождающих работу обрабатывающих систем, принимать решение о прекращении или изменении режимов их работы существенно осложняются отсутствием соответствующей нормативной документации как юридического основания для принятия подобного решения.

Анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных поиску методов решения этой проблемы, позволил установить следующее:

– состояние отдельных элементов обрабатывающей системы, в частности режущего инструмента, оценивается в отрыве от динамического поведения обрабатывающей системы в целом, хотя все ее элементы находятся в постоянном и сложном взаимодействии,

так, износ инструмента является причиной изменения динамических характеристик обрабатываемой системы, приводящих к изменению уровня ее колебаний, что, в свою очередь, негативно сказывается на качестве обработки детали и, как следствие, ускоряет процесс износа инструмента, сокращая тем самым его ресурс;

– при оценке степени критичности технического состояния обрабатывающих систем ограничиваются результатами текущего контроля, не учитывающего предысторию функционирования систем на протяжении всего периода выполнения заданной технологической операции, а прогнозирование их ресурса осуществляют, как правило, на основе среднестатистических или паспортных данных о ресурсе режущего инструмента, что приводит к существенным ошибкам при прогнозировании момента его замены.

Результатом данного сложившегося к настоящему времени подхода к контролю и прогнозированию технического состояния обрабатывающих систем являются непредвиденные аварийные остановки обрабатывающего оборудования из-за внезапной поломки инструмента или замены бракованной детали.

Для борьбы с этим явлением пытаются строить разнообразные корреляционные зависимости, связывающие численное значение ресурса обрабатывающих систем с условиями их эксплуатации: режимами резания, материалом заготовки, инструмента и т.п., что, однако, не позволяет достигать желаемого результата, так как эти уравнения, имея, как правило, сложный «научнообразный» вид тем не менее описывают только конкретные условия эксперимента, в которых они были получены. По этой причине результаты подобных экспериментов невозможно распространить на иные технологические условия работы обрабатываемой системы.

При поиске альтернативных путей решения этой проблемы авторами данной работы были проведены обширные по объему исследования, основные результаты которых в кратком изложении заключаются в следующем:

– разработаны математические модели динамического поведения технологических обрабатывающих систем, находящихся

под постоянным воздействием внутреннего фактора – изменения состояния вследствие износа их слабого элемента – режущего инструмента;

– доказано, что выбор в качестве информационного сигнала звуковой волны, генерируемой процессом резания, позволяет объективно контролировать динамическое поведение обрабатывающих систем, что основывается на следующих положениях:

- звуковые волны имеют пространственный характер, и в соответствии с фундаментальным законом механики о движении центра масс характеризуют такой же пространственный характер колебаний всех элементов обрабатывающей системы, включая и режущий инструмент;
- в отличие от вибрационных сигналов, подверженных воздействию помех, генерируемых механическими колебаниями станка, измерение амплитуды звуковой волны $E_{ЗВ}$ с помощью микрофона, расположенного вблизи зоны резания, и переход при обработке результатов измерений к относительной величине этой амплитуды (параметру $\bar{E}_{ЗВ}$) обеспечивает помехоустойчивость результатов контроля динамического поведения обрабатывающих систем к мультикативным и аддитивным по природе помехам, а также к помехам, носящим импульсный и случайный характер;
- экспериментально установлено, что тренд амплитуды звуковой волны $\bar{E}_{ЗВ}$ тесно коррелирует с кривой износа режущего инструмента, о чем свидетельствует величина коэффициента корреляции $R = 0,92596$, зафиксированная при токарной обработке стали 12Х18Н10Т режущей пластинкой Р25 на режимах $t = 1$ мм, $S = 0,15$ мм/об, $V = 33,5$ м/мин, и величина коэффициента корреляции $R = 0,855$, зафиксированная при фрезерной обработке стали Ст 45 фрезой Р6М5 на режимах $n = 800$ об/мин, $t = 3$ мм, $S = 0,15$ мм/зуб;

– в результате математического моделирования динамического поведения обрабатывающих систем установлены взаимосвязи между изменением за время работы обрабатывающей системы контактным усилием в зоне контакта инструмента и детали, трендами звука $\bar{E}_{зв}$ и высотного параметра шероховатости R_a и изменяющейся вследствие износа геометрией режущего инструмента, что основывается на следующих доказанных положениях:

- изменение радиуса вершины лезвия и выкрашивание его режущих кромок 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 которой определяются динамическими характеристиками обрабатывающей системы, режимами резания и сочетанием материалов инструмента и детали;
- по мере увеличения износа по задним поверхностям лезвия инструмента на участке нормального износа постепенно увеличивается радиальный износ и соответственно радиус вершины лезвия, что сопровождается уменьшением параметра шероховатости, а следовательно, глубины проникновения лезвия в обрабатываемую поверхность заготовки, это приводит к уменьшению контактного усилия и, как следствие (в соответствии с теорией Герца), к уменьшению (при прочих равных условиях) амплитуды колебаний (вибраций) инструмента и обрабатывающей системы в целом, чему способствует усиление демпфирующего эффекта с возрастанием площади контакта лезвия инструмента с поверхностями (резания и обработанной) на обрабатываемой детали; соответствующий этим процессам тренд звука $\bar{E}_{зв}$ носит квазистационарный, т. е. практически мало изменяющийся (стабильный) характер;
- дальнейшее возрастание износа, в первую очередь, на главной задней поверхности лезвия инструмента и переход его в стадию сколов и выкрашиваний режущей кромки (катастрофический износ) приводит к искажению геометрии лезвия, в частности, к изменению (увеличению) радиуса округления режущей кромки, в результате этого увеличивается силовое взаимодействие инструмента с заготовкой и

соответственно растут амплитуды колебаний практически всех элементов обрабатываемой системы, а соответственно и амплитуды звуковой волны, что является предвестником отказа инструмента и появления брака детали;

– разработан метод прогнозирования ресурса обрабатывающих систем, основывающийся на параметрической идентификации прогнозной модели, аналитическое выражение которой представляет сумму двух дробно-рациональных степенных функций, наиболее подходящих для аппроксимации натуральных данных, характеризующихся резкими скачкообразными изменениями, что в практике эксплуатации обрабатывающих систем обеспечивает прогноз момента резкого изменения тренда амплитуды звуковой волны, сопровождающей их работу, свидетельствующего о приближении отказа инструмента;

– предложен метод адаптивного управления работой обрабатывающих систем, впервые в практике резания использующий прогноз фактического ресурса инструмента для выбора режимов резания, позволяющий продлить в заданных пределах период работоспособности инструмента, исключив непредвиденные остановки на его замену, и свести до минимума риск появления брака при металлообработке;

– разработан автоматизированный прогнозно-диагностический комплекс, предназначенный для прогноза в режиме реального времени ресурса и диагностирования технического состояния металлообрабатывающих технологических систем, что обеспечивает решение основной задачи машиностроительного производства – автоматизации контроля технологических процессов, что, в свою очередь, позволит внедрять и проверять в производственных условиях разнообразные технологические новации и современные инженерные разработки по оперативному контролю в режиме реального времени качества функционирования не только металлообрабатывающего, но и любого другого промышленного оборудования, в процессе работы которых генерируются разнообразные по физической природе информационные сигналы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы теории резания материалов : учебник / [Н. П. Мазур, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др.] ; под общ. ред. Н. П. Мазура, А. И. Грабченко. – 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.] ; за 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. Залога. – Суми : СумДУ, 2010. – 243 с.
4. По материалам сайта «Технология». Методы диагностики состояния режущего инструмента [Электронный ресурс]. – 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. – 264 с.
6. Кадыров Ж. Н. Диагностика и адаптация станочного оборудования гибких производственных систем / Ж. Н. Кадыров. – Л. : Политехника, 1991. – 144 с.
7. Резание металлов : учебник для машиностроительных вузов и факультетов / [Ч. И. Трановский, П. П. Трудов, В. А. Кривоухов и др.]. – М. : Машгиз, 1954. – 471 с.
8. Залога В. А. Материалы для металлорежущих лезвийных инструментов : учеб. пособие / В. А. Залога, В. Д. Гончаров. – Барнаул : АлтГТУ, 2009. – 299 с.
9. Обработка металлов резанием : учебник для авиационных вузов / [В. А. Кривоухов, Б. Е. Бруштейн, С. В. Егоров и др.]. – М. : Оборонгиз, 1958. – 627 с.
10. Залога В. А. Курс лекций «Инструментальные материалы для лезвийных инструментов» : учеб. пособие / В. А. Залога. – Сумы : СумГУ, 2007. – С. 16–45.
11. Ящерицын П. И. Основы резания материалов и режущий инструмент : учебник для машиностроит. спец. вузов /

П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко. – Минск : Высш. школа, 1975. – 528 с.

12. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.

13. 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.

14. Жулидов А. В. О связанности колебаний системы СПИЗ при резании / А. В. Жулидов, В. А. Залога, А. А. Носуленко // Металлорежущие станки / отв. ред. Б. Н. Бирюков. – М. : Машиностроение, 1985. – С. 7–12.

15. 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.

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 тчении титанового сплава. Часть 1 / В. А. Залога, Р. Н. Зинченко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2008. – № 4. – С. 118–125.

20. Интегрированные генеративные технологии / Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко, Ю. Н. Доброскок та ін. – Харків : НТУ «ХПИ», 2011. – 512 с.

21. Грабченко А. И. Повышение эффективности обработки ПСТМ на основе использования явления периодичности процесса шлифования / А. И. Грабченко, Л. Г. Дюбнер, И. Н. Пыжов // Різання та інструмент в технологічних системах : сборник научных работ НТУ «ХПИ». – Харьков : 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 / А. Г. Деревянченко, Д. А. Криницын, О. В. Фомина // Високі технології в машинобудуванні : сборник научных работ НТУ «ХПИ». – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – № 1. – С. 18–21.

24. Доброскок В. Л. Система 3D-моделирования абразивных инструментов из сверхтвердых материалов / В. Л. Доброскок // Материалы Междунар. науч.-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. Зінченко // 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. Новоселов. – 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 : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Р. Н. Зинченко. – 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. Дядюра К. А. Оптимизация механической обработки адаптивным управлением на основе анализа шума резания / К. А. Дядюра, Р. Н. Зинченко, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 3 (13). – С. 63–67.

34. Залого В. А. 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 «ХПІ». – Вип. 2 (17). – С. 142–147.

35. Залого В. А. 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 «ХПІ», 2008. – № 35. – С. 49–55.

36. Математическая модель системы жизненного цикла машиностроительного изделия : материалы I Междунар. науч.-техн. конф. [«Современные технологии в газотурбостроении»], (Алушта, 7–12 сентября 2009 г.). – Харьков, 2009. – С. 1.

37. Залого В. А. 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. Дядюра К. А. 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. Розробка системи технічного діагностування машин : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. учених [«Комп'ютерні науки для інформаційного суспільства»], (СХУНУ ім. Даля, 23–25 травня 2010 р.). – Луганськ : Вид-во «Ноулідж», 2010. – С. 178–180.

40. Моделирование процесса проектирования машиностроительных изделий производственно-технического назначения : материалы

Всеукраинской научно-технической конференции [«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Механообработка. Севастополь – 2010»]. – Севастополь, 2010. – С. 13–20.

41. Розроблення системи технічного діагностування машин : матеріали IV міжвуз. наук.-техн. конф. викл., співроб., асп. і студ. [«Інформатика, математика, механіка ІММ – 2010»], (СумДУ, 19–23 квітня 2010 р.). – Суми, 2010. – С. 164.

42. Дядюра К. А. 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. Дядюра К. А. Прогнозирование фактического ресурса режущего инструмента / К. А. Дядюра, В. В. Нагорный // Вибрации машин, измерение, снижение, защита. – Донецк, 2011. – № 2 (25). – С. 20–25.

44. Залога В. А. Оценка степени износа инструмента методом вибродиагностики / В. А. Залога, В. В. Нагорный // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2011. – № 4. – С. 88–96.

45. Повышение эффективности эксплуатации промышленного оборудования на основе диагностики и прогнозирования наработки его на отказ : матеріали Першої міжнар. наук. конф. пам'яті проф. В. Поджаренка [«Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС–2011»], (ВНТУ, 18–20 жовтня 2011 р.). – Вінниця, 2011. – С. 17.

46. Диагностирование технического состояния скважинного оборудования : материалы XIII Международной научно-технической конференции «ГЕРВИКОН–2011» [Международный форум «НАСОСЫ–2011»], (СумГУ, 6–9 сентября 2011). – Сумы, 2011. – С. 6.

47. Залога В. А. Прогноз стойкости инструмента по результатам вибродиагностики / В. А. Залога, В. В. Нагорный // Вибрации машин, измерение, снижение, защита. – Донецк, 2012. – № 2 (29). – С. 29–35.

48. Залога В. А. Расчёт индикаторов разрушения режущего

інструмента / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2012. – № 2. – С. 101–111.

49. Дядюра К. А. 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.

50. Дослідження коливань токарного верстата з метою прогнозування моменту своєчасної заміни різального інструмента : матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції [«Сучасні технології в промисловому виробництві»], (СумДУ, 17–20 квітня 2012 р.). – Суми, 2012. – С. 74–75.

51. Залого В. А. Спадкові принципи формування якості складних машинобудівних виробів при самоорганізації процесів проектування, виготовлення та експлуатації : монографія / В. О. Залого, К. О. Дядюра, В. В. Нагорный. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – 347 с.

52. Прогнозирование момента замены режущего инструмента по уровню звука, генерируемого процессом резания : материалы III научно-практической конференции [«Инновации, качество и сервис в технике и технологиях»], (ЮЗГУ, 17–19 мая 2012 г.). – Курск, 2012. – С. 107–111.

53. Залого В. А. Расчёт индикаторов разрушения режущего инструмента / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машинобудування. – 2012. – № 66. – С. 96–102.

54. Залого В. А. Использование вибродиагностики для прогноза стойкости инструмента / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Известия ЮЗГУ. Серія Техніка и технология. – 2012. – № 2, Часть 1. – С. 30–38.

55. Залого В. А. Исследование колебаний токарного станка. Часть 1. Исследование закономерностей изменения динамики обрабатываемой 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. Диагностирование состояния режущего инструмента по звуку, сопровождающему процесс резания : материалы Международной научно-практической конференции [«Молодёжь и наука : модернизация и инновационное развитие страны»], (Пенза, 5–8 июня 2013 г.). – Пенза, 2013. – С. 179–187.

57. Залого В. А. Обеспечение качества изготовления продукции посредством вибродиагностики / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 1 (31). – С. 12–17.

58. Залого В. А. Индикаторы состояния режущего инструмента и качества металлообработки / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 3(33). – С. 46–50.

59. Залого В. А. 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. Залого В. А. 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. Исследование колебаний узлов фрезерного станка в зависимости от износа фрезы : материалы V Международной научно-технической конференции [«Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ–2013)»]. – Юго-Западный государственный университет. – Курск, 2013. – С. 112–115.

62. Управление режимом механообработки на основе виброакустического контроля процесса резания : материалы Международной научно-технической конференции [«Машиностроение – глазами молодых»]. – Кременчуг : КНУ, 2013. – С. 49.

63. Програмно-апаратний комплекс контролю якості функціонування металообробної технологічної системи : матеріали III Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції

співроб., асп. і студ. [«Обробка матеріалів у машинобудуванні»], (СумДУ, 22–25 квітня 2014 р.). – Суми, 2014. – С. 60.

64. Залого В. А. Контроль качества функционирования обрабатывающей системы / В. А. Залого, В. В. Нагорный // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 7. – С. 39–45.

65. Пат. UA 91643 U Україна, МПК G01M 7/00 (2014.01). Спосіб вібродіагностики технічного стану металообробного верстата / Залого В. О., Нагорний В. В. ; заявник і власник патенту Сумський державний ун-т. – № у 2014 01692 ; заявл. 21.02.14 ; опубл. 10.07.14, Бюл. № 13.

66. Пат. UA 91817 U Україна, МПК G01N 3/58 (2006.01). Спосіб оцінки зносу та стійкості лезового різального інструмента / Залого В. О., Нагорний В. В. ; заявник і власник патенту Сумський державний ун-т. – № у 2014 03124 ; заявл. 27.03.14 ; опубл. 10.07.14, Бюл. № 13 .

67. Пат. UA 92424 U Україна, МПК B23B 25/00 (2014.01). Спосіб визначення шорсткості поверхні деталі при металообробці / Залого В. О., Нагорний В. В. ; заявник і власник патенту Сумський державний ун-т. – № у 2014 00000 ; заявл. 03.04.14 ; опубл. 11.08.14, Бюл. № 15 .

68. Пат. UA 92987 U Україна, МПК B23Q 11/02 Пристрій для контролю стану технологічної металообробної системи / Залого В. О., Нагорний В. В. ; заявник і власник патента Сумський державний ун-т. – № у 2014 04238 ; заявл. 22.04.14 ; опубл. 10.09.14, Бюл. № 17. – 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. 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.

73. Штейнберг В. С. Исследование вибраций при токарной обработке металлов / В. С. Штейнберг // Вестник металлопромышленности. – 1936. – № 12–13. – С. 83–87.

74. Исаев А. И. Резание металлов керамическим инструментом / А. И. Исаев, Н. Н. Зорев, Л. К. Кучма. – М. : Машгиз, 1952. – 92 с.

75. Амосов И. С. Осциллографическое исследование вибраций при резании металлов / И. С. Амосов. – М. : Машгиз, 1951. – 64 с.

76. Кобринский А. Е. Виброударные / А. Е. Кобринский, А. А. Кобринский. – М. : Наука, 1973. – 591 с.

77. Межевой Ю. Т. Экспериментальное исследование вибраций при точении в зависимости от условий обработки : дис. ... канд. техн. наук / Ю. Т. Межевой. – М., 1954. – 135 с.

78. Дроздов Н. А. К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке / Н. А. Дроздов // Станки и инструмент. – 1937. – № 22. – С. 21–25.

79. Каширин А. И. Исследование вибраций при резании / А. И. Каширин. – М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1944. – 262 с.

80. Манжос Г. А. Исследование вибраций в условиях скоростного точения и изыскание методов борьбы с ними / Г. А. Манжос. – М. : Машгиз, 1951. – 47 с.

81. Ильницкий И. И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения / И. И. Ильницкий. – М. : Машгиз, 1958. – 141 с.

82. Кривоухов В. А. Высокочастотные вибрации резца при точении / В. А. Кривоухов, А. Л. Воронов. – М. : Оборонгиз, 1956. – 77 с.

83. Мурашкин Л. С. Прикладная нелинейная механика станков / Л. С. Мурашкин, С. Л. Мурашкин. – Л. : Машиностроение, 1977. – 192 с.

84. Заре В. В. Оценка некоторых механизмов возбуждения вибрации при точении / В. В. Заре // Вопросы механики и машиностроения. – Рига : Зинантне, 1971. – Вып. 6. – С. 107–121.

85. Эльясберг М. Е. Автоколебания металлорежущих станков : теория и практика / М. Е. Эльясберг. – СПб. : ОКБС, 1993. – 180 с.
86. Вейц В. Л. Вынужденные колебания в металлорежущих станках / В. А. Вейц, В. К. Дондошанский, В. И. Чиряев. – М. ; Л. : Машгиз, 1959. – 288 с.
87. Внуков Ю. Н. Влияние угла наклона винтовой режущей кромки концевой цилиндрической фрезы на уровень возбуждения вибраций при обработке тонкостенной детали / Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова и др. // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. – Вып. 84. – С. 43–50.
88. Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании / Ю. Н. Внуков, А. И. Гермашев, С. И. Дядя и др. // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – Вип. 10. – С. 3–13.
89. Методика определения условий контактирования инструмента с тонкостенной деталью при ее концевом фрезеровании / Ю. Н. Внуков, А. И. Гермашев, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. – Вып. 85. – С. 48–55.
90. Синопальников В. А. Надежность и диагностика обрабатывающих систем / В. А. Синопальников, С. Н. Григорьев. – М. : Высшая школа, 2005. – 343 с.
91. 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.
92. 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.
93. Точность и надежность станков с числовым программным управлением / под ред. А. С. Проникова. – М. : Машиностроение. –

1982. – 256 с.

94. Техническая диагностика процессов механообработки в ГАП / Н. В. Дорогова, Л. Н. Петрашина, В. Н. Тисенко [и др.] // Исследование надежности и долговечности деталей машин : труды ЛПИ. – 1983. – № 396. – С. 92–97.

95. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 320 с.

96. Трусов В. В. Математическая модель вибраций при резании / В. В. Трусов // Производительная обработка и надежность деталей машин : межвуз. сб. тр. – Ярославль, 1981. – С. 18–29.

97. Талантов Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.

98. Макаров А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов / А. Д. Макаров. – М. : Машиностроение. – 1966. – 264 с.

99. Дудкин Е. В. Повышение надежности работы многолезвийного инструмента на автоматических линиях / Е. В. Дудкин, А. Л. Плотников // Автоматизация обрабатывающих процессов в машиностроении : межвуз. сб. науч. тр. – Волгоград : ВолгГТУ, 1994. – С. 43–47.

100. Иващенко А. П. Анализ и синтез причин, приводящих к снижению стойкости режущего инструмента при резании материалов [Электронный ресурс] / А. П. Иващенко // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа : www.science-education.ru/113-11435.

101. Бржозовский Б. М. Обеспечение надежности определения режимов лезвийной обработки для автоматизированного станочного оборудования / Б. М. Бржозовский, А. Л. Плотников. – Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2001. – 88 с.

102. 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.

103. Сидоров А. С. Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента в мехатронных станочных системах : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» / А. С. Сидоров. – Уфа, 2007. – 209 с.
104. Надеинская Е. П. Исследование износа режущего инструмента с помощью радиоактивных изотопов / Е. П. Надеинская. – 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. – М. : ВНИИТЭМР, 1986. – Вып. 2. – С. 25.
107. Калашников М. А. Разработка и исследование переменнo-частотного метода электрических измерений параметров поверхностных слоев металлических изделий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.11 «Методы контроля и диагностика в машиностроении» / М. А. Калашников ; Новочеркасский политехнический институт. – Новочеркасск, 1974. – 24 с.
108. Контроль поломки и 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. – СПб. : 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 : сб. науч. трудов. – Уфа : УГАТУ, 1997.

114. Кретинин О. В. Исследование спектра термоЭДС 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 : республик. 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 : республик. 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. – 2004, February. – № 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 / Е. Г. Нахапетян. – 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. Litaο Wang. Tool wear monitoring in reconfigurable machining systems through Wavelet analysis / Wang Litaο, G. Mostafa Mehrabi, 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 / X. D. Huang, Y. Ariki, M. A. Jack. – 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 Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning / Y. Chiou Richard, Y. Liang 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. – 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 J. Surface roughness prediction of flow-formed AA6061 alloy by design of experiments / J. 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 тчении с опережающим пластическим деформированием / А. Р. Ингеманссон // 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 В 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. АО «КОМПОМАШ–ТЭК». – № 2000103090/02 ; заявл. 11.02.2000 ; опубл. 20.02.2001, Бюл. № 9. – 2 с.

158. Пат. 2379737 Российская Федерация, МПК⁷ G 05 В 19/18. Способ поддержания предельно допустимых обрабатывающих режимов / Агапов С. И., Сидякина С. Ю., Корпелянский О. Ф. (RU) ; заявитель и патентообладатель Гос. образовательное учреждение высшего проф. образования «Волгоградский гос. техн. ун-т (ВолгГТУ)». – № 2008109281/09 ; заявл. 11.03.2008 ; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 23. – 3 с.

159. Пат. 872052 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 В 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 прогнозирования 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 прогнозирования остаточной стойкости режущего инструмента для системы ЧПУ станка / Мартынов 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 прогнозирования 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. Брюханов В. Н. Теория автоматического управления / В. Н. Брюханов, М. Г. Косов, С. П. Протопопов и др.] ; под ред.

Ю. М. Соломенцева. – [3-е изд., стер.]. – М. : Высш. шк., 2000. – 268 с.

167. Остафьев В. А. Диагностика процесса металлообработки / В. А. Остафьев, В. С. Антонюк, Г. С. Тымчик. – К. : Техніка, 1991. – 152 с.

168. Синопальников В. А. Надежность и диагностика обрабатывающих систем / В. А. Синопальников, С. Н. Григорьев. – М. : Высшая школа, 2005. – 343 с.

169. Acoustic emission technique as a mean 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 сложнопрофильных 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 / В. Л. Вейц, В. Е. Дондошанский, В. И. Чиреев. – 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-во физ.-мат. 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. ГОСТ 2789–73. 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. – Т. 4. – 261 с.
182. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. / ред. совет : В. Н. Челомей (председ.). – Москва : Машиностроение, 1978. – Т. 1. Колебания линейных систем / под ред. В. В. Болотина. – 1978. – 352 с.
183. Грешилов А. А. Математические методы построения прогнозов / А. А. Грешилов, В. А. Стакун, А. А. Стакун. – 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 / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. – 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 / А. И. Якушев, Л. Н. Воронцов, Н. М. Федотов. – 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 т. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.

191. Основы автоматизации машиностроительного производства : учеб. для машиностроит. спец. вузов / Е. Р. Ковальчук, М. Г. Косов, В. Г. Митрофанов 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. – 276 с.

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. 2011. – Vol. 49, No. 4. – С. 503–509.

198. Study of flank wear in single point cutting tool using acoustic emission sensor techniques / S. Sundaram et al. // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – August 2008. – Vol. 3, No. 4. – С. 32–36.

199. Prateepasen A. Acoustik Emission and vibration for tool wear monitoring in single-point machining using Belief network /

A. Prateepasen // IEEE Instrumentation and Measurement Technology conference. – Budapest, Hungary, May 21–23, 2001.

200. Fiala Z. On the analysis of the sound spektrum at machining of the glass-polyester composite material / Z. Fiala, M. Piska, A. Jaros // MM Science Journal. – 2013, March. – 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. 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 прогнозирования / Е. М. Четыркин. – М. : Статистика, 1977. – 200 с.

206. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / 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 (информационное)

Литературные данные о характере изменения амплитуды звуковой волны и акустической эмиссии при износе режущего инструмента

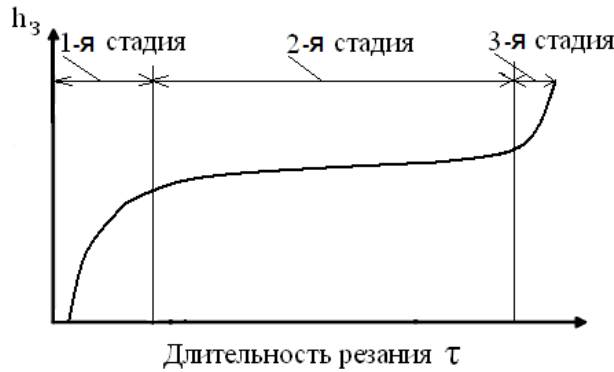


Рисунок А.1 – Стадии износа инструмента [1]

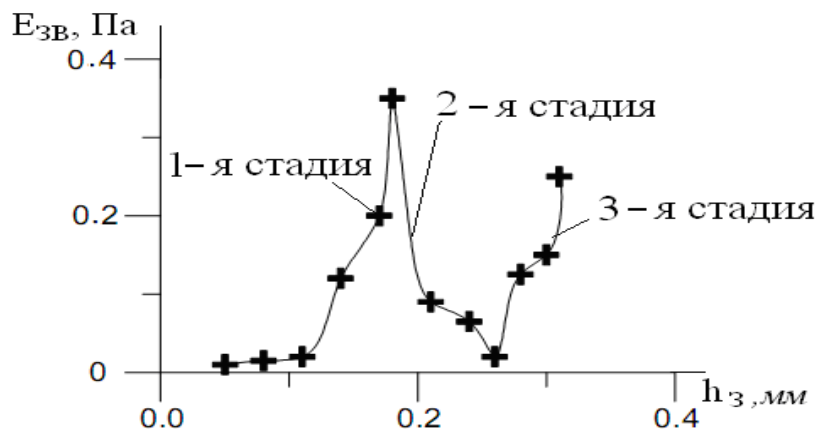


Рисунок А.2 – Изменение уровня звукового давления
в зависимости от износа инструмента [197]

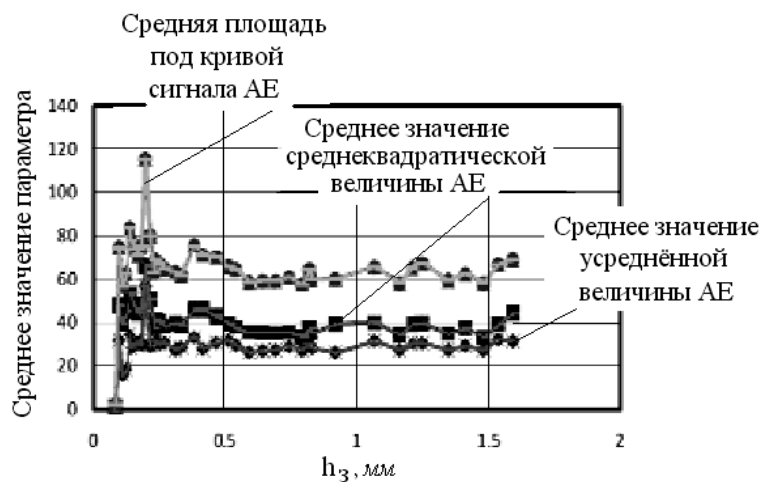


Рисунок А.3 – Изменение параметров акустической
эмиссии (АЕ) в зависимости от износа инструмента [198]

Продолжение приложения А

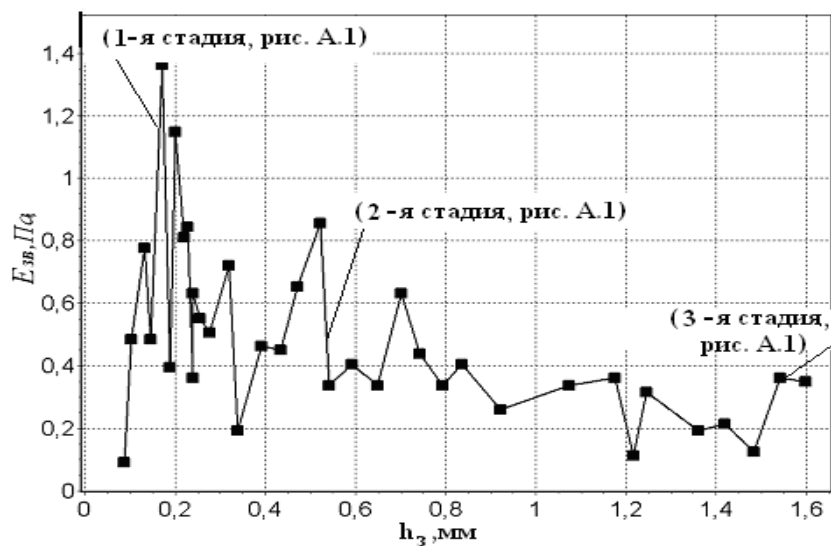


Рисунок А.4 – Изменение звукового давления в зависимости от износа инструмента [198]

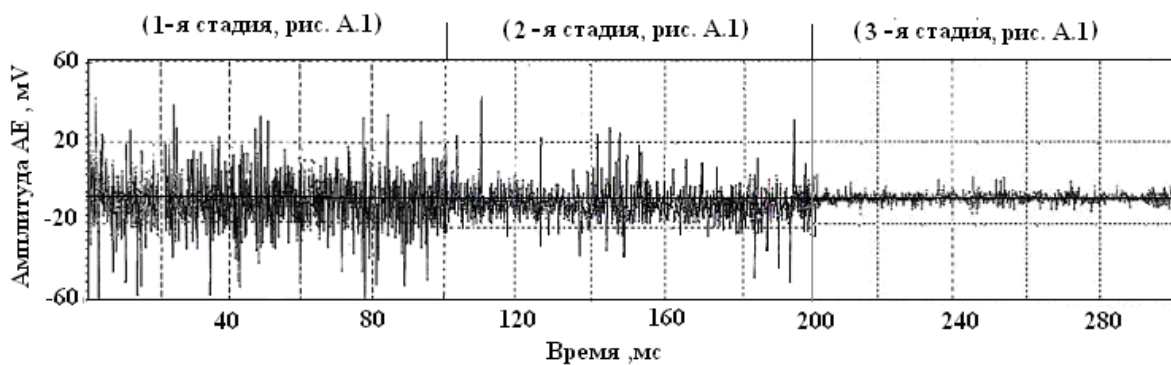


Рисунок А.5 – Изменение амплитуды акустической эмиссии (АЕ) в зависимости от стадии износа инструмента [198]

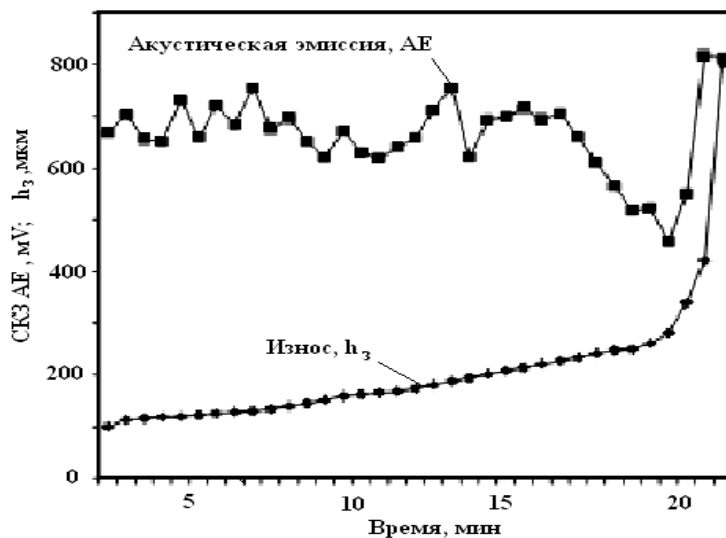


Рисунок А.6 – Изменение среднеквадратической величины акустической эмиссии и износа инструмента ($V = 300 м/мин, t = 0,5 мм, S = 0.2 мм/об$ [199])

Продолжение приложения А

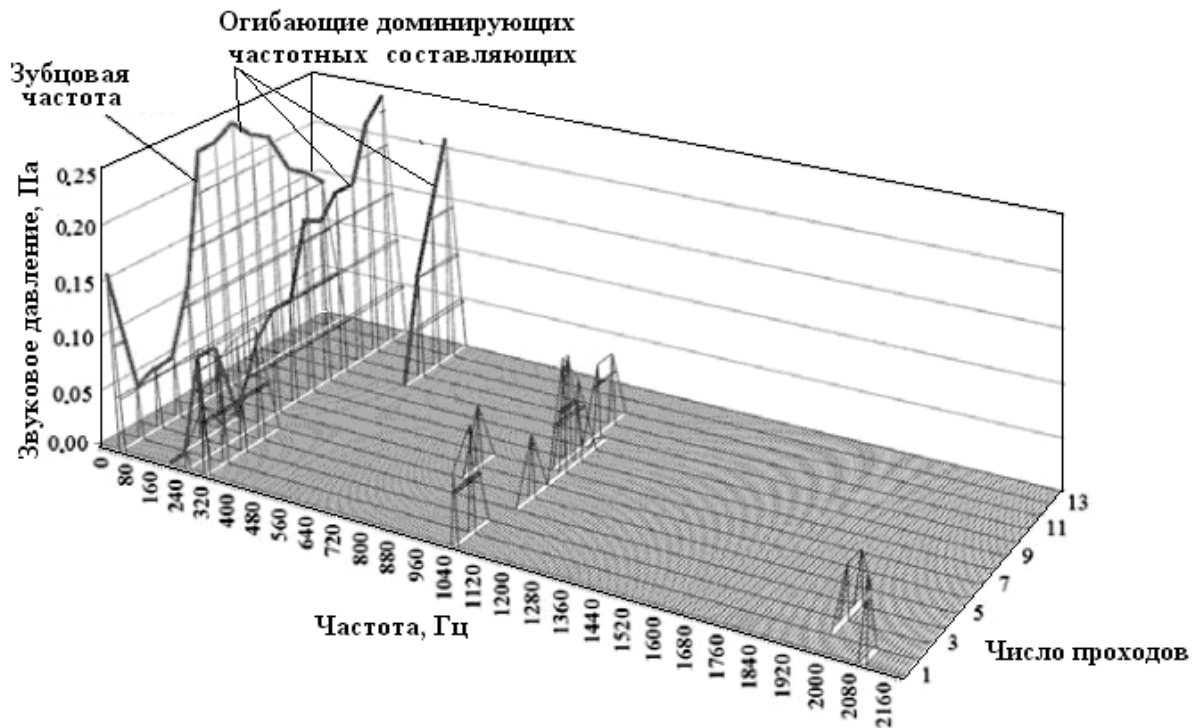


Рисунок А.7 – Трехмерная диаграмма изменения спектра звукового давления в зависимости от числа проходов инструмента [200]

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(справочное)
Материал к разделу 4

Таблица Б.1 – Дефекты станка, выявляемые методом вибродиагностики

Номер параметра	Определяемый параметр
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 шариковинтовой передачи
12	Перекос винта шариковинтовой передачи
13	Износ винта и шариков шариковинтовой передачи
14	Раковины, сколы на телах качения шариковинтовой передачи
15	Раковины, трещины винта и гаек шариковинтовой передачи
16	Износ гаек шариковинтовой передачи
17	Дисбаланс валов, шпинделей, шкивов

Продолжение приложения Б

Таблица Б.2 – Дефекты подшипниковых опор и информационные частоты, на которых они выявляются

№ пор.	Наименование дефекта подшипника	Информационная частота дефекта	Наличие в сигнале гармоник
Проблема монтажа подшипников качения			
1	Перекас 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	$k \times f_{об}$	$k = 0,5,1,1,5,2,2,5,3$
Проблема 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	$f_H + f_B, f_H + f_{об}$	$k = 1,2, \dots$
Дефект 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	$k \times f_{тк}$	$k = 1,2,3$
14	Обкатывание наружного кольца	$f_{об}$	

Продолжение приложения Б

Таблица Б.3 – **Формулы для расчёта информационных частот зубчатого зацепления**

Частота	Вид дефекта и его причина		
	изготовления	сборки	износа
$f_{об}$	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

Продолжение приложения Б

Таблица Б.4 – **Формулы для расчёта информационных частот подшипника**

Кинематическая характеристика и дефекты подшипника	Формула
Перекатывание тел качения по наружной дорожке	$f_H = z/2 f_{об} (1 - d_{мк} / D_{ср} \cos \beta)$ ($f_H = f_{об} (z/2 - 1.2)$)
Перекатывания 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	$f_C = 1/2 f_{об} (1 - d_{мк} / D_{ср} \cos \beta)$ ($f_C = f_{об} (1/2 - 1.2/z)$)
Перекатывания тел качения	$f_{мк} = 1/2 f_{об} d_{мк} / D_{ср} [1 - (d_{мк} / D_{ср})^2 \cos 2\beta]$ ($f_{мк} = f_{об} (z/2 - 1.2/z)$)
Дефект формы тел качения	$f_{мк}^{\phi} = 2 f_{об} \left(\frac{D_{ср} - d_{мк}}{d_{мк}} \right) \left(\frac{D_{ср} + d_{мк}}{d_{мк}} \right)$
Дефект внутренней дорожки	$f_B^{Def} = 2 f_{об} \left(\frac{D_{ср} + d_{мк}}{d_{мк}} \right)$
Дефект наружной дорожки	$f_H^{Def} = 2 f_{об} \left(\frac{D_{ср} - d_{мк}}{d_{мк}} \right)$
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 – количество тел качения, шт; β – угол контакта тела качения с обоймой; E – модуль Юнга, Па; ρ – удельная плотность материала, $\frac{кг}{м^3}$.

Продолжение приложения Б

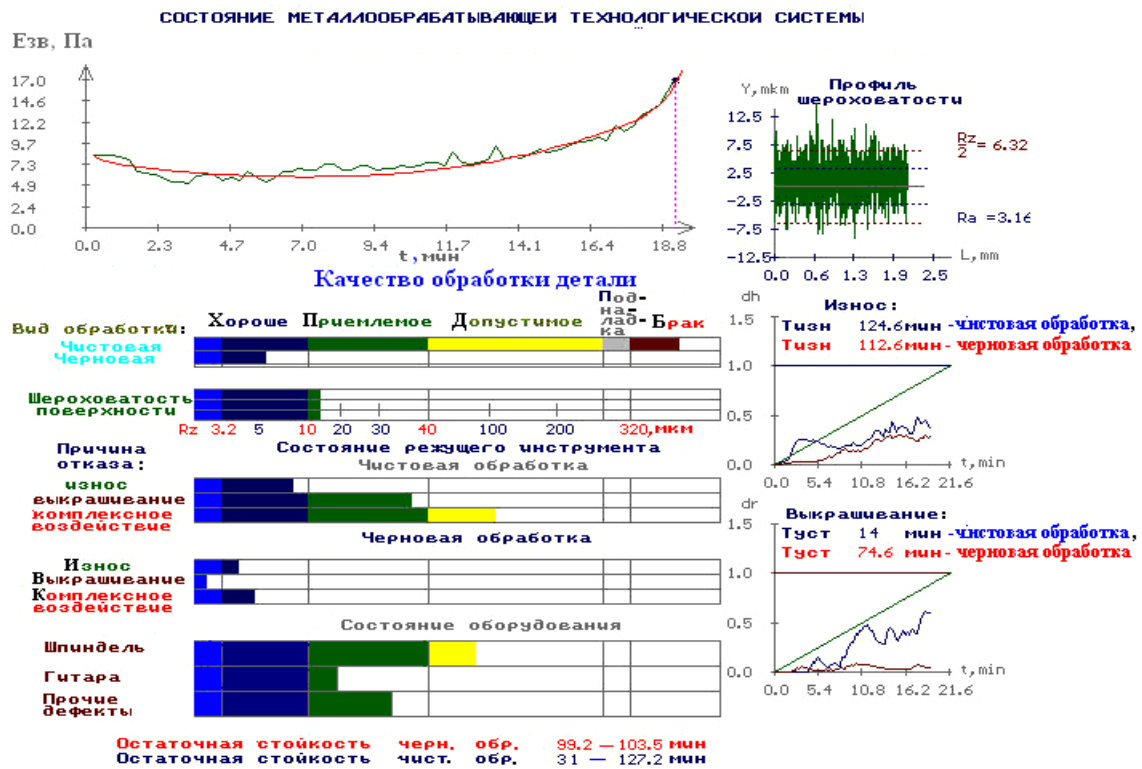


Рисунок Б.1 – Визуализации результатов контроля состояния металлообрабатывающей технологической системы

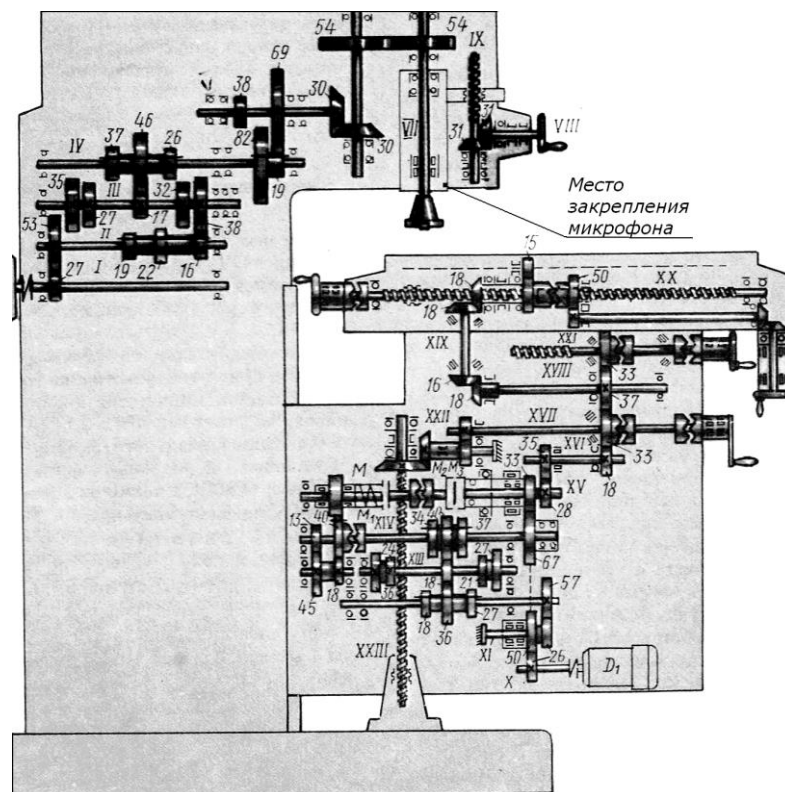


Рисунок Б.2 – Кинематическая схема фрезерного станка 6P13 с указанием места закрепления микрофона

Продолжение приложения Б

Токарный станок 16К20Т1

От электродвигателя главного привода Д1 (рис. Б.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.

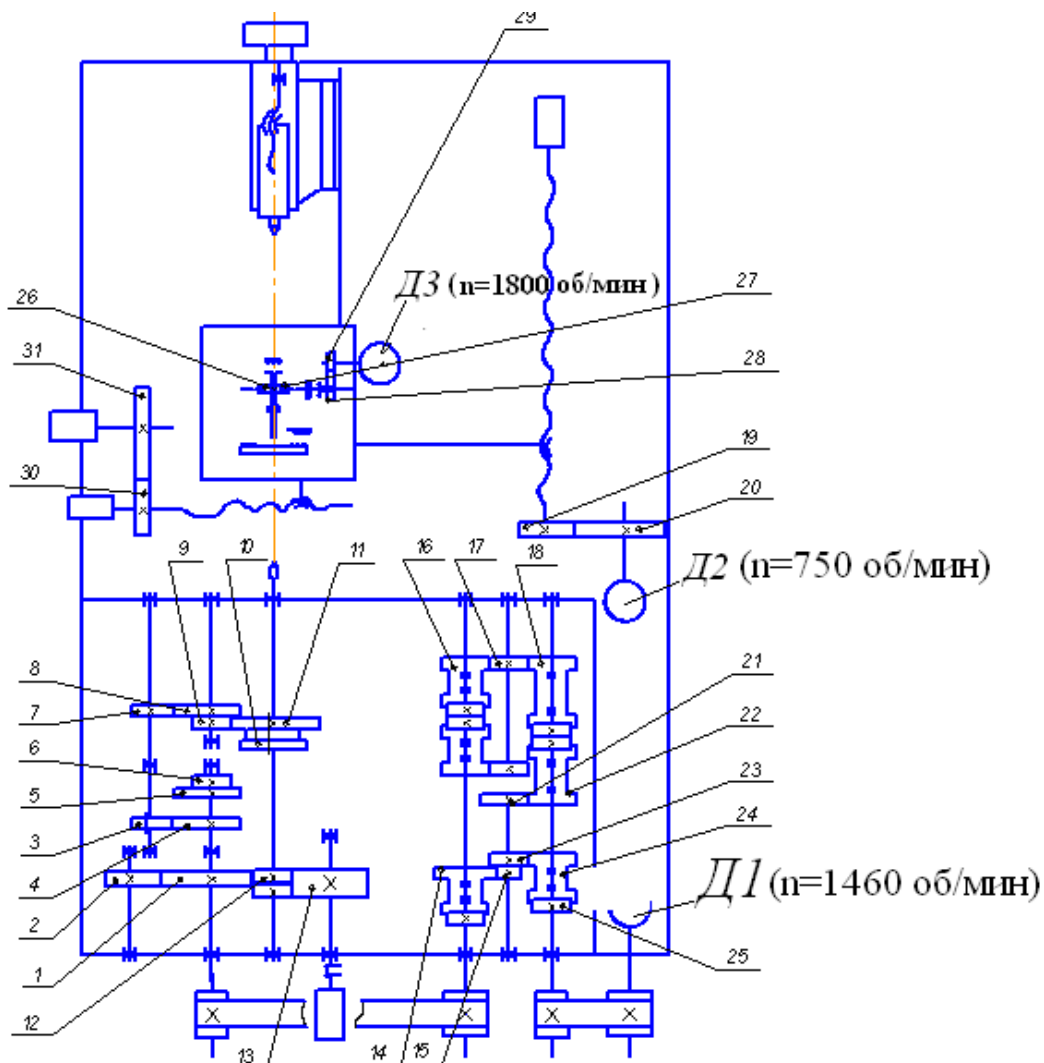


Рисунок Б.3 – Кинематическая схема токарного станка 16К20Т1

Продолжение приложения Б

Таблица Б.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 В

(информационное)

Статистическая оценка качества аппроксимации экспериментальных данных

Для статистического оценивания коэффициентов аппроксимационной модели 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:

$$\hat{\gamma} = \frac{|a|}{\sigma_a} > \gamma_{(n-3;P)}^{табл}, \quad (B.1)$$

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 (B.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

$$\hat{r} = \frac{r\sqrt{(n-2)}}{\sqrt{1-r^2}} \geq r_{(n-3;P)}. \quad (B.2)$$

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 аппроксимационной 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:

Продолжение приложения В

$$D_{\text{общ}} = \frac{\sum E_{3B}^2 - \frac{(\sum E_{3B})^2}{n}}{n-1}. \quad (\text{B.3})$$

Остаточная дисперсия характеризует различие между экспериментальными E_{3B} и расчётными E_{3B}^P данными об уровне звука:

$$D_{\text{общ}} = \frac{\sum (E_{3B}^P - E_{3B})^2}{n-1}. \quad (\text{B.4})$$

Критерий Фишера находят по формуле

$$\hat{F} = \frac{D_{\text{общ}}}{D_{\text{ост}}} > F_{(n-3, P)}^{\text{табл}}. \quad (\text{B.5})$$

Критерий Фишера показывает, во сколько раз модель предсказывает результаты опытов лучше, чем среднее E_{3B}^{CP} .

Кроме этого, вычислялись коэффициент детерминации R и средняя величина отклонения расчетных данных от экспериментальных:

$$R = \sqrt{1 - \frac{D_{\text{ост}}}{D_{\text{общ}}}}, \quad (\text{B.6})$$

$$A = \frac{\sum |E_{3B} - E_{3B}^P|}{n E_{3B}}. \quad (\text{B.7})$$

Основой расчета точности определения ресурса инструмента T является выражение, полученное путём дифференцирования выражения (3.17) по величине параметра \bar{E}_{3B} при $\tau > T_{\text{ПР}}$:

$$\Delta T = \frac{T - \tau}{\alpha \bar{E}_{3B}^{\text{ПР}} \beta} \left(\frac{T - \tau}{\tau - T_{\text{ПР}}} \right)^{\beta} \sqrt{D_{\text{ост}}}. \quad (\text{B.8})$$

где $\bar{E}_{3B}^{\text{ПР}} = \left(1 + \frac{g_{\text{ПР}}}{E_{03B}} \cdot T_{\text{ПР}} \right)$ – величина параметра \bar{E}_{3B} на момент окончания участка приработки резца.

Прогнозируемая величина ресурса $T_{\text{ПР}}$ с заданной вероятностью $P = 0,95$ должна находиться в следующем доверительном интервале (доверительные границы для экспериментальной выборки):

Продолжение приложения В

$$T_{PP} - \gamma_{(n-1; P)}^{табл} \Delta T < T_{Прогн} < T_{PP} + \gamma_{(n-1; P)}^{табл} \Delta T, \quad (B.9)$$

где $\gamma_{(n-1; P)}^{табл}$ – коэффициент Стьюдента; T_{PP} – параметр прогнозной модели, определяемый в процессе идентификации прогнозной модели (3.13).

Математическое ожидание прогнозируемой величины ресурса \bar{T}_{PP} изменяется в более узких границах:

$$T_{PP} - \frac{\gamma_{(n-1; P)}^{табл}}{\sqrt{n}} \Delta T < \bar{T}_{PP} < T_{PP} + \frac{\gamma_{(n-1; P)}^{табл}}{\sqrt{n}} \Delta T. \quad (B.10)$$

Ниже представлены результаты статистической оценки качества аппроксимации и точности прогнозирования ресурса инструмента, проведенной по результатам обработки экспериментальных данных, представленных в разд. 5.

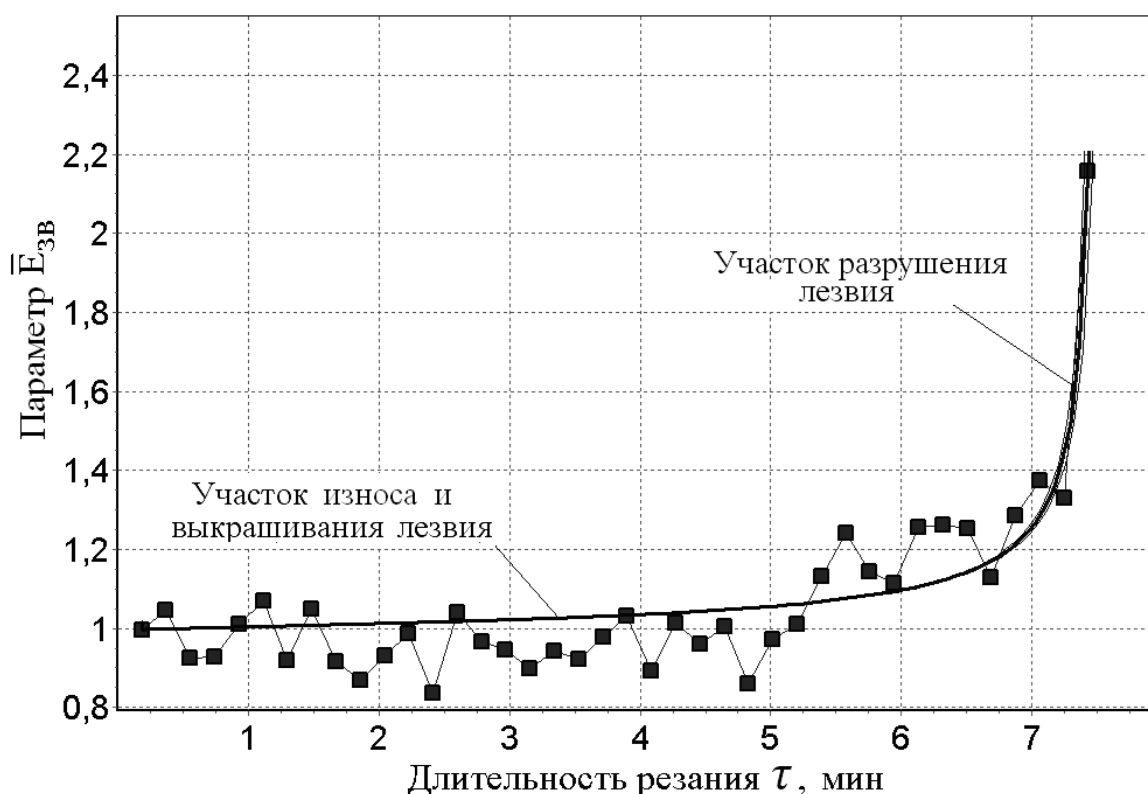


Рисунок В.1 – Аппроксимация графиком модели (3.13) экспериментальных данных [10] о характере изменения параметра $\bar{E}_{зв}$ звука, сопровождающего процесс продольного точения при износе и последующем выкрашивании и сколе лезвия

Таблица В.1 – Оценка статистической значимости прогнозной модели, описывающей параметр $\bar{E}_{зв}$

Технологический процесс	Общая дисперсия $D_{общ}$	Остаточная дисперсия $D_{ост}$	Коэффициент детерминации R	Коэффициент корреляции $r (r_{крит})$	Среднее отклонение A , %	Критерий Фишера, $F (F_{табл})$
Продольное точение	0,066	0,020	0,681	0,825 (0,370)	16,7	17,8 (2,9)
Фрезерование	0,112	0,001	0,987	0,993 (0,248)	1,9	1537 (2,7)



Рисунок В.2 – Аппроксимация графиком модели (3.13) экспериментальных данных о характере изменения параметра $\bar{E}_{зв}$ звука, сопровождающего процесс фрезерования при износе, выкрашивании и последующем сколе зуба цилиндрической фрезы

Таблица В.2 – Оценка статистической значимости прогнозной модели, описывающей параметр $\bar{E}_{зв}$, сопровождающий разрушение инструмента

Технологический процесс	Общая дисперсия $D_{общ}$	Остаточная дисперсия $D_{ост}$	Коэффициент детерминации R	Коэффициент корреляции $r (r_{крит})$	Среднее отклонение A , %	Критерий Фишера $F (F_{табл})$
Продольное точение	0,225	0,096	0,816	0,903 (0,314)	7,6	53,3 (2,8)
Фрезерование	0,451	0,056	0,98	0,992 (0,267)	3,4	1072 (2,7)

Таблица В.3 – Статистическая оценка точности прогнозирования ресурса инструмента при износе

Технологический процесс	Прогноз ресурса, 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
Продольное точение	630 мин	± 79 мин	$\pm 14,70$ мин	2,06	7,9	0,120
Фрезерование	59 мин	$\pm 3,40$ мин	$\pm 0,43$ мин	2,00	17,5	0,057

Таблица В.4 – Статистическая оценка точности прогнозирования ресурса инструмента при выкрашивании и при сколе

Технологический процесс	Прогноз ресурса, 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
Продольное точение	7,5 мин	0,014 мин	0,002 мин	2,02	130	0,002
Фрезерование	148,8 с	$\pm 1,43$ с	$\pm 0,19$ с	2,00	103	0,009

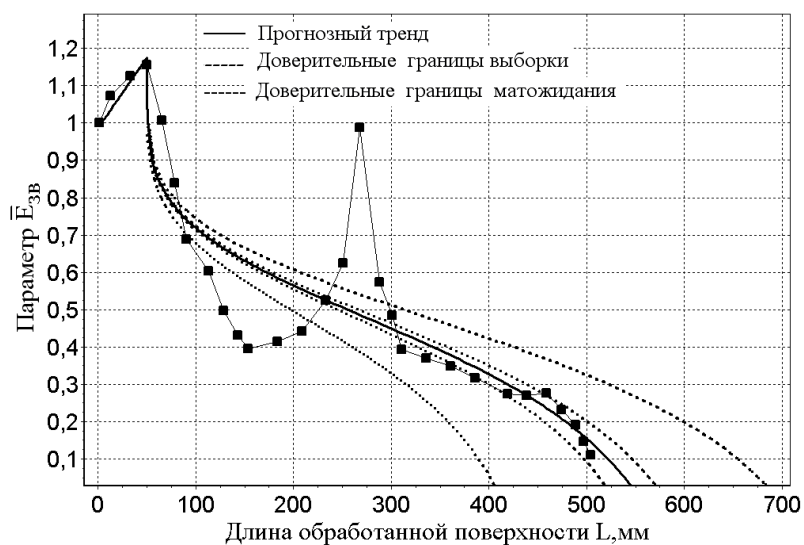


Рисунок В.3 – Прогнозный тренд параметра $\bar{E}_{зв}$, сопровождающего продольное точение, и его доверительные границы

Продолжение приложения В

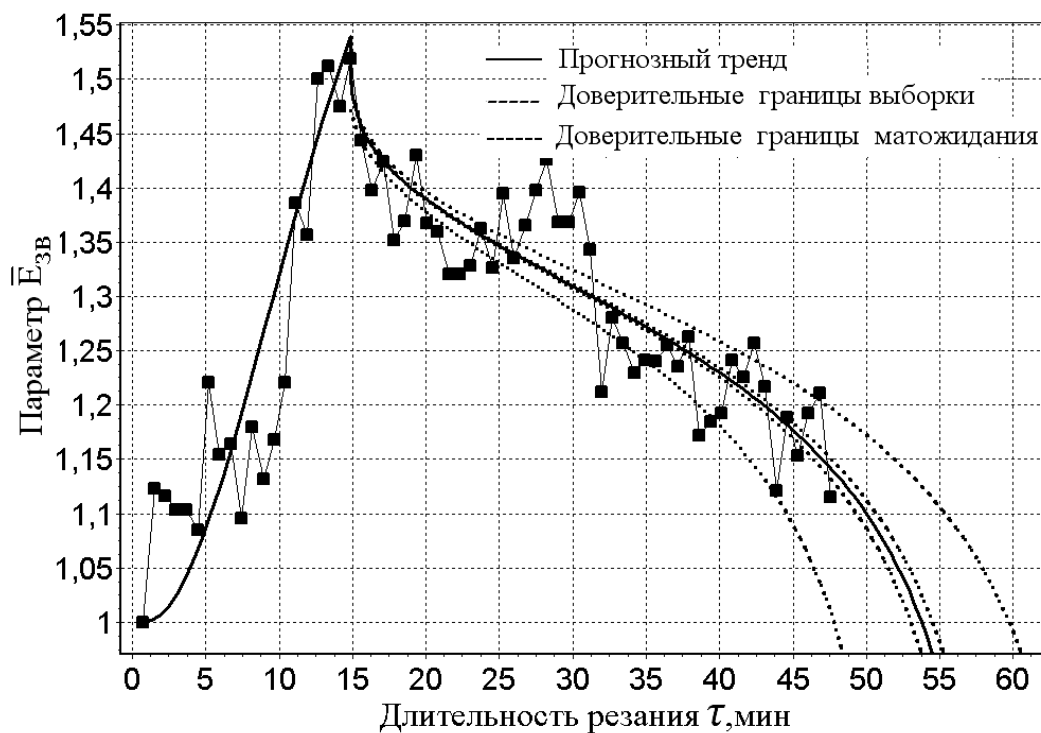


Рисунок В.4 – Прогнозный тренд параметра $\bar{E}_{зв}$, сопровождающего фрезерование, и его доверительные границы

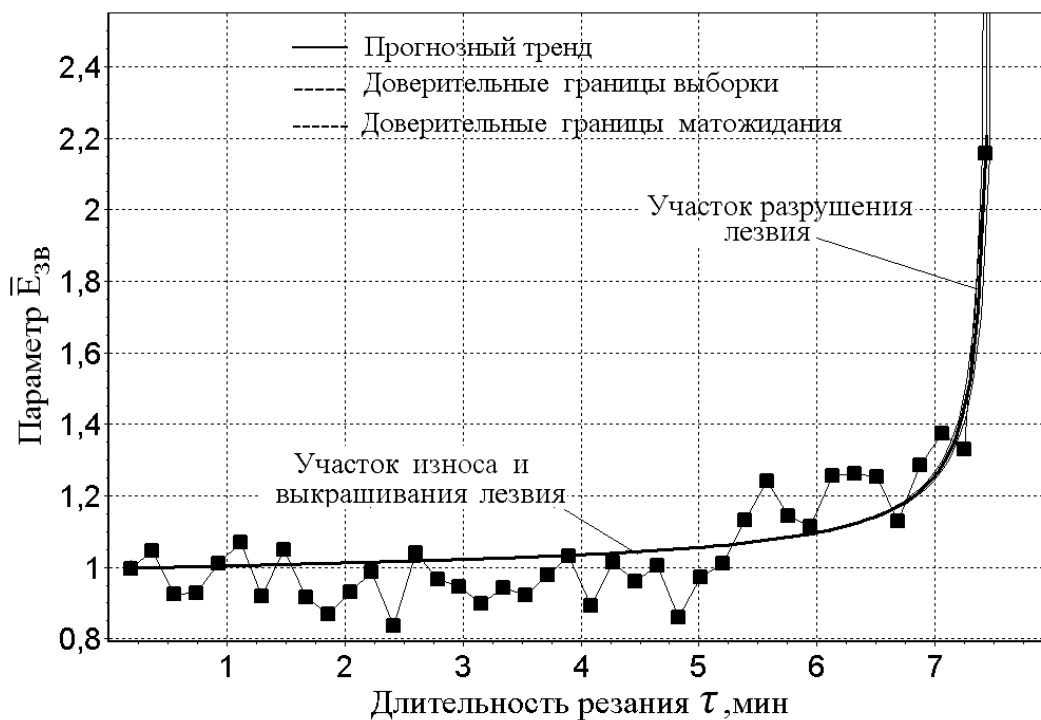


Рисунок В.5 – Прогнозный тренд параметра $\bar{E}_{зв}$, сопровождающего процесс продольного точения при износе, выкрашивании и последующем сколе лезвия, и его доверительные границы

Продолжение приложения В

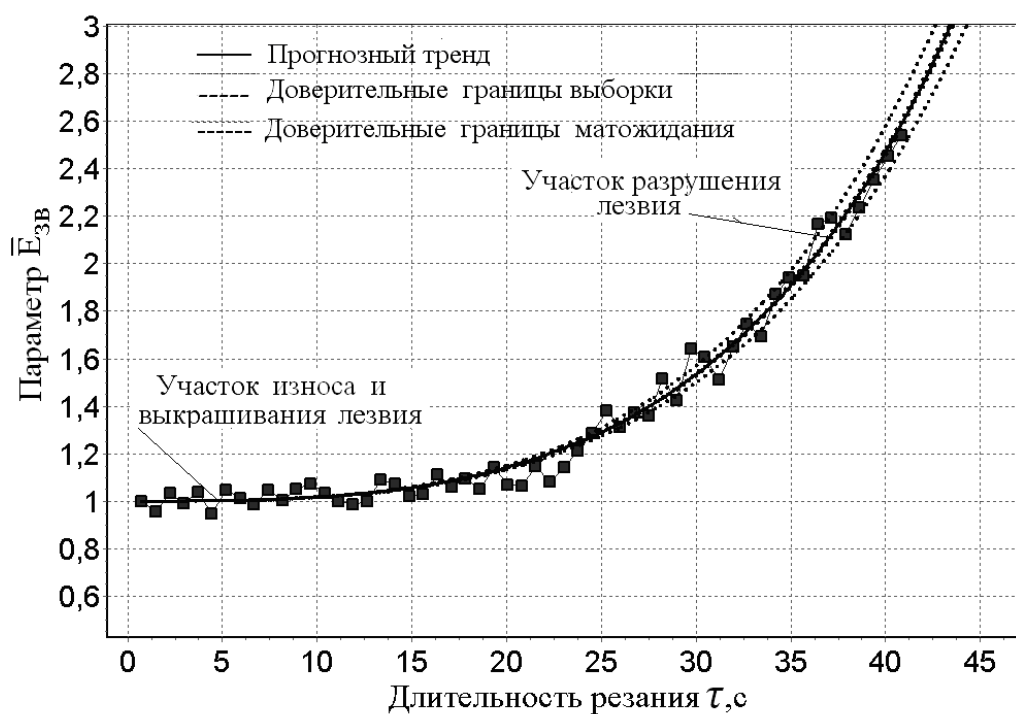


Рисунок В.6 – Прогнозный тренд параметра $\bar{E}_{зв}$, сопровождающего процесс фрезерования при износе, выкрашивании и последующем сколе зуба цилиндрической фрезы, и его доверительные границы

Образцы протоколов диагностирования технического состояния технологической системы (обтачивание)

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (длительность резания – 5,76 мин)

1. Состояние детали

1.1. Качество обработки детали:

– хорошее.

1.2. Шероховатость поверхности:

– соответствует чистовой обработке ($R_a = 0,25$ 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;

Продолжение приложения В

– 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.

Продолжение приложения В

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (длительность резания – 10,59 мин)

1 Состояние детали

1.1 Качество обработки детали:

– брак.

1.2 Шероховатость поверхности:

– соответствует черновой обработке ($Ra = 100$ 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.

Продолжение приложения В

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.

Наукове видання

**Залога Вільям Олександрович,
Нагорний В'ячеслав Михайлович,
Нагорний Володимир В'ячеславович**

Контроль динамічного стану металообробної технологічної системи та прогнозування її ресурсу

Монографія
(Російською мовою)

Комп'ютерне верстання В. В. Нагорного
Редактор М. Я. Сагун
Художнє оформлення обкладинки А. В. Рокитянського

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 14,18. Обл.-вид. арк. 13,97. Тираж 300 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.