УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

СИДОРОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В МЕХАТРОННЫХ СТАНОЧНЫХ СИСТЕМАХ

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор ЗОРИКТУЕВ В.Ц.

УФА 2007

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ 2
Перечень используемых сокращений 5
ВВЕДЕНИЕ 6
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ДИАГНОСТИКИ 13
1.1. Проблема и методы разработки систем мониторинга состояния РИ 13
1.2. Современное состояние методов мониторинга в зарубежной литературе 15
1.3. Современное состояние методов мониторинга в России 24
1.4. Обоснованный выбор метода мониторинга состояния РИ 29
1.5. Проблемы прогнозирования состояния РИ 31
1.6. Проблемы математического описания ПР 34
1.7. Требования к методу прогноза состояния РИ 35
1.8. Основные выводы, принятые положения и гипотезы 36
ГЛАВА 2. КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА И ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ 38
2.1. Физические и информационные основы оперативного мониторинга износа РИ 38
2.1.1. Представление процесса резания как объекта диагностики в виде «черный ящик» 38
2.1.2. Анализ состояний объекта диагностики (инструмента) 40
2.1.3. Выделение входных координат объекта диагностики 43
2.1.4. Выделение выходных координат объекта диагностики 45
2.1.4.1. Анализ электрических явлений в зоне резания 45
2.1.4.2. Виброакустические колебания в процессе резания 54
2.1.5. Выводы 55
2.2. Разработка концептуальной модели системы оперативного мониторинга и прогноза работоспособности РИ 55

2.3. Методы измерения и извлечения информации из диагностических сигналов 59
2.3.1. Измерение постоянной составляющей ТЭДС 59
2.3.2. Выбор метода оценки среднего 64
2.3.2.1. Разработка адаптивного фильтра 67
2.3.3. Измерение электрической проводимости контакта «инструмент-деталь» 70
2.3.4. Измерение сигнала виброакустической эмиссии 76
2.3.5. Методы извлечения информации из сигналов ВАЭ 78
2.3.5.1. Преобразования Фурье и спектр мощности 78
2.3.5.2. Периодограммный метод вычисления спектральной плотности мощности 82
2.3.5.3. Вейвлет-преобразование и вейвлет-спектры 87
2.3.6. Оборудование, приборы и устройства исследований 101
2.3.7. Обоснование и выбор материалов для исследований 103
2.3.8. Программно-математическое обеспечение для сбора и анализа экспериментальных данных 105
2.4. Выводы по главе 109
ГЛАВА 3. РАСПОЗНАВАНИЕ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ 110
3.1. Распознавание состояния РИ на основе сигнала виброакустической эмиссии 111
3.1.1. Распознавание состояния РИ на основе нейросетевого классификатора 112
3.1.2. Исследования чувствительности метода мониторинга на основе сигнала ВАЭ к нестационарности режимов резания 115
3.2. Распознавание состояния РИ на основе ЭП КИД с обучением по параметрам ВАЭ 119
3.3. Прогноз параметров процесса резания 123
3.3.1. Разработка базы данных системы диагностики 124

3.3.2. Разработка базы знаний 127
3.3.2.1. Особенности обеспечения связанности и определения семантической меры информационных единиц в БД процесса резания 128
3.3.2.2. Выбор способа представления знаний 129
3.3.3. Разработка алгоритма работы предикатора 131
3.3.4. Экспериментальная проверка адекватности прогнозируемой оценки работоспособности РИ 135
3.4. Выводы 138
ГЛАВА 4. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОЛУЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ 139
4.1. Алгоритмы параметрической идентификации моделей 140
4.2. Структурная идентификация 145
4.3. Оптимизация структуры модели 149
4.3.1. Самоорганизация моделей 154
4.3.2. Оценка значимости коэффициентов модели 157
4.4. Проверка адекватности модели 158
4.5. Извлечение моделей из экспериментальных данных 159
4.6. Выводы 161
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ 162
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 164
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛА В ПАКЕТЕ MATLAB 178
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И СИГНАЛОВ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ 182
ПРИЛОЖЕНИЕ В. СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ 191
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ФРАГМЕНТ БАЗЫ ДАННЫХ МОДЕЛЕЙ ПР 194
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. ФРАГМЕНТ ЗАПРОСА К БАЗЕ ДАННЫХ МОДЕЛЕЙ ПР 201

Перечень используемых сокращений

АЕ – acoustic emission (акустическая эмиссия)

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика

ВАЭ – виброакустическая эмиссия

ИНС – искусственные нейронные сети

КИД – контакт «инструмент-деталь»

НС – нейронная сеть

ПР – процесс резания

ПСД – плата сбора данных

РИ – режущий инструмент

СПМ – спектральная плотность мощности

ТЭДС – термоЭДС

ФЧХ – фазочастотная характеристика

ЦОС – цифровая обработка сигнала

ЭП КИД – электропроводимость контакта «инструмент-деталь»

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности и эффективности процесса механообработки является невозможным без информации о текущем состоянии режущего инструмента и, прежде всего, количественной оценки интенсивности изнашивания режущего инструмента. Недоступность зоны резания для прямого наблюдения вынуждает строить модели и судить о контактных процессах по косвенным параметрам.

Трудами таких отечественных и зарубежных ученых как, Б. М. Бржовский, В. Л. Заковоротный, В. Ц. Зориктуев, В. И. Подураев, А. А. Барзов, О. В. Кретинин, Ю. Г. Кабалдин, Т. Н. Лоладзе, А. Д. Макаров, Е. М. Трент и др., разработаны методы контроля состояния режущего инструмента на основе сигналов акустической эмиссии, вибрации, компонентов сил резания, электрических параметров и др. Несмотря на значительные успехи в области мониторинга работоспособности инструмента, проблема повышения точности, быстродействия, надежности, простоты технической реализации и инвариантности к условиям механической обработки остается. Одним из наиболее перспективных направлений при создании адаптивных методов мониторинга состояния инструмента в изменяющихся условиях механической обработки является синтез различных косвенных методов контроля.

Следующим шагом в развитии систем оперативной диагностики состояния РИ является прогноз, точность и достоверность которого основывается на точности выбранного метода мониторинга. До настоящего времени не существует промышленных систем прогнозирования размерного износа инструмента труднообрабатываемых материалов. Поведение объекта диагностики зависит от большого числа неодинаковых по значимости факторов, поэтому полученные модели хорошо работают только на той группе материалов и в тех условиях, в которых проводились исследования. При использовании иных групп материалов приходится полностью повторять эксперимент, что является совершенно

неприемлемым для широкого практического использования в конкретных задачах диагностики, прогнозирования и принятия решений.

Используя последние достижения в развитии методов мониторинга, средств измерения и повышение быстродействия вычислительных средств, в работе предложен принципиально новый подход к прогнозу параметров процесса резания, основанный на принципе самоорганизации моделей. Согласно этому принципу, для оперативных измерений осуществляется целенаправленный перебор многих моделей-претендентов различной сложности по ряду критериев, в результате которого находится модель оптимальной структуры в виде одного уравнения или системы уравнений, которые используются при построении прогнозов, с учетом коррекции по экспериментальным данным. Привлекаемый аппарат нелинейной динамики позволяет произвести синтез и выборку наиболее адекватных моделей, оценить горизонт прогноза, точность оценок и пополнить банк моделей в процессе работы.

Актуальность работы

Одна из главных причин снижения точности обработки на металлорежущих станках – изменение размеров режущего инструмента вследствие его износа. Актуальность задачи повышается при обработке труднообрабатываемых материалов, которые широко используются в авиационной промышленности, поскольку для этих материалов трудоемкость обработки заготовки соизмерима с ресурсом инструмента. Остановка процесса по причине износа инструмента часто означает брак дорогостоящей детали. Контроль состояния и замена инструмента в реальных производственных условиях осуществляется на основе расчетной стойкости [45, 80]. Но в зависимости от качества инструмента вариационная стойкость инструмента в одной партии колеблется от 15 до 35% [24, 69, 71], если время работы инструмента определяется наихудшим образцом в партии, то наиболее стойкие образцы при фиксированной наработке используют свой ресурс лишь на 65%. Измерение износа РИ возможно после каждого цикла обработки [45,

48], но в этом случае нет возможности идентифицировать критические состояния инструмента, такие как: поломка, скол, выкрашивание, а также осуществлять долгосрочные прогнозы.

Без информации об интенсивности изнашивания инструмента невозможна оптимизация процессов резания.

Несмотря на продолжительные исследования, проводимые в указанном направлении во многих научных и производственных коллективах страны и за рубежом, указанная проблема создания оперативной системы диагностики удовлетворительной точности, простоты и надежности остается нерешенной.

Развитие средств диагностики позволит:

- повысить точность формообразования и размерную точность за счет коррекции траектории инструмента, с учетом текущего значения износа;

- вести оптимальное управление по критерию износа инструмента.

Предлагаемое исследование посвящено актуальным вопросам повышения достоверности и быстродействия системы мониторинга состояния режущего инструмента, а также разработке методики прогнозирования параметров, характеризующих состояния режущего инструмента.

Цель работы и задачи исследований

Целью работы является совершенствование методов мониторинга износа режущего инструмента и прогноза диагностических параметров процесса резания. Для достижения указанной цели поставлены следующие основные задачи:

1. Усовершенствовать методику идентификации износа РИ по сигналу виброакустической эмиссии (ВАЭ).

2. Разработать методику самонастройки диагностических моделей износа РИ по электрическим параметрам контакта «инструмент-деталь», по экспери-ментальным данным, полученным в процессе функционирования системы.

3. Разработать алгоритм прогноза износа РИ использующий априорные и эмпирические данные и учитывающий нелинейность функции износа от времени.

4. Разработать базу данных и базу знаний диагностических параметров процесса резания. Произвести ее наполнение априорными данными.

5. Разработать информационно-измерительную систему для сбора, анализа и хранения диагностических параметров процесса резания.

На защиту выносятся

1. Методика оценки износа режущего инструмента на основе анализа энергии волновых коэффициентов сигнала виброакустической эмиссии.

2. Методика коррекции модели износа РИ по электропроводимости контакта «инструмент-деталь» на основе параметров вейвлет-образа сигнала виброакустической эмиссии.

3. Алгоритм прогнозирования износа и диагностических параметров процесса резания.

4. База данных и база знаний диагностических параметров процесса резания.

5. Функциональная схема системы оперативной диагностики состояния режущего инструмента по косвенным параметрам процесса резания.

Научная новизна

В диссертации получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Установлена функциональная зависимость энергии детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения сигнала виброакустической эмиссии от износа режущего инструмента и ее нечувствительность к изменению режимов механической обработки.

2. Предложен способ самонастройки функциональной зависимости относительной электропроводимости от износа режущего инструмента, заключающийся в идентификации момента наступления катастрофического износа РИ по энергетическому спектру детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования сигнала ВАЭ и линейной интерполяции функции $h_3(t)$ в зоне нормального износа.

3. Разработан алгоритм «предикатор-корректор» для прогноза износа РИ в реальном масштабе времени, который заключается в коррекции оценки базовой модели по результатам текущих измерений путем добавления аддитивной составляющей, полученной на основе экстраполяции функции невязки.

4. Разработаны база данных и база знаний диагностических моделей процесса резания. Особенность БД состоит в векторно-матричном представлении входных аргументов.

5. Предложена функциональная схема системы оперативной диагностики состояния режущего инструмента по косвенным параметрам процесса резания, отличающаяся наличием подсистем прогноза, самоорганизации моделей диагностики и идентификации критических состояний РИ.

Практическая значимость работы:

1. Разработан программный комплекс, основанный на методах и алгоритмах обработки сигнала и теории вейвлет-преобразований, позволяющий внедрить в производство предложенные методы мониторинга и прогноза износа РИ.

2. Повышена точность и достоверность оценки износа режущего инструмента путем синтеза методов контроля по электрическим и виброакустическим сигналам, что повышает эффективность и надежность всего мехатронного модуля.

3. Оценка оставшегося ресурса конкретного РИ в реальном времени, позволяет практически реализовать оптимальное и ситуационное управления процессом механообработки.

Методика проведения исследований

Проектирование и апробация системы диагностики является комплексной задачей, требующей применения методов системного анализа, в соответствии с которым был разработан план выполнения исследований (рисунок 1).

При исследовании объекта диагностики использованы методы системного анализа, теории резания, теории автоматического управления, идентификации и планирования эксперимента, математической статистики. Проектирование системы

диагностики осуществлялось на основе методов теории надежности, электротехники, метрологии. Анализ экспериментальных данных осуществлялся методами, описанными выше, а также с применением теории цифровой обработки сигналов, теории оптимизации, вариационного вычисления, теории информации, теории нейронных сетей. Для решения задач прогноза использованы методы нелинейной динамики.

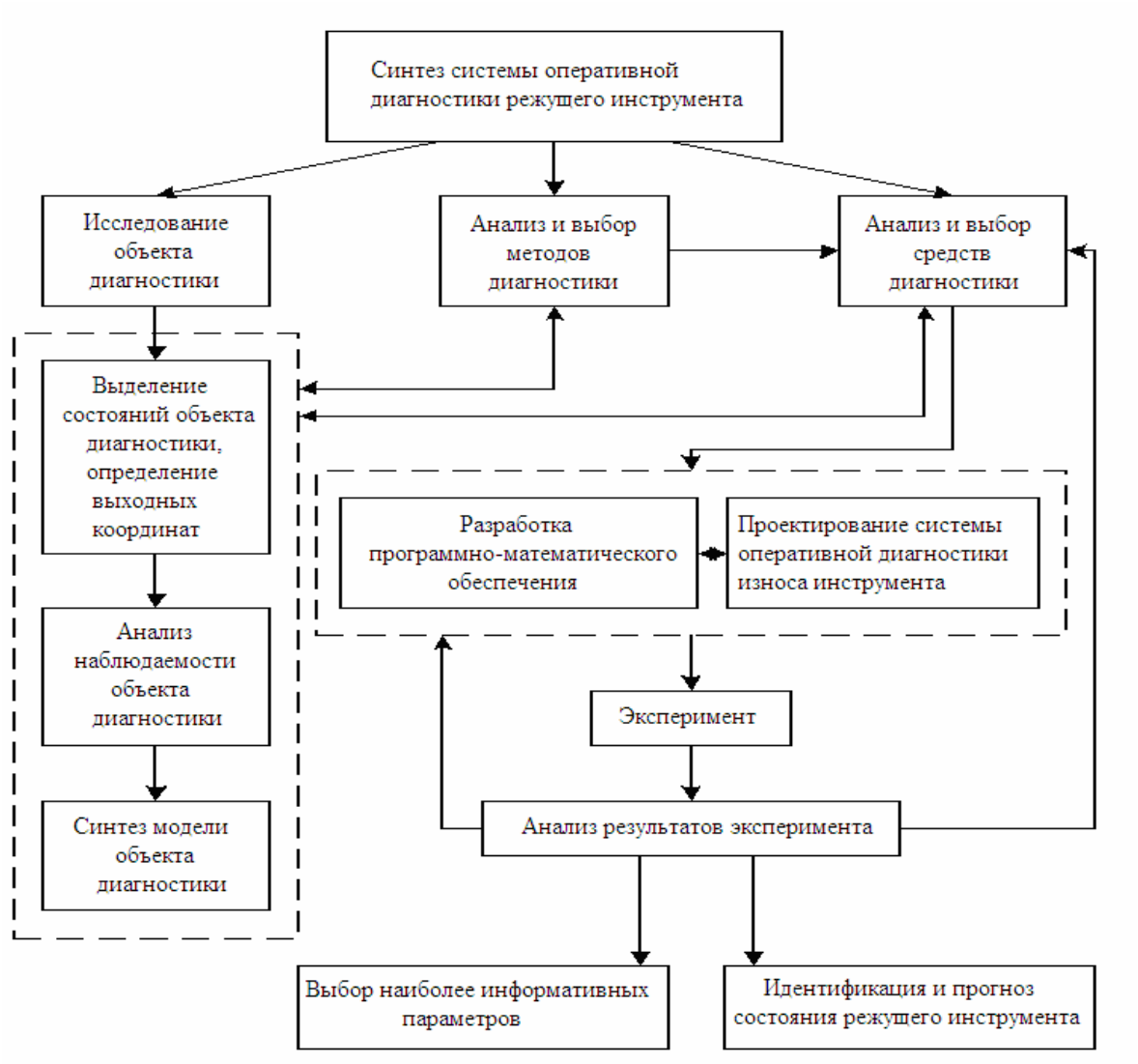


Рисунок 1.Структура выполнения работ по разработке системы оперативной диагностики режущего инструмента

Апробация работы и публикации

Работа проводилась в рамках проекта РФФИ №06–08–00198 «Теоретические основы проектирования интеллектуальных систем управления мехатронными металлорежущими станками» и научно–исследовательских работ на кафедре «Автоматизированные технологические системы» по созданию интеллектуальных мехатронных станочных систем.

Основные положения работы были представлены в трудах международных научно-технических конференций ВОАС'2000; ВОАС'2002 г. Санкт-Петербург; в сборнике научных трудов (с международным участием) Московского государственного университета приборостроения и информатики, а также научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Уфимского государственного авиационного технического университета, 2002 – 2006г., в том числе в сборнике научных трудов УГАТУ. Опубликованы в 8 работах, в том числе в 2 статьях, из них: 1 – в издании, входящем в список ВАК («Вестник УГАТУ», 2006г.), 1 – в научно-технических изданиях: "Инструмент и технологии", 2004 №9–10; 6 – в материалах и трудах конференций.

Внедрение результатов работы

Метод диагностики состояния режущего инструмента по виброакустическим параметрам принят к внедрению в ОАО «Салаватнефтемаш», г. Салават.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ДИАГНОСТИКИ

1.1. Проблема и методы разработки систем мониторинга состояния РИ

Интерес к вопросу мониторинга состояния инструмента за рубежом намного выше, чем в России. Наиболее полные литературные обзоры достижений последних лет Германии, Америки, Франции и ряда других зарубежных государств в области мониторинга состояния инструмента (рисунок 1.1.), можно найти в [145, 154].

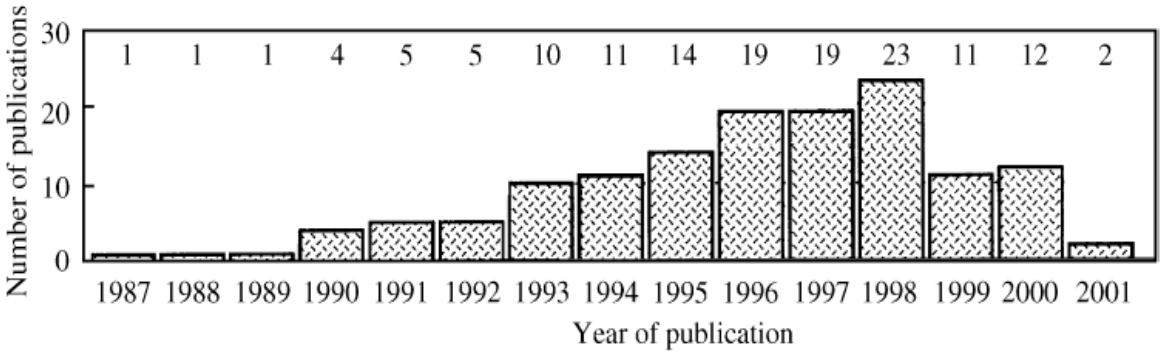


Рисунок 1.1. Исследование [143] опубликованных работ на тему мониторинга состояния инструмента

Полная автоматизация процессов механообработки сдерживается отсутствием промышленных датчиков износа и поломки инструмента [122]. Исследования в области диагностики состояния инструмента, проведенные учеными Аргентины [152], показали, что 20% времени внепланового простоя оборудования вызваны поломкой инструмента. Аналогичные результаты дают исследования, проведенные в нашей стране [45].

Методы

Большинство систем мониторинга состояния инструмента, освещенные в публикациях, построены по следующему принципу [143]: измеряются несколько параметров процесса резания, имеющих корреляционную связь с износом инструмента (такие как компоненты силы резания, вибрация, сигналы акустической

эмиссии, мощности привода главного движения), фильтруются, усиливаются, извлекаются полезные характеристики сигналов (амплитуда, спектр, статистические оценки, коэффициенты вейвлетов) и подаются на вход нейронной сети, которые отличаются структурой и алгоритмами обучения/адаптации.

Сигналы измеряются в реальном масштабе времени, на них оказывают влияния множество факторов – условия обработки, геометрия инструмента, свойства материала инструмента и заготовки. Очень часто для извлечения характерных образов сигналов используют нейронную сеть, нечеткую систему или комбинацию систем для построения нелинейной зависимости между характеристиками образов, извлеченных из сигнала, и состоянием инструмента.

Оценка результативности

Вывод об успешности данных работ можно сделать на основе комментариев самих разработчиков таких систем [143].

Leem и Dornfeld [131] (1996): «Несмотря на многие уникальные характеристики приложения нейронных сетей, физическая реализация системы мониторинга состояния инструмента на нейронных сетях пока не встречалась в промышленности. Между исследовательским энтузиазмом к нейросетевым подходам и надежной адаптивной системой мониторинга лежит целая пропасть, которая обусловлена простым принятием существующей методологии нейронных сетей, без альтернатив и критического рассмотрения проблемы».

A. Ghasempoor, T. N. Moore and J. Jeswiet [122] (1998): “Надежных он-лайн систем измерения износа пока не существует и исследования в этой области продолжаются».

R. G. Silva, K. J. Baker, S. J. Wilcox and R. L. Reuben [153] (2000): «Процесс резания металла – сложное явление, которое изучается многие годы, но цель создания индустриальных систем мониторинга пока не достигнута».

Проблемы

Почему же процесс мониторинга состояния РИ является настолько сложной задачей? Ответ на данный вопрос предлагается Silva et al. [152]. ”Во-первых, многие

процессы обработки нелинейные и нестационарные, что создает сложность построения моделей, во вторых – сигналы, полученные с датчиков, зависят от целого ряда многих факторов, таких как изменение условий резания, …" W. Maydl [136]: «Сигналы с датчиков искажаются по многим причинам: поломки и разрушения режущей кромки, вибрации (в том числе, самопроизвольные вибрации), различия в геометрии инструмента или свойств обрабатываемого материала, нелинейности датчиков, шумы дискретизации, взаимное влияние каналов друг на друга и т.д.». Pittner et al. [140] отмечает, что «… временной ряд, полученный с датчиков, зашумлен вследствие того, что материалы инструмента и заготовки неоднородны и на сигналы, поступающие от датчиков, влияют термотоки».

1.2.Современное состояние методов мониторинга в зарубежной литературе

Обзор наиболее интересных предлагаемых в публикациях схем мониторинга состояния инструмента рационально произвести по типу измеряемого сигнала. Согласно исследованиям [150], имеются следующие статистические данные по использованию методов (Рисунок 1.2).

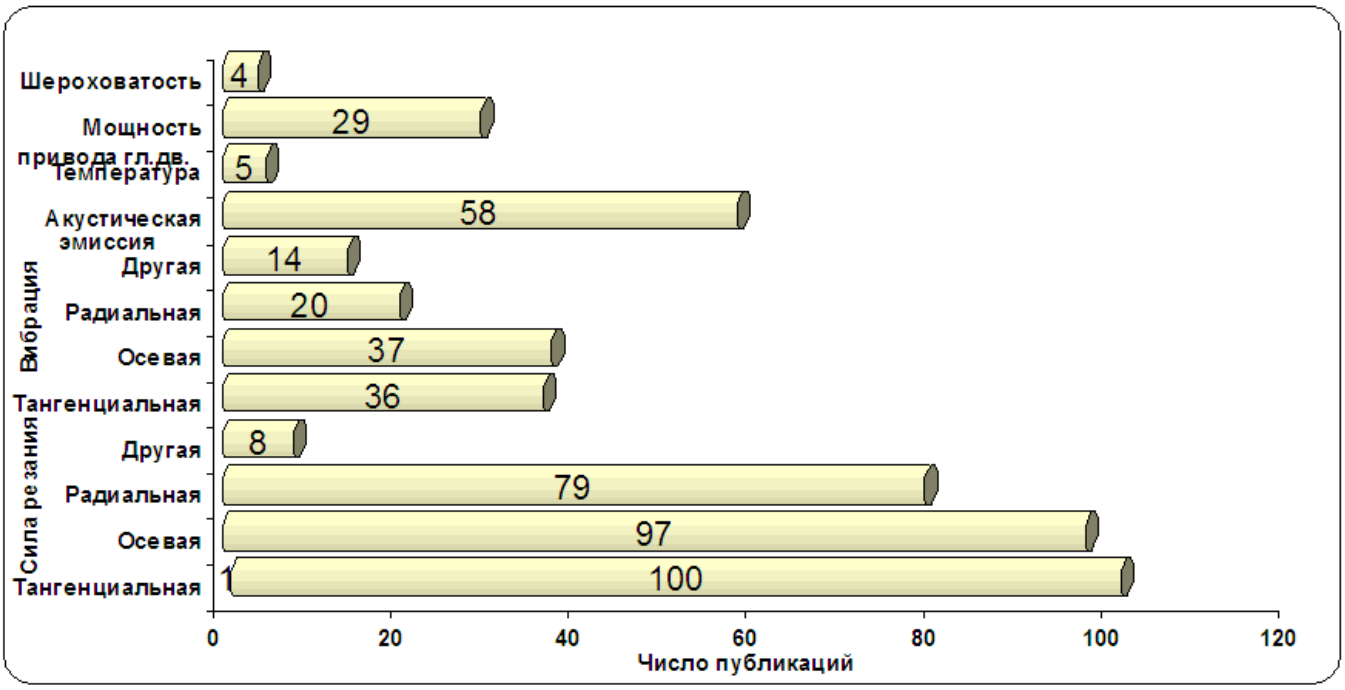


Рисунок 1.2. Типы измеряемых параметров (сигналов) процесса резания

Измерение силы резания и крутящего момента

На силы, развиваемые при обработке, влияет геометрия инструмента [154]. По мере того как инструмент изнашивается – геометрия изменяется, тем самым изменяет силы резания. Ранние опыты [123, 133] обнаружили, что продольная и радиальная составляющие силы более чувствительны к износу инструмента, чем сила резания. Радиальная компонента силы, как было замечено, будет более чувствительна к износу вершины, а радиальная и продольная компоненты силы находятся под влиянием износа задней поверхности [139, 158]. Отношение сил также может быть использовано для предсказания износа инструмента, так как они представляют определенную модель износа инструмента [114].

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 [129]. В данной работе проводится полнофакторный эксперимент с целью получения зависимостей между компонентами силы резания, крутящего момента и режимами обработки (скорость резания, глубина, подача). Строится модель, которую в совокупности со стойкостной зависимостью планируется применять для оценки текущего состояния инструмента. Авторы данного метода не отвечают на вопросы учета в моделях изменений в свойствах материала инструмента и заготовки из различных партий, нестационарности режимов обработки и влияние внешней среды. Условия механической обработки жестко детерминированы, а номенклатура материалов ограничена экспериментальным набором данных, что является неприемлемым для мелко и среднесерийного производства.

В работе китайских исследователей H. Shao, H. L. Wang, X. M. Zhao [155] также построена модель зависимости мощности резания от режимов обработки, параметров инструмента и заготовки. В процессе работы производится сравнение измеренного сигнала от датчика мощности привода главного движения с оценкой по модели. При превышении порогового уровня рассчитанного значения силы, система выдает сигнал в систему управления на смену инструмента. Недостатки такой системы достаточно очевидны – при различной номенклатуре используемых

материалов и инструментов время подготовки значительно увеличивается из-за необходимости настройки системы, кроме того, отсутствует возможность адаптации системы к неизбежному дрейфу параметров станочного комплекса (связанные с температурными деформациями, неоднородности структуры свойств материалов инструмента и заготовки и т.д.). Быстродействие такой системы не высоко, поскольку измерительная цепь пространственно удалена от зоны резания.

Измерение сигналов акустической эмиссии

В процессе резания заготовка подвергается значительным пластическим деформациям, которые связаны с генерированием волн акустической эмиссии (АЕ). Интенсивности износа инструмента проявляются в зоне резания изменением в сигнале АЕ. В соответствии со своим высокочастотным образом (1 кГц до 1 МГц, разнесены в зависимости от резонанса станка), акустическая эмиссия более чувствительна к износу инструмента, чем сила резания [115].

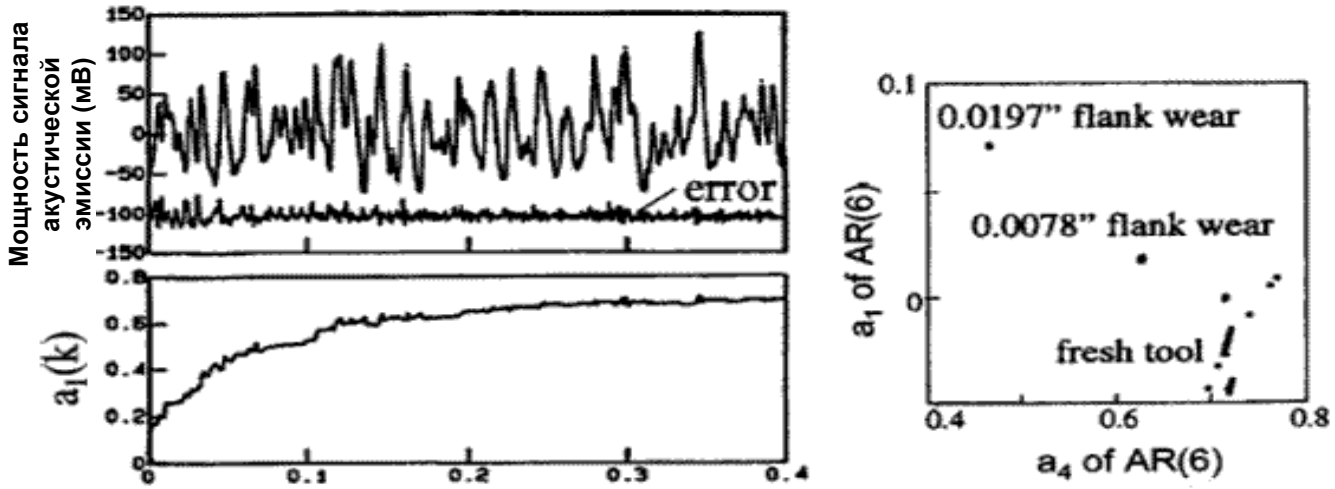


Рисунок 1.3. Использование коэффициентов регрессионного ряда 6-го порядка для мониторинга износа инструмента: сигнал акустической эмиссии, коэффициент и его ошибка моделирования. Расположение компактных классов износа инструмента в ортогональном пространстве коэффициентов регрессионного ряда [130]

Тесная корреляция сигналов AE RMS (мощности сигналов акустической эмиссии) с износом инструмента была показана Moriwaki и Tobito [137], где статистический образ, подобный средней дисперсии и коэффициентам среднеквадратичного отклонения, связаны с износом инструмента. Дисперсия была основным чувствительным параметром, показывающим возрастание амплитуды в результате износа инструмента.

Другие параметры акустической эмиссии, такие как время нарастания, частота и темп тактов, а также коэффициенты рядов Фурье [132], как показано на рисунке 1.3, также имеют корреляцию с износом инструмента, но их чувствительность зависит от расположения датчика, жесткости, материалов и режимов процесса резания, что чрезвычайно усложняет проблему применения данной технологии в производстве.

Измеренные сигналы вибрации и акустической эмиссии имеют высокий уровень помех, связанных с производственной средой. Основной информативной характеристикой таких сигналов является дисперсия, которая имеет наибольшую чувствительность к износу при заданных характеристиках инструмента и минимальную чувствительность к шумам. Исследованиям сигналов акустической эмиссии при резании посвящены работы Richard Y. Chiou a, Steven Y. Liang b [146].

Измерение вибрации

Litao Wang [134] предлагает идентифицировать состояние по измерению сигналов вибрации. Датчик при этом размещается на державке инструмента в направлении подачи.

Сигнал усиливается, отфильтровывается низкочастотная составляющая (частота среза фильтра 6кГц), и оцифровывается с частотой 100кГц, используя 12-битный АЦП. Используя дискретные вэйвлет-преобразования [29, 105, 118, 119, 116] из исходного сигнала для острого и изношенного инструмента, получают вейвлет-коэффициенты различных порядков.

На основе анализа распределения энергии сигнала по порядку вейвлет-разложения, используя дискретные скрытые Марковские модели [124, 135], создают

матрицу распознавания, содержащую по 5 образов для каждого распознаваемого класса. Успешность сделанного вывода о принадлежности текущего состояния 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 о объемах проведенных испытаний. В качестве достоинств данного подхода можно отметить простоту алгоритмов мониторинга, универсальность методов для любого типа обрабатываемого материала практически на любом оборудовании. В качестве недостатка данного метода можно отметить отсутствие количественной оценки износа. (В качестве критерия износа принят максимальный износ 0,6 мм; средний износ режущей кромки 0,3 мм, в соответствии с рекомендациями ISO 3685 для карбидных инструментов).

C. Scheffer and P. S. Heyns [149] на основе сигнала вибрации и применения нейронной сети на основе самоорганизующейся карты Коухена получили 100% достоверность результататы классификации размерного износа алмазного инструмента при обработке алюминиевого сплава.

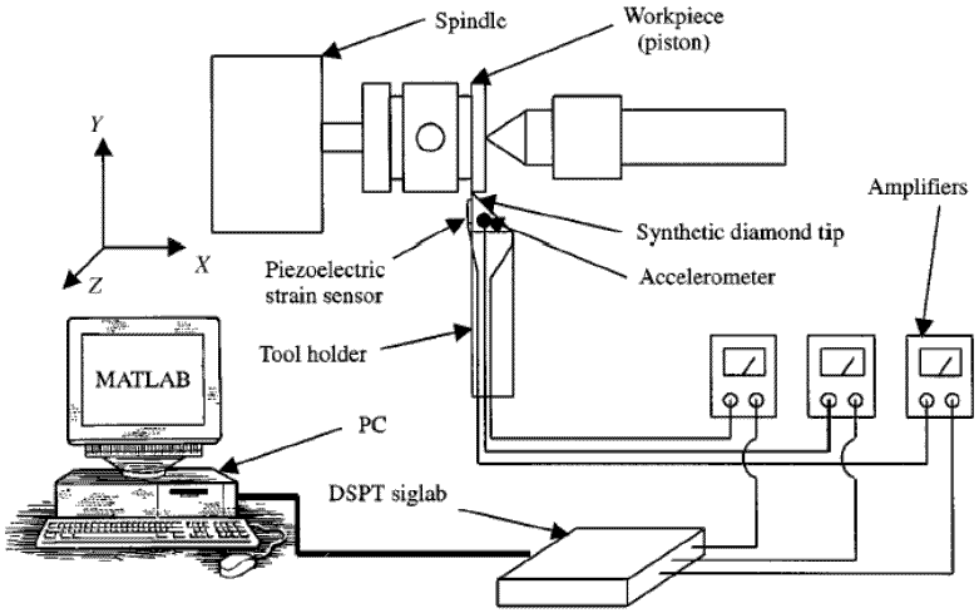


Рисунок 1.4. Схема экспериментальной установки

Сигнал снимался в течение 10 сек с частотой 25,6кГц. После чего извлекались следующие параметры (таблица 1.1).

Таблица 1.1. Параметры, подаваемые на вход нейронной сети

средняя составляющая сигнала	$\bar{x} = \frac{\int_0^T x(t)\,\mathrm{d}t}{T}.$	средний квадрат	$X_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^T x(t)^2\,\mathrm{d}t}{T}}$
крест-фактор	$CF = \frac{X_{\max}}{X_{rms}}.$	среднее квадратичное отклонение	$\sigma^2 = \frac{1}{T}\int_0^T [x(t) - \bar{x}]^2\,\mathrm{d}t$
третий статистический момент (ассиметрия)	$S = \frac{1}{\sigma^3 T}\int_0^T x^3\,\mathrm{d}t.$	четвертый статистический момент	$K = \frac{1}{\sigma^4 T}\int_0^T x^4\,\mathrm{d}t.$
первые 2 коэффициента (a_1,a_2) от авторегрессионной модели и (b_1,b_2) со скользящим средним (ARMA)		$x(n) = -\sum_{k=1}^{p} a_k(x(n-k)) + \sum_{k=1}^{q} b_k(u(n-k))$	
значение энергии частотного спектра на частоте от 100Гц до 1кГц и на частоте 5кГц:		$\psi_{xb}^2 = \int_{fl}^{fh} S_x(f)\,\mathrm{d}f$	
3-й вейвлет-образ выбранный экспериментально			
оценку по ранее полученной модели [141] и коэффициент корелляции между оценкой и фактическим значением (выраженный в процентах)		$\rho = \left\lvert \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2} \right\rvert \times 100$	
идеальный тренд линии износа (имеет 40° наклона)			

К достоинствам данной системы можно отнести минимальное количество первичных преобразователей (не требует измерения режимов обработки – скорости, подачи, глубины), всю необходимую информацию извлекая из текущих измерений вибрации. К недостаткам – низкое быстродействие. Работа имеет узко-направленную специализацию на обработке алюминиевых сплавов алмазным

инструментом. Таким образом, система работает на линейном участке износа инструмента. Исследование качества системы при обработке других, более твердых материалов, авторы не приводят.

Комплексное измерение параметров резания

При создании адаптивных методов мониторинга состояния инструмента в изменяющихся условиях механической обработки приходят к выводу, что отдельные косвенные параметры (сила резания, вибрация, волны акустики) не могут дать полную информацию о состоянии режущего клина инструмента. Silva R. G., Baker K. J., Wilcox S. J. and Reuben R. L. [151] предлагают систему, объединяющую различные косвенные методы контроля. Схема установки представлена на рисунке 1.5.

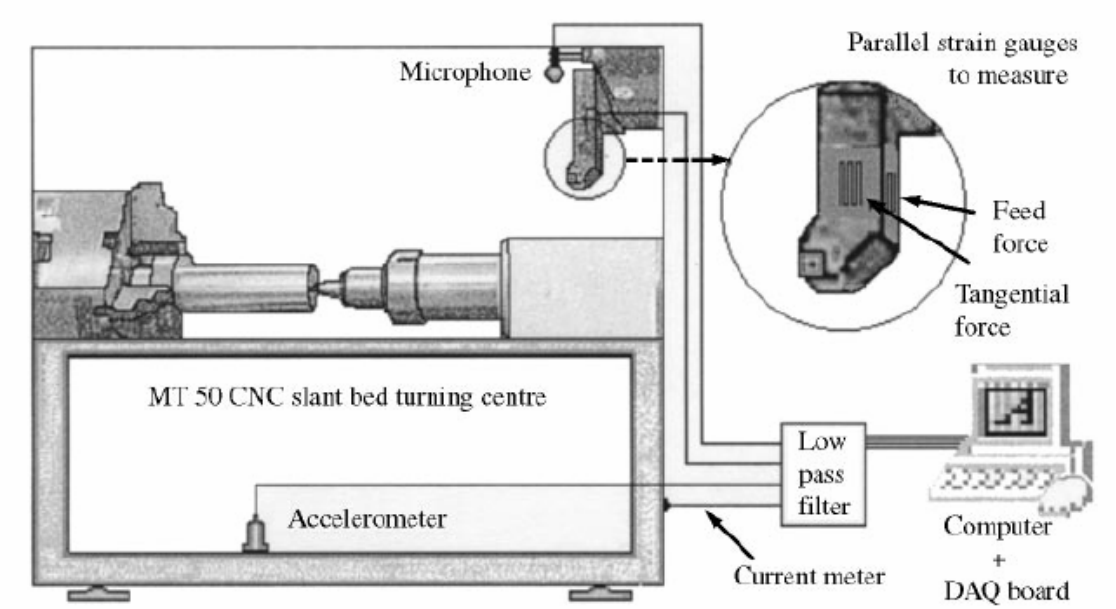


Рисунок 1.5. Схема токарного автомата и системы размещения датчиков

Извлекая из измеренных сигналов среднее значение, среднее отклонение, 3-й и 4-й статистический моменты, а также Фурье-образы сигналов и анализируя их с помощью нейронной сети, построенной на основе самоорганизующейся карты Коухена, производят оценку износа инструмента при различных условиях обработки.

Экспериментальная проверка проводилась на партии резцов из одного материала при обработке одной заготовки. Результат достоверности прогноза представлен на рисунке 1.6.

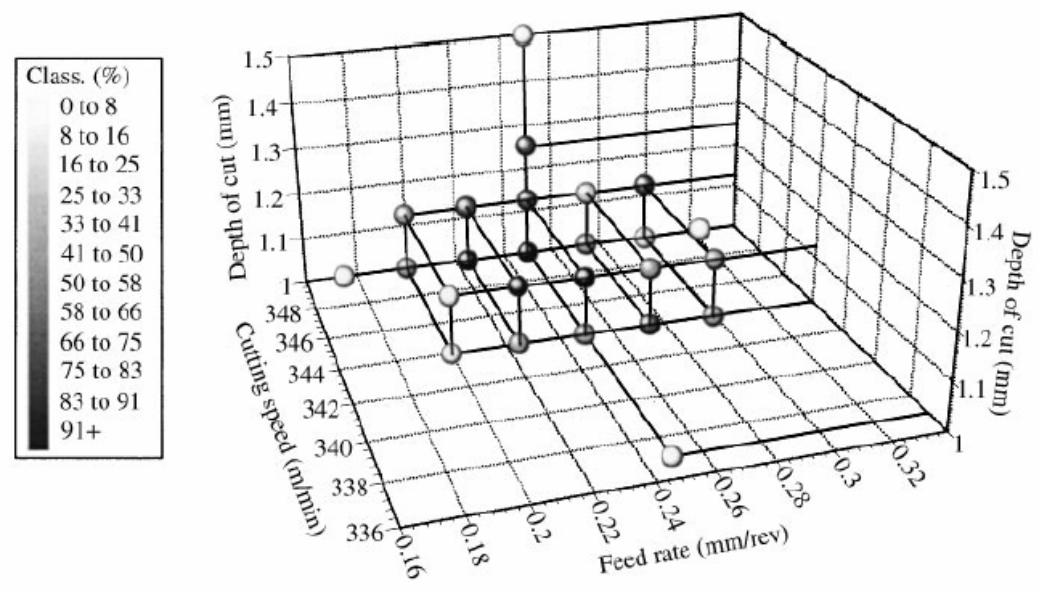
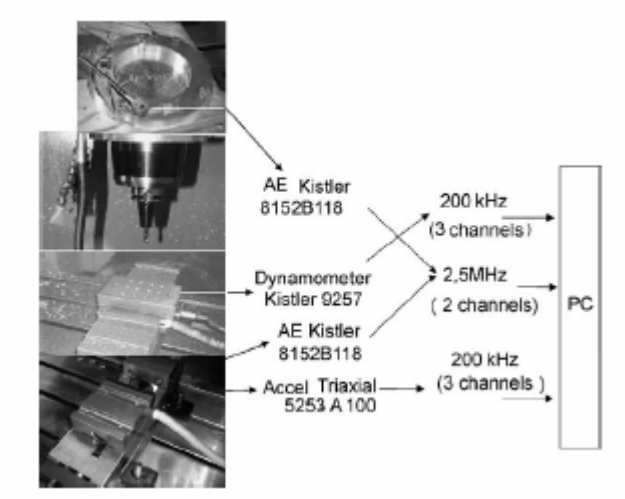


Рисунок 1.6. Карта достоверности оценки износа для различных условий обработки

Как видно из этой карты, достоверность прогноза даже в области рабочих режимов достаточно низкая. Недостаток использования такой системы также очевиден – требуется проведение трудоемкой процедуры обучения сети при каждом изменении номенклатуры инструмента и/или заготовки. Множество датчиков усложняют конструктивное исполнение станочного модуля и снижают его надежность. Экспериментальные данные по измерению сил резания и вибрации приведены D.E. Dimla Sr. a, P.M. Lister b. в[120].

Исследование с использование динамометра, акселерометра и двух датчиков по акустическим колебаниям заготовки и шпинделя проведены в работе [147]. При высокоскоростном точении стали (60 HRc), концевой фрезой Karnasch 30.6472 carbide end mill (12% Co micro-grained cemented carbide with a single layer of TiAlN-Al, 3 m film thickness) 12mm в диаметре.

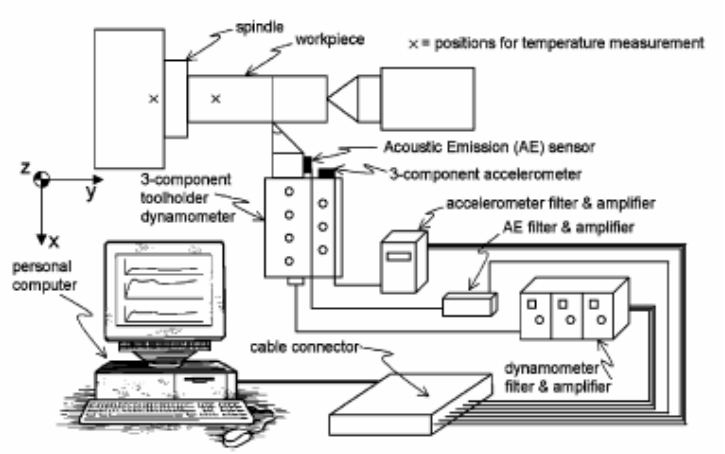


Comparison of sensorial signatures for different tool conditions at 546 m/min.

	F (N)	A_c (m/s^2)	AE piece (V)	AE spindle (V)
New tool				
Mean value	55.80	0.0540	0.0153	0.0485
Peak	82.32	0.1023	0.1239	0.2411
Worn tool				
Mean value	90.04	0.1964	0.0141	0.0467
Peak	158.43	0.3679	0.1147	0.3218

Рисунок 1.7. Упрощенная схема системы мониторинга при высокоскоростной обработке и результаты измерения

Строят систему на основе анализа Фурье-образа сигнала и определения двух состояний «нормальный» и «изношенный». C. Scheffer a, H. Kratz b, P.S. Heyns a, F. Klocke b. [148] предлагают систему мониторинга для труднообрабатываемых материалов (Рисунок 1.8).



Channel setup

Channel	Sensor	Calibration	Gain	Sampling rate (kHz)	Filter bandpass
1	AE_{real}	57 dB_{ref} $^{1V/(m/s)}$	10	400	50–100 kHz
2	AE_{rms}	57 dB_{ref} $^{1V/(m/s)}$	1	20	50–100 kHz
3	*Fx*	50 N/V	1	20	DC–3 kHz
4	*Fy*	50 N/V	1	20	DC–3 kHz
5	*Fz*	50 N/V	1	20	DC–3 kHz
6	*Ax*	10 mV/g	100	20	10 Hz–6 kHz
7	*Ay*	10 mV/g	100	20	10 Hz–6 kHz
8	*Az*	10 mV/g	100	20	10 Hz–6 kHz

Рисунок 1.8. Схема экспериментальной установки и измерительные каналы

Измеряя компоненты вибрации и силы резания по трем осям, а также сигналы акустической эмиссии, проведены эксперименты с использованием двух комбинаций материалов инструмента и заготовки на различных режимах обработки и различном оборудовании. В результате корреляционного анализа, проведенного с помощью нейронной сети (самоорганизующаяся карта), строят прогноз состояния инструмента. Результаты приведены на рисунке 1.9.

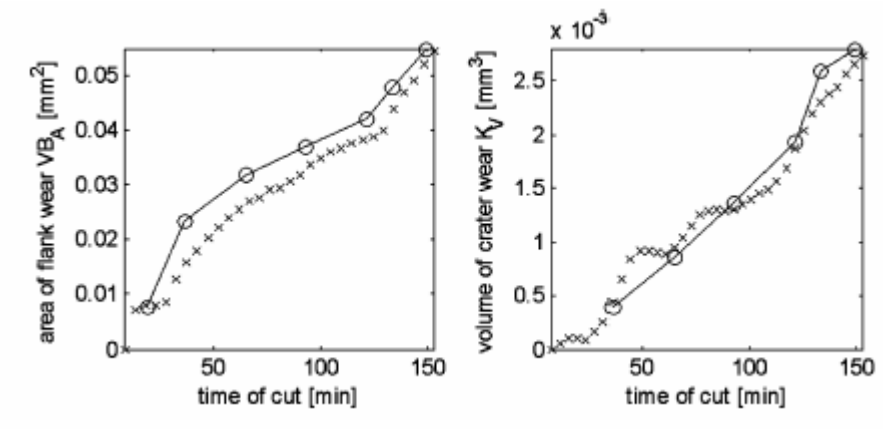


Рисунок 1.9. Результаты прогноза: o – измеренные значения; *x* – значения износа, оцененные по модели

Приведенные выше научные изыскания реализованы в продукции мировых лидеров датчиков и комплексных систем мониторинга и диагностики состояния различных механических систем. Это ведущие производители Европы "Bruel & Kjaer" (сейчас эта фирма объединилась с фирмой "Schenk") (Дания – Германия), "Diagnostic Instruments" (Великобритания), а также крупные производители США и Канады – DPL-Group (Канада), VibroTek, Inc. (прежнее название - Inteltech Enterprises, Inc.), (США).

1.3.Современное состояние методов мониторинга в России

Экономический кризис в России, поразивший отрасль машиностроения в целом, оказал негативное влияние на разработку систем управления процессом резания с использованием подсистем оперативного мониторинга и диагностики состояния РИ. Существует очень ограниченный ряд исследований, посвященных разработке полноценных автоматических систем оперативной диагностики, в большинстве литературных источников исследуется информативность определенного метода. Исходя из вышесказанного, целесообразно провести обзор на основе классификации методов контроля износа РИ (Таблица 1.2).

Таблица 1.2. Классификации методов контроля износа РИ

Прямые		
	Измерение геометрии резца	
	1	Радиоактивный метод [9, 76]
	2	Метод технического зрения [9, 26, 53, 76, 78, 79, 138, 156]
	3	Лазерное сканирование [26, 54, 144]
	4	Электромеханический метод
	5	Ультразвуковой метод [49]
	6	Пневматический [81]
Косвенные		
	Термоэлектрические измерения	
	7	Измерение термоЭДС [21, 38, 42, 58, 59, 60, 67, 84, 97, 100]
	8	Измерение электрической проводимости контакта "инструмент – обрабатываемый материал" [38, 39, 42, 45, 69, 71, 72]
	9	Измерение инфракрасного излучения стружки [99]
	Акустические, акустоэлектрические и виброакустические измерения	
	10	Измерение сигнала акустической эмиссии [11, 12, 21, 28, 82, 83, 143]
	11	Измерение вибрации [16, 109, 110, 113]
	Силовые измерения	
	12	Измерение составляющих сил резания [54, 55, 94]
	13	Измерение крутящего момента [39, 46]
	14	Измерение мощности приводных двигателей [56]

Прямые методы состоят в непосредственном измерении параметров инструмента. При этом контролируется износ (по лунке, образующейся на передней

поверхности), расстояние от режущей кромки до центра лунки, глубина лунки, ширина ленточки износа по задней поверхности, уменьшение объема или массы инструмента, размерный износ режущей кромки и др. [64]. Указанные параметры могут быть определены оптико-телевизионными, лазерными, электромеханическими, ультразвуковыми или пневматическими методами.

Недостатком прямых методов является то, что в условиях производства их можно применять только после прекращения процесса резания, поэтому не исключается появление брака изделий между контрольными операциями.

Косвенные методы контроля используются в процессе резания, который сопровождается рядом физических явлений. К основным из них принадлежат: изменение термоэлектрического состояния зоны контакта детали с инструментом; изменение величины составляющих силы резания; изменение характера акустических, акустоэлектрических и виброакустических сигналов, генерируемых инструментом по мере его износа.

В работе [99] описывается способ определения размера фаски износа по задней грани инструмента на основании измерения температуры в точке передней поверхности резца по инфракрасному излучению стружки. С температурой резания косвенно связана и оперативная оценка состояния режущего инструмента.

В работе [84] говорится, что "регистрация переменной составляющей термоЭДС может рассматриваться как метод получения информации о темпе износа инструмента (эта составляющая практически не зависит от подачи и глубины резания в случае черновой или получистовой обработки металлов). Амплитудно-частотный спектр колебаний разности потенциалов является функцией скорости резания и воспроизводит амплитудно-частотный спектр колебаний системы, генерирующей электрические заряды".

Работы [28, 58, 59, 60] показывают, что спектр переменной составляющей термоЭДС с темпом интенсивности износа имеет коэффициент взаимной корреляции выше 99%. Путем специального анализа частотного спектра устанавливается корреляционная связь изменений характера спектра с темпом износа [58, 60].

Работы [38, 67, 68] показывают, что регистрация сигналов среднего значения термоЭДС позволяет определять величину фаски износа по задней поверхности в области нормального изнашивания и имеет практически линейную зависимость. Методы активной диагностики, основанные на измерении акустоэлектрической эмиссии, базируются на теории термофлуктуационного разрушения. В работах [11, 12, 28, 58, 60, 83] 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.

Ультразвуковой метод позволяет одновременно получать информацию непосредственно из зоны резания о текущем значении диаметра формы поперечного сечения обрабатываемой детали, ее упругих перемещениях, качестве обрабатываемой поверхности, размерном износе инструмента по передней грани и управлять положением вершины резца. В процессе резания выходной сигнал с ультразвукового искателя, пропорциональный текущему диаметру обрабатываемой детали в плоскости, проходящей через вершину резца по нормали к обработанной поверхности детали, через блок управления поступает на вход дифференциального усилителя, где формируется сигнал управления.

В процессе резания ультразвуковой искатель подает сигналы с ультразвукового генератора импульсов на обрабатываемую деталь, а отраженные от детали сигналы проходят через ультразвуковой искатель и поступают на усилитель-приемник, выход которого включен на блок износа инструмента, который регистрирует размерный износ инструмента и выдает сигнал, пропорциональный величине размерного износа.

Исследования [63, 64] 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. На величину растягивающих напряжений в опасных точках наибольшее влияние оказывает силовая нагрузка. С износом при точении инструмента особенно сильно

изменяется радиальная составляющая силы резания. В работе [73] ширина фаски износа определяется по формуле, где значение силы резания определяется путем ее измерения, а данные о величине удельного нормального давления на задней поверхности и приведенная длина контакта вычисляются по формулам, рекомендованным в работах [36, 37, 92]. Составляющие силы резания измеряют при помощи динамометрических гаек и датчиков давления в гидростатических опорах, различных марок тензометрических датчиков, электромагнитные и магнитоэлектрические преобразователи, новые динамометрические устройства, встраиваемые в суппорт или резцедержатель, а также электрические датчики мощности, измерители тока в якорной цепи двигателей постоянного тока, измерители электрической проводимости [38, 55, 56].

Вместе с тем, анализ результатов исследований различных авторов по влиянию износа инструмента на силы резания, выполненный в работе [4], показывает, что в случае совместного износа по передней и по задней поверхностям, изменение силы резания не несет информации о величине износа.

Интересным является подход оценки текущего уровня изнашивания режущего инструмента путем идентификации параметров геометрической модели текстуры поверхности, основываясь преимущественно на профиле поверхности. Контролирующая система включает в себя: детектор профиля (лазерное сканирующее устройство), предназначенный для сканирования поверхности детали вскоре после того, как она выгружена со станка; анализатор сигнала, способный идентифицировать некоторые геометрические параметры инструмента путем распознавания следов оставленных инструментом на контролируемом профиле. Основываясь на этих оценках параметров, обеспечивается оценка текущего уровня износа режущего инструмента в виде значений геометрических параметров и производится описание будущей эволюции износа посредством динамической модели разрушения.

Для оценки критического износа инструмента пользуются замерами параметров механических колебаний системы СПИД, применяя датчики виброакустической эмиссии [65]. Выделяя из спектра колебаний ВЧ- и НЧ-

составляющие, по их отношению оценивается текущий износ [1]. Для повышения точности измерений контролируют либо амплитуду ускорения колебательной системы СПИД, либо формируют получаемый сигнал в прямоугольные импульсы постоянной амплитуды, длительность которых пропорциональна величине сигнала.

Практика научных исследований при изучении износа инструмента широко применяет оптические устройства, а также метод радиоактивных изотопов, суть которого заключается в следующем: на глубине соответствующей критическому износу производится имплантация радиоактивного элемента в режущую пластину. При протекании процесса механообработки измеряемое излучение от радиоактивного элемента меняет свою интенсивность пропорционально появлению фаски износа режущего инструмента.

Для оценки величины фаски износа по задней поверхности используется метод измерения электрической проводимости контакта "инструмент-деталь" [39, 42, 45, 46]. Из теории электрических аппаратов известно, что величина электрической проводимости пропорциональна площади контакта. При точении с изменением величины фаски износа происходит изменение площади контакта, что приводит к отклонению значения электрической проводимости. Таким образом, контролируя сигнал об электрической проводимости, судят о величине фаски износа инструмента по задней поверхности.

1.4.Обоснованный выбор метода мониторинга состояния РИ

Все перечисленные выше методы имеют ограниченную область применения и определяются характером протекающего процесса, контактируемой парой и применяемой системой управления. Большинство методов дорогостоящи, требуют сложных технических средств, применимы в основном в лабораторных условиях для получения новых зависимостей и труднопригодны к производственным условиям.

При выборе метода руководствуются следующими критериями:

- инвариантность измеряемого параметра к режимам и условиям обработки;
- быстродействие алгоритмов распознавания на основе данного метода;

- точность измерения;

- надежность и достоверность полученной оценки;

- простота технической реализации (стоимость системы мониторинга).

Наиболее приемлемыми к производственным условиям по представленным критериям являются методы контроля, основанные на регистрации виброакустической эмиссии, величины термоЭДС и электропроводимости контакта «инструмент-деталь».

Метод мониторинга, основанный на регистрации виброакустической эмиссии, является наименее чувствительным к изменениям режимных параметров и условий механической обработки. Однако быстродействие данного метода ограничено, поскольку оценка состояния РИ производится на основе анализа спектра цифрового ряда, а уменьшение пакета данных ведет к резкому снижению достоверности оценки. Существенным недостатком является низкая достоверность оценки износа при классическом анализе, основанном на сравнении соотношений коэффициентов Фурье для различных частот (частотных диапазонов).

Метод измерения, основанный на регистрации постоянной составляющей термоЭДС, является более точным, надежным и имеет более высокое быстродействие. Но его использование затруднено по причине сложности моделирования паразитных термоЭДС и «провалов» температуры, приводящих к тому, что функция средней температуры контакта от степени износа инструмента становится немонотонной. Температура контакта также существенно зависит от режимов обработки, геометрии инструмента и других условий обработки. Таким образом, область использования данного метода ограничена группой труднообрабатываемых токопроводящих материалов (где «провалы» температуры незначительны, а величина термоЭДС велика) в условиях стационарной обработки.

Электрическая проводимость контакта "инструмент-деталь" отражает температурно-силовые и контактные явления, сопровождающие процесс резания. Имеет высокое быстродействие и надежность, по сравнению с другими методами, поскольку место контакта само является источником информации (датчиком), а уровень снимаемого сигнала достаточно высок для того, чтобы выделить его из

всего многообразия помех и наводок, связанных как с самим процессом, так и вызванных работой машин, приводов и воздействием внешней технологической среды. ЭП КИД зависит от условий и режимов механической обработки, однако в отличие от термоЭДС, функция зависимости монотонна, а по большинству параметров практически линейна. По сравнению с методом, основанным на анализе сигнала виброакустической эмиссии, точность и достоверность оценки износа РИ намного выше.

Из проведенного анализа следует:

- в условиях нестационарности режимов резания, при обработке новых материалов, модели ПР для которых неизвестны, а требования к быстродействию системы не высокое (менее 1 Гц), наиболее предпочтительным является метод мониторинга, основанный на анализе сигнала виброакустической эмиссии.

Для промышленного применения требуется повысить достоверность оценки износа РИ путем совершенствования алгоритмов обработки временного ряда замены Фурье-преобразований на wavelet-преобразования.

- для групп труднообрабатываемых материалов, для которых имеется модель в БД, а также при обнаружении критических состояний инструмента, метод мониторинга, основанный на измерении электрических сигналов, более предпочтителен, поскольку имеет более высокое быстродействие, точность и достоверность.

Для применения в производстве требуется разработка системы, способной формировать модель ПР в оперативном режиме на основе экспериментальных данных. А также создания алгоритмов адаптации, хранящихся в БД моделей по оперативной информации от датчиков для мониторинга текущего состояния РИ.

1.5.Проблемы прогнозирования состояния РИ

Прогноз временных рядов осуществляется на основе двух принципиально различных подходов:

- итерационный (прямой) прогноз;

$$x_n = f(x_{n-1}, x_{n-2}, ..., x_{n-D}, c), \quad (1.1)$$

где x – наблюдаемый параметр.

- модельные отображения.

$$f(t, c) = c_1\phi_1(t) + ... + c_p\phi_p(t), \quad (1.2)$$

где ϕ_k – базисная функция.

Подходы могут быть применены как к временному ряду, так и к фазовому отображению прогнозируемого параметра.

Прямой прогноз

Линейные модели (1.1) авторегрессии [15] (скользящего среднего), локальные модели [127, 128], итерационный способ [14] уместно применять при прогнозе значений ЭП КИД и термоЭДС на линейном участке износа, при стационарных условиях обработки. Для прогноза сигналов виброакустической эмиссии в отличие от явной экстраполяции временной зависимости составляется динамическая модель [14], прогноз опирается на интерполяцию в фазовом пространстве. Значение вектора состояния, с которого нужно начинать прогноз, лежит обычно «между» многими векторами тренировочного ряда, которые используются для построения модели.

Для улучшения прогнозов с умеренным упреждением предложен комбинированный подход «предиктор-корректор» [14, 124], который состоит в следующем. Делают прогноз итерационным или прямым путем с помощью имеющейся модели, назовем ее «базовым предиктором». Затем «подправляют» предсказанные значения с помощью дополнительного модельного отображения – так называемого «корректора», которое строится по тренировочному ряду и связывает ошибки прогнозов базового предиктора для упреждения l с самими прогнозами. Для корректора используют значительно более простую структуру, чем для базового предиктора. Комбинация «предиктор-корректор» может дать существенно более точный прогноз по сравнению с «чистыми» прямым и итерационным способами.

Однако вследствие нелинейного характера износа РИ прямое использование вышеперечисленных методов для прогноза параметров процесса резания приводит к

высокой ошибке в области перехода из зоны приработки в зону нормального износа, и из зоны нормального износа в зону катастрофического износа, т.е. в наиболее актуальные моменты жизненного цикла.

Модельные отображения

Сопоставим прогностические возможности моделей (1.1) с различными видами функции f (1.2). Алгебраические многочлены умеренного порядка очень эффективны для аппроксимации функций одного переменного, причем плавно меняющихся – без скачков и изломов. Лучше них в этом случае только сплайны порядка 3 и выше [50, 89]. Чем больше необходимая размерность модели D и порядок многочлена K, тем меньше вероятность успеха. Дробно-рациональные функции эффективны в тех же случаях, но могут лучше описывать зависимости с областями быстрого изменения.

Тригонометрические многочлены и вейвлеты (1.2) тоже являются способами слабой аппроксимации и хороши для аппроксимации функций с определенными свойствами (п. 3.4).

Радиальные базисные функции [125] несравнимо эффективнее упомянутых подходов при большой размерности модели (ориентировочно, больше 3). Искусственные нейронные сети (ИНС) имеют примерно такие же свойства, а по некоторым указаниям [117, 157] ИНС аппроксимируют сложные зависимости даже лучше. Требования к объему данных и уровню шума для всех перечисленных моделей относительно не строгие, так как это глобальные модели.

Локально-линейные модели очень эффективны при умеренных размерностях вектора состояния (меньше некоторого небольшого числа, зависящего от длины тренировочного ряда), длинных рядах (чтобы найти значительное число близких соседей каждого вектора) и малом измерительном шуме. Требования к объему данных и уровню шума очень строгие. Локально-постоянные модели лучше, чем локально-линейные при большем шуме и более коротком ряде.

Все подходы страдают от уже упоминавшегося «проклятия размерности». Очень высокоразмерные системы (ориентировочно, размерности около 10 и выше) на

настоящем этапе не могут быть сколько-нибудь успешно описаны такими эмпирическими моделями.

Как известно [91], процесс износа не является линейным и зависит от большого числа параметров, поэтому применения стандартных методов прогноза временных рядов неэффективно. Требуется применение методов, использующих априорную информацию о модели процесса резания, т.е. необходимо математическое описание процесса резания.

1.6.Проблемы математического описания ПР

Математическое описание ПР связано с учетом большого количества параметров. Кроме изменения режимов процесса резания, неконтролируемого колебания припуска изменяются, например, жесткость оборудования (жесткость во время обработки может отличаться в 1,5 раза и более [5, 51]). Также по данным [51] в зависимости от технологии изготовления режущего инструмента период стойкости режущего инструмента из одного материала с одинаковой геометрией одной партии может отличаться в 3 – 5 раз. Геометрия режущего инструмента не имеет постоянных значений. Ее случайный характер обусловлен изменением положения плоскости резания, износом режущего инструмента, погрешностью установки инструмента или заготовки на станке, отклонением реальных значений углов режущей части при изготовлении или при переточке инструмента от значений, указанных в технической документации [51, 111]. Физические свойства материалов также изменяются в процессе резания под действием температурных и силовых (деформирующих) факторов. Например, по данным [33] при изменении температуры от 20 до 700°С в среднем для группы жаропрочных обрабатываемых материалов предел прочности при растяжении изменяется на 50%, предел текучести – на 45%, твердость – до 50%, модуль нормальной упругости – на 30%, относительное удлинение – на 10%, относительное сжатие – на 15%, температурный коэффициент линейного расширения – на 15%, коэффициент ударной вязкости – на 20%, коэффициент теплопроводности – на 40%, удельная теплоемкость – на 15%, коэффициент температуропроводности – на 35%, коэффициент упрочнения – на 30%.

Для некоторых материалов изменения свойств при обработке могут составлять до 70% и более. Кроме того, отмечается колебание свойств как в пределах одной заготовки, так и в пределах партии. Также свойства обрабатываемого материала в значительной мере определяются технологическими условиями на предыдущих операциях. В составе материалов приходится сталкиваться с колебаниями процентного содержания химических элементов, чего нельзя избежать при выплавке стали, кроме того, колебания химического состава связаны с перераспределением химических элементов в поверхностном слое материала во время обработки [20].

Поскольку изнашивание РИ представляет собой типично эволюционный процесс, величина износа зависит не столько от текущих значений фазовых координат, сколько от их изменения в течение всего времени контакта РИ с заготовкой. Иными словами, износ определяется всей траекторией движения динамической системы станка в пространстве состояния [34, 35].

1.7.Требования к методу прогноза состояния РИ

Таким образом, на основании выполненного анализа методов прогноза по экспериментальным данным и по модели процесса резания очевидна неэффективность каждого из метода в отдельности. В первом случае (1.1) процесс резания рассматривается как «черный ящик», и поэтому не учитывается характер износа инструмента. Во втором (1.2) методе, основанном на использовании ранее полученной модели, не учитывается переменность факторов внешней среды и переменность внутренних параметров системы.

Требуется разработка метода, рассматривающего ПР как «серый ящик», учитывающий «качественное» поведение процесса, основанное на анализе физических явлений происходящих в процессе резания металла. И частную реализацию процесса для конкретных технологических условий, восстанавливаемую по оперативной информации от датчиков информационно измерительной подсистемы мехатронного станочного модуля. По имеющейся модели требуется осуществить прогноз, а банк моделей в процессе работы должен пополняться новыми актуальными моделями.

1.8.Основные выводы, принятые положения и гипотезы

1 В результате выполненного литературно-патентного анализа зарубежных систем мониторинга выявлен существенный недостаток, сдерживающий широкое применение методов мониторинга РИ в производственных условиях, заключающийся в отсутствии алгоритмов адаптации моделей к изменяющимся условиям механической обработки и номенклатуре обрабатываемых материалов.

2 Для всех методов мониторинга, кроме метода, основанного на анализе сигнала виброакустической эмиссии, оценка работоспособности, основана на моделях. Используемые различными авторами модели не учитывают нестационарности режимов обработки. Учет нестационарности режимов обработки позволит значительно расширить границы применимости системы в производственных системах и/или повысить точность прогноза.

3 Установлено, что классический метод мониторинга, основанный на анализе Фурье-спектра сигнала виброакустической эмиссии, имеет низкую достоверность. Требуется разработка более эффективного алгоритма анализа сигнала.

4 Выдвинута гипотеза о возможности повышения быстродействия и точности системы мониторинга путем синтеза методов контроля работоспособности режущего инструмента, основанного на измерении виброакустической эмиссии и электропроводимости контакта «инструмент-деталь». На первом шаге – анализируя сигнал виброакустической эмиссии, инвариантный к режимам обработки идентифицировать модель износа, а на втором – произвести оценку состояния работоспособности и степени износа по сигналу электропроводимости контакта «инструмент-деталь».

5 Установлено, что в существующих системах прогноза работоспособности РИ не учитывается нелинейный характер износа инструмента в процессе резания, характерный для обработки труднообрабатываемых материалов. На основании проведенного анализа существующих методов прогноза сформулированы следующие основные требования к методу прогноза состояния РИ;

- алгоритм прогноза должен учитывать качественную модель поведения объекта диагностики через структуру используемых моделей;

- количественную оценку требуется осуществлять с учетом оперативной информации, полученной от датчиков ПР.

6 Для обеспечения гибкости и самообучения требуется разработка алгоритмов извлечения моделей на основе анализа экспериментальных данных в автоматическом режиме.

ГЛАВА 2. КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА И ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

2.1.Физические и информационные основы оперативного мониторинга износа РИ

Решение поставленных задач – совершенствования методов мониторинга и прогноза, основано на выявлении качественных характеристик процесса износа и особенностей в функциональных зависимостях износа, а также параметров, коррелированных с ним.

2.1.1.Представление процесса резания как объекта диагностики в виде «черный ящик»

Принятое в теории автоматического управления выделение объекта из среды для получения первого представления об его состояниях и связях со средой эффективно применяется во многих отраслях знаний, в том числе и в задачах диагностики. Модель объекта диагностики представлена на рисунке 2.1.

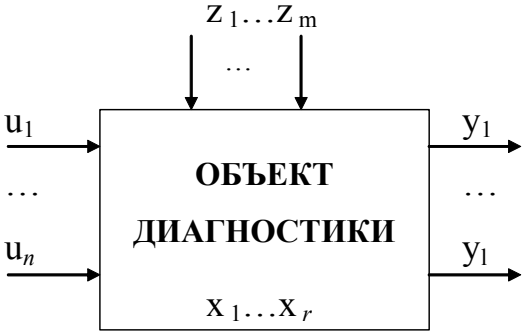


Рисунок 2.1. Модель объекта диагностики в виде «черный ящик»

Где $u_i \in U, i = \overline{1,n}; \bar{u}(t) = (u_1(t), u_2(t), \ldots, u_n(t))$; совокупность наблюдаемых входных воздействий на объект;

$z_i \in Z, i = \overline{1,m}; \bar{z}(t) = (z_1(t), z_2(t), \ldots, z_m(t))$; совокупность ненаблюдаемых входных воздействий;

$x_i \in \mathrm{X}, i = \overline{1,r}; \bar{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \ldots, x_r(t))$; совокупность внутренних (собственных) параметров объекта;

$y_i \in \mathrm{Y}, i = \overline{1,l}; \bar{y}(t) = (y_1(t), y_2(t), \ldots, y_l(t))$; совокупность выходных характеристик объекта (переменных состояния).

Таблица 2.1. Входные, выходные воздействия и переменные состояния процесса резания, как объекта диагностики

совокупность наблюдаемых входных воздействий на объект	*Входные (тестовые сигналы):* Постоянный и/или переменный ток для определения электропроводимости контакта «инструмент-деталь». *Параметр наработки*: время работы τ; путь относительного рабочего движения *L* или иной параметр. *Режимы механообработки:* подача инструмента *s*, глубина резания *t*, скорость резания *V*. Геометрические параметры инструмента: передний угол α, задний угол γ, угол в плане φ.
совокупность ненаблюдаемых входных воздействий	*Изменение геометрических параметров инструмента*: радиус при вершине резца Δ*r*, угол в плане Δφ, величина начального износа *h* *Свойства инструментального и обрабатываемого материала:* колебания твердости заготовки ΔНВ, изменение физико-химических свойств контакта инструмент-деталь; Δ*t* – колебания припуска, связанные с погрешностью формы. *Параметры внешней среды:* жесткость эквивалентной упругой системы станка и детали (h_x, h_y, h_z), условия охлаждения и т.д.
совокупность внутренних (собственных) параметров объекта	Изменение структурно-фазового и прочностного состояния приконтактных слоев режущей части инструмента, распределение температурных полей и напряжений, геометрическая форма контакта.
совокупность выходных характеристик объекта (переменных состояния)	Состояние режущего инструмента (РИ); *диагностические параметры*, коррелированные с состоянием РИ: сила резания *P* (а также ее составляющие *Pz,Py,Px*), интегральная температура в зоне резания Θ, термоЭДС E, крутящий момент M, мощность *N*, виброакустические колебания $N_{акуст}$, ЭП КИД G и др.

2.1.2.Анализ состояний объекта диагностики (инструмента)

В процессе механообработки следует выделить следующие состояния режущего инструмента:

- состояние работоспособности
  - период приработки;
  - период нормального износа;
  - период катастрофического износа;
- состояния потери (полностью или частично) работоспособности
  - микровыкрашивание;
  - макровыкрашивание;
  - скалывание тонких слоев;
  - отделение слоев значительной толщины;
  - выдавливание материала и т.д.

В процессе резания в результате взаимодействия обрабатываемого материала с инструментальным контактные площадки на передней и задней поверхностях изнашиваются. Износ контактных площадок происходит непрерывно на протяжении всего процесса резания. Характер износа режущего инструмента, то есть распределение его по рабочим поверхностям инструмента, зависит от многих конкретных условий, в которых производится резание. Износ режущего инструмента выражается в появлении лунки на передней поверхности, площадок износа на главной и вспомогательной задних поверхностях и в уменьшении вылета вершины резца или режущего лезвия иного инструмента.

Износ режущего инструмента только по задней поверхности наблюдается при обработке хрупких материалов, при резании которых образуется стружка надлома, не представляющая собой сплошного прочного тела. Износ по задней поверхности является также превалирующим в случае резания с малыми толщинами среза, при малых значениях задних углов и при обработке сталей и сплавов, обладающих ярко выраженным упругим последствием и сильным обработочным упрочнением.

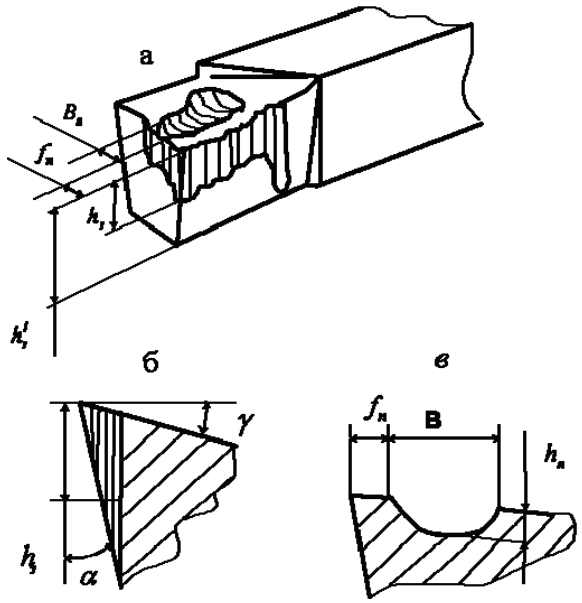


Рисунок 2.2. Распределение износа по поверхностям инструмента: *а* – общий вид режущей части инструмента со следами износа; *б* – износ по задней поверхности; *в* – износ по передней поверхности

Износ режущего инструмента только по передней поверхности происходит в случае обработки вязких металлов с большими сечениями среза, когда образуется устойчивый нарост, исключающий контакт задней поверхности с обрабатываемым материалом. В большинстве же случаев практики резания металлов инструмент изнашивается как по передней, так и по обеим задним поверхностям (Рисунок 2.3, Рисунок 2.4).

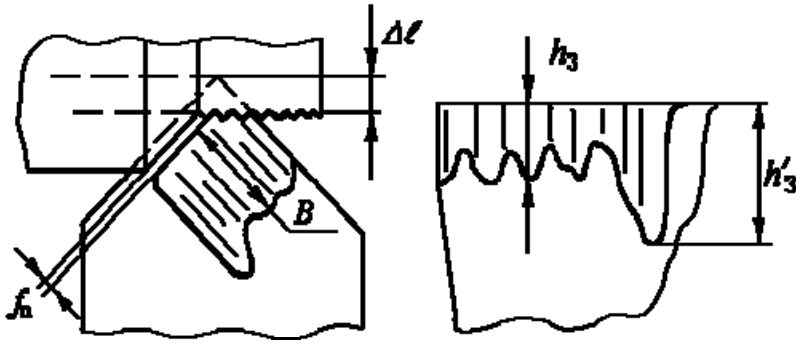
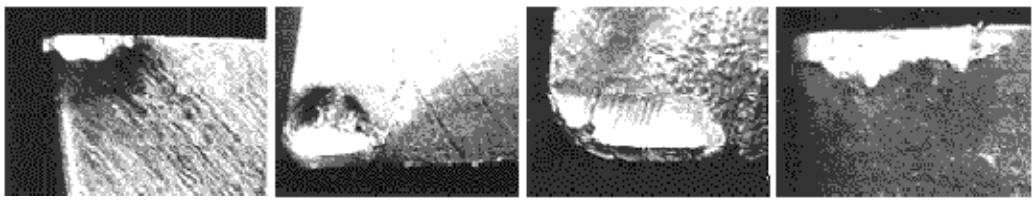


Рисунок 2.3. Параметры изношенного инструмента



а *б* *в* *г*

Рисунок 2.4. Износ резцов из быстрорежущей стали Р18 при точении стали 40Х: *а* – по задней, *б* – передней поверхностям; твердого сплава ВК8 при точении коррозионно-стойкой стали: *в* – по передней, *г* – задней поверхностям

Изнашивание передней поверхности происходит, как правило, на некотором удалении от главной режущей кромки. Образующаяся лунка с течением времени работы резца углубляется и незначительно расширяется в сторону от режущей кромки. Износ инструмента полностью характеризуется указанными ниже параметрами: линейный износ по задней поверхности $h_З$; ширина лунки на передней поверхности $l_Л$; длина лунки на передней поверхности ВЛ; глубина лунки на передней поверхности $h_Л$; перемычка от края лунки до главного лезвия f; радиус округления ρ; массовый износ; объемный износ.

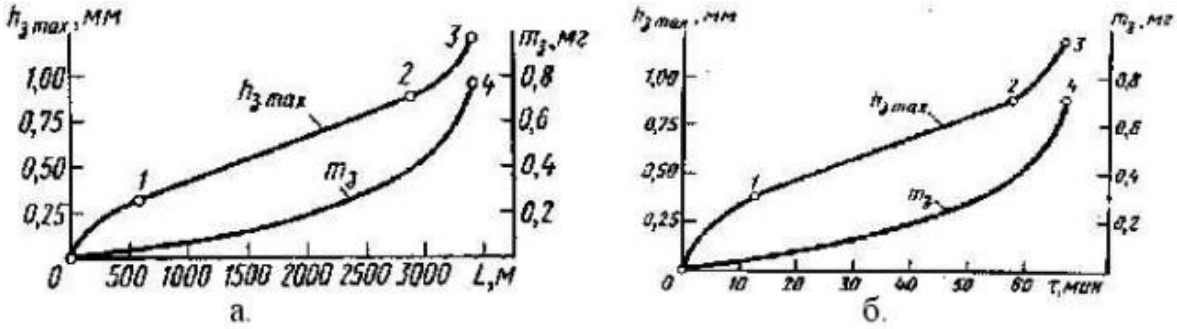


Рисунок 2.5. Кривые линейного $h_З$ и массового износа $m_З$ задней поверхности резца: *а* – в зависимости от времени работы t; *б* – в зависимости от пути L относительного рабочего движения

Многочисленными исследованиями обрабатываемости резанием современных труднообрабатываемых материалов доказано [11, 24, 36, 64, 69], что интенсивность роста фаски износа инструмента по задней поверхности в условиях получистовой и чистовой обработки является основным фактором, определяющим эффективность технологического процесса по параметрам производительности, точности и качества

поверхности обработанных деталей, является определяющим и подчиняется общей закономерности изнашивания деталей машин (Рисунок 2.5).

Здесь можно отметить следующие зоны работы резца: 0-1-зону приработки, 1-2 зону нормального или рабочего износа, 2-3 зону интенсивного износа.

2.1.3.Выделение входных координат объекта диагностики

Известно, что на износ режущего инструмента оказывают существенное влияние следующие основные параметры:

- элементы режима резания (подача, скорость и глубина резания);
- геометрия режущей части инструмента;
- свойства инструментального и обрабатываемого материала;
- время работы, относительная длина обработанной поверхности;
- стационарность, вибрация, СОТС и т.д.

Кроме основных перечисленных параметров существует большое число других факторов, оказывающих влияние на характер протекания процесса резания [20].

Следует особо отметить необходимость и значимость учета нестационарности режимов обработки в задачах оперативной диагностики. Существующие системы мониторинга (п.1.2) ограничиваются стационарными режимами работы, однако анализ технологических операций механической обработки в производственных условиях, а также современное представление о физических явлениях, протекающих в зоне контакта инструмента с деталью, показывает, что в большинстве процессов лезвийной обработки нагружение режущей части инструмента не стационарно во времени [85]. Это может быть обусловлено как переменностью внешних факторов: припуска на обработку, скорости резания, толщины срезаемого слоя, геометрии инструмента, жесткости технологической системы, так и внутренней нестабильностью процесса резания, связанной с циклическим характером стружкообразования, значительным градиентом удельных нагрузок, температур и скоростей деформации на контактных поверхностях инструмента, изменением силы и температуры резания вследствие необратимого роста износа инструмента [85]

Эксперименты [70], проведенные с переменными режимами резания, показали, что хотя износ формируется по всей активной длине режущей кромки, основное и наиболее закономерное приращение фаски износа происходит вблизи вершины резца. На остальной части изношенной поверхности суммирование износа происходит не пропорционально времени работы инструмента или пройденному пути резания. Степень такой непропорциональности зависит как от порядка чередования переменных элементов режима резания, так и от скорости их изменения во времени.

В задачах прогноза требуется учесть, что линейное суммирование износа возможно только в том случае, когда изменение режима резания не меняет пропорциональности между работой сил трения и температурой, обеспечивающих образование частиц износа, с одной стороны, и условиями (соотношением касательных и нормальных нагрузок), способствующими залечиванию микротрещин и удержанию частиц износа инструмента на его контактной поверхности в процессе непрерывного резания [85, 7].

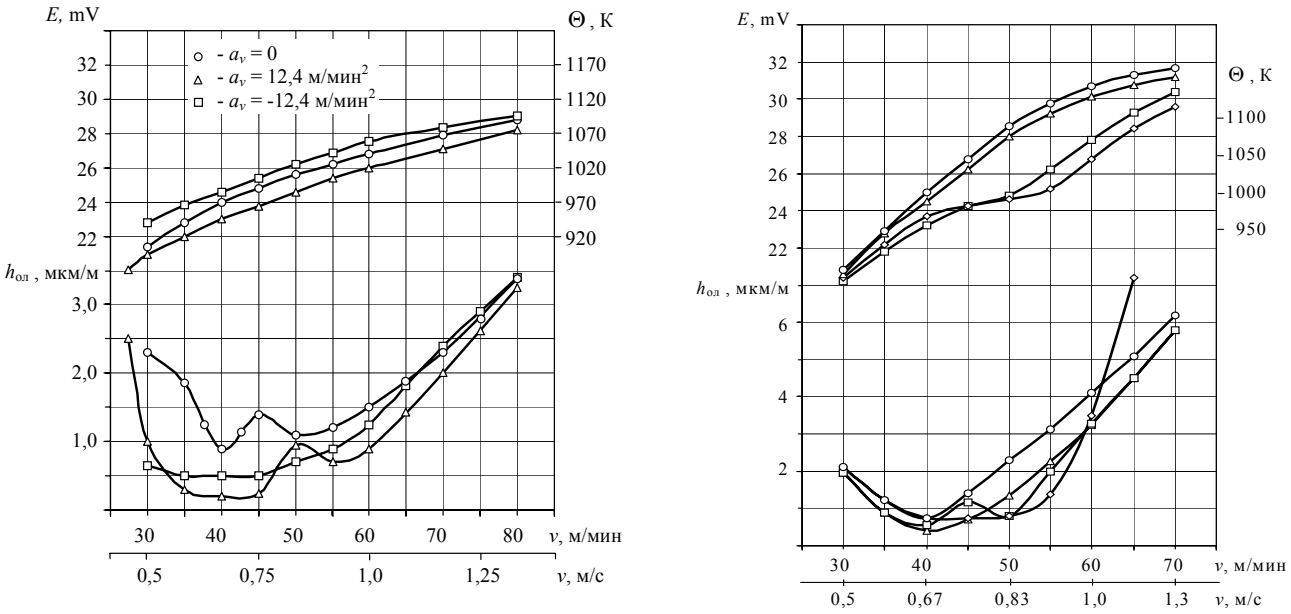


Рисунок 2.6. Износостойкость РИ при нестационарном резании [85]

Согласно исследованиям, приведенным в работе В. В. Постнова [85], нестационарное точение с различными по величине и знаку ускорениями скорости

резания, глубины и подачи способно существенно изменить интенсивность износа инструмента вследствие конечного значения скорости формоизменения и запаздывания темпа ее изменения по сравнению с темпом изменения температурно-силовых и скоростных условий контактирования.

2.1.4.Выделение выходных координат объекта диагностики

Для определения «качественных» зависимостей между износом инструмента и контролируемыми параметрами процесса резания необходим анализ физической природы диагностических сигналов и особенностей их формирования и способов измерения.

2.1.4.1.Анализ электрических явлений в зоне резания

С точки зрения диагностики состояния РИ при анализе электрических явлений требуется рассматрение термоЭДС Е, на контакте разнородных материалов заготовки и инструмента, и электрической проводимости контакта G = 1/R, которая зависит преимущественно от формы контакта (Рисунок 2.7)[38].

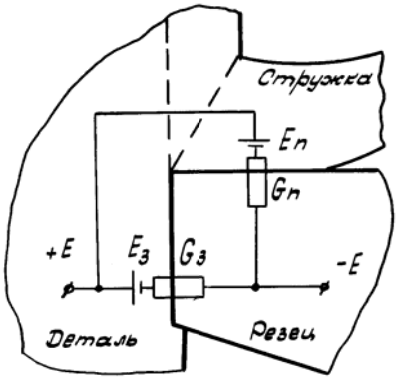
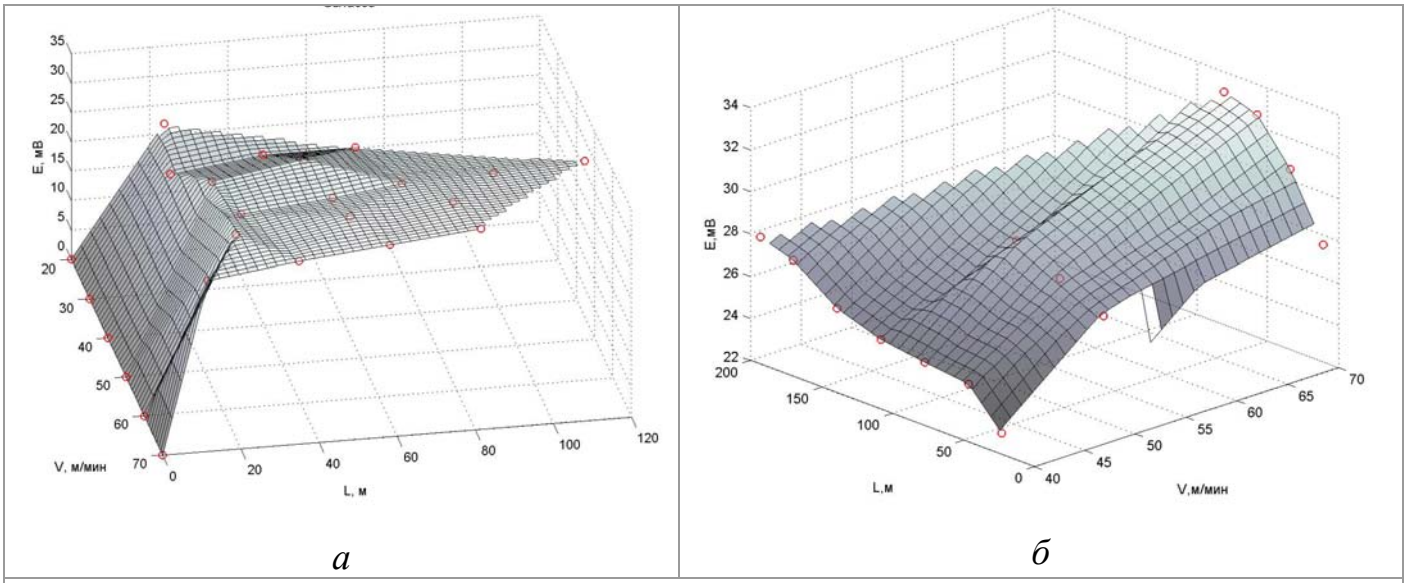


Рисунок 2.7. Схема замещения контакта "инструмент-деталь"[38]

Интегральная ЭДС обусловлена преимущественно термоэлектрическими и термоэлектронными явлениями на поверхности раздела металлов, а также акустоэлектрическим эффектом, эффектом Крамера и возможно другими явлениями [84]. Однако увлечение носителей зарядов волнами механических напряжений, а также низкотемпературная электронная эмиссия, возникающая с поверхности

твердых тел в результате их деформации, структурных превращений, адсорбционно-окислительных и других физико-химических процессов, пренебрежительно малы.

Влияние на термоЭДС и температуру резания режимов механообработки, геометрии инструмента, физико-механических свойств обрабатываемых и инструментальных материалов исследованы в работах [22, 25, 42, 69, 71 и др.]. Характер зависимости ТЭДС от режимов резания (Рисунок 2.9 - Рисунок 2.11), пути резания (Рисунок 2.8) выражаются нелинейными монотонными функциями.



а *б*

Рисунок 2.8. График функции $E = f(V,L)$ при продольном точение сплава ХН73МБТЮ резцом ВК8, t=0,5мм. *а* – s=0,075 мм/об; *б* – s=0,1 мм/об

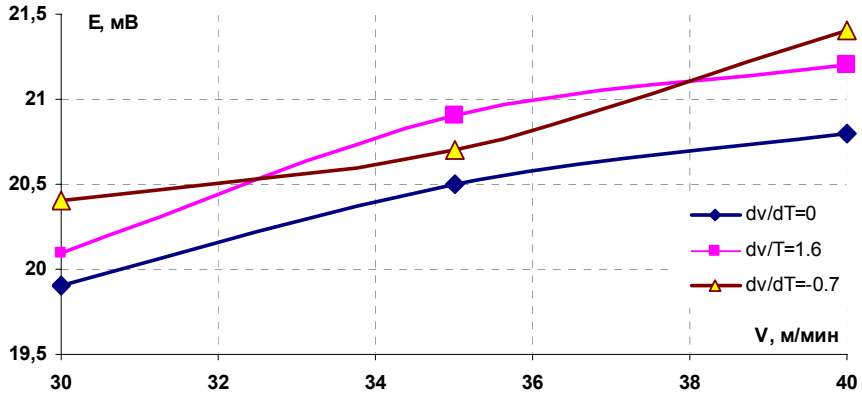


Рисунок 2.9. Зависимость термоЭДС от скорости резания при точении ХН73МБТЮ – ВК8 (s = 0,1 мм/об; t = 0,5 мм)

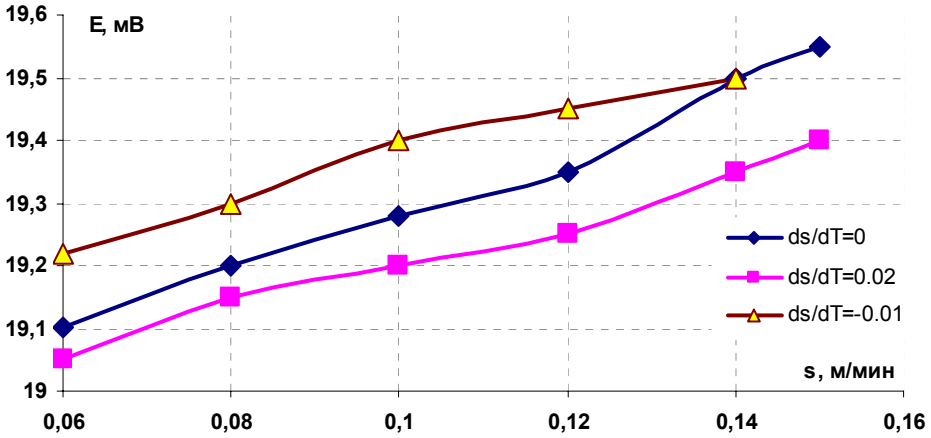


Рисунок 2.10. Зависимость термоЭДС от подачи при точении ХН73МБТЮ – ВК8 (V = 40 м/мин; t = 0,5 мм)

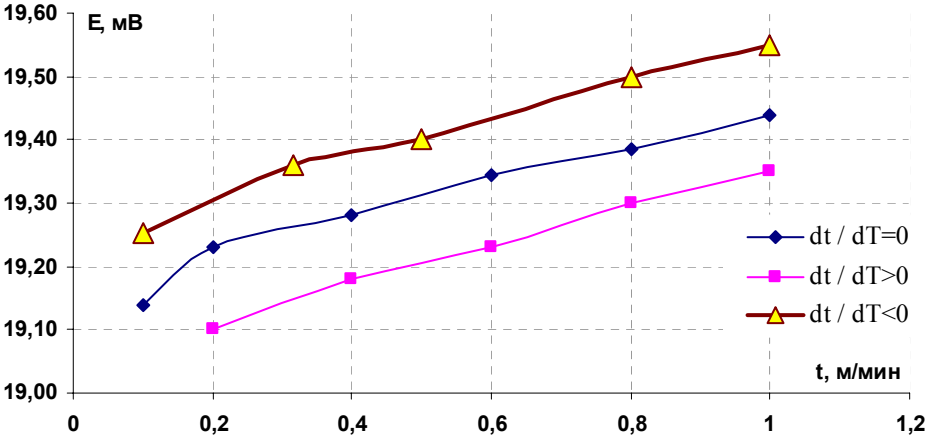


Рисунок 2.11. Зависимость термоЭДС от глубины резания при точении ХН73МБТЮ – ВК8 (s = 0,1 мм/об; V = 40 м/мин)

Общеизвестно [22, 25, 42, 69, 71, 75, 85] и подтверждается исследованиями автора (Рисунок 2.9 – Рисунок 2.11), что наибольшее влияние на ТЭДС оказывает скорость резания, а для некоторых пар материалов в области оптимальных температур наблюдается изменение в характере функциональной зависимости (Рисунок 2.12).

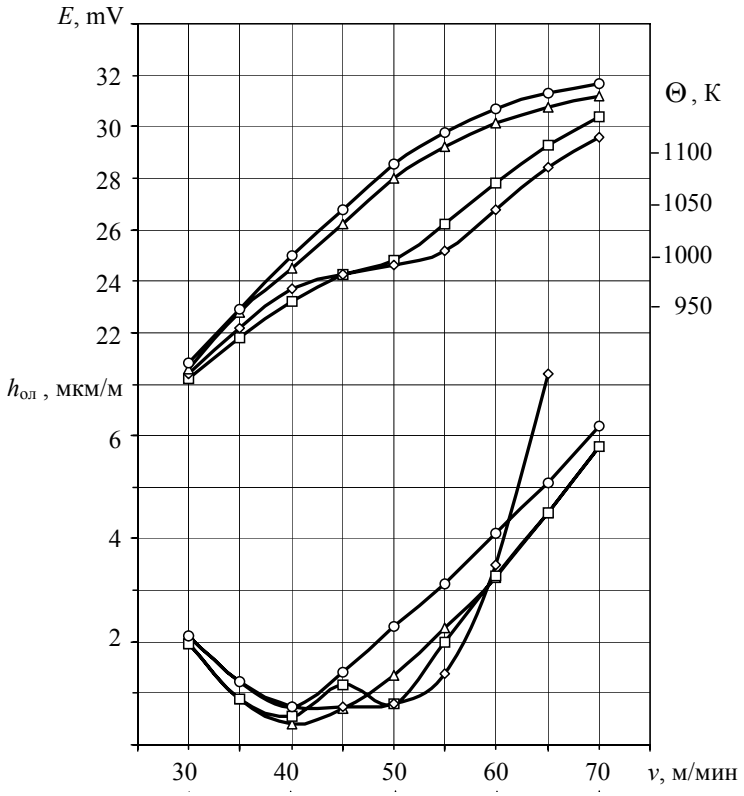


Рисунок 2.12. Зависимость термоЭДС от скорости резания ХН73МБТЮ – ВК6 (s = 0,1 мм/об; t = 0,5 мм) o – a_v = 0 м/мин^2; Δ – a_v = 2,7 м/мин^2; □ – a_v = 3,6 м/мин^2; $\Diamond$ – a_v = 6,0 м/мин^2; ∇ – a_v = - 3,6м/мин^2

Точность оценки износа РИ определяется, прежде всего, точностью измерения диагностического параметра. Проведенный анализ факторов, ограничивающих точность измерения ТЭДС, выявил следующие: присутствие помех в канале измерения; ограниченная разрядность АЦП; точность контрольно-измерительной аппаратуры, используемой в процессе тарирования; дрейф параметров электрической цепи. Доминирующий вклад в погрешность оценки термоЭДС, вносит паразитная ТЭДС.

Исследование точности измерения термоЭДС

Основным фактором, влияющим на точность измерения термоЭДС, является «паразитная» термоЭДС, возникающая в месте контакта режущей твердосплавной пластинки с державкой резца. Величина её определяется сочетанием материалов пластины и державки, а также средней температурой поверхности контакта, а направление – противоположное действительной ТЭДС.

Для повышения точности измерения применяются [25]:

- цельные твердосплавные резцы;
- резцы с токосъемной иглой, выполненные из того же материала, что и режущая пластинка;
- резцы с принудительным охлаждением твердосплавного хвостовика.

Все эти методы оказываются неприемлемыми в производственных условиях для многоинструментального станочного мехатронного модуля. Поэтому требуется учитывать влияние термоЭДС на измерения в моделях. Зависимость паразитной термоЭДС от времени носит экспоненциальный характер (Рисунок 2.13).

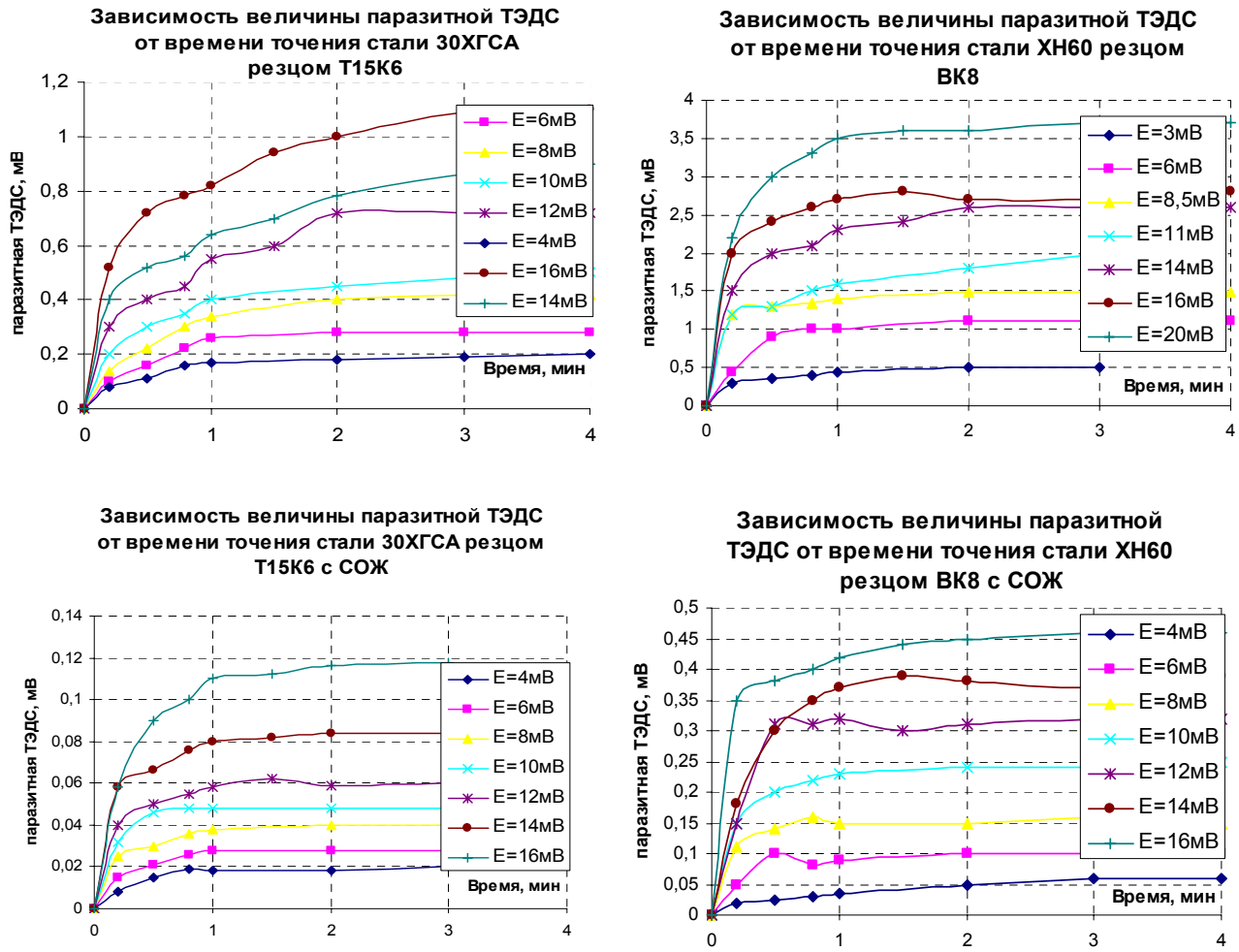


Рисунок 2.13. Зависимость паразитной термоЭДС от времени:
(γ=5˚; α=10˚;φ=φ_1=45˚; r=0,3мм; λ=0˚; t=0,5мм; s=0,11 мм/об)

Постоянная времени переходного процесса τ значительно колеблется, от 10 сек до 3 минут, в зависимости от материалов, конфигурации пластины и режимов обработки

Таблица 2.2. Значения установившихся значений паразитных термоЭДС для различных материалов

ТЭДС	**ХН60 -ВК8**			
	паразитная ТЭДС			
	Без СОЖ		с СОЖ	
	мВ	%	мВ	%
3	0,5	16,67	0,06	2,00
6	1,1	18,33	0,1	1,67
8,5	1,48	17,41	0,15	1,76
11	1,98	18,00	0,25	2,27
14	2,6	18,57	0,32	2,29
16	2,8	17,50	0,39	2,44
20	3,7	18,50	0,46	2,30

ТЭДС	**30ХГСА -Т15К6**			
	паразитная ТЭДС			
	Без СОЖ		с СОЖ	
	мВ	%	мВ	%
4	0,2	5,00	0,02	0,50
6	0,28	4,67	0,028	0,47
8	0,42	5,25	0,04	0,50
10	0,5	5,00	0,048	0,48
12	0,72	6,00	0,06	0,50
14	0,9	6,43	0,084	0,60
16	1,1	6,88	0,73	4,56

В системе оперативного мониторинга состояния РИ по сигналу термоЭДС для резцов с механическим креплением режущей пластины оценку износа предлагается производить по следующей уточняющей формуле:

$$\hat{E}_{уточ} = \hat{\mathrm{E}} + \frac{2}{3}\hat{\mathrm{E}}\mathrm{K}_{\text{пар}}\mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{1}{7}\cdot\frac{\mathrm{t}}{\tau_{\text{пар}}}\right), \qquad (2.1)$$

где $\hat{E}_{уточ}$ – уточненная оценка ТЭДС, скорректированная с учетом влияния паразитной ТЭДС;

$\hat{E}$ – оценка полученная по модели;

$\mathrm{K}_{\text{пар}}$ – коэффициент, учитывающий отношение амплитуды ТЭДС и паразитной ТЭДС;

$\tau_{\text{пар}}$ – постоянная времени, в течение которого значение паразитной ТЭДС достигает 95% порога от своей номинальной величины.

Методика экспериментального определения коэффициентов $\mathrm{K}_{\text{пар}}$ и $\tau_{\text{пар}}$ по осциллограмме ТЭДС (Рисунок 2.14) заключается в следующем. Для режимов обработки V_0, s_0, t_0 протачивается отрезок длиной пути L_1, измеряется значение ТЭДС в начале $\mathrm{E}_1^{\,0}$ и в конце $\mathrm{E}_1^{\,1}$ пути резания. Отрезок выбирается таким образом,

чтобы время точения гарантированно превышало время нагрева контакта пластины и державки. После выравнивания температуры между РИ и внешней средой повторяют эксперимент с режимами V_0, s_0, t_0, измеряя значение ТЭДС E_2^0 в начале резания отрезка L_2.

Вычисление $K_{пар}$ производят по формуле (2.2) и определяют как среднее математическое по нескольким замерам

$$K_{пар} = \frac{E_1^1 - E_2^0}{E_1^1}, \qquad (2.2)$$

Коэффициент $\tau_{пар}$ находят как точку-излом графика функции dE/dt на участке L_1.

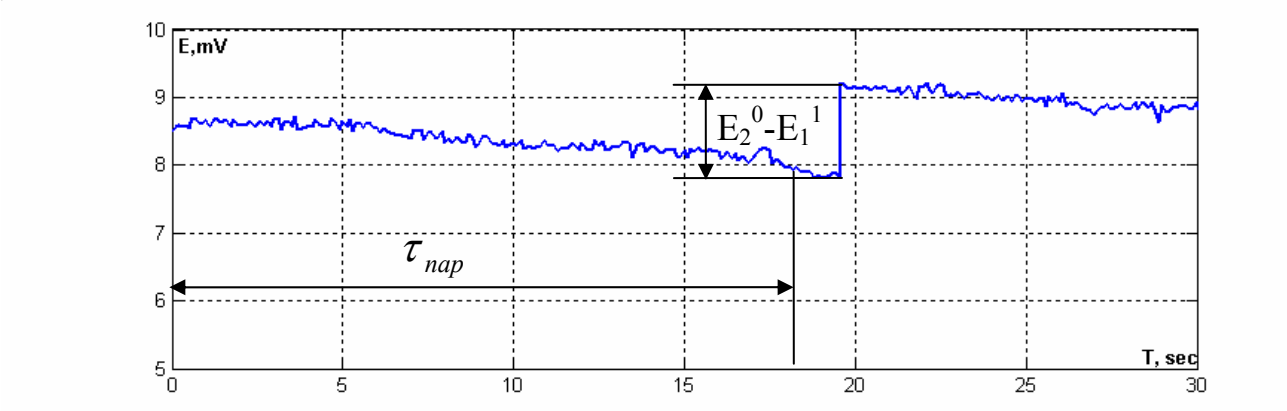


Рисунок 2.14. Экспериментальное определение коэффициентов $K_{пар}$ и $\tau_{пар}$ по осциллограмме термоЭДС, полученной при продольном точении 12Х18Н10Т резцом со сменными пластинами ТТ8К6 с покрытием TiAlN Balzers X.Treame

Представленная методика позволяет повысить точность оценки износа РИ по моделям вида $h_3 = f(V,s,t\ldots)$ для РИ с механическим креплением режущей пластины.

Анализ влияния износа инструмента на ЭП КИД

Нелинейная зависимость ТЭДС от режимов резания и практическая сложность в устранении влияний паразитной ТЭДС на результаты измерений затрудняют самостоятельное использование метода контроля состояния РИ на основе этого параметра. Актуальным остается вопрос поиска диагностического параметра, обладающего инвариантностью или линейной зависимостью от режимов и условий механообработки, и высокой чувствительностью к износу РИ. С этих позиций, эффективным параметром является электропроводимость контакта «инструмент-деталь».

Электрический контакт заготовки с передней поверхностью инструмента осуществляется через условную плоскость сдвига и стружку. Материал стружки претерпевает большие пластические деформации, во много раз превышающие деформации в зоне условной плоскости сдвига [42, 102], что предопределяет повышенное электрическое сопротивление стружки. Поэтому удельный вес электрической проводимости по передней поверхности в суммарной проводимости КИД будет существенно меньше по сравнению с проводимостью по задней поверхности инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов, когда износ по задней поверхности является превалирующим.

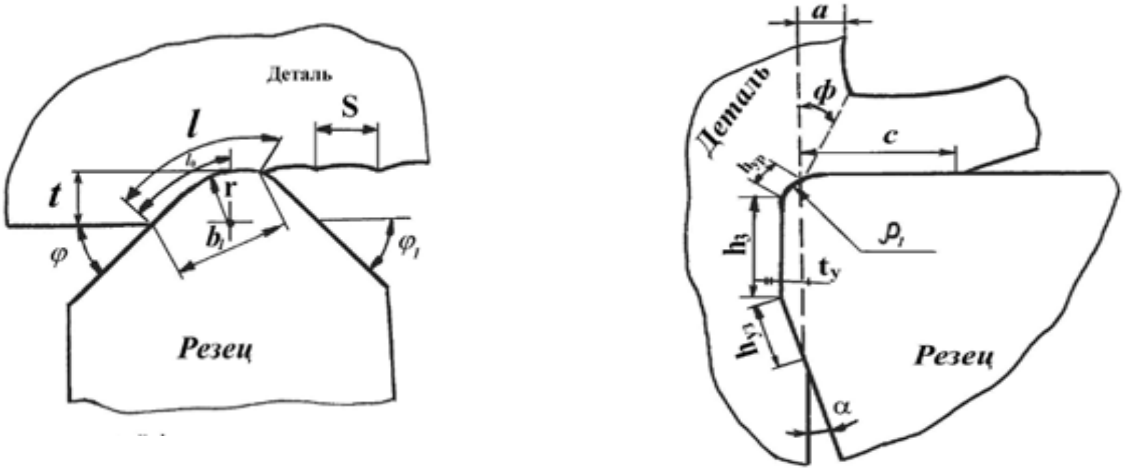


Рисунок 2.15. Расчетная схема к выводу аналитического выражения чувствительности электропроводимости G к изменению износа инструмента $h_з$

Проведенные исследования [38, 40, 80] показали тесную корреляционную взаимосвязь электропроводимости с износом инструмента и припуском обработки (глубиной резания) и выявили аналитические зависимости.

Аналитическое выражение чувствительности электропроводимости G к изменению износа инструмента $h_{З,}$ полученное в работе профессора Зориктуева [38], согласуется с экспериментальными данными.

$$\frac{dG}{dh_з} = \frac{K_G \ell}{2\sqrt{\ell(h_{Y\Sigma} + h_з) + b_1 C}} = \frac{K_G \ell}{2\sqrt{\ell(h_{Y\Sigma} + h_з) + b_1 K_C S^{Y_C}}}, \quad (2.3)$$

где K_G – коэффициент пропорциональности, постоянный для контактной пары обрабатываемого и инструментального материалов и зависящий от их удельных проводимостей;

$$\ell = \frac{t}{\sin\varphi} + r\left(\varphi + tg\frac{\varphi}{2}\right) + \frac{S}{2} = \ell 0 + \frac{S}{2}, \quad (2.4)$$

где ℓ – длина активной части режущей кромки инструмента;

hЗ – средняя ширина фаски износа инструмента, определяемая по методике профессора Г. И. Грановского [22];

$$h_{y\Sigma} = h_{yз} + h_{y\rho} \quad (2.5)$$

$h_{yз} = \frac{t_y}{Sin\alpha}$ – ширина контакта, обусловленная упругим восстановлением материала обрабатываемой поверхности t – глубина резания в мм;

S – подача инструмента в мм/об;

γ,α,φ,r – геометрические параметры инструмента: соответственно передний и задний угол, угол в плане, радиус при вершине.

$C=K_C S^{Yc}$ – ширина контакта стружки с инструментом;

Y_C – показатель степени, зависящий от свойств обрабатываемого материала.

Действие температуры на контактную проводимость в детали ослаблено (в 4,5÷9) раз. Это ослабление приводит к практической нечувствительности электропроводимости контакта "инструмент-деталь" к слабовыраженной

экстремальной зависимости электропроводимости обрабатываемых материалов от температуры.

Электропроводимость G увеличивается пропорционально увеличению износа инструмента. Чувствительность электропроводимости к изменению износа инструмента h_3 с увеличением подачи уменьшается. Абсолютная проводимость G с ростом значений $h_{Y\Sigma}$ и C увеличивается, а ее чувствительность к изменению износа dG/dh_3 падает.

Линейный характер зависимостей $G=f(h_3)$ предопределяет и одинаковый характер изменений G от пути резания, что подчеркивает принципиальную возможность использования информации об электропроводимости контакта для измерения и контроля текущего состояния инструмента.

2.1.4.2. Виброакустические колебания в процессе резания

Механизмы вибраций при резании рассмотрены в работах [47, 52, 61, 62], где выделены основные факторы, обуславливающие возникновение автоколебаний при резании:

- запаздывание сил резания при перемещении инструмента (наличие фазового сдвига между ними);

-наличие координатных связей в упругой системе, вследствие чего режущее лезвие описывает в плоскости замкнутую траекторию в виде эллипса;

- наличие разницы между силами резания при врезании и отталкивании благодаря упрочнению поверхностного слоя заготовки.

Экспериментально установлено [52], что фазовая характеристика силы резания является основной причиной возмущения упругой системы. В работе [108] отмечается большое влияние на запаздывание сил резания по отношению к перемещению, скорости деформирования, силы (коэффициента) трения стружки с передней поверхностью инструмента, усадки стружки, пластичности либо хрупкости обрабатываемых материалов. Запаздывание сил резания связывается с нелинейностью процесса стружкообразования (инерционностью пластической деформации).

Согласно работе [61], наличие фазового сдвига между силой резания и

перемещением является следствием неоднозначности изменения толщины среза при сложном относительном движении инструмента и заготовки как упругой системы станка со многими степенями свободы. Отставание во времени силы резания от изменения толщин среза определяется постоянной времени T_p стружкообразования, которая пропорциональна скорости резания.

Таким образом, изменение характера виброакустических колебаний является реакцией на изменение сил резания, которые, в свою очередь, с запаздыванием являются реакцией на изменение состояния РИ.

2.1.5.Выводы

Произведен анализ входных воздействий, определены пути повышения точности мониторинга износа режущего инструмента путем учета нестационарности режимов обработки в моделях ПР.

Классифицированы состояния объекта диагностики и определен нелинейный характер износа РИ. Проанализированы особенности физического формирования сигналов термоЭДС, ЭП КИД и ВАЭ, принятые ранее в качестве основных диагностических параметров. Отмечены особенности измерения термоЭДС для резцов с механическим креплением режущей пластины. Предложена методика уточненного расчета величины термоЭДС, заключающаяся в компенсации паразитной составляющей в процессе оперативного измерения.

Установлено, что сигнал ВАЭ является производным от изменения силы резания, которая обладает запаздыванием, поэтому данный метод имеет более низкое быстродействие по сравнению с методами, основанными на анализе электрических параметров.

2.2.Разработка концептуальной модели системы оперативного мониторинга и прогноза работоспособности РИ

Исследования, проведенные в первой главе, показали, что использование методов мониторинга, основанных на различных физических явлениях, без

использования системы, обладающей «интеллектуальностью», недостаточно эффективно в производственных условиях. Основной ряд возникающих проблем заключается в отсутствии алгоритмов адаптации либо сложностей, связанных с перенастройкой системы при изменениях в номенклатуре выпускаемой продукции или изменении режимов обработки. Сложности чаще всего связаны с дополнительными затратами ресурсов на переобучение и перенастройку системы мониторинга.

Актуальным является вопрос разработки концепции системы мониторинга и прогноза, используя наиболее хорошо зарекомендовавшие и проработанные методы контроля состояния РИ, способные адаптироваться и самообучаться на основе новых экспериментальных данных.

В соответствии с поставленной задачей, предложена функциональная схема системы мониторинга и прогноза работоспособности системы (Рисунок 2.16), работа которой осуществляется следующим образом. Датчики (термоЭДС, электропроводимости контакта инструмент-деталь, вибрации, акустики) воспринимают и преобразуют контрольно-диагностические параметры в электрические сигналы напряжения. Далее сигнал с датчиков через интерфейс связи поступает на модуль сопряжения с ЭВМ, включающий каскад усилителей и противомаскирующих фильтров, преобразуется в цифровой сигнал с помощью аналого-цифрового преобразователя.

Каналы передачи сигналов от датчиков к ЭВМ и свойства датчиков часто различны и имеют нелинейные амплитудно-частотные характеристики, поэтому требуется линеаризация и нормализация сигналов. АЧХ датчиков и каналов передачи запоминаются при предварительной тарировке и заносятся в базу данных. С выхода блока получаем нормализованный, линейный и отфильтрованный сигнал.

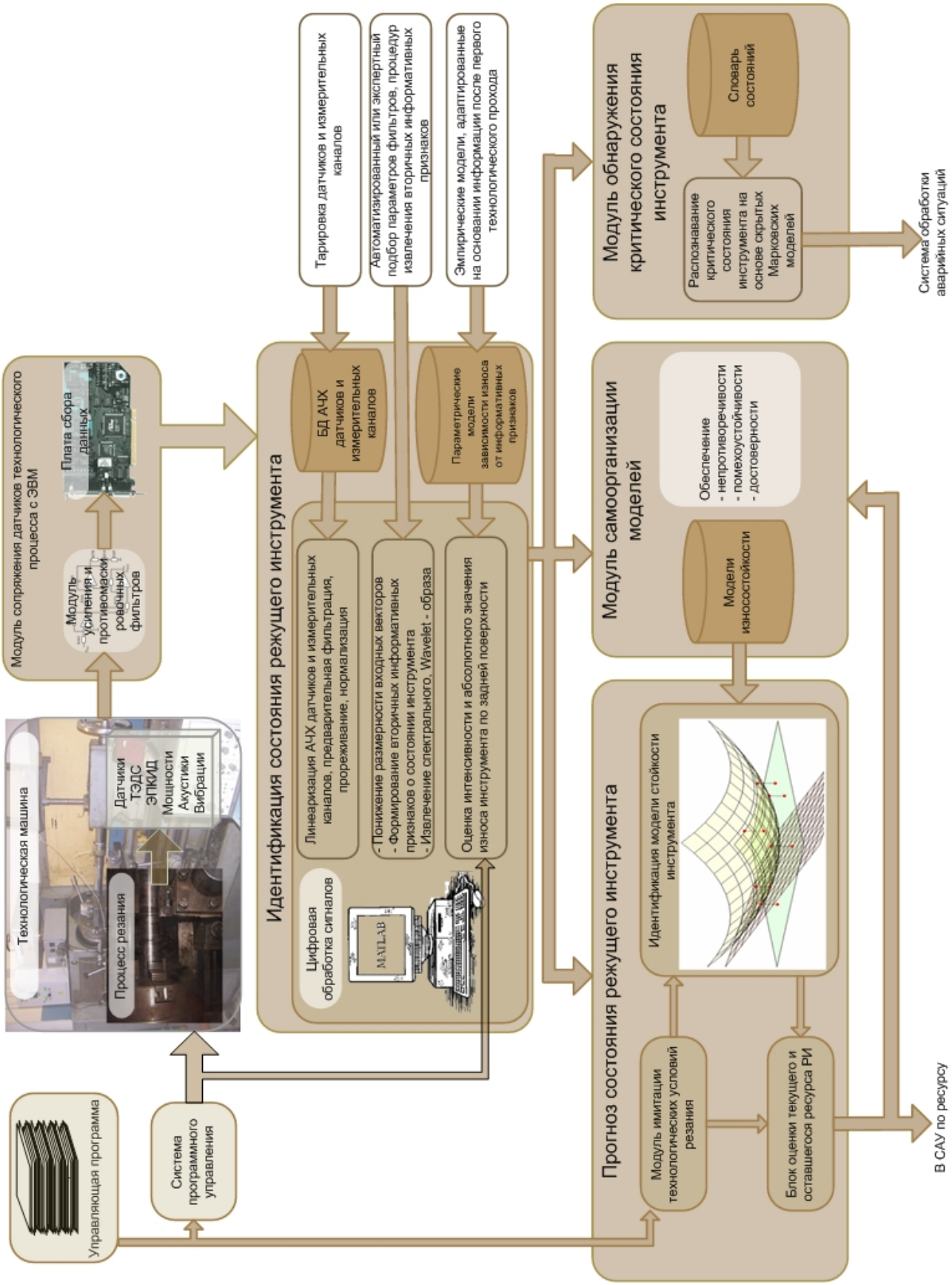


Рисунок 2.16. Функциональная схема системы оперативной диагностики состояния РИ

После предварительной обработки на основе первичных информативных признаков вычисляются вторичные (угол сдвига фазы между сигналом тока и напряжения в измерительном канале инструмент-деталь, относительные значения ЭП КИД и т.д.).

Дальнейшая обработка сигналов нацелена на извлечение полезных характеристик сигнала с целью повышения информативности и уменьшения объема обрабатываемой и хранимой информации.

В качестве методов извлечения характеристик (образов) сигналов приняты: среднематематическое ожидание, дисперсия, третий статистический момент, четвертый статистический момент, коэффициенты разложения сигнала в ряд Фурье и Wavelet-образы сигналов.

Полученные образы используются модулем самоорганизации моделей и модулем оценки интенсивности и абсолютного значения износа инструмента по задней поверхности.

Каналы обнаружения критического износа и оценки (классификации) величины износа разделены. Обнаружение критических состояний (скола, выкрашивания, поломки) происходит на основе скрытых Марковских моделей, а оценка износа – с помощью методов идентификации, основанной на моделях.

База данных содержит эталонные модели износостойкости, которые могут не учитывать нестационарность, стохастичность и нелинейность процесса резания. Модуль самоорганизации моделей обеспечивает правдоподобность и гарантирует достоверность результатов оценки, позволяет не только использовать имеющиеся модели, но по результатам измерений в реальном масштабе времени корректировать существующие или создавать новые модели.

Модуль прогноза на основе текущего значения износа, имеющейся модели процесса резания (ПР) и информации о режимах резания в будущем может дать прогноз состояния инструмента (% оставшегося ресурса инструмента или время, оставшееся до выработки ресурса).

Результат оценки текущего состояния режущего инструмента (износа, текущего и оставшегося ресурса) поступает в систему мониторинга для

представления информации о состоянии режущего инструмента оператору или в другие подсистемы станка (для адаптации режимов обработки, экономического планирования и оптимизации, планирования циклов смены инструмента и т.д.).

Анализ предложенной концептуальной модели позволил выделить основные задачи в реализации системы:

- выбор метода контроля (первичных преобразователей) и разработка алгоритмов извлечения информации из временных рядов;
- разработка алгоритмов распознавания состояния РИ;
- разработка алгоритмов прогнозирования параметров ПР и продуцирования новых моделей.

2.3.Методы измерения и извлечения информации из диагностических сигналов

2.3.1.Измерение постоянной составляющей ТЭДС

Измерение термоЭДС производится по схеме «естественной термопары». Деталь и инструмент электрически изолированы. В процессе точения происходит локальный нагрев контакта разнородных материалов, вследствие чего возникает разность потенциалов. Величина термоЭДС составляет от 10 до 50 мВ и зависит от свойств пары материалов «инструмент-деталь», температуры и всех факторов, влияющих на температуру (режимов обработки, геометрии инструмента и т.д.). Так как износ режущего инструмента изменяет геометрию инструмента, то косвенно влияет на величину ТЭДС. Таким образом, теоретически возможно, путем учета влияния режимов обработки для заданной пары материалов заготовки и инструмента произвести идентификацию текущего износа. Сложность функциональной зависимости, связывающей износ инструмента и величину ТЭДС (п.2.1.4.1), предполагает использование сложных алгоритмов обработки с использованием вычислительной техники. Для организации алгоритмов шумоподавления, адаптивной фильтрации и анализа сигнала с помощью ЭВМ необходимо преобразование сигнала к цифровому виду.

Цифровая обработка сигналов является альтернативой традиционной, аналоговой. К ее важнейшим качественным преимуществам относятся: реализуемость любых сложных (оптимальных) алгоритмов обработки с гарантированной и независящей от дестабилизирующих факторов точностью; программируемость и функциональная гибкость; возможность адаптации к обрабатываемым сигналам; технологичность.



Рисунок 2.17. Блок-схема обобщенной системы цифровой обработки сигналов реального времени

Чтобы система ЦОС, работающая в реальном времени (Рисунок 2.17), не вносила искажений, к устройствам, входящим в систему, предъявляются следующие требования [90]:

1) устройства должны обладать достаточно широким динамическим диапазоном, позволяющим одинаково, не нарушая пропорций, передавать большие и малые сигналы;

2) устройства должны обладать необходимым частотным диапазоном (полосой пропускания) – возможностью воспринимать и одинаково передавать все гармонические составляющие спектра мощности входного сигнала и невосприимчивостью к сигналам на «чужих» частотах. Излишне широкая полоса частот, пропускаемых устройством, нежелательна из-за опасности проникновения в наблюдаемый сигнал помех и шумов, но и ее уменьшение чревато внесением искажений и ростом инерционности – временем τ и реакции на короткий импульс. Узкую полосу пропускания преобразующего устройства часто используют для целенаправленной фильтрации сигнала. Пропускание только «низкочастотной»

части спектра приводит к его сглаживанию. Фильтр высоких частот удаляет постоянную составляющую и тренд (медленный дрейф);

3) устройства должны обладать достаточной чувствительностью – уровень собственных шумов устройства должен быть достаточно мал, чтобы на их фоне можно было уверенно различать полезный входной сигнал на выходе.

Расчет динамического диапазона устройств системы ЦОС при измерении сигнала термоЭДС.

По результатам работ, полученным в работах [22, 25, 42, 69, 71, 75, 85], интегральная величина термоЭДС в процессе резания находится в диапазоне от 0 до 50 мВ. Однако в результате исследований сигнала ТЭДС в производственных условиях при наличии шумов и наводок от работы частотного преобразователя получены следующие результаты (Рисунок 2.18). Значения сигнала расположены в диапазоне от -60 до 120 мВ.

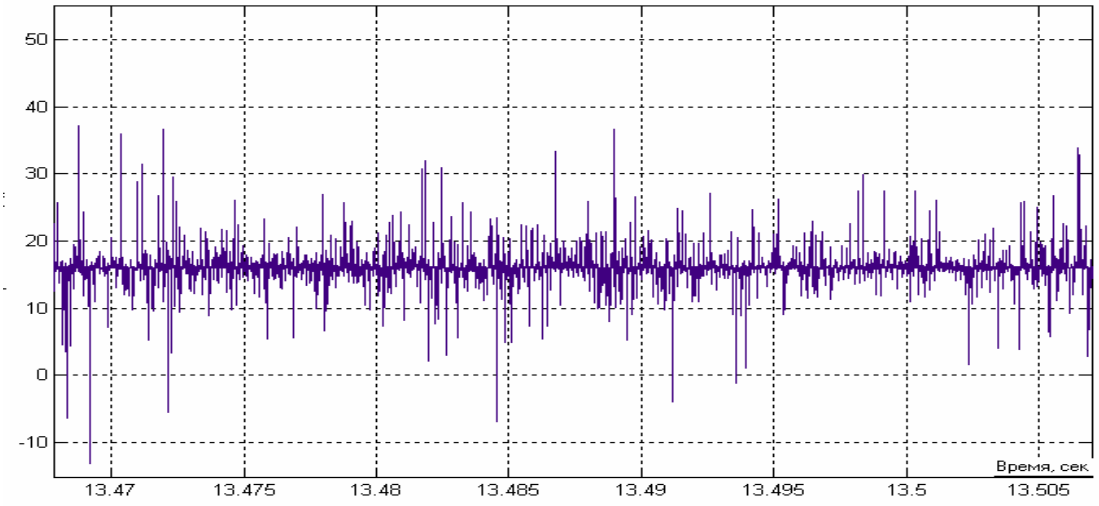


Рисунок 2.18. Осциллограмма сигнала термоЭДС, частота дискретизации 200 кГц

Измеренный сигнал E(τ) является случайным временным рядом E(τ_1), E(τ_2), …, E(τ_n). Для ряда с одинаковой вероятностью $p_i = 1/N$ математическое ожидание оценивается по формуле (2.6), тогда оценка дисперсии (2.7):

$$m_E^* = \sum_{i=1}^{n} E(\tau_i) p_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} E(\tau_i), \tag{2.6}$$

$$D_E^* = \frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^{n} \left(E(\tau_i) - m_E^* \right)^2 \tag{2.7}$$

Проведем проверку теоретического распределения ряда [44]. Для чего построим гистограмму распределения (рисунок 2.19).

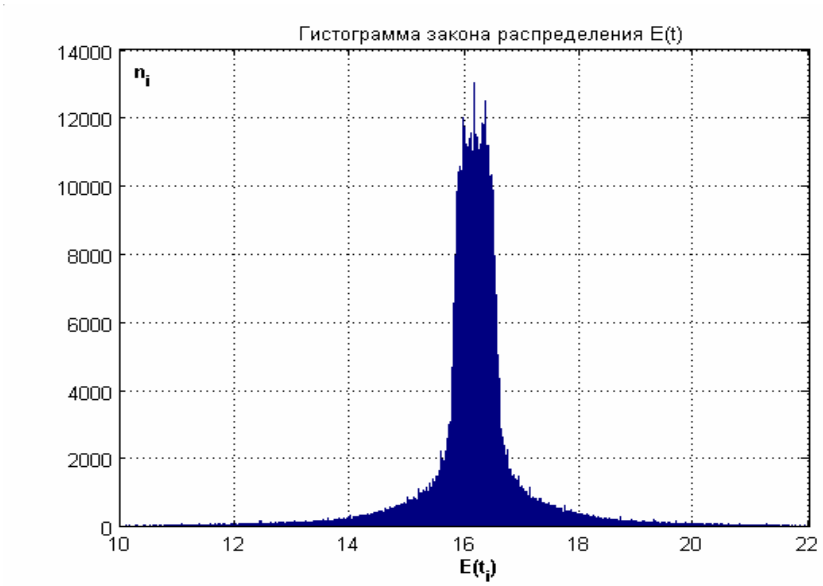


Рисунок 2.19. Гистограмма распределения временного ряда E(**τ**), измеренного с частотой дискретизации 200кГц при точении ЭИ698 – ВК8 (V = 40 м/мин; s= 0,075/об; t=0,1 мм) выполненная с помощью MatLab

Регистрируемый сигнал обладает нормальным распределением, с плотностью $f(x)$ и плотностью распределения $F(x)$:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(E-m)}{2\sigma^2}}, \tag{2.8}$$

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{\frac{(E-m)}{2\sigma^2}} dt = \Phi\left(\frac{E-m}{\sigma} \right) + 0{,}5, \tag{2.9}$$

где m – математическое ожидание (m_E=16,18 мВ);

$\sigma = \sqrt{D_E}$ – среднеквадратическое отклонение (σ=4,04 мВ).

На основании (2.8, 2.9) произведем в MatLab вычисление практически достоверного диапазона для m_E=50 мВ. Практически достоверный динамический диапазон с доверительной вероятностью 99,73% для наблюдения сигнала ТЭДС от 0 до 50мВ находится в диапазоне от -10 до 65мВ.

Расчет частотного диапазона

Для анализа постоянной составляющей ТЭДС при нормальном распределении входного сигнала (см. Рисунок 2.19) частотный диапазон выбирается исходя из требований к быстродействию датчика ТЭДС, с одной стороны, и достоверностью оценки вычисленной по результатам измерений, с другой.

Объем выборки *N*, необходимый для оценки с точностью выше 97%, должен быть больше 500 точек (Рисунок 2.20).

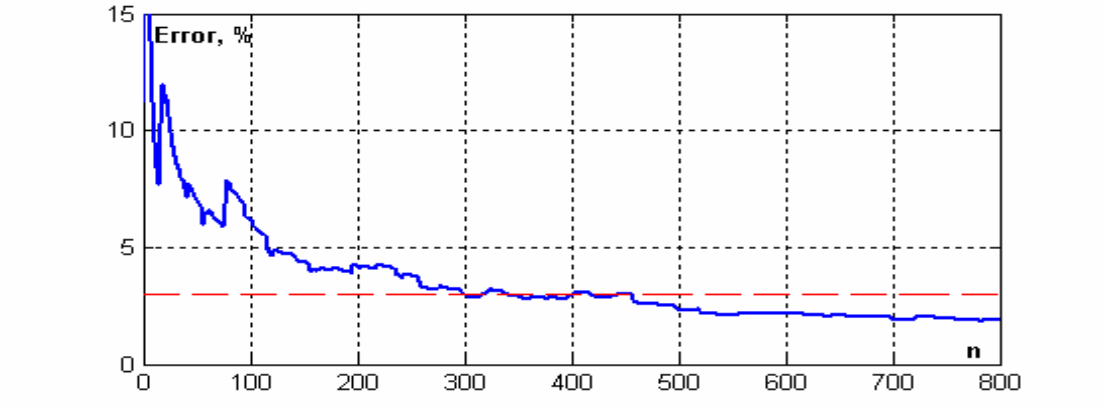


Рисунок 2.20. График функции $\Delta(n) = M_E^* - m_E(n)$

Зависимость быстродействия датчика от частоты дискретизации выражается формулой:

$$T = 500\frac{1}{f_d}, \qquad (2.10)$$

для f_d = 100 кГц, T = 5мс.

Определим требования к разрядности АЦП для обеспечения чувствительности цифровой системы измерения ТЭДС ±2,5%.

Работая в диапазоне амплитуд сигнала ЭП КИД до 150 мВ для обеспечения измерения ТЭДС 5мВ±2,5%, требуется обеспечить дискретизацию по уровню сигнала в 0,125 мВ. Таким образом, количество кодируемых дискрет должно превышать 150/0,125 = 1200. Данное число комбинаций кодируется 2^{11}. Следовательно, для обеспечения динамического диапазона ±150 мВ достаточно 12-разрядного АЦП.

2.3.2.Выбор метода оценки среднего

При любом измерении на результат влияют особенности методики эксперимента и параметры приборов, внешние регулярные воздействия и шумы.

На практике невозможно полностью избавиться от помех – влияния внешних регулярных и случайных воздействий. Регулярные воздействия реально подавить, а нерегулярные, называемые шумами, – только ослабить. Шумы могут иметь как внешнее происхождение (измерительные), так и быть присущими самому объекту – внутренние или динамические (так как влияют на динамику объекта). Измерительный шум может быть аддитивным – $\eta = f(x) + \xi$, мультипликативным – $\eta = f(x) \cdot \xi$, или входить в формулы для связи наблюдаемых и модельных величин более сложным образом. Требуется выбрать метод наиболее эффективный для оценки постоянной составляющей сигнала ТЭДС.

Задача выделения постоянной составляющей имеет широкое распространение в практике ЦОС.

Линейная цифровая фильтрация определяется как:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k), \qquad (2.11)$$

где $h(k)$, $k = 0,1,..., N-1$ – коэффициенты фильтра, а x(k) и y(k) соответственно – вход и выход фильтра.

Для заданного фильтра коэффициенты, определяющие характеристики этого фильтра, однозначны.

На Рисунок 2.21, *а* показана блок-схема фильтра, определение которого было дано выше. В таком виде этот фильтр широко известен как трансверсальный фильтр. На рисунке через *z*-1 обозначена задержка на один интервал дискретизации.

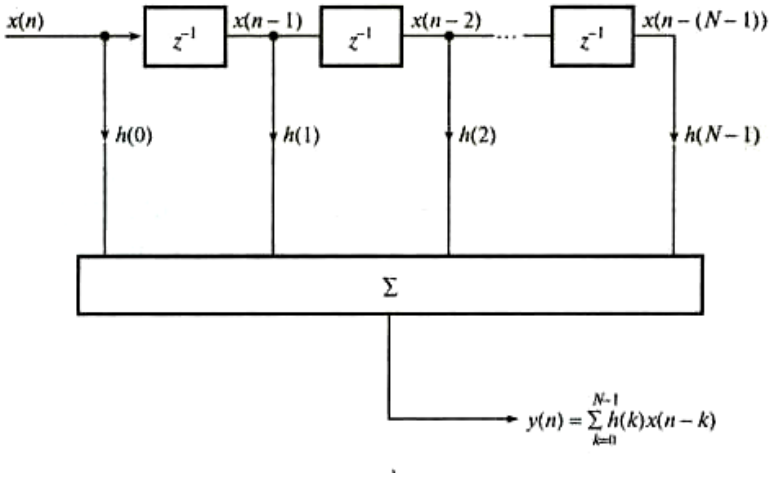


Рисунок 2.21. Блок-схема трансверсального фильтра. Здесь $h(k)$, $k = 0,1,..., N - 1$ — коэффициенты фильтра, а каждый квадрат с z^{-1} обозначает задержку на один интервал дискретизации

Целью фильтрации является снижение шума в полезном сигнале. На рисунке 2.23, *а* показан исходный сигнал термоЭДС и оценка сигнала после его фильтрации.

В качестве ФНЧ выбран эллиптический фильтр (рисунок 2.22). АЧХ фильтра имеет пульсации заданной величины как в полосе пропускания, так и в полосе задерживания. За счет этого удается обеспечить максимально возможную крутизну ската АЧХ.

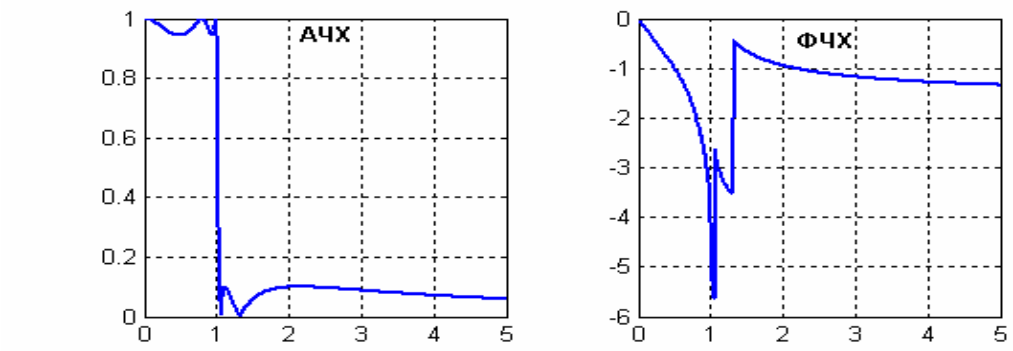


Рисунок 2.22. Характеристики эллиптического фильтра 5-го порядка с уровнем пульсаций в полосе пропускания 0,5дБ и в полосе задерживания 20дБ

Амплитудно-частотная характеристика фильтра описывается следующей формулой:

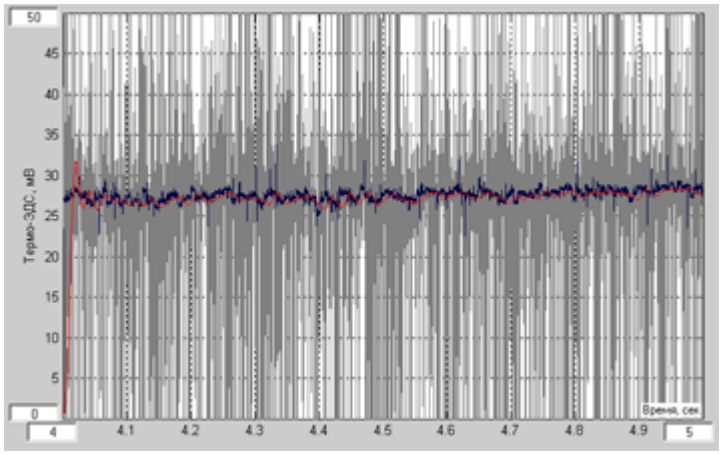
$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 R_n^2(\omega / \omega_0, L)}}, \qquad (2.12)$$

где ω_0 – частота среза;

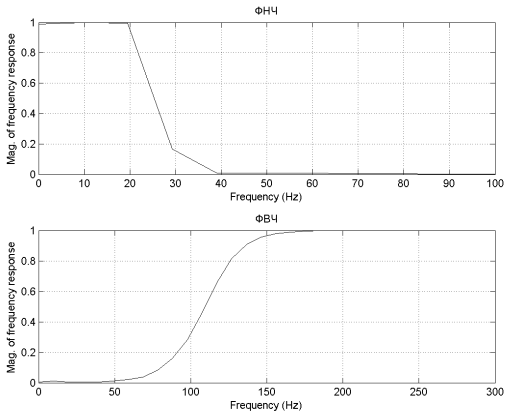
n – порядок фильтра;

$R_n^2(...)$ – рациональная функция Чебышева n-го порядка;

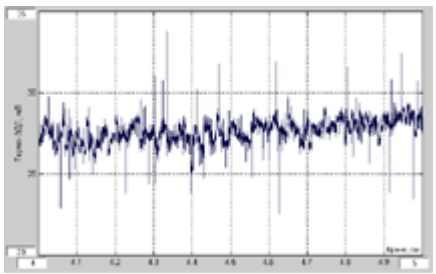
ε и L – параметры, определяющие величину пульсаций в полосах пропускания и задерживания.



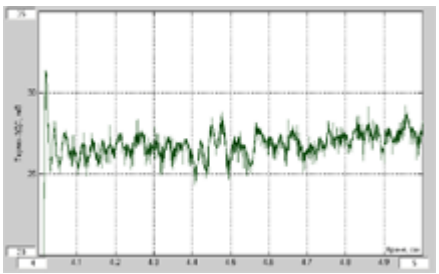
а – Исходный сигнала от датчика термоЭДС (серый); вычисление медианы (синий); сигнал медианы, пропущенный через ФНЧ (красный)



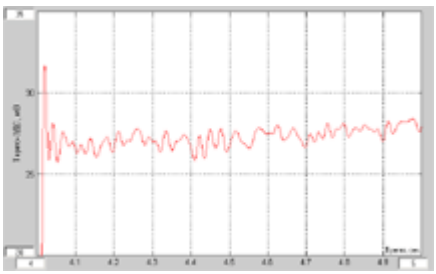
б – АЧХ фильтров высокой и низкой частоты



в – Сигнал после взятие медианы



г – Сигнал термоЭДС после пропускания через ФНЧ



д – Медиана, пропущенная через ФНЧ

Рисунок 2.23. Результат фильтрации сигнала от датчика ТЭДС

Фрагмент программы для расчета фильтра и фильтрации сигнала приведен в приложении А. АЧХ фильтров высоких и низких частот представлены на рисунке 2.23, *б*. Разложение сигнала от датчика термоЭДС (измеряемый методом естественной термопары) при обработке сплава ХН73МБТЮ резцом ВК8 при *V*=35м/мин; *s* = 0.1 мм/об; t = 0.1мм, *h*з=0,01мм представлен на Рисунок 2.23, *а*.

Высокий уровень помех не позволяет оценить уровень полезного сигнала (Рисунок 2.23, *а*) до пропускания сигнала через фильтр. После извлечения низкочастотной составляющей спектра (Рисунок 2.23, *г*) уровень сигнала может быть надежно оценен, однако имеет смещение на 1мВ (4% от измеряемой величины) и временную задержку в 0,01 с. Для снижения погрешности предварительно производим вычисление медианы (Рисунок 2.23, *в*). Вновь вычисленный сигнал имеет погрешность не более 2 % (Рисунок 2.23, *д*). В дальнейшем при анализе экспериментальных данных мультипликативная составляющая погрешности фильтрации учитывается и устраняется в расчетах за счет введения поправочных коэффициентов.

2.3.2.1.Разработка адаптивного фильтра

Адаптивный фильтр действует по принципу оценивания статистических параметров поступающего сигнала и подстройки собственной переходной характеристики таким образом, чтобы минимизировать некоторую функцию стоимости. Адаптивные фильтры обычно состоят из двух отдельных частей: фильтра, структура которого рассчитана на выполнение искомой функции обработки информации, и адаптивного алгоритма для подстройки параметров (коэффициентов) этого фильтра (рисунок 2.24).

Большое количество возможных комбинаций структур фильтра и законов адаптивного управления ими приводит к большому разнообразию адаптивных фильтров.

В литературе встречается следующая условная классификация [6]:

- адаптивные фильтры с конечной импульсной характеристикой;
- адаптивные фильтры с бесконечной импульсной характеристикой;

- решетчатые фильтры с оцениванием рекурсивным методом;
- адаптивные фильтры с адаптацией в частотной области.

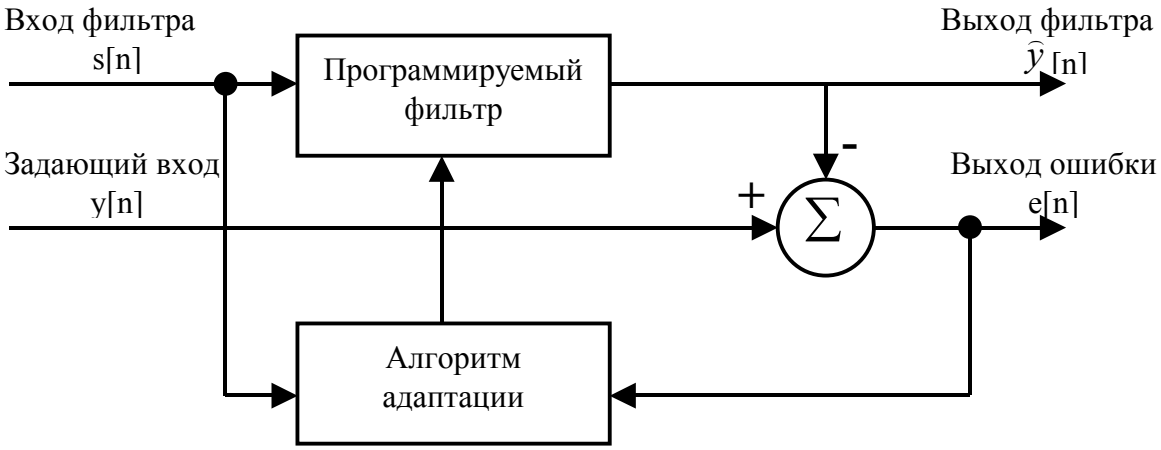


Рисунок 2.24. Блок-схема адаптивного фильтра

Как было указано выше, в сигнале, снимаемом с платы АЦП, присутствуют помехи разной частоты. В частности, помехи, возникающие вследствие наводок промышленной сети с частотой 50 Гц. Частота промышленной сети не является величиной постоянной, а может изменяться в пределах +/- 5%. Поэтому необходимо разработать такой фильтр, который в процессе работы может подстраиваться под амплитуду и фазу наводки и осуществлять ее полную компенсацию.

Устранение помехи заключается в простом вычитании из входного сигнала некоторого компенсирующего сигнала, сформированного фильтром. Рассмотрим решение этой задачи построения компенсатора в случае гармонической помехи с известной частотой.

Пусть $\{xn\}$ – сигнал на входе и $\{yn\}$ – сигнал на выходе, n = 1,2,.... Поскольку помеха аддитивная, то $yn = xn - an$, где an – рассчитанные фильтром отсчеты компенсирующего сигнала. Мы считаем, что $a_n = A\sin\Theta_n$, где A – неизвестная амплитуда сетевой наводки и Θ_n – текущее значение аргумента синусоидальной функции. Пусть

$$a_{n+1} = A\sin(\Theta_n + \delta), a_n = A\sin\Theta_n, a_{n-1} = A\sin(\Theta_n - \delta), \qquad (2.13)$$

тогда из тригонометрической формулы $\sin(\Theta+\delta) = 2\cos\delta\sin\Theta - \sin(\Theta-\delta)$ следует

$$a_{n+1} = 2\cos\delta a_n - a_{n-1}. \qquad (2.14)$$

Таким образом, по двум известным соседним отсчетам синусоиды можно найти следующее значение. Это обстоятельство положено в основу подавления сетевой помехи. Константа δ находится из условия $\delta=2\pi F_0/F_d$, где F_0 – частота (в герцах) сетевой помехи и F_d – частота дискретизации сигнала. Например, если F_0=50 Гц и F_d=1000 Гц, то δ=0,1π и cosδ =0,95107.

Опишем схему фильтрации сигнала. Предположим, что *n*-м шаге известно предыдущие значения *xn*-1 и *an*-1, *an*. Тогда для выходного сигнала имеем:

yn=*xn*-*an, yn*-1=*xn*-1-*an*-1.

Рассмотрим разность

Δy=*yn*-*yn*-1=(*xn*-*an*)-(*xn*-1-*an*-1)

Считается, что чем точнее определены отсчеты компенсирующего сигнала a_{n-1} a_n , тем лучше разность Δ*y* приближается к нулю. Для реализации фильтра необходимо задать a_0, a_1 и шаг адаптации Δa.

Алгоритм программы фильтрации:

1. *n*:=1; a_0:=0; a_1:=0; x_0:=0;
2. Δ*y*:=(x_n-a_n)-(x_{n-1}-a_{n-1})
3. если Δ*y*=0, то переход к 9, иначе – на следующий шаг;
4. если Δ*y*>0, то переход на следующий шаг, иначе a_n:=a_n-Δa и переход к 6;
5. a_n:=a_n+Δa;
6. y_n:=x_n-a_n;
7. a_{n+1}=2cosδa_n-a_{n-1};
8. *n*:=*n*+1;
9. если конец сигнала, то на следующий шаг, иначе – к п. 2;
10. конец.

Наибольшее значение для качества фильтрации оказывает выбор шага адаптации Δ*a*. При больших значениях Δ*a* фильтр настраивается быстро, но искажает полезный сигнал, при уменьшении Δ*a* искажения сигнала становятся меньше, но увеличивается время настройки.

Результаты:

1. По экспериментальным данным рассчитан динамический диапазон сигнала ТЭДС, оценено быстродействие датчика ТЭДС, определены требования к разрядности АЦП.

2. Разработан и экспериментально проверен метод извлечения постоянной составляющей, обеспечивающий несмещенную состоятельную оценку сигнала ТЭДС.

3. Разработан и программно реализован алгоритм адаптивной фильтрации сетевой помехи.

2.3.3.Измерение электрической проводимости контакта «инструмент-деталь»

Измерение электрической проводимости контакта «инструмент-деталь» (ЭП КИД) производится по методу [42]. На контакт «инструмент-деталь» подводится постоянный ток эталонной амплитуды $I_Э$. После задержки времени τ, обусловленного временем переходного процесса в цепи СПИД, производится измерение полного напряжения U, которое складывается из суммы двух составляющих: напряжения, индуцируемого пропускаемым током $I_Э R_{КИД}$ и термоЭДС Е. Сопротивление контакта зависит от формы контакта, который изменяется в процессе износа инструмента. Электропроводимость КИД будет определяться по следующей формуле:

$$G_{КИД} = \frac{1}{\mathrm{R}_{КИД}} = \frac{I_Э}{\mathrm{U - E}} \qquad (2.15)$$

Для одновременного измерения параметров сигнала ТЭДС, ЭП КИД на постоянном и переменном токах было разработано «Устройство измерения ЭП КИД».

Устройство измерения ЭП КИД предназначено для измерения сигналов термоЭДС и ЭП КИД на постоянном и переменном токе. Имеет аналоговый выход +/- 15В, который может быть использован вторичным измерительным преобразователем или устройством регистрации и обработки сигнала (самописец, АЦП ЭВМ и т.д.) (таблица 2.3). Благодаря ограничителю в выходном каскаде усилителя, сигнал с выхода прибора не превышает +/- 15В даже в момент размыкания и замыкания цепи, что делает возможным его безопасное использование совместно с платой АЦП.

Совместно с ЭВМ при обработке токопроводящих материалов может быть использован для идентификации текущего износа инструмента, интенсивности износа, прогноза состояния инструмента. Раннего выявления дефектов инструмента.

Таблица 2.3. Технические характеристики «Устройство измерения ЭП КИД»

Измеряемые величины	термоЭДС, электропроводимость
Входной амплитудный диапазон	-200 ÷ 200 мВ
Сила тока эталонных импульсов	5;10;20;40 А
Частота эталонных импульсов	(250; 500; 750)Гц
Частота высокочастотных импульсов	2.5÷10кГц
Коэффициенты усиления	25; 50; 75; 100
Рабочий частотный диапазон в режиме «усилитель»	0 ÷ 400 Гц
Рабочий частотный диапазон в режиме «генератор»	2.5 – 10 кГц
Основные пределы погрешностей	+/- 1.5%

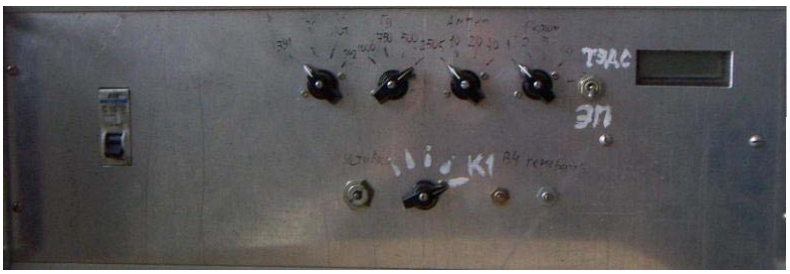


Рисунок 2.25. Внешняя панель устройства измерения ЭП КИД

Устройство измерения имеет аналоговый выход 0-15 В для измерения электрических параметров на различных режимах работы.

Режим 1. Подача на контакт «инструмент-деталь» (КИД) импульсов тока эталонного значения (5;10;20;40 А) с частотой (250; 500; 750)Гц. Измерение термоЭДС происходит в период отсутствия импульса тока. В момент подачи импульса тока происходит измерение суммарного падения напряжения: электропроводимости контакта «инструмент-деталь» и термоЭДС. Измеренный сигнал в диапазоне 0 – 200 мВ усиливается с коэффициентом усиления 75; 150; 300; 450.

Режим 2. На КИД подаются «пакеты» импульсов тока эталонного значения (5; 10; 20; 40 А) с плавно регулируемой частотой 2,5 – 10 кГц, частота следования «пакетов» (250; 500; 750)Гц.

Режим 3. Последовательное включение Режима №1, Режима №2.

Режим 4. Подача на контакт «инструмент-деталь» (КИД) синусоидальной полуволны импульса тока 100 А с частотой (250; 500; 750)Гц.

Режим 5. Последовательное включение Режима №3, Режима №4.

Режим 6. Измерение ТЭДС (предназначен для тарировки измерительных каналов).

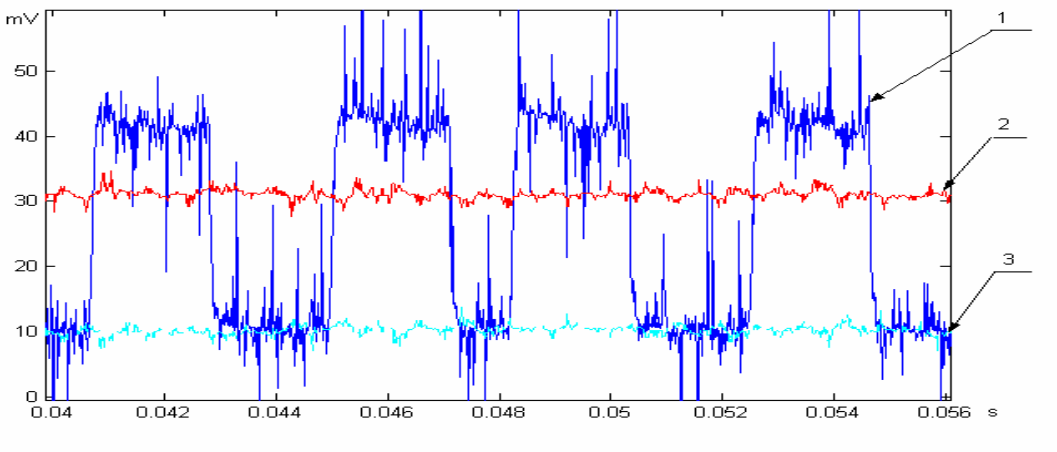


Рисунок 2.26. Графики измеряемых сигналов с контакта «инструмент-деталь» (КИД). Канал №1 – напряжение на КИД; Канал №2 – термоЭДС на КИД; канал №3 – напряжение, пропорциональное сопротивлению КИД

Схема измерения ЭП КИД и осциллограмма изменения электропроводимости в зависимости от пути резания представлена на рисунке 2.27.

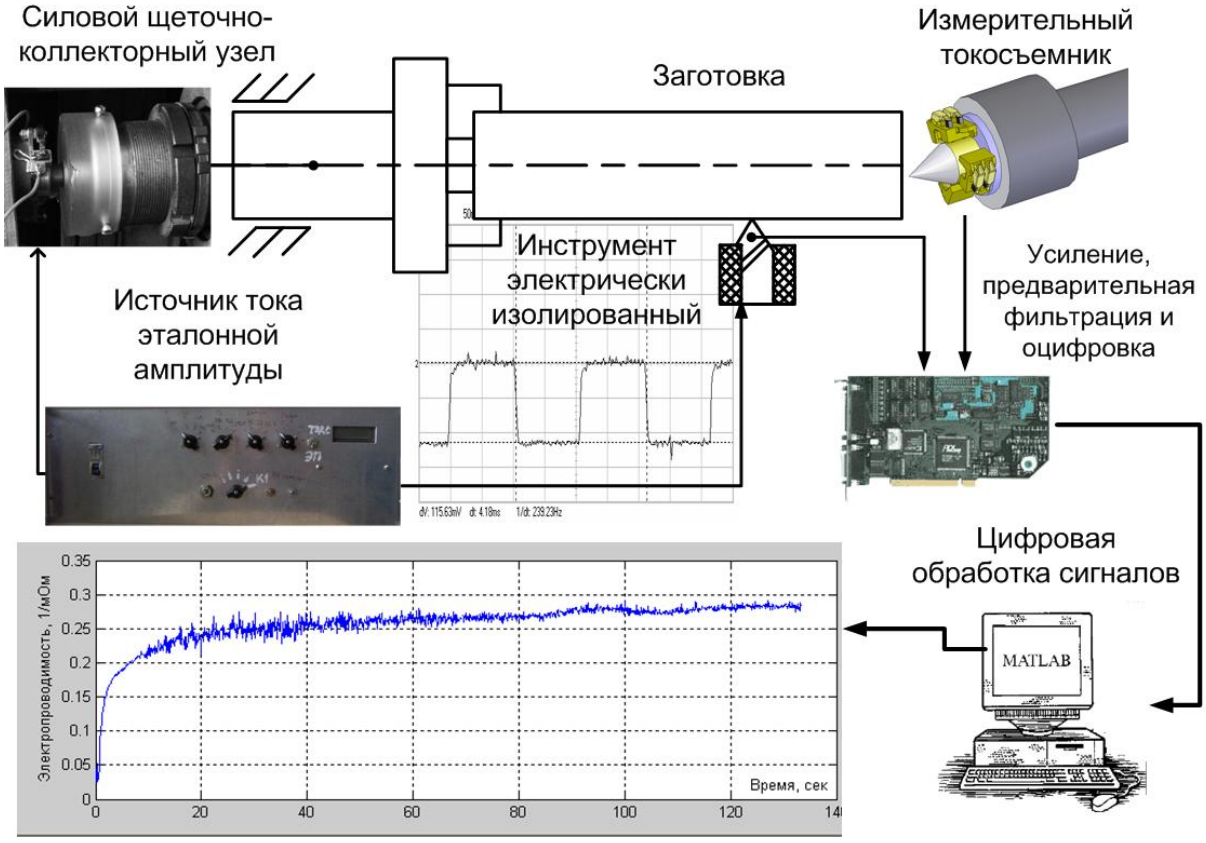


Рисунок 2.27. Схема измерения ЭП КИД

Быстродействие измерительного устройства определяется частотой генератора импульсов, а последняя ограничивается частотой собственных колебаний электрического контура инструмент – деталь – станок (Рисунок 2.28).

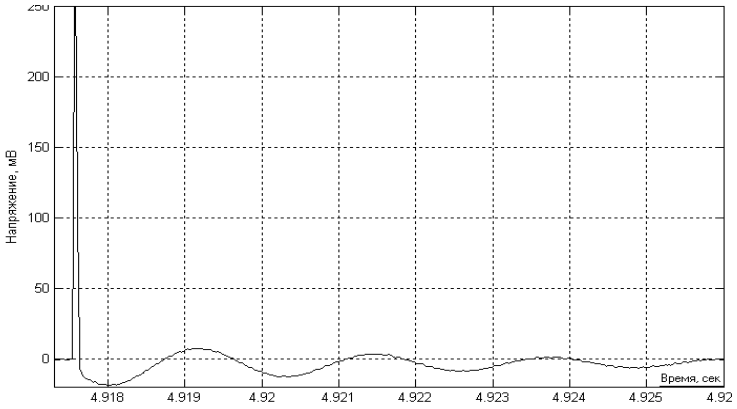


Рисунок 2.28. Исследование частоты собственных электромагнитных колебаний системы СПИД. (f = 454,5 Гц)

Частота собственных колебаний может меняться в процессе механической обработки [84]. Проведенные экспериментальные исследования (подтвержденные [42]) показывают, что снижение частоты измерительных импульсов ниже 250 Гц не приводит к повышению точности результатов.

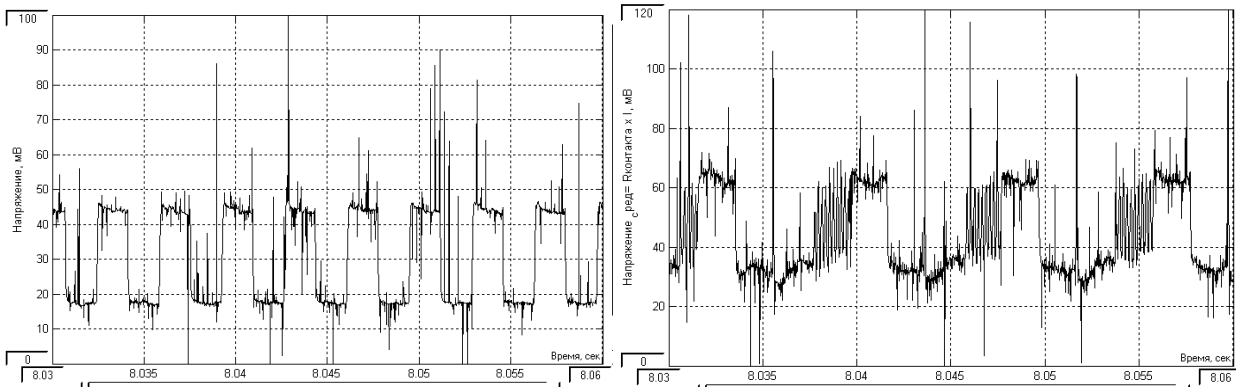


Рисунок 2.29. Напряжение на контакте «инструмент-деталь» при резании в условиях действия помех: а – режим измерения термоЭДС и постоянной составляющей ЭПКИД; б – Режим измерения ТЭДС, постоянной и переменной составляющей ЭПКИД

Таким образом, быстродействие измерения только постоянной составляющей ЭП КИД составляет 8мс, а одновременное измерение постоянной и переменной составляющей ЭП КИД 16 мс (Рисунок 2.28).

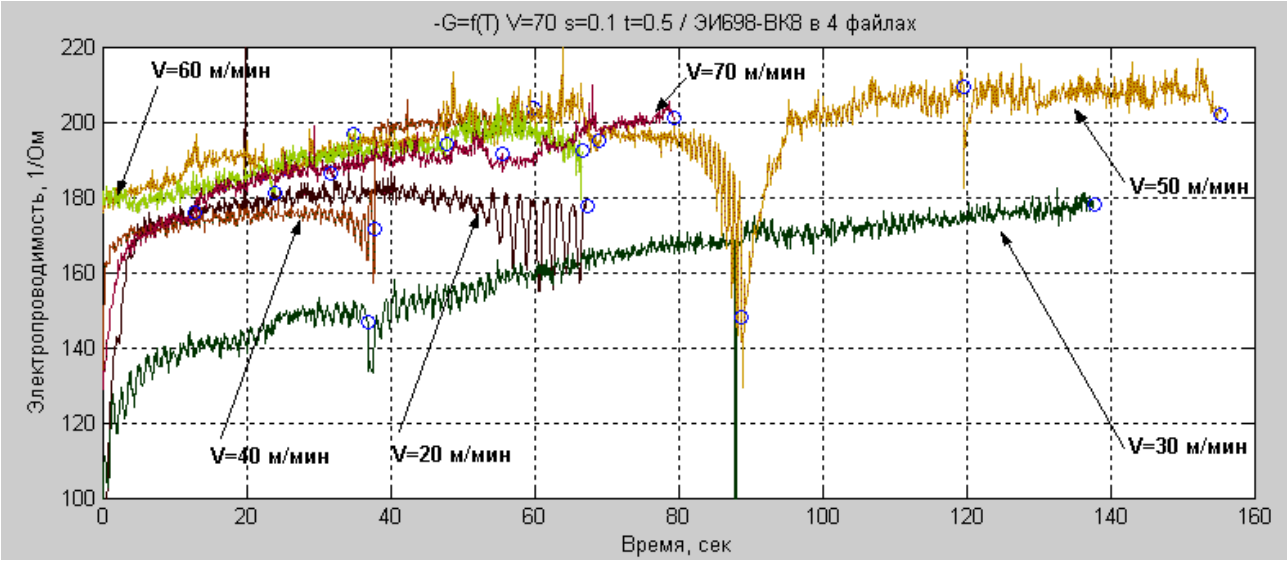


Рисунок 2.30. Осциллограмма сигнала ЭП КИД при продольном точении сплава ЭИ698 инструментом марки ВК8, s=0,1 мм/об; t = 0,5мм с напайными пластинами

Для оценки точности метода измерения была произведена серия экспериментов для продольного точения сплава ХН73МБТЮ-ВД проходными резцами ВК8 со следующей геометрией инструмента: $\gamma = \lambda = 0°$, $\alpha = 10°$, $\varphi = \varphi_1 = 45°$, r = 0,5 мм. (Рисунок 2.30).

Анализ статистических характеристик сигнала позволил установить зависимость между быстродействием и точностью измерения (Таблица 2.4).

Таблица 2.4. Исследование зависимости между точностью и быстродействием датчика ЭП КИД

Быстродействие измерения ЭП КИД на постоянном токе, T_{-G}, мс	Быстродействие измерения ЭП КИД на постоянном и переменном токе, $T_{\sim G}$, мс	Погрешность измерения, Δ, %
8	16	5
32	64	2,5
64	128	1

Границей снижения быстродействия датчика является $2 \cdot f_{об}$, где $f_{об}$ – частота оборотной подачи шпинделя. При дальнейшем снижении на оценку значения ЭП

КИД будет оказывать влияния колебаний значения ЭП КИД за оборот, что снижает точность на 5 – 10%. Оптимальной с данных позиций является частота ~10 Гц.

Результаты:

1. Доработано устройство измерения электрической проводимости контакта «инструмент - деталь», отличающегося от аналогов [1, 38]:

- возможность одновременной регистрацией термоЭДС, постоянной и переменной составляющей ЭП КИД;
- цифровой регистрацией контролируемых параметров;
- высокой частотой регистрации параметров.

2. Экспериментально оценена точность метода измерения ЭП КИД, динамический и частотный диапазон регистрируемого сигнала. Определено оптимальное по точности быстродействие устройства регистрации ЭП КИД.

2.3.4.Измерение сигнала виброакустической эмиссии

Измерение сигнала ВАЭ производится по схеме [149], представленной на рисунке 2.31.

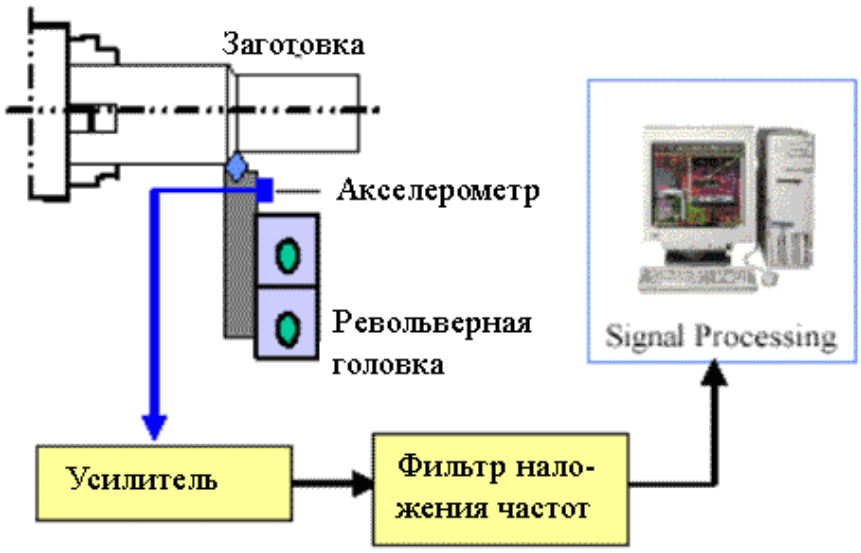


Рисунок 2.31. Схема измерения вибрации

Пьезоэлектрический датчик при этом размещается на державке инструмента в направлении подачи. Анализ сигнала во временной области без обработки невозможен (рисунок 2.32).

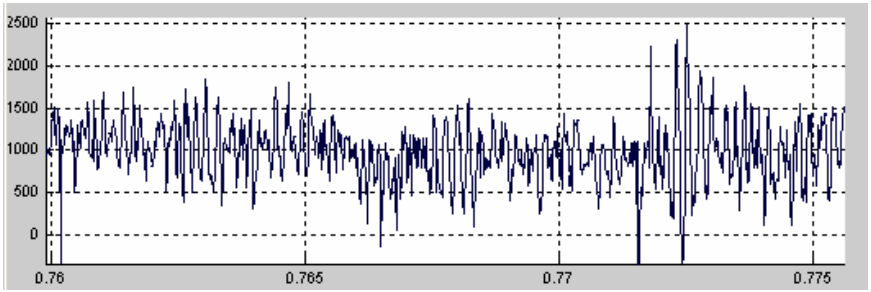


Рисунок 2.32. Сигнал вибрации во временной области.

В соответствии с исследованиями [107], зависимости между частотами колебаний и источниками доминирующих частот спектра колебаний представлены в Таблица 2.5.

Таблица 2.5.Зависимость частотных гармоник спектра виброакустических колебаний от источника

Частота колебаний	*Источник доминирующей частоты спектра колебаний*
70 – 90 Гц	Заготовка – подсистема стола станка
395 – 405 Гц	Шпиндель – режущий инструмент
10 – 12 кГц	Державка в двух различных гармониках колебаний
15 – 16 кГц	Режущая пластина

Временной ряд мгновенных измерений виброускорений, получаемый с датчиком ВАЭ, имеет большой объем выборки и неинформативен без обработки. Для решения задач идентификации износа инструмента требуется извлечение из цифрового ряда информативных параметров.

2.3.5.Методы извлечения информации из сигналов ВАЭ

В настоящее время для анализа сигналов виброакустической эмиссии предложены следующие методы: Фурье-анализ; Wavelet-анализ; анализ фазового портрета (аттрактора). Проведем анализ каждого из методов с целью выбора наиболее эффективного.

2.3.5.1.Преобразования Фурье и спектр мощности

Традиционно для анализа сигналов вибрации и волн акустической эмиссии использовался Фурье-анализ [11, 12, 16, 34, 47, 58, 59, 82, 83 и др.]. Эта тема является предметом рассмотрения огромного числа книг и статей и лежит в основе целых отраслей прикладной математики – спектрального анализа [112] и цифровой фильтрации [113]. Коснемся кратко некоторых моментов.

Согласно теореме Вейерштрасса, с помощью тригонометрического многочлена можно сколь угодно точно представить любую непрерывную на отрезке $[a,b]$ функцию $\eta = F(t)$ при $F(a) = F(b)$. Обратимся к практике применения этой идеи в случае временного ряда. Будем считать, что ряд эквидистантный с четным числом точек N, интервал выборки Δt, $a = t_1$, $b = a + N \cdot \Delta t = t_N + \Delta t$. Можно показать, что исходный сигнал $\{\eta(t_i)\}_{i=1}^{N}$ может быть однозначно представлен во все моменты наблюдений в виде суммы

$$\{\eta(t_i)\} = a_0 + \sum_{k=1}^{N/2} a_k \cos(k\omega t_i) + \sum_{k=1}^{N/2-1} b_k \sin(k\omega t_i), i = 1,..,N \,, \tag{2.16}$$

где основная частота есть $\omega = \dfrac{2\pi}{b-a} = \dfrac{2\pi}{N\Delta t}$. Коэффициенты тригонометрического многочлена (2.16) находятся по простым формулам

$$a_0 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \eta_i, a_{N/2} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (-1)^i \eta_i, \tag{2.17}$$

$$a_k = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} \cos(k\omega t_1), k = 1,\ldots, N-2/1, \tag{2.18}$$

$$b_k = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}\eta_i \sin(k\omega t_1), k = 1,\ldots N-2/1, \qquad (2.19)$$

Формулы (2.17) – (2.19) переводящие значения η_i в коэффициенты a_k и b_k, называются прямым дискретным преобразованием Фурье (ДПФ). Формула (2.16), обеспечивающая расчет η_i по a_k и b_k, называется обратным ДПФ. С помощью тригонометрических многочленов часто можно получить достаточно хорошую аппроксимацию непрерывной на отрезке функции *F*(*t*). Подчеркнем, что тригонометрическая система особенно полезна и не имеет «конкурентов» при аппроксимации периодических функций.

Мощность сигнала распределяется по частотам:

$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\eta_i^2 = \sum_{k=0}^{N/2} S_k \ , \qquad (2.20)$$

где *Sk* есть мощность гармонической составляющей с частотой *k*ω: $S_k = \left(a_k^2 + b_k^2\right)/2$ при $1 \le k < N/2$, $S_k = a_k^2$ при $k = 0, N/2$. Физически наблюдаемый сигнал часто представляет собой суперпозицию сигналов от нескольких источников. Если эти источники демонстрируют гармонические колебания каждый со своей частотой, то в наблюдаемом сигнале их интенсивность будет отражена величиной S_k на соответствующей частоте. Коэффициенты S_k, помимо решения задачи фильтрации сигнала, позволяют выявить присутствие и значимость различных источников колебаний. Если каждую значимую частоту связать с колебаниями одного гармонического осциллятора, то число таких существенных частот равно *числу степеней свободы*, вовлеченных в процесс. Поскольку полная мощность сигнала, согласно (2.20), представляется в виде набора (спектра) нескольких составляющих, то этот набор *Sk* называют *спектром мощности* процесса η (*t*). Строго говоря, это лишь оценка спектра мощности (Рисунок 2.33).

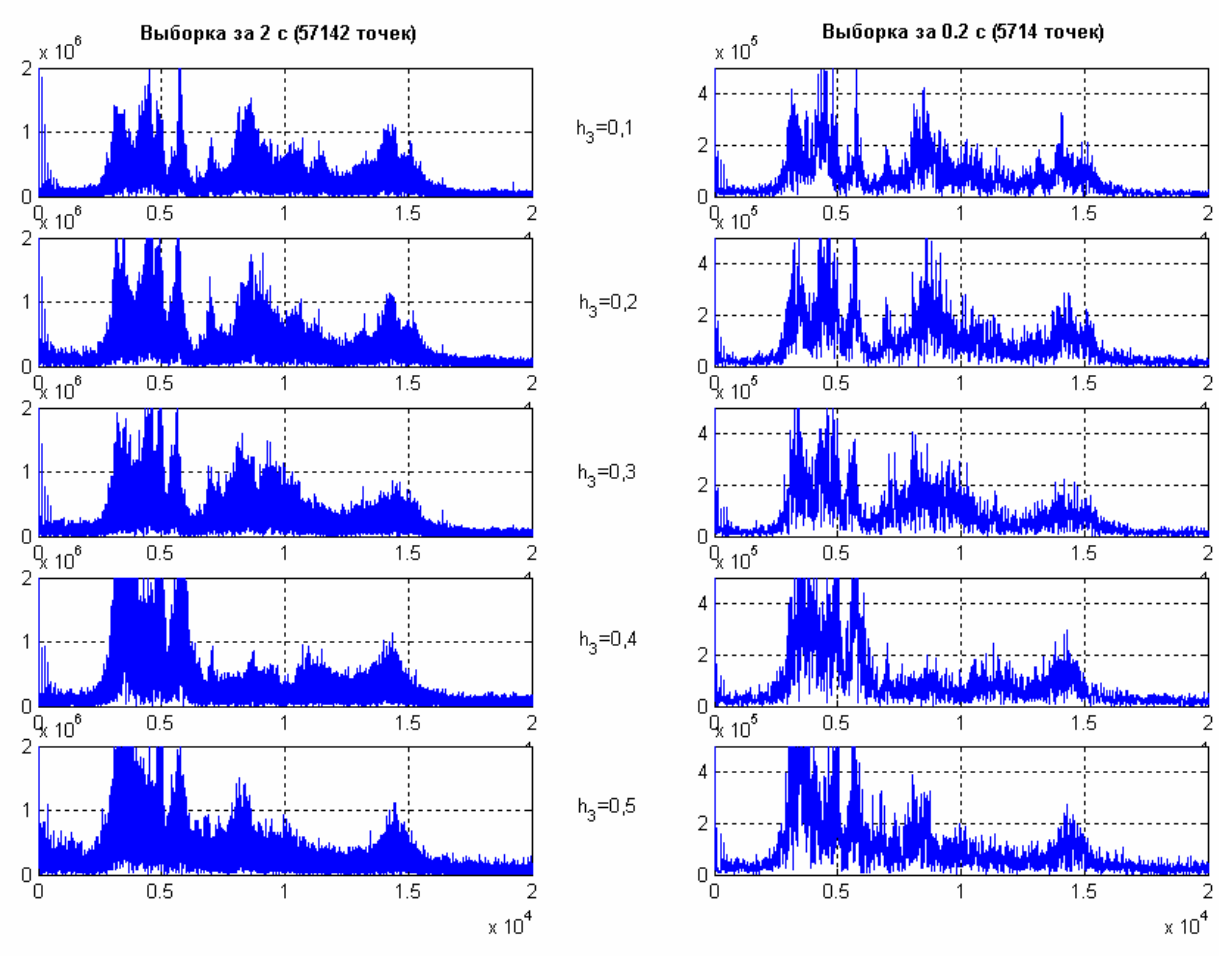


Рисунок 2.33. Оценка спектра мощности сигнала виброакустической эмиссии, полученного при продольном точении ЭИ698 резцом ВК8 (V = 40 м/мин; *s*=0,075 м/об; *t* = 0,5 мм). $f_д$=57,143 кГц.

Понятие спектра мощности так легко вводится только для детерминированной периодической функции η(t) с периодом 2π/ω , поскольку она однозначно представляется в виде тригонометрического ряда Фурье

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty}\left[a_k \cos(k\omega t_i) + b_k \sin(k\omega t_i)\right], \qquad (2.21)$$

все коэффициенты которого в общем случае ненулевые и выражаются через интегралы от исходной функции η (*t*).

Сигнал виброакустической эмиссии, принимаемый датчиками, является конечным, нестационарным, частично стохастическим. Таким образом, оценка спектра мощности зависит от длины числового ряда, выбранного в качестве базового (см. Рисунок 2.33). При увеличении длины отрезка спектр-сигнала

«размазывается», при малой длине выборки результат не обладает статистической устойчивостью.

Если основная мощность содержится только в низких частотах, то приближение достаточно точно. Однако известно явление мимикрии (маскировки) частот, которое состоит в следующем. В модель (2.16) входит максимальная частота ωN/2 =π/Δt, которую называют частотой Найквиста. Период соответствующей компоненты равен двум интервалам выборки. Составляющие с частотами kω, большими частоты Найквиста, в точках временного ряда являются линейной комбинацией базисных функций, входящих в (2.16): если их добавлять в модель, то более низкие частоты нужно исключать, чтобы обеспечить линейную независимость базисных функций. Другими словами, составляющие с более высокими частотами нельзя отличить от низкочастотных составляющих, например,

$\cos((N\,2 + k)j\omega\Delta t) = \cos(\pi j + k\omega j\Delta t) = (-1)j\cos(jk\omega\Delta t)$, где $k > 0$, $t\,j = \mathrm{j}\Delta t$.

Одни как бы «маскируются» под другие. Еще сложнее ситуация в случае непериодической функции η (t). Такая функция не может быть представлена точно в виде ряда (2.20) на всей оси.

Результаты разложения сигнала ВАЭ в ряд Фурье показывают (см. Рисунок 2.33), что мощность сигнала локализована в области низких частот, что освобождает от необходимости дополнительной фильтрации высокочастотной составляющей сигнала.

Полученная прямая оценка спектральной плотности мощности сигнала ВАЭ для нестационарного сигнала обладает принципом неопределенности, согласно которому улучшение разрешения по одному параметру (частоте или времени) ведет к ухудшению разрешения по другому параметру. Т.е. пытаясь определить точнее частоту, на которой энергия спектра имеет максимум, снижаем достоверность оценки. При повышении достоверности неизбежно «размывание» спектра и становится невозможна локализация частоты максимума энергии спектра.

2.3.5.2.Периодограммный метод вычисления спектральной плотности мощности

Прямой метод определения спектральной плотности мощности (СПМ) основан на вычислении квадрата модуля преобразования Фурье для бесконечной последовательности данных с использованием соответствующего статистического усреднения. СПМ, полученная без такого усреднения оказывается неудовлетворительной, поскольку среднеквадратичная ошибка такой оценки сравнима с ее средним значением.

Метод периодограмм, основанный на прямом преобразовании данных и последующем усреднении, обеспечивает получение гладких и статистически устойчивых спектральных оценок по конечному числу отсчетов.

В методе Бартлетта (Bartlett) анализируемый сигнал делится на неперекрывающиеся сегменты, для каждого сегмента вычисляется периодограмма, и затем эти периодограммы усредняются. Уэлч (Welch) внес в метод Бартлетта два усовершенствования: использование весовой функции и разбиение сигнала на перекрывающиеся фрагменты. Применение весовой функции позволяет ослабить растекание спектра и уменьшить смещение получаемой оценки спектра плотности мощности ценой незначительного ухудшения разрешающей способности. Перекрытие сегментов введено для того, чтобы увеличить их число и уменьшить дисперсию оценки. Алгоритм данного метода приведен в [90] (Рисунок 2.34).

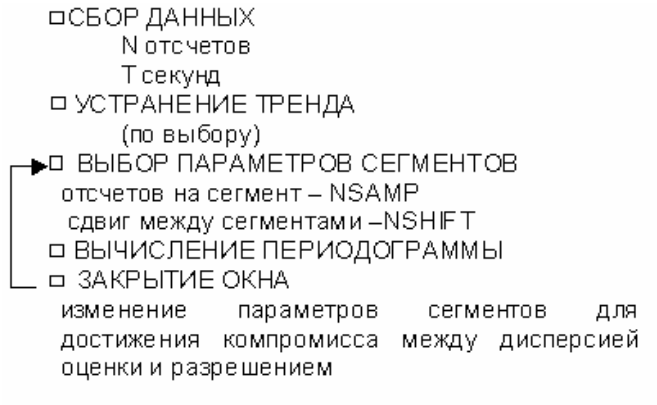


Рисунок 2.34. Основные этапы оценивания СПМ с помощью периодограммного метода

Применение метода начинается со сбора *N* отсчетов данных, которые берутся с интервалом T секунд на отсчет с последующим (по желанию) этапом устранения тренда. Для того чтобы получить статистически устойчивую спектральную оценку, имеющиеся данные необходимо разбить на перекрывающиеся сегменты и в последующем усреднить выборочные спектры, полученные по каждому такому сегменту. Параметры этого усреднения изменяются посредством соответствующего выбора числа отсчетов на сегмент (NSAMP) и числа отсчетов, на которое необходимо сдвинуть начало следующего сегмента (NSHIFT) (Рисунок 2.34). Количество сегментов выбирается в зависимости от требуемой степени гладкости (дисперсии) спектральной оценки и требуемого спектрального разрешения. При малом значении параметра NSAMP получается больше сегментов, по которым будет производиться усреднение, а следовательно будут получаться оценки с меньшей дисперсией, но также и меньшим частотным разрешением. Увеличение длины сегмента (параметра NSAMP) повышает разрешение естественно за счет увеличения дисперсии оценки из-за меньшего числа усреднений. Стрелка возврата на рисунке 2.35 указывает на необходимость нескольких повторных проходов по данным при различных длинах и количествах сегментов, что позволяет получить больше информации об исследуемом процессе.

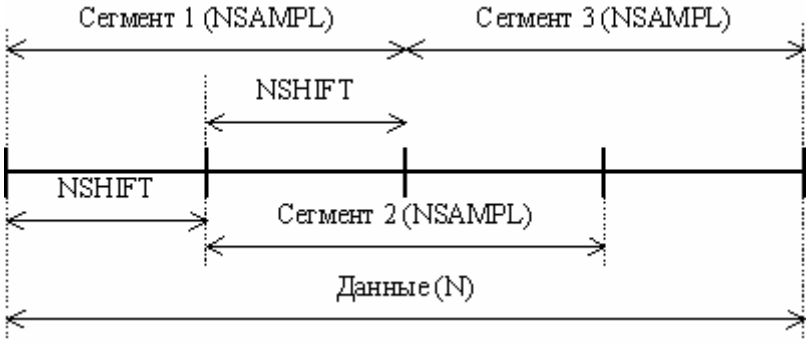


Рисунок 2.35. Разбиение данных на сегменты для вычисления периодограммы

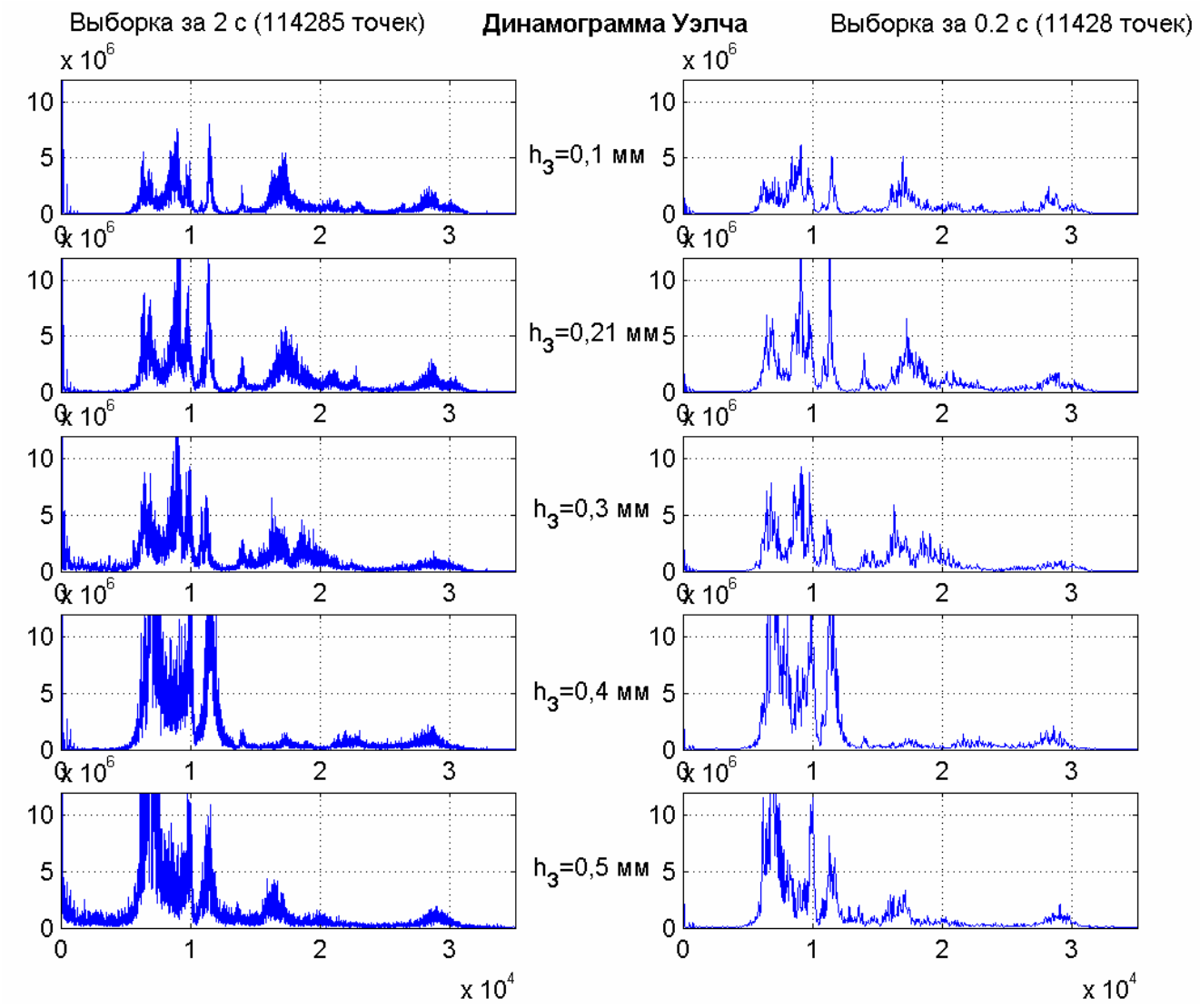


Рисунок 2.36. Периодограмма Уэлча сигнала виброакустической эмиссии, полученного при продольном точении ЭИ698 резцом ВК8 (V = 40 м/мин; s=0,075 м/об; t = 0,5 мм). $f_д$=57,143 кГц

Перекрытие соседних фрагментов сигналов равно половине длине окна. Используется окно Хэмминга, длина которого выбирается так, чтобы сигнал оказался разделенным на 8 фрагментов. Размерность БПФ используемого для вычисления периодограммы, равен 2^n, где n – ближайшая степень экспоненты по основанию 2 длина фрагмента сигнала.

Спектральная плотность мощности рассчитывается по следующей формуле:

$$W_x(\omega) = \frac{1}{Nf_д}\left|\sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{-j\omega kT}\right|^2, \qquad (2.22)$$

где $x(k)$ – реализация случайного процесса; N – число отсчетов одной реализации случайного процесса; $f_д$ - частота дискретизации.

Для наглядности эволюции частотных характеристик сигнала в процессе резания возможно применение спектрограмм (Рисунок 2.37).

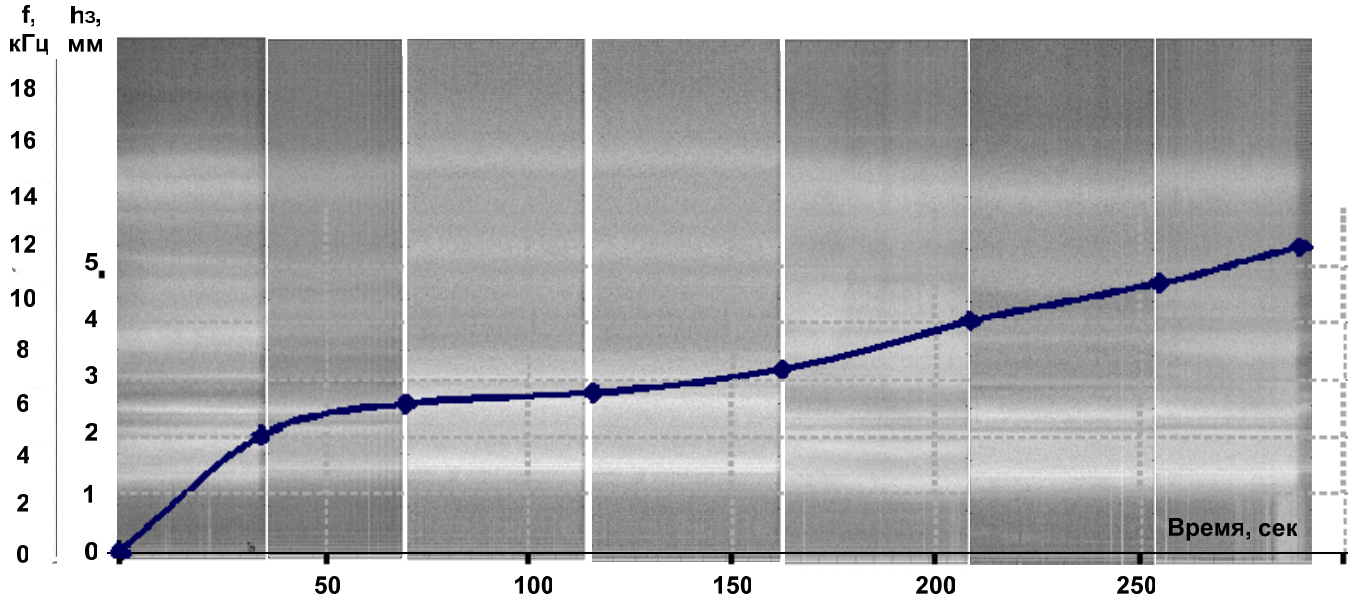


Рисунок 2.37. Спектрограмма сигнала виброакустической эмиссии, полученного при продольном точении ЭИ698 резцом ВК8 (V = 40 м/мин; s=0,075 м/об; t = 0,5 мм)

На спектрограмме более светлые участки соответствуют пикам спектра. Эквивалентно спектрограмме, спектральный анализ возможно провести на трехмерной диаграмме (Рисунок 2.38).

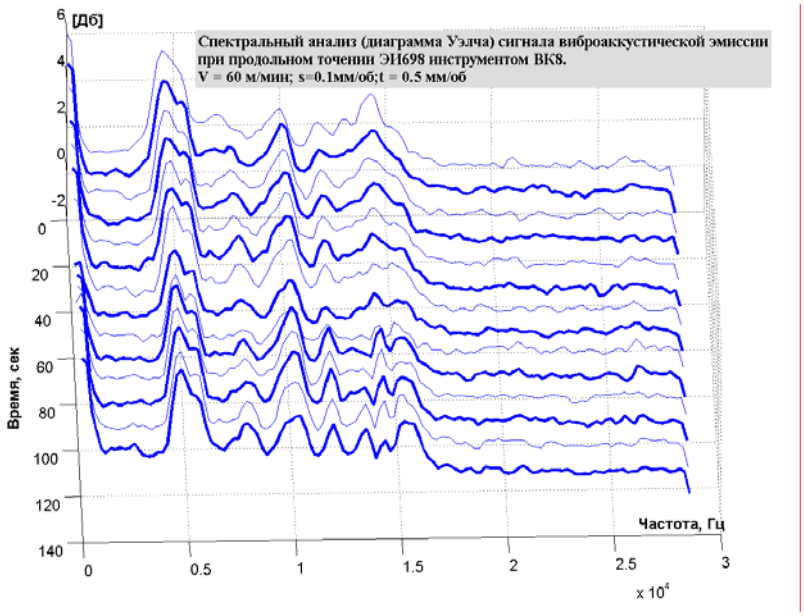


Рисунок 2.38. Представление спектра сигнала в 3D

Однако очевидны недостатки практического использования рядов Фурье при анализе сигналов, полученных в процессе резания. Базовая функция – синусоида явно неудачна для представления сигналов с локальными особенностями [30]. Бесконечное число членов в ряде Фурье недопустимо и нереально на практике, а их ограничение приводит к возникновению больших погрешностей (эффекта Гиббса [32]). Нестационарные сигналы можно подвергнуть анализу, используя оконное преобразование Фурье, но при заданных параметрах окна вступает в действие закон неопределенности, согласно которому улучшение разрешения по одному параметру (частоте или времени) ведет к ухудшению разрешения по другому параметру. Можно предположить, что это противоречие разрешимо путем перехода к адаптивному оконному преобразованию, при котором ширина окна адаптируется к особенностям сигнала, а число окон становится не вполне определенным. Однако при этом стоит весьма сложная задача выбора критерия адаптации и его реализации. Подавляющее большинство практических реализаций оконного преобразования Фурье базируется на применении окон одинаковой ширины и, таким образом, не решает проблему неопределенности частотного и временного разрешения.

2.3.5.3.Вейвлет-преобразование и вейвлет-спектры

Альтернативой оконному преобразованию Фурье и заодно его частному виду – обычному преобразованию Фурье – является вейвлет-преобразование. Для анализа функций η = $F(t)$, имеющих импульсный характер, разрывы, изломы и прочие особенности, весьма эффективным оказывается использование базиса, состоящего из функций $\phi_k(t)$, локализованных по времени и по частоте вейвлетов. В последние 20 лет они приобрели огромную популярность, см., например, обзорные работы [8, 30, 96] и ссылки в них.

«Многие исследователи называют вейвлет-анализ “математическим микроскопом”» [8]. По-английски «wavelet» (термин введен в 1984 г.) означает приблизительно «маленькая волна», но уже и в русскоязычной литературе принято использовать термин «вейвлет». Вейвлетом называют функцию φ (t), которая:

1) хорошо локализована по времени t (т.е. быстро стремится к нулю с ростом |t|) и по частоте (ее Фурье-образ тоже хорошо локализован);

2) имеет нулевое среднее $\int_{-\infty}^{\infty}\phi(t)dt = 0$;

3) удовлетворяет условию автомодельности (при изменении масштаба по времени число осцилляций не меняется).

На основе вейвлета можно построить систему функций путем его сдвигов и масштабных преобразований (сжатий и растяжений вдоль оси t).

Полученные функции удобно обозначать двумя индексами:

$$\phi(t) = 2^{j/2}\phi(2^j t - k),\ -\infty < j,k < \infty, \qquad (2.23)$$

где j и k – целые числа.

Увеличение индекса j на единицу дает изменение масштаба по оси времени в 2 раза («сжатие» графика функции), а увеличение индекса k на единицу дает сдвиг графика функции $\varphi_{j,k}$ на интервал k/2j вправо вдоль оси t.

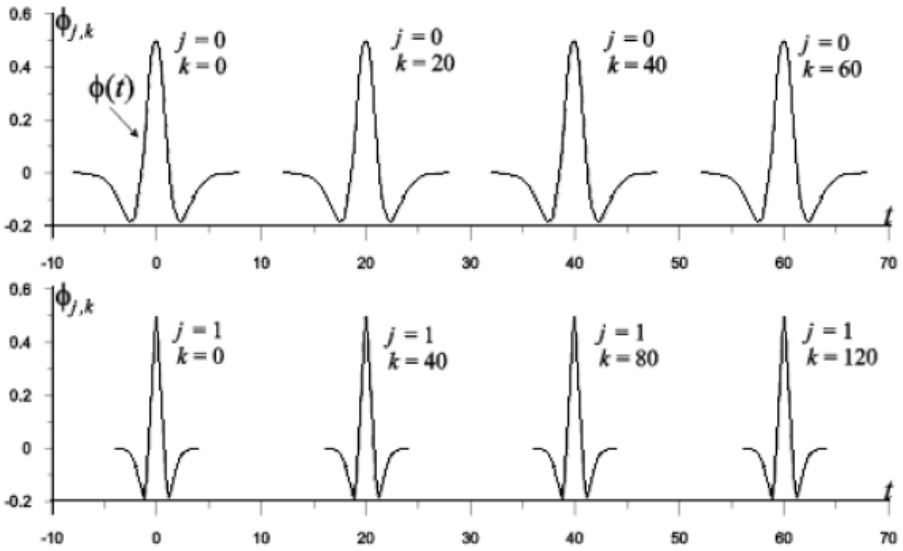


Рисунок 2.39. Пример вейвлета и конструирования на его основе системы базисных функций путем сдвигов (слева направо) и сжатий (сверху вниз) без учета нормировки

Сконструированная система локализованных функций $\varphi_{j,k}$ за счет сдвигов и растяжений покрывает всю ось *t*. При определенном выборе функции φ(t) она является базисом в пространстве функций, суммируемых с квадратом на всей оси (только тогда φ(*t*), строго говоря, и называют вейвлетом [29]). Базисные функции $\varphi_{j,k}$ часто называют вейвлет-функциями. Поскольку все они получены преобразованиями функции φ(*t*), то последнюю часто называют «материнской функцией». Примеры материнских функций очень разнообразны, библиотеки насчитывают сотни таких функций [95].

Прямое вейвлет-преобразование осуществляется, согласно правилу

$$W_\psi(a,b)f = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}}\int \frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)f(x)dx, \qquad (2.24)$$

где *a* и *b* – параметры, определяющие соответственно масштаб и смещение функции ψ, называемой анализирующим вейвлетом, C_Ψ — нормировочный множитель. Интегрирование ведут по всей числовой оси.

Базисный, или материнский вейвлет ψ, образует посредством растяжений и сдвигов семейство. $\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$

Вейвлет-анализ основан на получении набора аппроксимирующих $cA_1 = \{a_{j-1,k}\}$, и детализирующих $cD_1 = \{d_{j-1,k}\}$, коэффициентов, которые находятся по следующим формулам:

$$a_{j-1,k} = (f, \varphi_{j-1,k}) = \int_R f(x)\overline{\varphi}_{j-1,k}(x)dx, \tag{2.25}$$

где φ(x) – масштабирующая функция.

$$d_{j-1,k} = (f, \psi_{j-1,k}) = \int_R f(x)\psi_{j-1,k}(x)dx \tag{2.26}$$

,

где ψ(x) – анализирующий (материнский) вейвлет

j характеризует уровень разрешения. Чем больше *j*, тем более мелкие носители имеют функции $\varphi_{jn}(x)$. Тогда коэффициенты (f, φ_{jn}) более детально отражают свойства *f(x)*.

Коэффициенты cA_1 описывают более грубое (сглаженное) приближение функции *f(x)* в пространстве V_{j-1}, коэффициенты cD_1 характеризуют колебания функции *f(x)* относительно $P_{j-1}(f)$.

Графически это вейвлет-разложение на уровне вейвлет-коэффициентов можно изобразить в виде следующей диаграммы (рисунок 2.40):

$$P_j(f) = cA_0 \to \{cA_1, cD_1\} \to \{cA_2, cD_2, cD_1\} \to \ldots \to \{cA_N, cD_N, cD_{N-1}, \ldots, cD_1\},$$

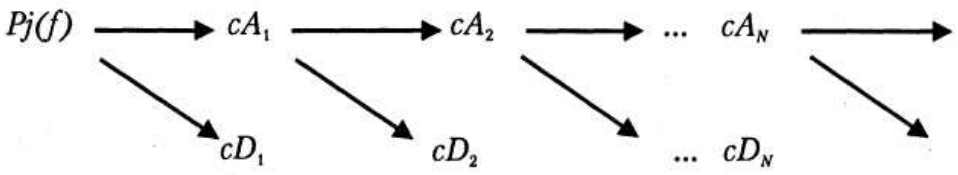


Рисунок 2.40. Вейвлет-разложение сигнала

Требуется провести анализ сигнала ВАЭ для определения размера анализируемого блока и информативной полосы частот, в области которых обнаруживаются изменения в процессе износа РИ, иными словами, определить кратность масштабного анализа.

Способности людей различать видимые изображения (картинки) развиты настолько, что при решении задач обработки образов мы можем конкурировать даже со специализированными компьютерами. Считается, что около 70 %

информации человек получает через глаза. Визуальный анализ данных об объекте, если они представлены в графической форме, может оказаться весьма полезным и эффективным – подсказать оптимальную размерность вектора, подходящий вид базовой функции вейвлета. Наиболее естественна визуальная оценка изображений временных реализаций процесса – графическая зависимость.

Для построения зависимости использован самый простой вид базового вейвлета – вейвлет Хаара. Наименьший фрагмент для анализа выбирается равный периоду вращения шпинделя ≈ 0,87 с. Оценку максимального масштаба произведем из следующих соображений. Центральная частота вейвлета Хаара равна Fr_{haar} = 0,9961 Гц. Поскольку период дискретизации Δt = 1/57142,86 с, центральная частота для первого уровня разложения (когда a=1) равна $Fr_{haar}(57142,86)$ =0,9961·57142,86 = 56,92 кГц. Для информативной полосы частот ВАЭ (источник доминирующей частоты – режущая пластина) от 10 до 15кГц, т.е $a_{10кГц}=56,92\cdot10^3/10\cdot10^3$ =5,7; $a_{15кГц}=56,92\cdot10^3/15\cdot10^3$ =3,8.

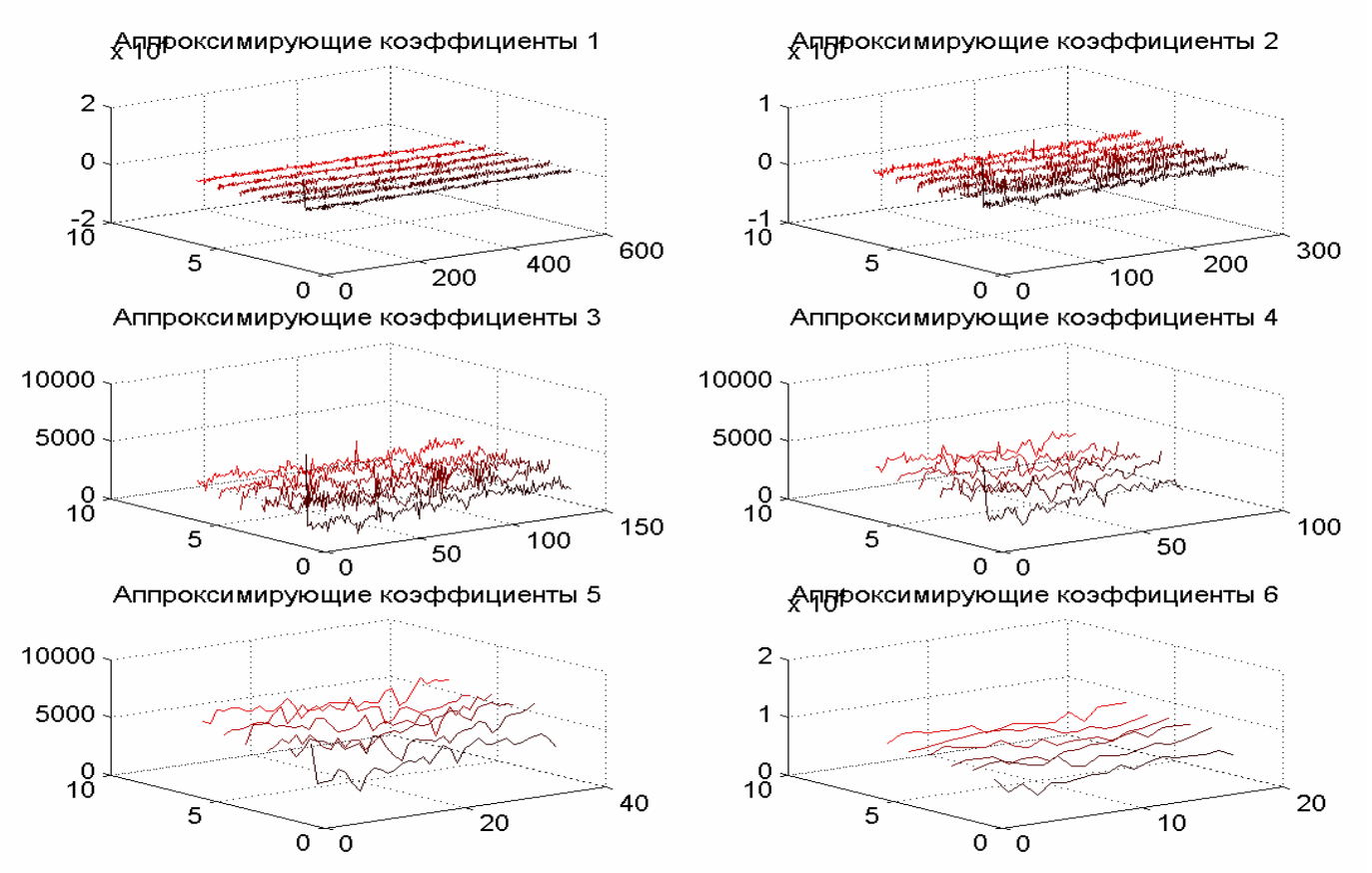


Рисунок 2.41. Аппроксимирующие коэффициенты разложения Хаара фрагментов сигнала вибрации длительностью 0,02 сек.

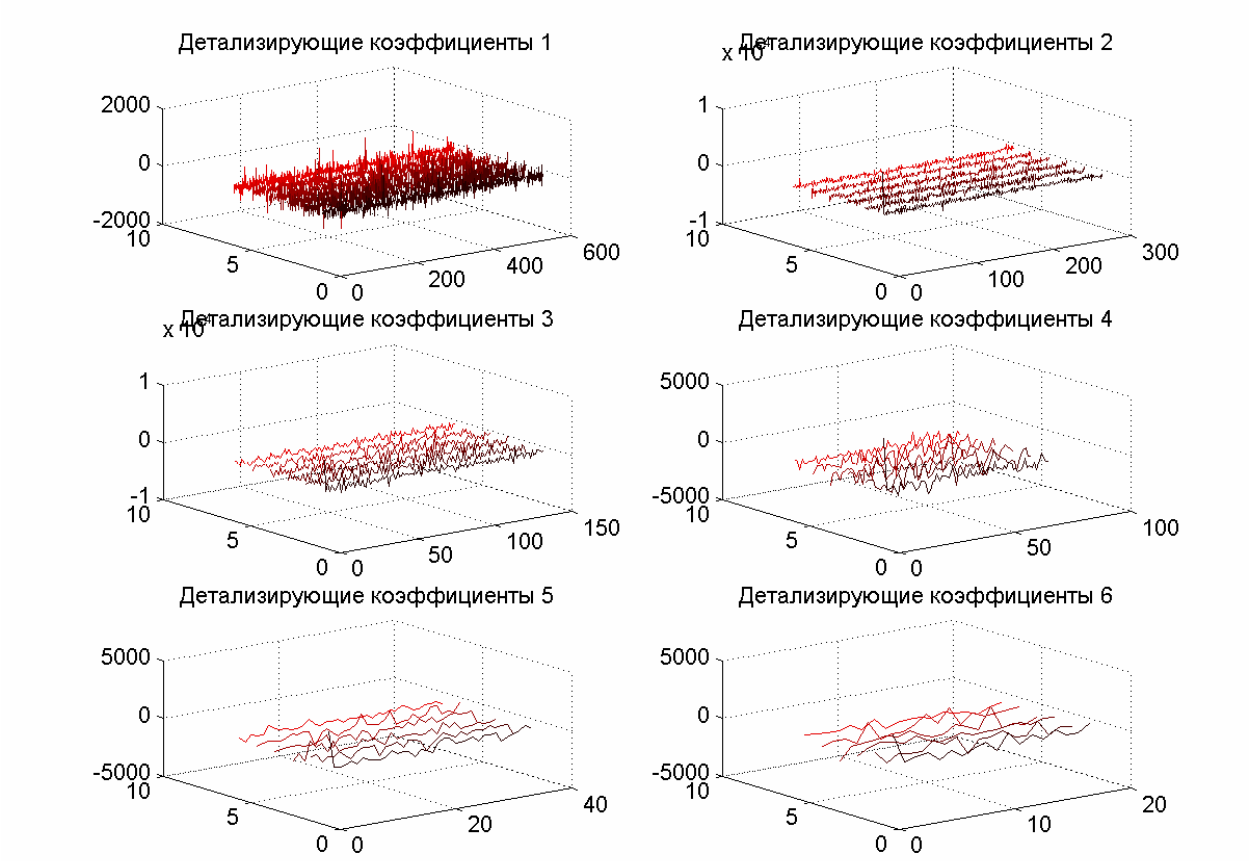


Рисунок 2.42. Детализирующие коэффициенты разложения Хаара фрагментов сигнала вибрации длительностью 0,02 сек через интервал времени 20 сек при продольном точении, ЭИ698 - ВК8; V = 30м/мин; s=0,01 мм/об; t=0,5мм ; $\gamma = \lambda = 0°$, $\alpha = 10°$, $\varphi = \varphi_1 = 45°$, r = 0,5 мм

Построим скалограмму (Рисунок 2.43), которая представляет собой функцию, отражающую интегральный вклад вейвлет-образа на каждом масштабе:

$$E(a) = \int W_{\psi}^{2}(a,b)db \qquad (2.27)$$

Большое число отсчетов не позволяет произвести визуальную оценку по скаллограмме (Рисунок 2.43), а также содержит большой объем информации, снижающий эффективность машинных алгоритмов обработки. Требуется разработать простой и надежный метод оценки мощности коэффициентов вейвлет-спектра в зависимости от степени износа инструмента.

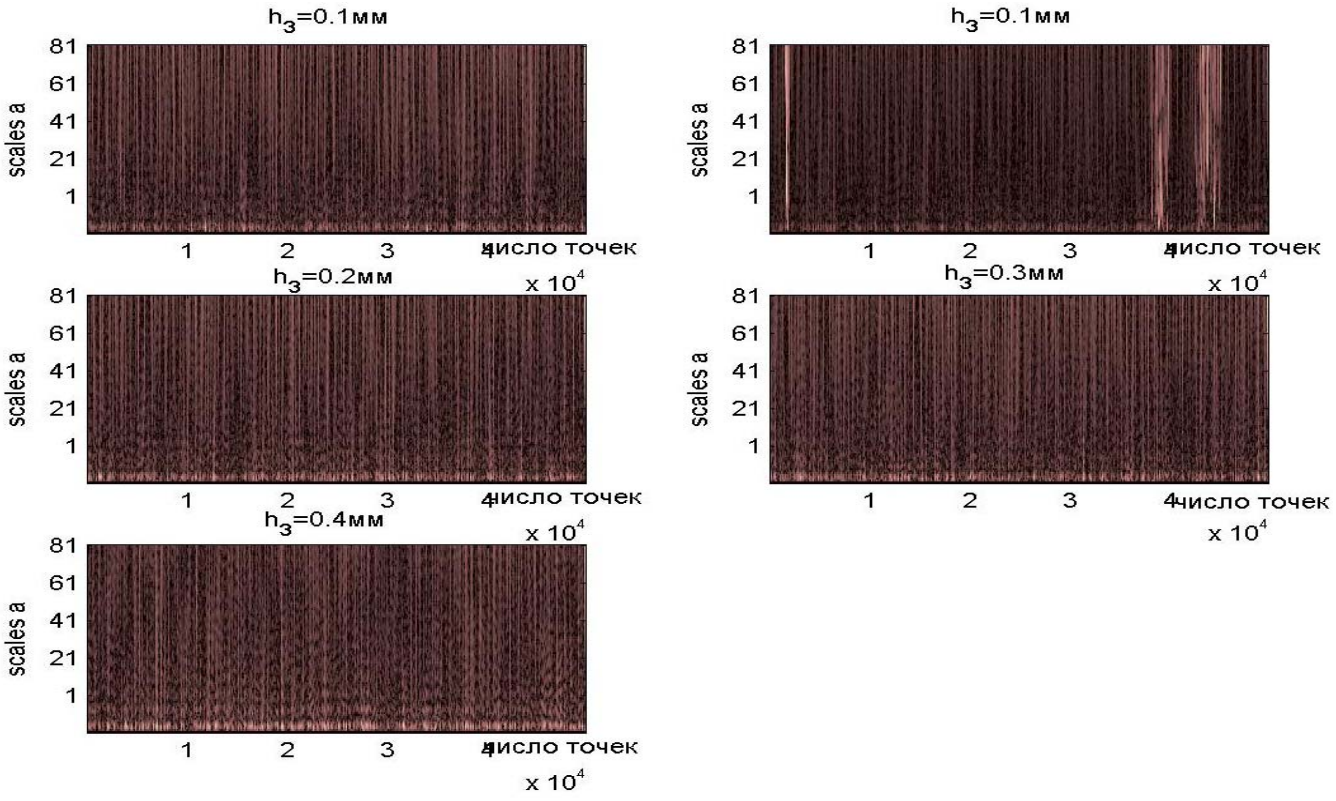


Рисунок 2.43. Непрерывный кратномасштабный анализ фрагментов сигнала ВАЭ, продолжительностью 0,87с, соответствующих различному состоянию РИ. Полученный при продольном точении ЭИ698-ВК8 (V = 40 м/мин; s=0,075 м/об; t = 0,5 мм)

Эффективным способом оценки мощности вейвлет-коэффициентов j-го уровня является оценка дисперсии ряда:

$$E_j = \frac{1}{T_j}\sum_{k=1}^{T_j} d_j^2(k), \qquad (2.28)$$

где T_j – число коэффициентов в каждой шкале;

j – уровень разложения;

d_j – детализирующий волновой коэффициент j-го уровня разложения.

Значение T_j различно для различных шкал, так как временные интервалы волновых коэффициентов изменяются пропорционально j.

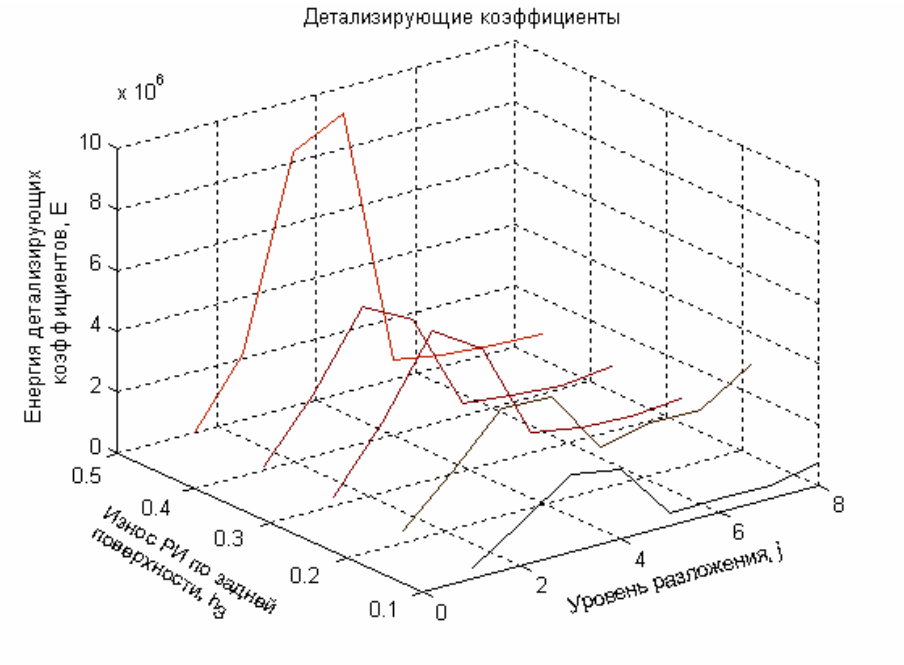


Рисунок 2.44. Зависимость распределение энергии коэффициентов детализации wavelet-преобразования, по уровням разложения в базисе вейвлета Добеши, соответствующих различному состоянию РИ. Исследования фрагментов сигнала ВАЭ продолжительностью 0,87с. Полученный при продольном точении ЭИ698-ВК8 (V = 40 м/мин; s=0,075 м/об; t = 0,5 мм)

Предложенный метод позволил экспериментально подтвердить теоретически выдвинутые положения о локализации информативного частотного wavelet-спектра в области коэффициентов 3-6 уровня.

Анализ экспериментальных данных (приложение Б) показывает нелинейную зависимость между энергией детализирующих коэффициентов сигнала ВАЭ и износом РИ. При достижении критического износа энергия резко возрастает.

Для повышения быстродействия метода требуется определить минимальную размерность фрагмента анализируемого сигнала. Проведено исследование чувствительности энергии детализирующих wavelet-коэффициентов к длительности регистрируемого сигнала. Результаты исследований представлены в Таблица 2.6.

Таблица 2.6. Анализ быстродействия

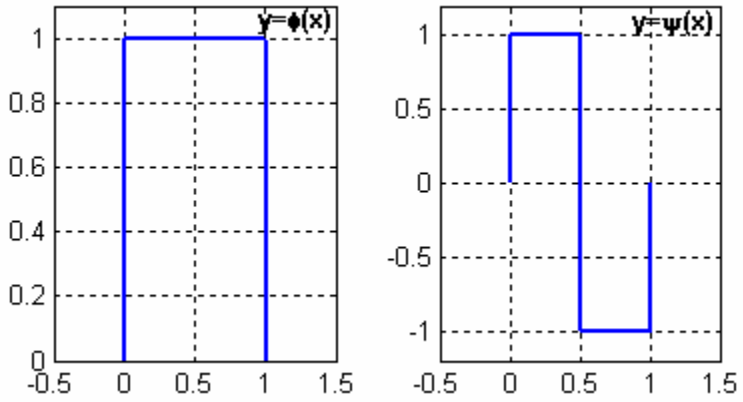
Длительность сигнала, с	Износ h_3, мм	Значения детализирующих коэффициентов					h_3=0,1/h_3=0,5
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	
0,87	d_1	0,38	0,54	0,63	0,59	0,64	1,68
	d_2	1,41	2,04	2,61	2,48	2,79	1,98
	d_3	2,56	3,69	5,17	4,94	9,00	3,52
	d_4	2,28	3,63	4,16	4,09	9,83	4,32
	d_5	0,43	1,53	1,00	0,87	1,29	2,99
	d_6	0,46	1,89	0,68	0,74	0,97	2,11
	d_7	0,44	1,91	0,62	0,57	0,87	1,96
	d_8	0,73	2,95	0,75	0,79	0,79	1,09
0,087	d_1	0,38	0,51	0,53	0,55	0,70	1,82
	d_2	1,41	1,94	2,58	2,46	2,97	2,10
	d_3	2,62	3,56	4,76	4,48	8,83	3,37
	d_4	2,19	4,11	4,00	3,94	10,91	4,97
	d_5	0,45	2,04	0,86	0,66	1,44	3,22
	d_6	0,31	2,27	0,79	0,68	1,05	3,41
	d_7	0,49	4,54	0,97	0,64	0,85	1,72
	d_8	0,80	4,66	0,67	0,64	0,82	1,01
0,02	d_1	0,33	0,45	0,55	0,46	0,63	1,91
	d_2	1,32	1,72	2,02	2,27	2,80	2,11
	d_3	2,52	3,23	5,88	4,14	7,92	3,14
	d_4	2,22	3,02	3,75	4,33	11,11	5,01
	d_5	0,48	0,59	0,86	0,80	1,20	2,52
	d_6	0,40	0,56	1,03	0,68	0,98	2,45
	d_7	0,71	0,13	1,36	0,55	1,93	2,73
	d_8	0,55	0,34	0,66	1,24	0,74	1,34
0,01	d_1	0,34	0,43	0,43	0,54	0,63	1,84
	d_2	1,08	1,59	2,31	2,04	2,89	2,69
	d_3	2,23	3,98	3,95	3,74	8,24	3,70
	d_4	1,66	3,08	3,64	5,76	11,21	6,76
	d_5	0,35	0,32	0,60	0,35	1,84	5,31
	d_6	0,20	0,56	0,44	1,21	0,78	3,97
	d_7	0,54	0,38	0,50	0,31	2,09	3,85
	d_8	0,20	0,10	0,48	0,22	0,16	0,80
0,005	d_1	0,33	0,55	0,54	0,40	0,70	2,13
	d_2	1,40	2,00	2,64	2,00	3,03	2,16
	d_3	2,16	3,54	3,98	2,47	11,63	5,38
	d_4	1,80	4,40	2,38	3,96	14,62	8,14
	d_5	0,41	0,53	0,33	0,26	0,68	1,64
	d_6	0,29	1,21	0,06	0,32	1,13	3,89
	d_7	0,71	0,14	0,65	0,75	0,02	0,03
	d_8	0,29	0,25	0,02	0,00	0,09	0,31

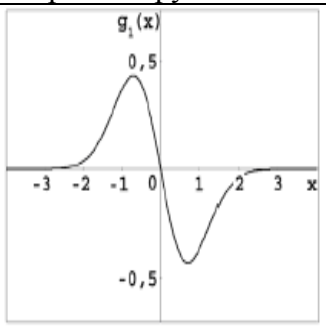
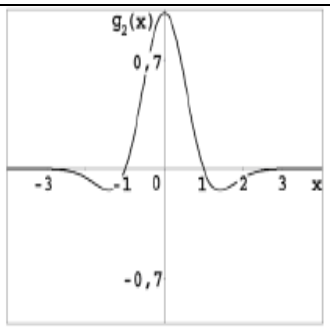
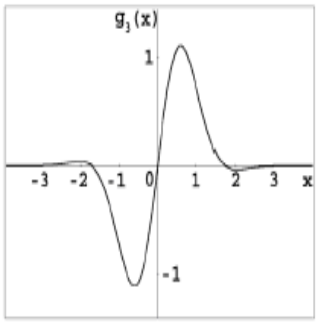
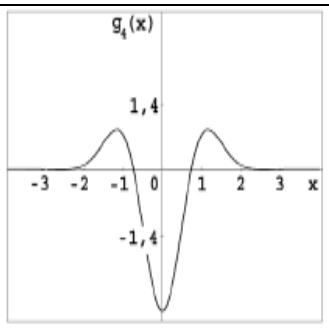
Анализ экспериментальных данных показал, что максимальное быстродействие метода 0,02 сек. Однако следует учесть, что для повышения достоверности следует искусственно занижать быстродействие до 0,1 с, при этом отбрасываются ложные выбросы.

Для выбора вейвлет-базиса требуется произвести анализ эффективности наиболее распространенных [96] и простых вейвлет-базисов для сигналов виброакустической эмиссии.

Классификацию произведем по: критерию простоты функции материнского вейвлета, оценка которой определяется трудоемкостью вычислений $\mathbf{T_{маш}}$ вейвлет-коэффициентов *j*-го уровня, где j = round($a_{10кГц}$)+1; критерию достоверности прогноза, который определяется разницей масштабных коэффициентов $a_{10кГц}$, $a_{15кГц}$. Чем больше разница между коэффициентами, тем выше достоверность оценки. Чем больше абсолютное значение **a**, тем меньше требуется объем выборки $\mathbf{T_{выб}}$, однако возрастают вычислительные затраты, связанные с расчетом wavelet-коэффициентов более высокого уровня $\mathbf{T_{маш}}$. (таблица 2.7).

Таблица 2.7. Классификация базовых вейвлетов

Вейвлет Хаара	
Достоинства: самый простой Недостатки: не является гладким; частотный спектр плохо локализован.	
$\psi_H(x)=\begin{cases}1, & 0\le x\le 1/2,\\ -1, & 1/2\le x<1\\ 0, & otherwise\end{cases}$ $\varphi_H(x)=\begin{cases}1, & 0<x<1,\\ 0, & otherwise\end{cases}$ Fr_{haar} = 0,9961 Гц; $Fr_{haar}(57\cdot10^3)$ = 56,92 кГц; $a_{10кГц}$=5,7; $a_{15кГц}$=3,8; $T_{маш}$ = 0,031 с.	

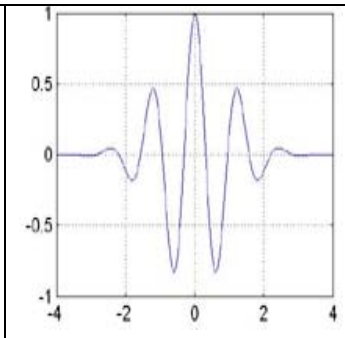
Предвейвлеты (гауссовы вейвлеты, Морле, мексиканская шляпа)	
Достоинства: Возможно непрерывное разложение; симметрия, имеет явное выражение Недостатки: функция φ не существует; анализ не ортогональный; функция имеет некомпактный носитель; восстановление не гарантируется; быстрые алгоритмы и реконструкция невозможны	
$g_1(x) = -xe^{-x^2/2}$ $Fr_{gaus1} = 0{,}2$ Гц; $Fr_{gaus1}(57 \cdot 10^3) = 11{,}429$ кГц; $a_{10кГц}$=1,14; $a_{15кГц}$=0,76	
$g_2(x) = (1 - x^2)e^{-x^2/2}$ $Fr_{gaus2} = 0{,}3$ Гц; $Fr_{gaus2}(57 \cdot 10^3) = 17{,}143$ кГц; $a_{10кГц}$=1,71; $a_{15кГц}$=1,14	
$g_3(x) = (x^3 - 3x)e^{-x^2/2}$ $Fr_{gaus3} = 0{,}4$ Гц; $Fr_{gaus3}(57 \cdot 10^3) = 22,857$кГц; $a_{10кГц}$=2,29; $a_{15кГц}$=1,52	
$g_4(x) = (-x^4 + 6x^2 - 3)e^{-x^2/2}$ $Fr_{gaus4} = 0{,}5$ Гц; $Fr_{gaus4}(57 \cdot 10^3) = 28{,}57$ кГц; $a_{10кГц}$=2,86; $a_{15кГц}$=1,9	

$\psi(x) = e^{-x^2/2}\cos(5x)$

$Fr_{morle} = 0{,}8125$ Гц;

$Fr_{gaus4}(57\cdot10^3) = 46{,}4$ кГц;

$a_{10кГц} = 4{,}64$; $a_{15кГц} = 3{,}1$

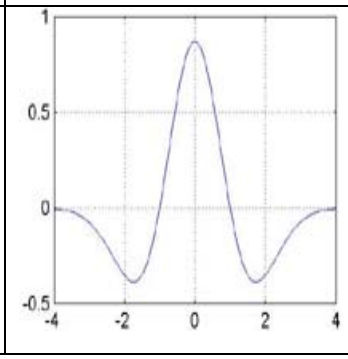


$\psi(x) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\pi^{-1/4}\right)(1-x^2)e^{-x^2/2}$

$Fr_{mexh} = 0{,}25$ Гц;

$Fr_{mexh}(57\cdot10^3) = 14{,}3$ кГц;

$a_{10кГц} = 1{,}43$; $a_{15кГц} = 0{,}95$



Регулярные вейвлет Мейера

Достоинства: функция φ существует и анализ ортогональный; симметрия, бесконечная дифференцируемость; непрерывное разложение, дискретное преобразование.

Недостатки: быстрые алгоритмы недоступны.

Функции φ и ψ не имеют компактного носителя.

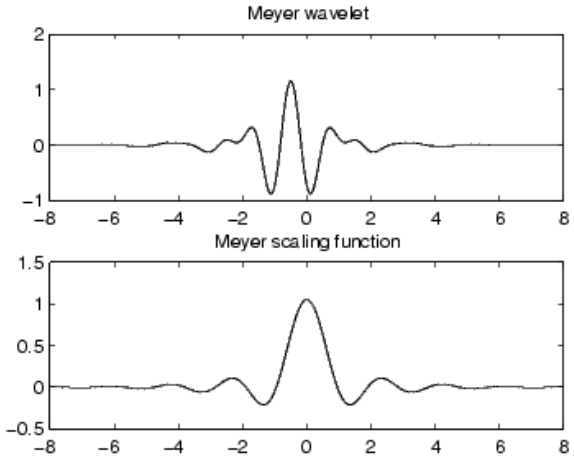
$$\widehat{\psi}(\omega) = \begin{cases} (2\pi)^{-1/2} e^{i\omega/2} \sin\left(\frac{\pi}{2} v\left(\frac{3}{2\pi}|\omega| - 1\right)\right), & \frac{2\pi}{3} \le |\omega| \le \frac{4\pi}{3} \\ (2\pi)^{-1/2} e^{i\omega/2} \sin\left(\frac{\pi}{2} v\left(\frac{3}{4\pi}|\omega| - 1\right)\right), & \frac{4\pi}{3} \le |\omega| \le \frac{8\pi}{3} \\ 0, & |\omega| \notin \left[\frac{2\pi}{3}, \frac{8\pi}{3}\right] \end{cases}$$

$$v(\alpha) = \alpha^4(35 - 84\alpha + 70\alpha^2 - 20\alpha^3), \qquad \alpha \in [0,1]$$

$Fr_{meyr} = 0{,}69$ Гц;

$Fr_{mexh}(57\cdot10^3) = 39{,}44$ кГц;

$a_{10кГц} = 3{,}94$; $a_{15кГц} = 2{,}63$



Ортогональные вейвлеты с компактным носителем

Достоинства: непрерывное разложение, дискретное преобразование с использованием быстрых алгоритмов; компактный носитель, обращающиеся в нуль моменты, FIR-фильтры
Недостатки: слабая регулярность.

Особенности: функция phi существует и анализ ортогональный; функции psi и phi имеют компактный носитель; функция psi имеет некоторое число нулевых моментов; Добеши dbN несимметричны; симлеты symN почти симметричны;

$$\widehat{\varphi}(x)=\prod_{j=1}^{\infty}H_0\left(\frac{\omega}{2^j}\right),$$

$$\left|H_0(\omega)\right|^2+\left|H_0(\omega+\pi)\right|^2=1$$

Если N нулевых моментов функции ψ(x), то

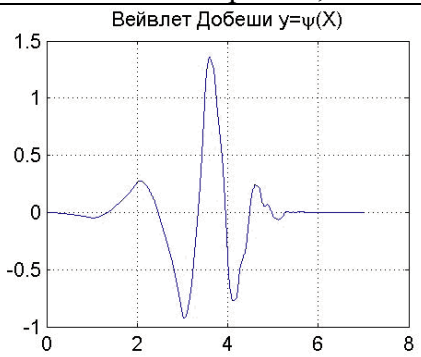
$$H_0(\omega)=\left(\frac{1+e^{-iN}}{2}\right)^N T\omega$$

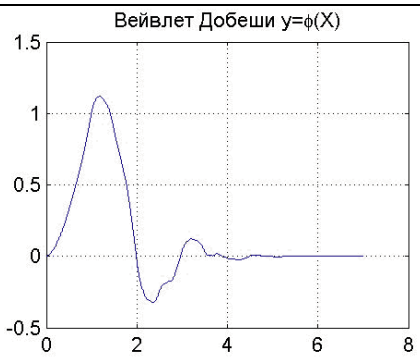
Fr_{db1} = 0,996 Гц; Fr_{db2} = 0,67 Гц; Fr_{db3} = 0,8 Гц;

$Fr_{db1}(57\cdot10^3)$= 56,9 кГц;

$a_{10кГц}$= 5,69; $a_{15кГц}$=3,8

$T_{маш}$ = 0,047 с.





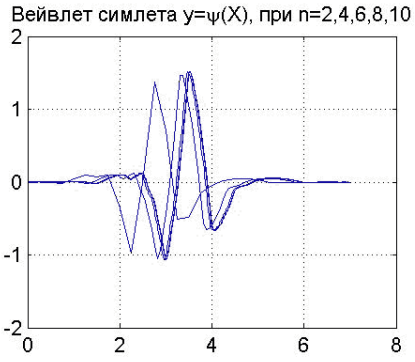
$$\phi_j(\omega)=\arctan\left(\frac{1+r_j}{1-r_j}\tan\frac{\omega}{2}\right)$$

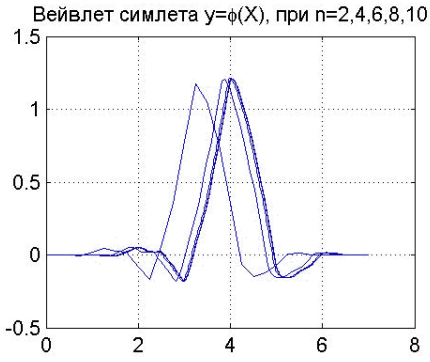
Fr_{sym1} = 0,996 Гц; Fr_{sym2} =0,67 Гц; Fr_{sym3}=0,8 Гц;

Fr_{sym} $(57\cdot10^3)$=39,4 кГц;

$a_{10кГц}$= 5,69; $a_{15кГц}$=3,8

$T_{маш}$ = 0,047 с.





Наиболее высокую эффективность показали разложения в базисе вейвлета Хаара, Добеши и симлеты. Однако вычисления на базе вейвлета Хаара требуют меньших вычислительных затрат, и следовательно данный базис наиболее предпочтителен.

Рассмотрение вопросов о скорости вычислений при вейвлет-преобразованиях

Несмотря на то, что вейвлет-преобразование требует значительных вычислительных затрат, его использование часто оправдано лучшими результатами; кроме того, разработаны методы, позволяющие существенно ускорить процесс обработки данных [119, 30]. При рассмотрении вопросов о скорости вычислений при вейвлет-преобразованиях следует учитывать также следующие обстоятельства:

- некоторые вейвлеты (например, Хаара) являются немного более простыми функциями, чем синусоидальная функция, и в этом случае затраты времени на вейвлет-преобразования могут быть заметно ниже, чем на преобразования Фурье, где вычисления множества трансцендетных тригонометрических функций всегда требуют значительных затрат времени;

- большинство вейвлетов представлено вещественными функциями, так что отсутствует необходимость привлечения для их вычисления аппарата комплексных чисел, затрудняющего вычисления;

- для ряда типов вейвлетов имеются быстрые алгоритмы вейвлет-преобразования, при реализации которых затраты времени (как и при реализации БПФ) кардинально уменьшаются;

- большинство вейвлетов описывается итерационными выражениями, которые, в целом, сложнее синусоиды, но, как правило, легче вычисляются численными методами, реализованными в компьютерных программах.

Кроме вопроса оценки износа РИ, задачей диагностики является также обнаружение критических состояний инструмента: сколов, поломок, выкрашиваний инструмента.

В результате проведенных автором экспериментальных исследований было установлено, что для мониторинга катастрофических состояний требуется анализ аппроксимирующих коэффициентов волнового образа сигнала ВАЭ (Рисунок 2.45).

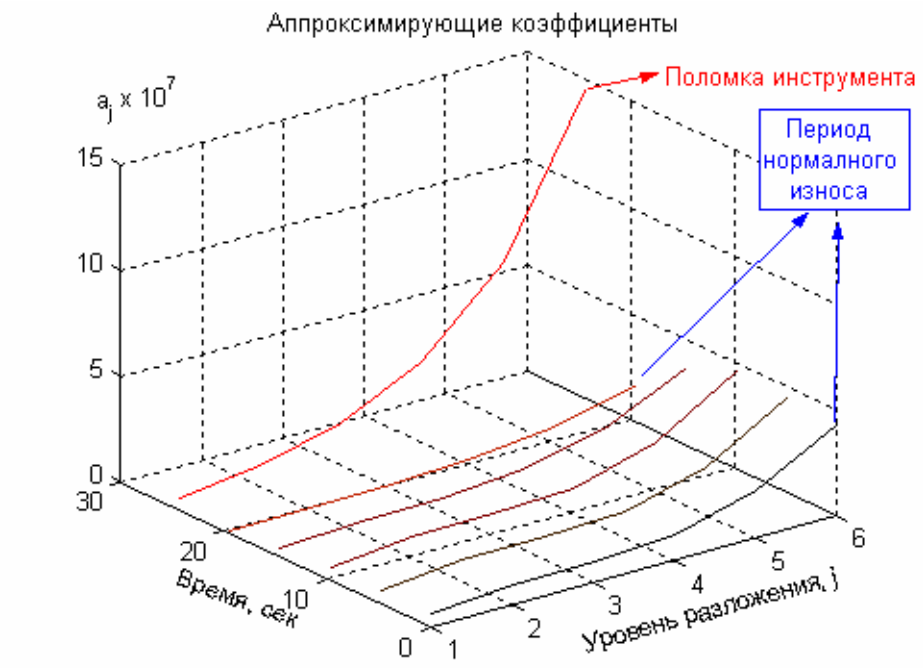


Рисунок 2.45. Аппроксимирующие коэффициенты разложения сигнала ВАЭ в базисе вейвлета Хаара. Полученный при продольном точении ЭИ698-ВК8 (V = 40 м/мин; s=0,075 м/об; t = 0,5 мм)

Значения аппроксимирующих коэффициентов изменяются в десятки раз при поломках и прерывании ПР. Технически несложно реализовать алгоритмы, которые отслеживают резкое увеличение энтропии детализирующих коэффициентов после скачка энтропии аппроксимирующих, что свидетельствует о поломке инструмента.

Выводы:

Информативным параметром, характеризующим износ РИ, является дисперсия детализирующих коэффициентов wavelet-разложения сигнала виброакустической эмиссии. Для вейвлет-анализа эффективно применить наиболее простой базис – вейвлет Хаара. Минимальный объем выборки, достаточный для достоверного мониторинга 0,1 с. Идентификация износа РИ осуществляется по значению энергии детализирующих коэффициентов j-го порядка. Для разложения в базисе вейвлета Хаара 3<j<6.

Исследования сигнала ВАЭ при возникновении критических состояний инструмента показали, что энергетический спектр аппроксимирующих коэффициентов является чувствительным к поломкам и прерываниям ПР.

2.3.6.Оборудование, приборы и устройства исследований

Экспериментальные исследования (приложение Б) проводились на токарном станке 16К20, снабженном тиристорным приводом постоянного тока LG Si5-RUS с плавным регулированием частоты вращения шпинделя.

Анализ современных плат сбора данных (ПСД) и вносимые ими погрешности, а также структурные, схемотехнические и конструкторско-технологические решения позволили сделать квалифицированный выбор платы для задачи диагностики и сформировать обоснованное техническое задание на разработку комплекса диагностики. Выбор ПСД определяется рядом требований к скорости сбора данных, числу каналов, уровням входных напряжений, разрешающей способности и полосе частот используемого на плате АЦП. Немаловажным фактором является стоимость.

Для удобства ориентирования во всем многообразии плат сбора данных введем следующие классификационные признаки:

1) Интерфейс шины: ISA; PCI; VXI; VME; COM; USB; LPT.

2) Синхронность приема данных

- Синхронные каналы
- Переключаемые каналы

3) Число аналоговых входов

- До 8
- До 16
- До 32
- Более 32

4) Максимальная частота преобразования

- До 50 кГц
- До 500 кГц
- До 1 МГц
- Более 1 МГц

5) Разрядность АЦП: Меньше 12 бит; 12 бит; 14 бит; 16 бит; более 16 бит

Дополнительными требованиями является наличие внутреннего таймера и буфера для возможности использования операционной системы мягкого реального времени либо формального времени (Windows NT, Windows XP).

На основании анализа более 150 моделей АЦП отечественных компаний «СИГНАЛ» (Москва, http://www.signal.ru), L-Card (Москва, http://www.lcard.ru/), Центр АЦП ЗАО «Руднев-Шиляев» (Москва, http://www.rudshel.ru), ЗАО "Электронные технологии и метрологические системы – ЗЭТ (Московская обл., http://www.zetms.ru/), Instrumental Systems Corp. (Москва http://www.insys.ru/) на соответствие техническим требованиям, предъявляемым к ПСД предпочтения по комплексу признаков, отдано плате ПСД ЛА – 1,5PCI-14 фирмы RudnevShilyev www.rudshel.ru. Основные технические характеристики даны в Таблица 2.8.

Таблица 2.8. Технические характеристики ЛА-1,5PCI-14

ОБЩИЕ ДАННЫЕ	
Шина интерфейса с ПЭВМ	PCI Bus master
Потребляемая мощность	+5В, 950 мА
Габариты	186 х 107 мм
АНАЛОГОВЫЙ ВХОД	
Количество аналоговых входов	32 однополюсных или 16 дифференциальных
Входное сопротивление (импеданс)	более 100 МОм
Тип АЦП	последовательного приближения
Количество бит в выходном регистре АЦП	14
Максимальная частота выборок	400 кГц
Время преобразования	2,5 мкс
Диапазоны входного сигнала	± 10В.. ± 0,05В (индивидуально программируемый КУ на каждый канал)
Память на плате FIFO	2048 слов
Защита по напряжению	± 15 В
ЦИФРОВОЙ ПОРТ	
Количество линий	8 выв и 8 вв (с защёлкой)
Уровни и пороговые значения	ТТЛ совм

СЧЕТЧИКИ/ТАЙМЕРЫ	
Количество каналов	2
Разрядность счётчиков/таймеров	16
Разрядность внешнего интерфейса	8
Количество режимов	6
Тип кода	двоичный или двоично-десятичный
Уровни и пороговые значения	ТТЛ совм
Частота задающего кварцевого генератора	50 МГц
Программируемый делитель	5..31
Абсолютная точность задания частоты	10^{-4}

Для регистрации сигнала ВАЭ был использован датчик KD12 (Таблица 2.9).

Таблица 2.9. Технические данные KD12

Свойство	Символ	Един	KD12
Коэфф. передачи с кабелем	B_a	МВ/мсек$^{-2}$	ок. 4
Резонансная частота	f_R	кГц	ок. 30
Рабочий частотный диапазон	5%	Гц	5…7000
Мин. изм. ускорение	$a_{мин}$	мсек$^{-2}$	0,01
Магнитная чувствительность	-	мкв/гс	1…2

Тарировка измерительных цепей производилась с помощью цифрового генератора и осциллографа Velleman.

2.3.7.Обоснование и выбор материалов для исследований

Для проверки состоятельности используемых методов диагностики были выбраны представители труднообрабатываемых конструкционных материалов, применяемых в авиастроении, энергомашиностроении и производстве специзделий, обладающие существенно различным химическим и структурно-фазовым составом, физико-механическими свойствами, а также уровнем относительной обрабатываемости резанием:

- коррозионно-стойкая хромоникелевая сталь аустенитного класса 12Х18Н9Т;

- жаропрочные деформируемые сплавы на никелевой основе ХН73МБТЮ (ЭИ 698).

Для построения и проверки моделей прогноза также использованы данные других исследователей В. Ф. Безъязычного, Л. Н. Волгарева, Г.И. Грановского, В. Ц. Зориктуева, Р. Р. Латыпова, Ю. М. Кичко, А. Д. Макарова, М. Ш. Мигранова, В. В. Постнова, С. С. Силина, В. В. Трусова, Л. Ш. Шустера, [22, 24, 38, 40, 41, 75, 85, 92] для следующих материалов:

- коррозионно-стойкая хромистая и сложнолегированная сталь ферритного, мартенситного и мартенстно-ферритного класса 30ХГСА;

- коррозионно-стойкая хромоникелевая сталь аустенитно-мартенситного класса 07Х16Н6 (ЭП 288);

- теплостойкая хромоникелевая сталь мартенситного класса 13 Х12Н2ВМФШ (ЭИ 961 Ш);

- жаропрочная, жаростойкая, кислотостойкая сталь аустенитного класса 15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ 654);

- жаропрочный деформируемый сплав на железоникелевой основе ХН35ВТЮВД (ЭИ 787 ВД);

- жаропрочные деформируемые сплавы на никелевой основе ХН51ВМТЮКФР (ЭП 220), ХН56ВМТЮ–ВД (ЭП 199), ХН77ТЮ, ХН70МФТЮ, ХН5НВМТЮКФР;

- окалиностойкие и жаропрочные литейные сплавы на никилиевой основе ЖС3, ЖС6, ЖС6К, ЖС6У, АНВ-300, ВЖЛ-12;

- сплавы на титановой основе ВТ9, ВТЗ-1.

Химический состав, физико-механические свойства, термическая обработка указанных сталей и сплавов и области их применения подробно изложены в работах [2, 3, 104]. Сравнительные данные и классификация по обрабатываемости их резанием приведены в работе [87].

Полный цикл исследований проводился на базе жаропрочного сплава на никелевой основе ХН73МБТЮ – типичного представителя материалов для производства дисков турбин и компрессоров и других тяжелонагруженных деталей

ГТД [88]. Представители иных групп конструкционных материалов использовались для проверки общности полученных результатов.

В качестве инструментальных материалов для исследований были выбраны представители трех основных групп твердых сплавов (ВК, ТК, ТТК): ВК4, ВК6, ВК6ОМ, ВК8, ВК10ОМ, ВК10ХОМ, Т15К6, ТТ8К6, различных как по химическому составу, так и по физико-механическим и эксплуатационным свойствам [103]. Наиболее рациональные сочетания материалов детали и инструмента выбирали согласно рекомендациям [41, 87].

2.3.8. Программно-математическое обеспечение для сбора и анализа экспериментальных данных

Для проверки разработанных алгоритмов и методик требуется создание программно-математического комплекса, обладающего мощными вычислительными способностями для расчетов, связанных с обработкой экспериментальных данных, графического представления результатов, обладающего дружественным интерфейсом и возможностью сопряжения с другими программными продуктами по стандартным протоколам связи. Согласно выдвинутым требованиям разработан программно-математический комплекс, в сотав которого входит:

- драйвера сбора данных;

- набор инструментальных утилит для визуализации и первичной обработки данных (фильтрации, масштабирования, редактирования, спектрального и вейвлет-анализа и т.д.);

- программной среды автоматизацированного анализа исходных данных и построения моделей;

- базы данных моделей процесса резания и базы процедурных правил вывода моделей.

Плата ЛА – 1,5PCI-14 в комплекте поставки имеет драйвера под Windows NT/XP, которые позволяют считывать с АЦП информацию в циклический буфер по внешнему прерыванию и организовывать непрерывный сбор данных. К сожалению

разработчики не предоставляют удобные средства сбора и анализа данных. Для измерения и обработки данных была написана собственная утилита, обладающая следующим набором функций:

- визуализация экспериментальных данных и конвертирование файла формата *.dat (в который производит запись утилита разработчиков) в .mat файл (стандартный формат файлов данных MatLab);

- обработка и анализ временных рядов, позволяющий вырезать нужные фрагменты, масштабировать графики, производить фильтрацию данных, производить спектральный и wavelet-анализ, сохранять обработанные данные и экспортировать данные в файлы различных типов и/или рабочую область MatLab;

- выводить данные в отчетные формы, производить структурно-параметрическую идентификацию на основе экспериментальных данных.

Алгоритм обработки данных:

1. Файл с данными эксперимента открывается из диалогового окна (Рисунок 2.46).

В данном окне производится выбор анализируемых каналов, вводятся уравнения тарировочных кривых, определяется необходимость фильтрации сигналов. По окончании настройки возможно отображение графиков в этом же окне (Рисунок 2.46). Графики прорисовываются на различных вкладках (по каналам). При повторном открытии могут накладываться на существующие для визуального анализа и сравнения, добавляться к существующим (при исследованиях прерывистых режимов резания), либо заменять существующие.

Для дальнейшего анализа график по каждому измерительному каналу может быть сохранен в свой .mat файл либо как изображение в стандартных графических форматах векторной или растровой графики (tif, bmp, jpg, gif, …). Сигнал может быть масштабирован, из него можно вырезать фрагмент или добавить к нему фрагмент сигнала из другого файла. Полный перечень возможностей программного продукта описан в справочном руководстве к программе.

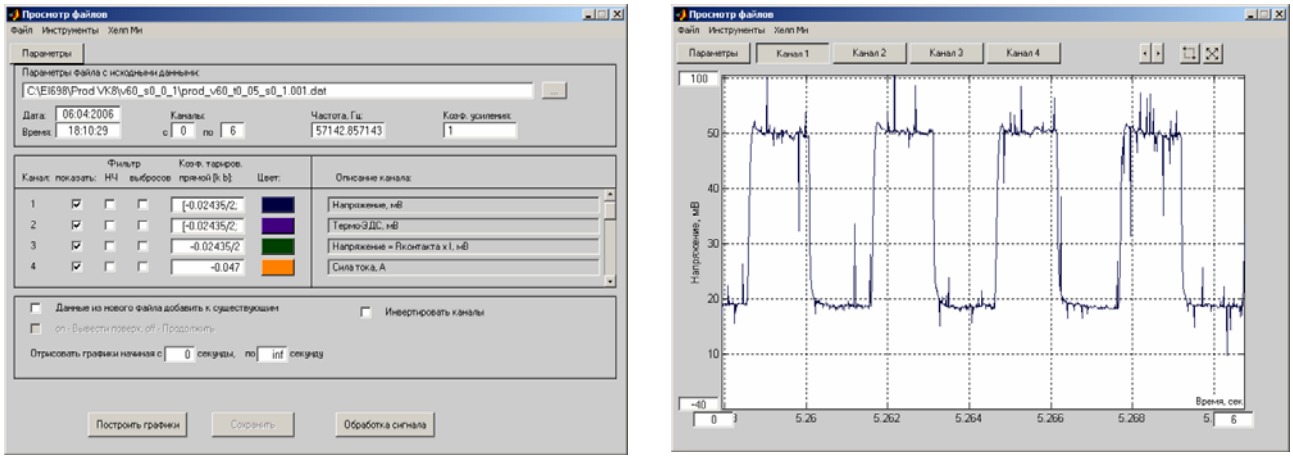


Рисунок 2.46. Окно визуализации экспериментальных данных

Размеры анализируемых файлов достигают 20 – 100 Мб, их открытие и анализ занимают много времени. С целью снижения трудоемкости и повышения времени обработки на подготовительном этапе производится анализ спектра колебаний с целью определения информативной полосы частоты, расчета фильтра, фильтрации сигнала и децимации (понижения частоты). Расчет фильтра производится в пакете MATLAB средствами Toolbox Filter Design & Analysis Tool (FDATtool).

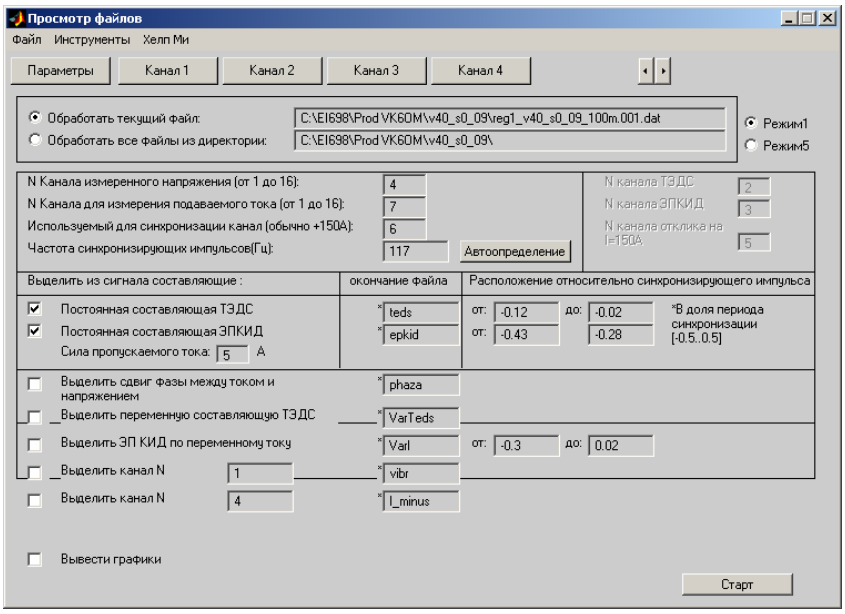


Рисунок 2.47. Окно настройки автоматической обработки данных

Для автоматизации выделения требуемых параметров: ТЭДС, расчета сигнала ЭПКИД, анализа сдвига фазы между сигналом тока и напряжения, выделения отдельно сигнала вибрации предусмотрена специальная функция «Обработка

сигнала», которая позволяет без присутствия оператора обрабатывать все файлы из указанного каталога по заранее определенному пользователем алгоритму (Рисунок 2.47). Обработка и анализ временных рядов производится из окна (Рисунок 2.48).

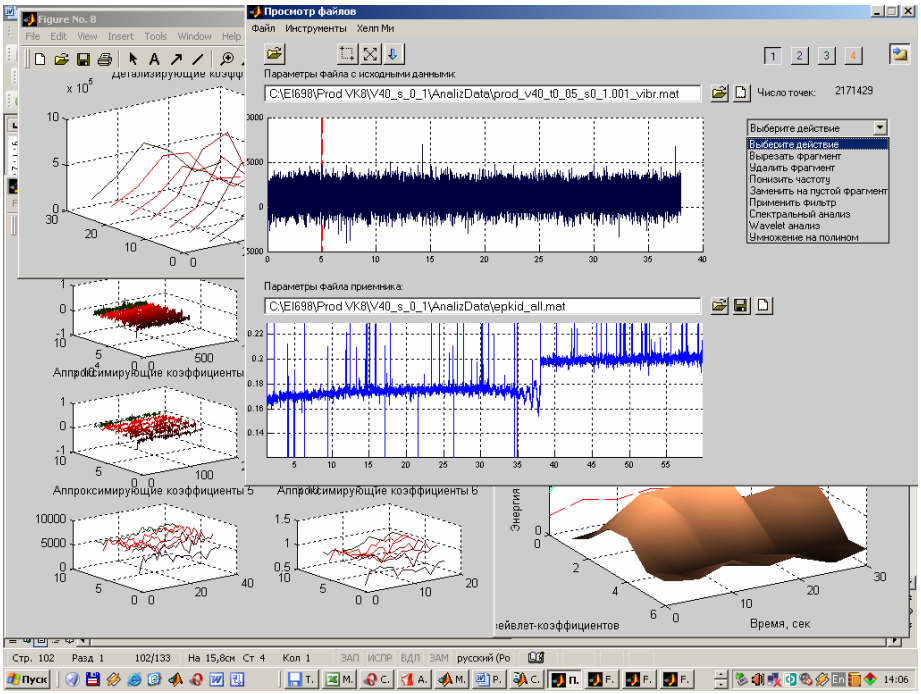


Рисунок 2.48. Окно обработки и анализа данных

Результаты:

До настоящего времени не синтезирована модель процесса резания, способная с высокой точностью и достоверностью эмитировать сигналы, снимаемые с датчиков ЭП КИД, термоЭДС, вибрации и т.д. Разработанная цифровая система сбора и обработки данных позволяет сохранить все измеренные параметры на внешние носители и в дальнейшем воспроизвести сигналы, полученные от датчиков, что устраняет необходимость в повторных реальных экспериментах. Созданный в среде программирования виртуальный процесс, последовательно считывая данные с внешнего носителя, полностью эмитирует условия протекания физического процесса со всеми его особенностями (нестационарностью, стохастичностью, и т.д.). Появилась возможность методами имитационного моделирования проверить достоверность разрабатываемых алгоритмов идентификации и прогноза. Для обнаружения критических состояний инструмента следует производить анализ энергии аппроксимирующих коэффициентов.

2.4.Выводы по главе

1) Определен динамический и частотный диапазоны наблюдения электрических сигналов. Определена собственная частота электрических колебаний в контуре «станок – приспособление – деталь – инструмент».

2) Выбраны и доработаны, с учетом специфики измерения параметров процесса резания, методы цифровой обработки электрических сигналов.

3) Рассчитан и реализован адаптивный фильтр для подавления сетевой помехи. Оценен уровень помех при измерении электрических сигналов и определены компенсирующие коэффициенты (уравнения), полученные в результате тарировки измерительных каналов.

4) Доработано устройство измерения электрической проводимости контакта «инструмент-деталь», отличающийся от аналогов [38]:

- возможность одновременной регистрацией термоЭДС, постоянной и переменной составляющей ЭП КИД;

- цифровая регистрация контролируемых параметров.

5) Экспериментально оценена точность метода измерения ЭП КИД, динамический и частотный диапазон регистрируемого сигнала. Определено оптимальное по точности быстродействие устройства регистрации ЭП КИД.

6) Разработан метод цифровой обработки виброакустических колебаний, основанный на волновом разложении сигнала.

Информативным параметром, характеризующим износ РИ, является дисперсия детализирующих коэффициентов wavelet-разложения сигнала виброакустической эмиссии. Для вейвлет-анализа эффективно применить наиболее простой базис – вейвлет Хаара. Минимальный объем выборки, достаточный для достоверного мониторинга, 0,1 с. Идентификация износа РИ осуществляется по значению энергии детализирующих коэффициентов *j*-го порядка. Для разложения в базисе вейвлета Хаара $3<j<6$.

ГЛАВА 3. РАСПОЗНАВАНИЕ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Обеспечение надежности и эффективности процесса механообработки, реализация оптимальных алгоритмов управления невозможна без информации о текущем состоянии и возможности прогноза работоспособности режущего инструмента в будущем.

Существующие системы прогноза, построенные на базе нейросетевых моделей, реализованы для узкого номенклатурного ряда изделий, обрабатываемого по одному программному циклу. Такие системы, имея узкую специализацию, требуют значительных ресурсов для организации процедуры переобучения и не удовлетворяют условиям универсальности.

Нестационарность условий механической обработки, режимов резания, свойств инструмента и заготовки приводит к несостоятельности оценок, полученных по статическим моделям.

Таким образом, актуальным является вопрос разработки оперативных алгоритмов адаптации имеющихся прогностических моделей к конкретным технологическим условиям среды.

Для реализации самообучающихся алгоритмов необходим метод мониторинга, инвариантный к нестационарности режимов и условиям механической обработки. Такими качествами обладает метод мониторинга на основании виброакустической эмиссии. Однако существующие алгоритмы распознавания на основе НС имеют низкую достоверность. Требуется повысить достоверность алгоритмов распознавания.

Для реализации алгоритмов прогноза требуются непрерывные монотонные функциональные зависимости, что не выполняется для параметров сигнала ВАЭ. Наиболее точным и надежным методом оценки износа РИ (1.4, 2.1.4.1) является метод контроля, основанный на измерении ЭП КИД.

Требуется разработать алгоритм, позволяющий осуществлять выбор модели процесса резания, наиболее близкой к реально протекающему процессу по оперативным измерениям, скорректировать оценку, полученную по данной модели для составления оценки прогноза. А также разработать структуру базы данных моделей и алгоритм автоматического синтеза моделей на основе текущих измерений.

3.1.Распознавание состояния РИ на основе сигнала виброакустической эмиссии

Распознавание состояния объекта – это центральная задача диагностики, связанная с разработкой принципов и построением систем, предназначенных для определения принадлежности данного состояния к одному из заранее выделенных классов состояний объектов. Каждое состояние описывается совокупностью основных характеристик (параметров, признаков, свойств) $X = (x_1, ..., x_i, ..., x_n)$, где i-я координата вектора X определяет значения i-й характеристики, и дополнительной характеристикой S, которая указывает на принадлежность объекта к некоторому классу (образу). Набор заранее расклассифицированных состояний, т. е. таких, у которых известны характеристики X и S, используется для обнаружения закономерных связей между значениями этих характеристик и поэтому называются обучающей выборкой или матрицей прецедентов. Проблема распознавания состояния диагностируемого объекта широко распространена [8, 13, 17, 19, 27, 48, 80, 86] и для ее решения предложены различные методы [80]:

- методы, основанные на принципе разделения;
- статистические методы;
- методы, построенные на основе “потенциальных функций”;
- методы вычисления оценок (голосования);
- методы, основанные на исчислении высказываний, в частности на аппарате алгебры логики.

Доказано [31], что любой из вышеперечисленных методов может быть сведен к задаче, решаемой нейросетью.

3.1.1.Распознавание состояния РИ на основе нейросетевого классификатора

Решения по выбору оптимальной (на сегодняшний день) конфигурации, связанные с выбором архитектуры НС и процедурой обучения для задачи классификации имеются в литературе [31].

Используя рекомендации, для классификации выбрана НС встречного распространения (Рисунок 3.1).

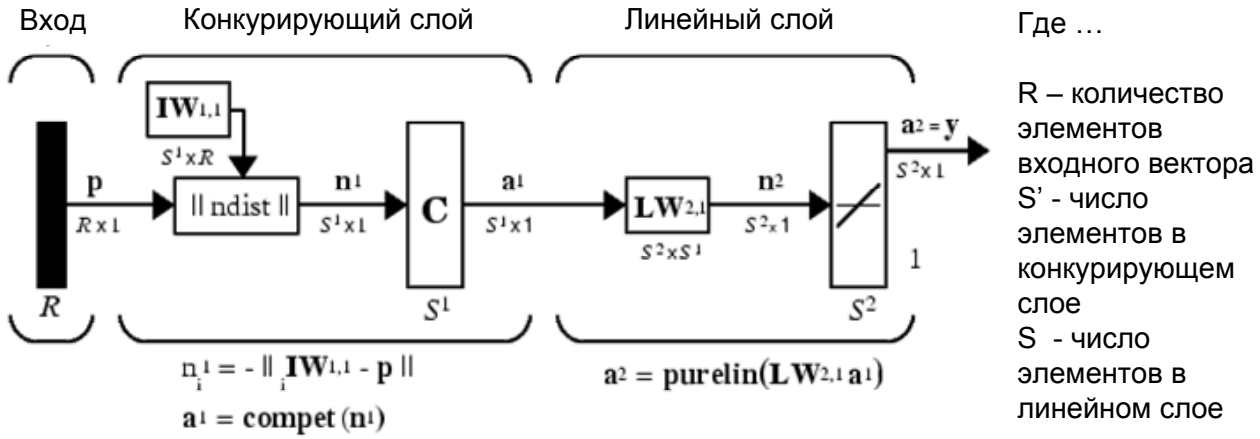


Рисунок 3.1. Сеть для классификации входных векторов (LVQ)

Для оценки числа нейронов в скрытом слое воспользуемся эвристической формулой для оценки необходимого числа синоптических весов L_W (в многослойной сети с сигмоидалыми передаточными функциями):

$$\frac{\mathrm{mN}}{1+\log_2 N} \le L_W \le m\left(\frac{N}{m}+1\right)(n+m+1)+m\,, \tag{3.1}$$

где n – размерность входного сигнала;

m – размерность выходного сигнала;

N – число элементов обучающей выборки.

Допустим, что параметры сигнала ВАЭ инвариантны к режимам обработки, и задача обнаружения критических состояний не стоит, тогда n определяется

размерностью вектора дисперсии детализирующих коэффициентов волнового преобразования (2.29). n = 6;

Размерность выходного вектора соответствует количеству выделенных классов состояний РИ. m=5.

Число элементов обучающей выборки оценивается экспертным путем. Принято равным 20.

$$\frac{5 \cdot 20}{1+\log_2 20} \le L_W \le 5 \cdot \left(\frac{20}{5}+1\right)(6+5+1)+5$$

$$24 \le L_W \le 905$$

Оценив необходимое число весов, можно рассчитать число нейронов в скрытых слоях.

$$L = \frac{L_W}{n+m} = \frac{L_W}{11}. \qquad (3.2)$$

Тогда L<∈[2;85].Примем для начальной оценки L= max[2; 85] = 85.

Тестовое множество (Рисунок 3.2) формируется согласно методу, предложенному в 2.3.5.3. Состояния РИ разделены на 5 классов, соответствующие износу РИ по задней поверхности hЗ = [0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5] мм.

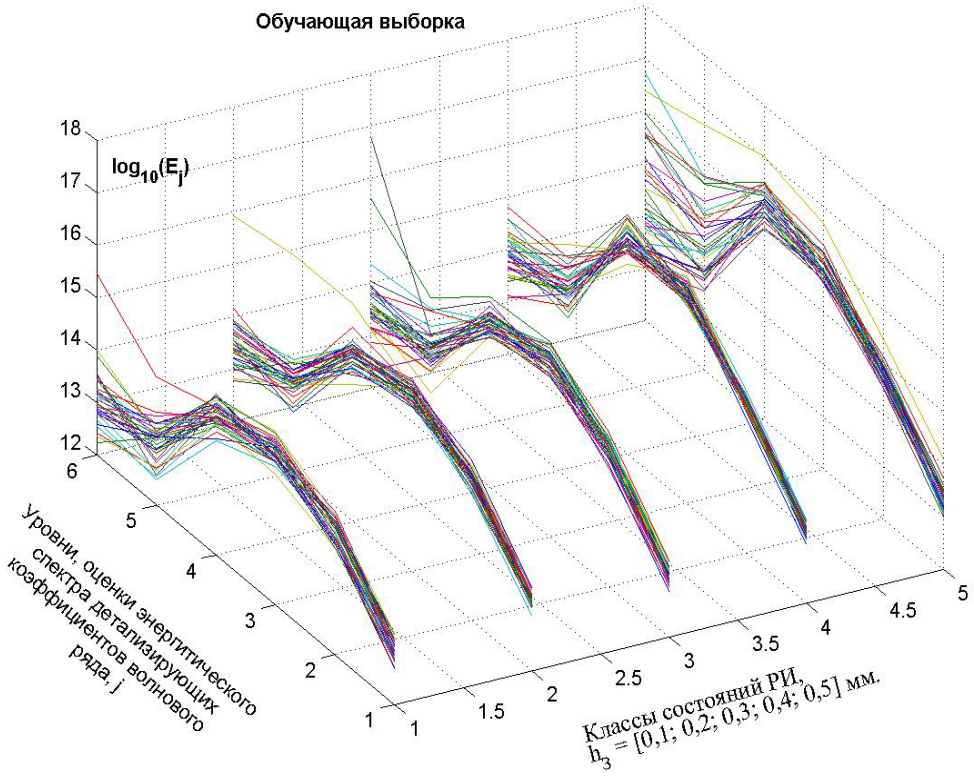


Рисунок 3.2. Обучающая выборка

Изменение ошибки сети в процессе обучения и результат моделирования обученной НС представлен на рисунке 3.3.

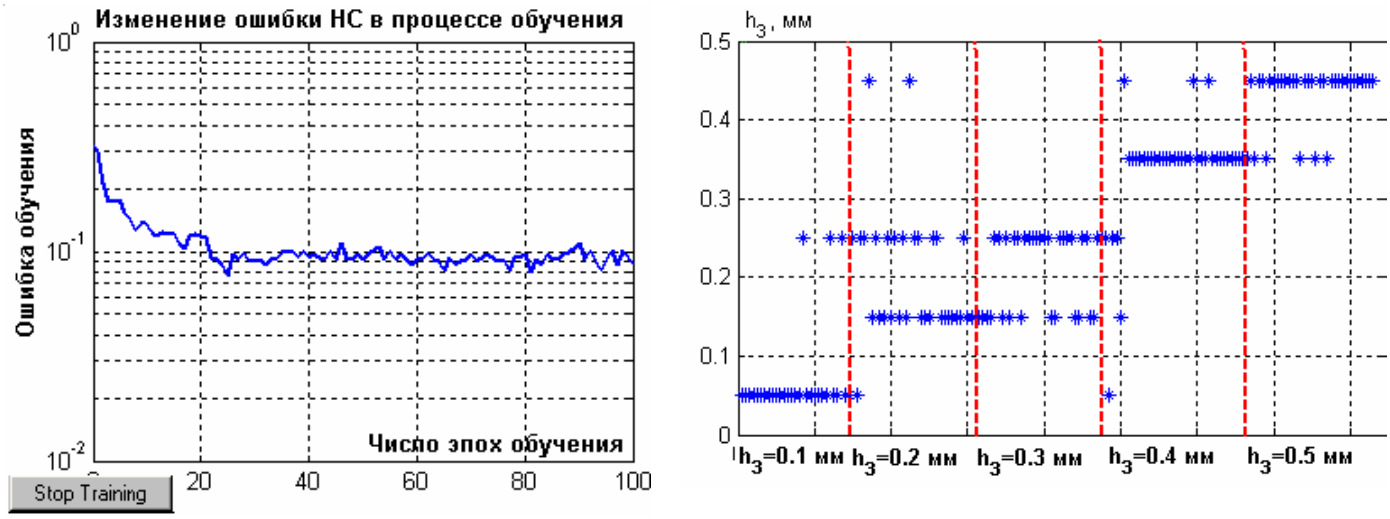


Рисунок 3.3. Результат процедуры обучения и тестирования НС

Анализ представленного на графиках результата обучения свидетельствует о хорошей способности НС классифицировать два состояния РИ: острый и изношенный. В этом случае достоверность прогноза достигает 98%. Достоверность классификации на большее число классов неудовлетворительна.

Дополнительная серия экспериментов позволила уточнить эффективное число нейронов в промежуточном слое (Рисунок 3.4) $L_{эф} < \in [50; 60]$.

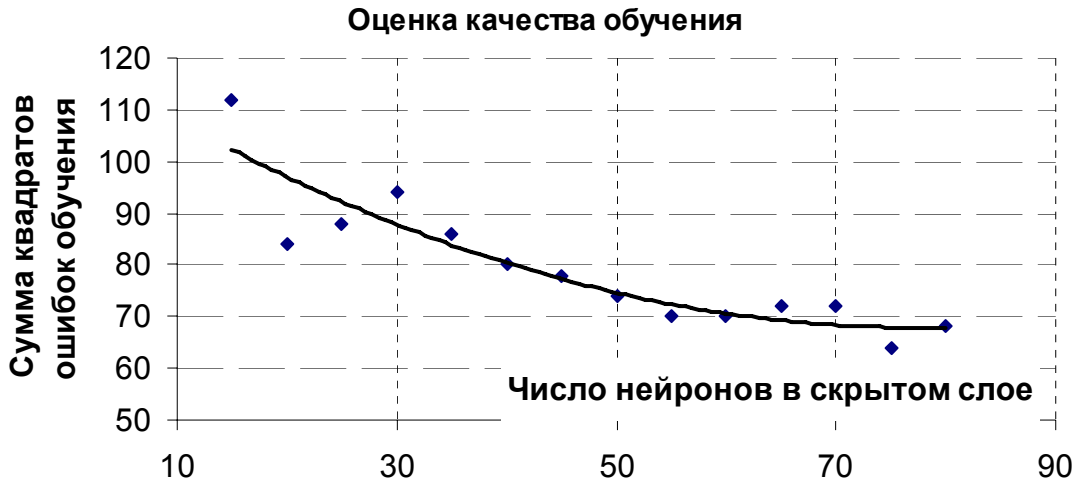


Рисунок 3.4. Зависимость качества обучения от числа нейронов

Сконструированная НС не учитывала изменение режимов обработки, допуская полную инвариантность параметров сигнала ВАЭ. Для решения вопроса о чувствительности метода мониторинга на основе сигнала ВАЭ к режимам обработки и условиям стационарности требуются дополнительные исследования.

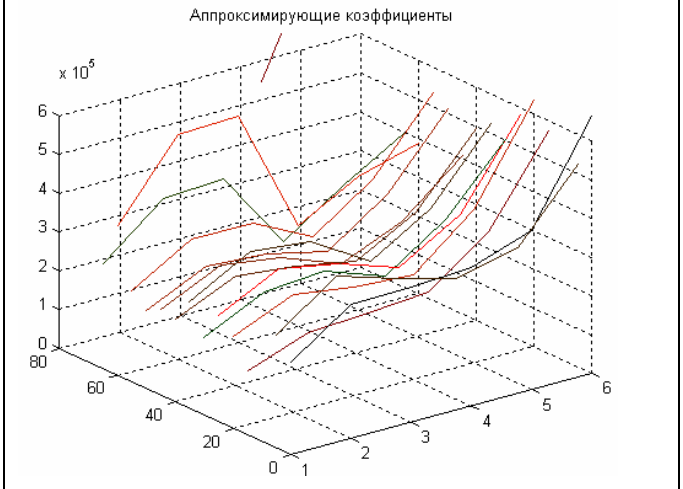
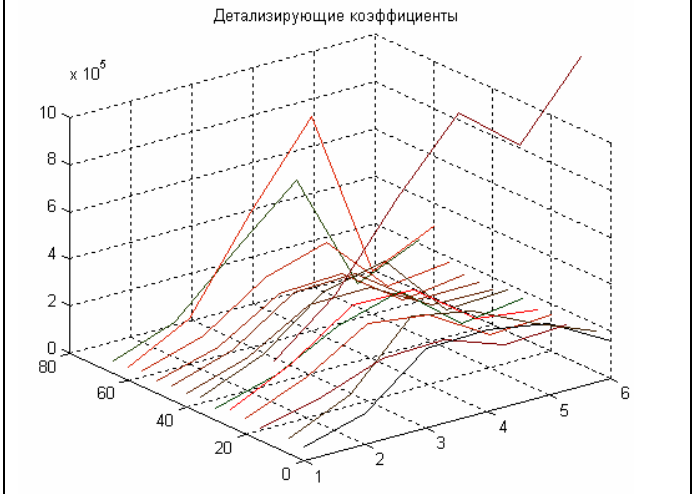
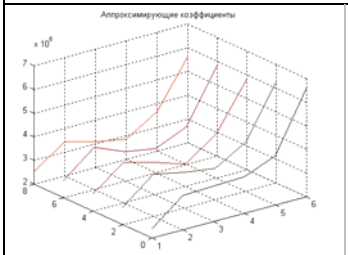
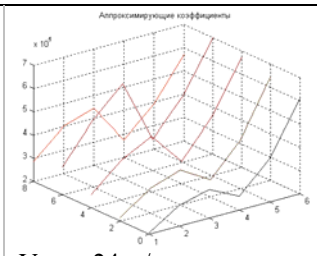
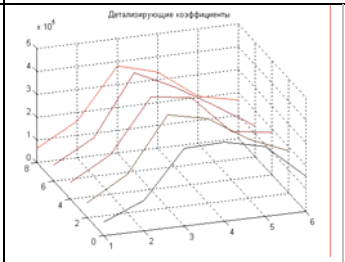
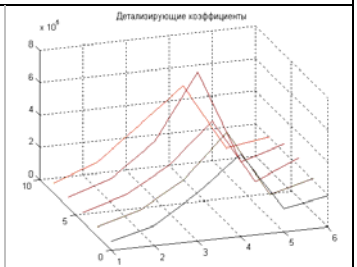
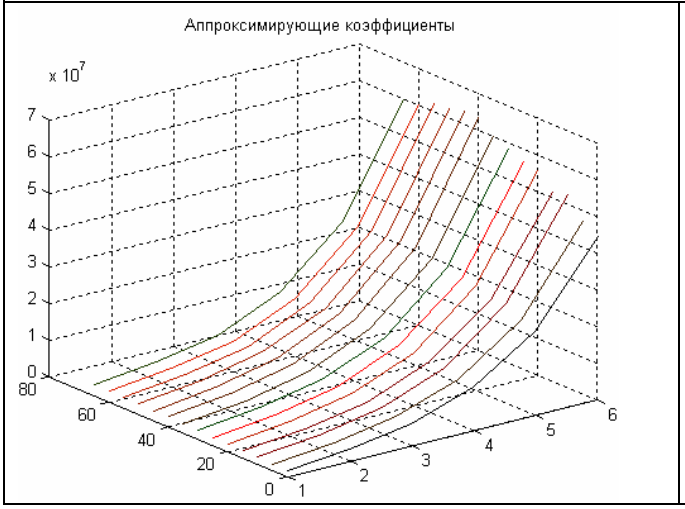
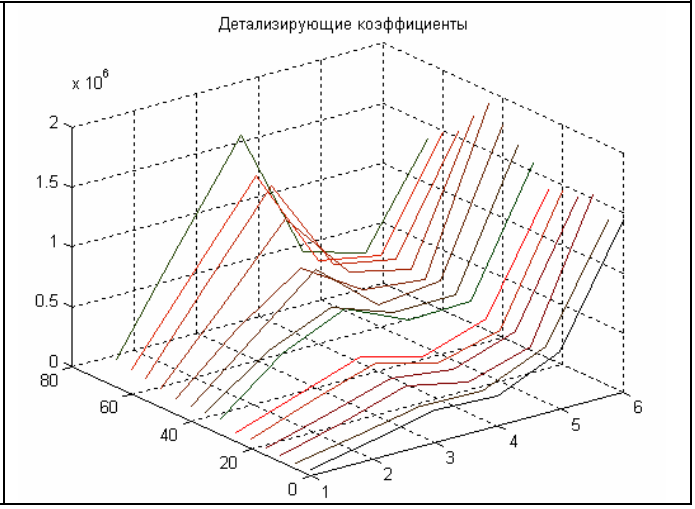
3.1.2. Исследования чувствительности метода мониторинга на основе сигнала ВАЭ к нестационарности режимов резания

Нестационарность процессов обработки сдерживает развитие методов диагностики на базе косвенных параметров (термоЭДС, ЭП КИД, составляющие силы резания, мощность привода главного движения), поскольку сильно искажает результаты оценки износа РИ, выполненного по стационарным моделям. Получение моделей для нестационарных режимов обработки в лабораторных условиях является трудоемким и ресурсоемким процессом. Поэтому задача разработки метода, позволяющего без дополнительных затрат в процессе работы мехатронного модуля получать новые модели, учитывающие нестационарность режимов обработки, и адаптироваться к конкретным технологическим условиям является безусловно актуальной.

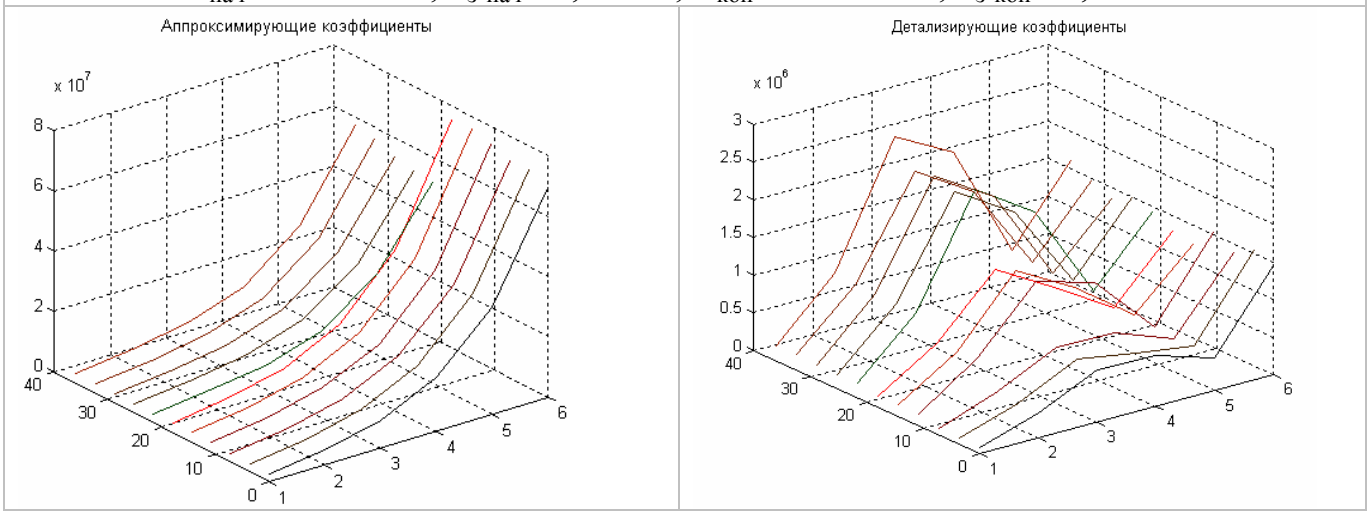
Основным вопросом при разработке новых методов и алгоритмов самообучения является экспериментальное подтверждение инвариантности параметров сигнала ВАЭ к изменению условий механической обработки и нестационарности режимов обработки.

Исследование чувствительности метода мониторинга к условиям стационарности проводилось по экспериментальным данным, полученным при продольном и торцевом точении ЭИ698 – ВК6ОМ. В соответствии с разработанным методом п.2.3.5.3 сигнала ВАЭ подвергался разложению в ряд волновых коэффициентов, оценка энергии детализирующих коэффициентов использовалась в качестве тестового (контрольного) множества, для тестирования НС (Таблица 3.1) , полученной по алгоритму, описанному в п.3.1.1. В качестве программной среды использовался инструментальный пакет MatLab6.5.

Таблица 3.1. Тестовое множество энергетического спектра вейвлет-коэффициентов

Аппроксимирующие коэффициенты	Детализирующие коэффициенты
Торцевое точение ЭИ698 – ВК6ОМ от периферии к центру s=0,125 мм/об; t = 0,5 мм; a_v = -7.8 м/мин^2 $V_{нач}$ = 38 м/мин; $h_{з\ нач}$= 0,01мм ; $V_{кон}$ = 24 м/мин; $h_{з\ кон}$= 0,23мм	
	
 $V_{нач}$ = 38 м/мин; $h_{з\ нач}$= 0,01мм	 $V_{кон}$ = 24 м/мин; $h_{з\ кон}$= 0,23мм
 $V_{нач}$ = 38 м/мин; $h_{з\ нач}$= 0,01мм	 $V_{кон}$ = 24 м/мин; $h_{з\ кон}$= 0,23мм
Торцевое точение ЭИ698 – ВК6ОМ от центра к периферии s=0,125 мм/об; t = 0,5 мм; a_v = 9,75 м/мин^2 $V_{нач}$ = 25 м/мин; $h_{з\ нач}$= 0,01мм ; $V_{кон}$ = 41 м/мин; $h_{з\ кон}$= 0,41 мм	
	

Торцевое точение ЭИ698 – ВК6ОМ от центра к периферии
s=0,9 мм/об; t = 0,5 мм; a_v = 9,5 м/мин^2
$V_{нач}$ = 37 м/мин; $h_{з\ нач}$= 0,01мм ; $V_{кон}$ = 48 м/мин; $h_{з\ кон}$= 0,53 мм



Визуальный анализ тестового множества (Таблица 3.1) показывает, что одинаковому значению износа инструмента соответствует один и тот же уровень энергетического спектра коэффициента wavelet-разложения третьего и четвертого уровней, независимо от ускорений режима резания.

Проведенный эксперимент заключался в следующем. Нейронная сеть обучалась на тестовой выборке №1, в диапазоне скорости резания от 25 до 41 м/мин с положительным ускорением dV/dt > 0, и тестовой выборке №2 в диапазоне скорости резания от 38 до 24 м/мин с отрицательным ускорением dV/dt < 0 при оборотной подаче инструмента 0,125 мм/об. Обученная НС тестировалась на контрольном множестве №3, полученном при резании со скоростью от 37 до 48 м/мин, при dV/dt > 0 и оборотной подаче 0,9 мм/об. В результате моделирования НС показала отличные способности разделения состояния на 2 класса: острый/изношенный (Рисунок 3.5). Дальнейшее дообучение НС по выборке №3 не улучшило способности НС к распознаванию состояния РИ. Напротив, исключение одной из выборок №1 или №2 практически не ухудшает качества распознавания.

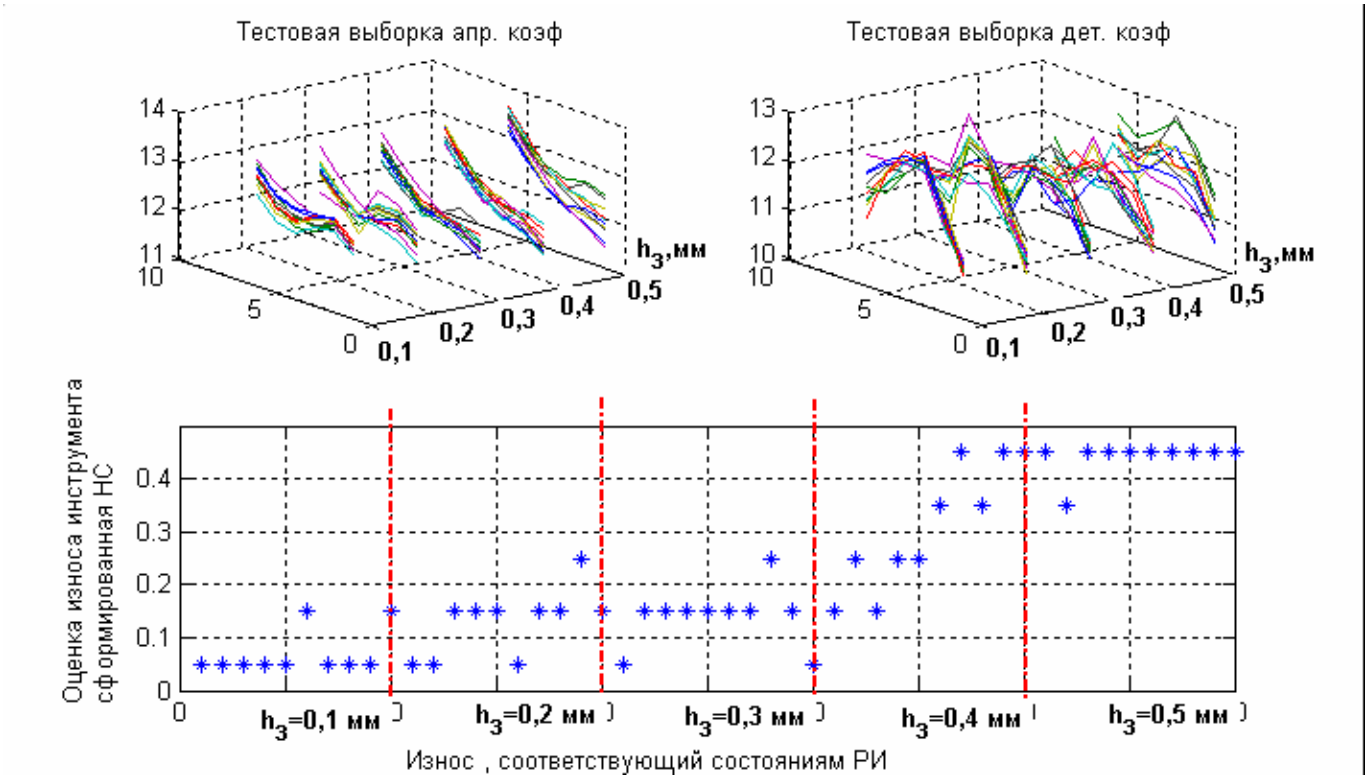


Рисунок 3.5. Результат распознавания состояния РИ НС

Выводы:

В результате эксперимента установлено, что для распознавания нейронной сетью двух состояний инструмента, соответствующих острому (h_3 < 0,2 мм) и изношенному (h_3 >0,4 мм), достаточно обучение на минимальном объеме экспериментальных данных (один тестовый проход). При этом результат распознавания инвариантен к режимам обработки, нестационарности и условиям обработки.

Для распознавания состояния инструмента с точностью +/- 0,1 мм требуется больший объем экспериментальных данных, повышение мощности сети и введение дополнительных входных координат, соответствующих режимам обработки. Однако даже в этом случае достоверность результата распознавания без изменений в архитектуре НС не превышает 75% (обычно на уровне 60 %).

Причина невысокой эффективности НС при распознавании износа РИ с высокой точностью состоит в том, что различные состояния РИ S_i способны порождать один и тот же наблюдаемый мгновенный энергетический вейвлет-спектр виброакустических колебаний O_j. Заключение о состояние инструмента требуется

осуществлять из анализа вероятности проявления комбинации наблюдений {O} во времени для конкретного состояния S_i. Данное обстоятельство делает принципиально невозможным точный прогноз с помощью НС на основе архитектуры LVQ. Возможно применение рекуррентных архитектур НС, однако для них остается нерешенным вопрос сходимости и расчета объема дополнительных экспериментальных данных.

3.2. Распознавание состояния РИ на основе ЭП КИД с обучением по параметрам ВАЭ

Метод распознавания состояния РИ, описанный выше, с высокой достоверностью по минимальному объему априорных данных способен идентифицировать износ по задней поверхности РИ, соответствующей 0,45÷0,5 миллиметрам. Однако для решения задачи оперативной оптимизации режимов обработки, прогноза ресурса инструмента и др. [80] требуется обеспечить точность +/- 0,05 мм на протяжении всего жизненного цикла инструмента. Анализ существующих методов контроля состояния РИ (пп.1.1 – 1.3) позволил выделить только один метод, удовлетворяющий требованиям к точности и практической инвариантности к величине ТЭДС, скорости и глубине резания [38], основанный на измерении относительной электропроводимости КИД.

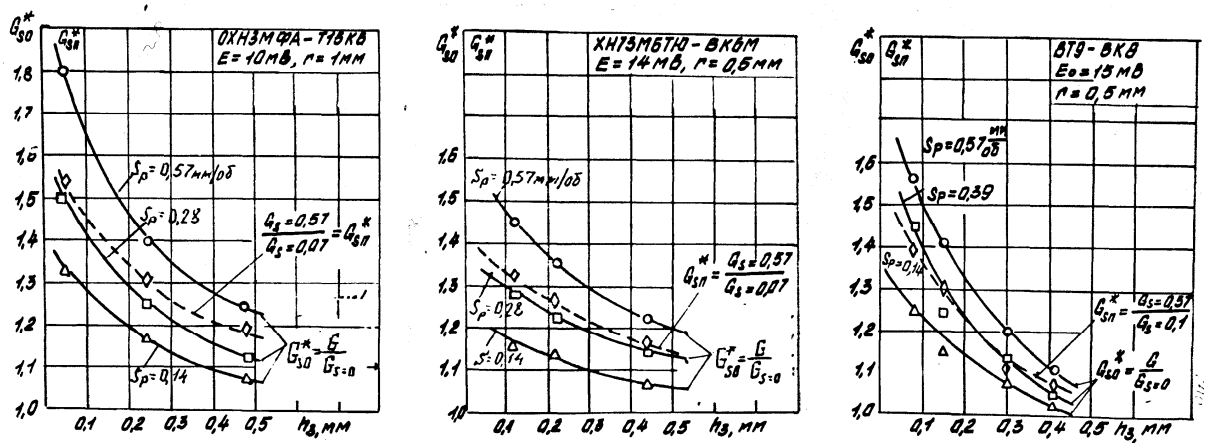


Рисунок 3.6. Зависимость относительной электропроводимости КИД G^*_{So} от износа $h_З$ инструмента ($\varphi=\varphi_1=45°$, $\alpha=10°$, $\gamma=\lambda=0°$, t=1мм) [38]

Относительная электропроводимость $G^*_{Sп}$ имеет практически линейную зависимость от износа инструмента (Рисунок 3.6). Таким образом, становится возможным создание адаптивной системы распознавания РИ, для которой не требуется предварительного получения моделей. Всю необходимую информацию система получает в процессе работы, в соответствии со следующим алгоритмом:

1. По сигналу ЭП КИД или ТЭДС идентифицируется точка 1 (Рисунок 2.5) завершения процесса приработки инструмента (Рисунок 3.7);

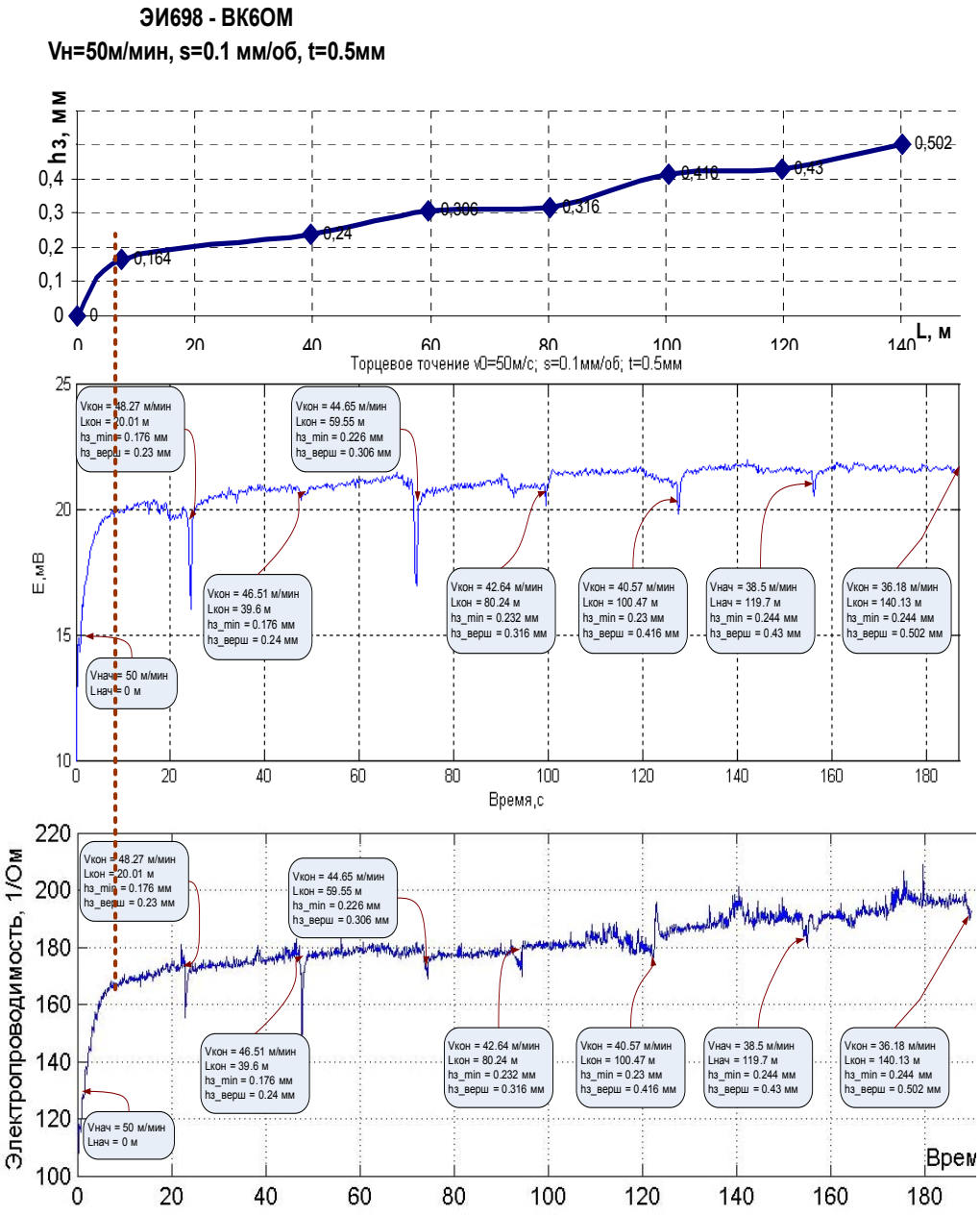


Рисунок 3.7. Идентификации точки завершения процесса приработки инструмента по электрическим сигналам КИД

2. По сигналу ВАЭ НС по методу (п.3.1.1) идентифицируется точка критического износа инструмента $h_{3кр}$ (см. Рисунок 3.5);

3. Производится расчет уравнения линейной функции $h_З = f(G^*_{So})$, которая будет использована системой для идентификации состояния РИ. $G^*_{Sп}$ – относительная электропроводимость, определяется из следующего отношения:

$$G^*_{Sn} = \frac{G_{Sp}}{G_{Sn}}, \tag{3.3}$$

где G_{Sp} – электропроводимость КИД при рабочей подаче (приложение Б);

G_{Sn} – ЭП КИД при пониженной подаче $s_п$=0,07 мм/об [38].

Адекватность методики была оценена по экспериментальной выборке, полученной при точении ЭИ-698 резцом ВК8.

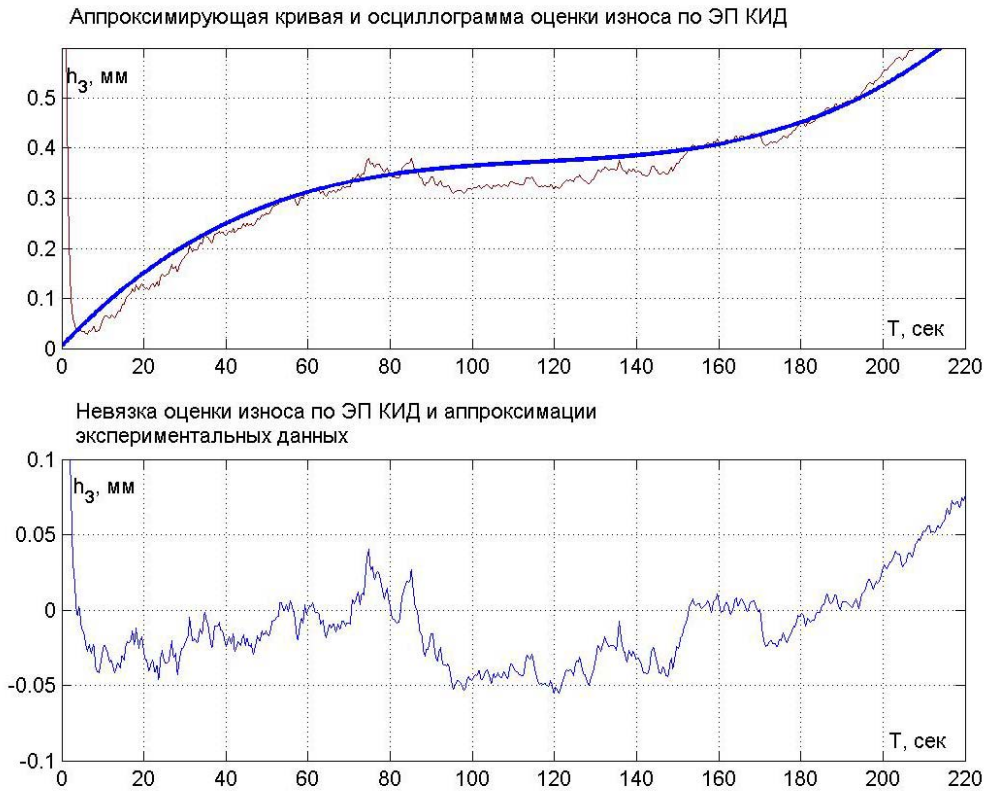


Рисунок 3.8. Сравнение оценки износа полученной по сигналу относительной ЭП КИД (G_{Sn}= 64,5 Ом$^{-1}$) с аппроксимацией кривой износа по экспериментальным данным (приложение Б). Продольное точение ЭИ698 - ВК8 (V=30 м/мин; S = 0,1 мм/об; t = 0,1 мм)

Экспериментальная и расчетная поверхности функции износа РИ $h_3 = f(V, G^*_{Sn})$, а также погрешность метода оценки износа приведены на рисунке 3.9.

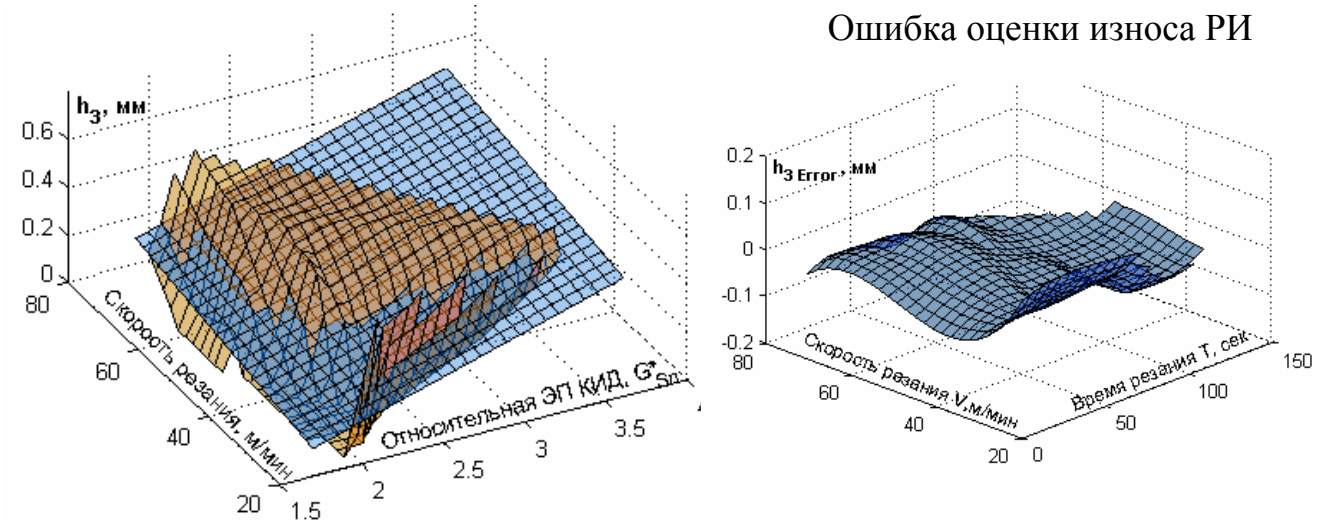


Рисунок 3.9. Экспериментальная и расчетная поверхность функции $h_3 = f(V, G^*_{Sn})$ и функция ошибки $\Delta = f(V,T)$

Реальная зависимость относительной ЭП КИД от скорости резания отличается от теоретической тем, что наблюдается нелинейность с экстремумом в области оптимальных скоростей резания. Поэтому в области оптимальных скоростей оценка износа инструмента завышена на 0,06 мм, а на малых скоростях резания занижена на 0,04 мм.

Результаты:

Разработан и получил экспериментальное подтверждение новый эффективный алгоритм идентификации состояния РИ, обладающий инвариантностью к режимам и технологическим условиям обработки и имеющий точность распознавания +/- 0,06 мм. Разработанный алгоритм отличается от аналогов способностью к адаптации и самообучению в процессе механообработки.

Синтез методов идентификации на базе ВАЭ и ЭП КИД позволил осуществить оценку износа с высокой точностью и сделать ее инвариантной к нестационарности, колебаниям припуска и изменениям ТЭДС.

Выводы:

1. Для возможности многократного использования моделей износа, полученных на первых технологических проходах, использования уже исследованных зависимостей, возможности обобщения и синтеза новых моделей, необходима разработка базы данных и алгоритмов самоорганизации моделей ПР.

2. Разработанный алгоритм мониторинга открывает перспективные возможности к прогнозированию состояния РИ, поскольку появилась возможность оценить прогностическую ценность имеющихся в БД моделей ПР на основе оперативной информации о состоянии инструмента.

3.3. Прогноз параметров процесса резания

Задача прогноза является на порядок более сложной, чем задача мониторинга состояния РИ [156]. Основная сложность процедуры прогноза заключается в неопределенности параметров модели, вызванной вариацией качества инструментального и обрабатываемого материала, неоднородностью их свойств, изменчивостью условий внешней среды, жесткости системы станок – приспособление – деталь, а также стохастичностью природы самого процесса резания (п.1.5). Таким образом, любая модель, которую планируется использовать в качестве базовой для прогноза параметров, должна изменять свои параметры в процессе работы системы. Приспосабливаться (адаптироваться) к реальному процессу на основе имеющейся оперативной информации может не сама модель, а только ее переменная часть, корректирующая вычисления по простому линейному алгоритму.

Постановка задачи прогноза может иметь следующую формулировку. Требуется по имеющемуся вектору измерений $\mathbf{W}(t)=(\mathbf{U}(t),\mathbf{Y}(t))$ восстановить вектор $\mathbf{Y}(t+\tau)$ при известном сочетании входных $\mathbf{U}(t+\tau)$ параметров и оценить точность и достоверность прогноза как меру неопределенности.

При линейной зависимости выходных координат от входных поставленная задача имеет тривиальное решение и сводится к задаче многомерной экстраполяции

[23]. При известной функциональной зависимости задача также может быть приведена к линейной путем замены переменных [91].

Но, к сожалению, зависимости являются нелинейными и нестационарными, что не дает системе в процессе работы надежную «обучающую выборку». Так зависимость износа инструмента от времени имеет характерную кривую (Рисунок 2.5), вид которой изменяется в зависимости от режимов обработки, геометрических параметров, жесткости системы и т.д. (Рисунок 2.9).

Для корректного расчета оцениваемых параметров требуется учесть априорный опыт и экспериментальные данные.

Предлагается использование следующего алгоритма.

1. Идентифицировать свойства инструмента и обрабатываемого материала, жесткость системы, геометрические параметры инструмента и т.д. (т.е. выбрать соответствующую модель из базы данных) (п.3.3.3);
2. Идентифицировать текущее состояние в пространстве параметров данной модели, т.е. определить время наработки (п.3.2);
3. Скорректировать при необходимости оценку прогнозируемого параметра на основе линейной экстраполяции функции невязки.

Для реализации описанного алгоритма требуется сформировать базу данных и разработать алгоритм для выбора модели, наиболее «близкой» по свойствам к реальному процессу.

3.3.1. Разработка базы данных системы диагностики

Поставленная задача прогноза не может быть корректно решена без априорной информации о модели износа инструмента. Титанические работы по построению таких моделей проводились в более чем 30 вузах с послевоенных лет и до распада Советского Союза. На основании этих работ были разработаны нормативы для всех видов металлообработки [16, 22]. Однако при построении моделей различные экспериментаторы ставят различные задачи, поэтому

полученные модели неунифицированы, отличаются числом входных параметров, условиями проведения экспериментов, их глубиной, статистической устойчивостью.

Требуется создание единого банка данных, обладающего следующими возможностями:

- унифицированное представление любого вида модели, независимо от сложности функциональной зависимости, числа входящих аргументов;

- возможности быстрого поиска соответствующей модели по марке материала и инструмента, и уточнение результатов поиска по дополнительным параметрам: вид обработки, технологическое оборудование, геометрия инструмента, вид инструмента, условия получения модели;

- поддержание стандартных протоколов обмена данными между приложениями.

Сформулированные требования выходят за рамки проектирования базы данных, поскольку требуют не только операций с декларативной информацией, но и процедур вывода и анализа данных.

В результате выполненных исследований разработана структура базы данных (приложение В) для хранения моделей. Систематизированы имеющиеся в открытых источниках данные по моделям резания труднообрабатываемых материалов и занесены в БД.

Доступ к БД осуществляется посредством драйвера ODBC (или напрямую через ADO). Структура БД предусматривает следующие поля:

- марка обрабатываемого материала и инструмента;
- выходной параметр (Пр.: Е – термоЭДС);
- входные (варьируемые) параметры, кодируемые символами $x_1, x_2 \ldots x_n$ и интервалы их варьирования (Пр.: $x_1 \rightarrow V$ (30-50 м/мин) скорость резания; $x_2 \rightarrow S$ (0,097-0,39 мм/об) – подача инструмента; $x_3 \rightarrow t$ (0,5-1,5 мм) – глубина резания; $x_4 \rightarrow h_3$(0,1-0,4 мм) – износ инструмента по задней поверхности;
- постоянные известные параметры, не изменяющиеся или изменяющиеся незначительно в процессе обработки с присвоенными им значениями (углы в плане, передний, задний угол);

- вид обработки (точение, фрезерование …), характеристики инструмента (резец цельный, с напайными пластинами, с механическим креплением режущей пластины), тип используемого оборудования, особенности обработки (СОТС, без СОТС).

Отличительная особенность базы данных состоит в векторно-матричном представлении параметров. Таким образом, в качестве выходного параметра может быть использован вектор состояния (например, вектор [cD_1, cD_2, cD_3, cD_4, cD_5, cD_6, cA_1, cA_2, cA_3, cA_4, cA_5, cA_6], состоящий из набора детализирующих и аппроксимирующих коэффициентов вейвлет-разложения).

В основу БД положена реляционная модель организации данных, реализованная в СУБД Microsoft SQL2000 (более ранняя версия имеет аналог в Microsoft Access). Средствами СУБД организован доступ с помощью языка структурированных запросов SQL (structured query language).

Богатый инструмент, предоставляемый современными профессиональными СУБД, позволяет отвлечься от вопроса хранения, добавления, удаления, индексирования, поиска структурированных данных.

Однако объем литературных исследований ограничен и не может включать бесконечное число всех реализаций сочетаний режимов обработки, геометрических параметров инструмента, условий проведения эксперимента и множества других факторов. Для реализации автоматических алгоритмов выбора оптимальной модели из базы данных требуется: ввести метрику релевантности, определяющую близость моделей по каждому из параметров к уже имеющимся в БД; обеспечить поиск функциональной зависимости от аргумента, не входящего в описание функции явно, но имеющего однозначную зависимость аргумента, присутствующего в БД.

Решение перечисленных задач, а также дополнительные возможности представления и оперирования данными и знаниями предоставляет база знаний [86].

Выводы:

1. Разработана структура базы данных, удовлетворяющих требованиям иерархичности, гибкости, расширяемости и реализована на базе СУБД Microsoft

SQL. Создание БД позволило унифицировать и систематизировать модели ПР из литературных источников.

2. База данных учитывает многомерность входных аргументов, что актуально для хранения параметров сигналов ВАЭ.

3. Выявлена необходимость организации более сложных алгоритмов поиска, по сравнению со стандартными инструментами, предоставляемыми средствами СУБД. Заключающаяся в многошаговом поиске и поиске «ближайших соседей» при отсутствии результата «прямого» запроса.

3.3.2.Разработка базы знаний

Коммерческих экспертных систем и баз знаний для процесса резания, основанных на базе данных моделей процесса износа, зависимости температуры, ТЭДС, ЭП КИД и других выходных параметров (п.2.1.2) от технологических условий, режимов резания и других входных параметров (п.2.1.3), не существует. С этих позиций актуальным вопросом является разработка базы знаний.

Особенности представления декларативной информации в базе знаний [86]:

- внутренняя интерпретируемость;
- структуризация;
- связность;
- введение семантической меры;
- активность знаний.

Вопросы внутренней интерпретируемости и структуризации решены средствами разработчиков СУБД MicrosoftSQL [159] (п.3.3.1). Активность знаний обеспечивается алгоритмами самоорганизации (п.4.5). Следовательно, нерешенными остаются задачи обеспечения *связанности* и введения *семантической меры*, всех информационных единиц, хранящихся в базе данных.

3.3.2.1.Особенности обеспечения связанности и определения семантической меры информационных единиц в БД процесса резания

Между информационными единицами БД должны быть установлены отношения структуризации, функциональные, каузальные и семантические отношения.

С помощью первых задается иерархия информационных единиц, и данные отношения определяются структурой базы данных (приложение Г).

Вторые несут процедурную информацию, позволяющую находить (вычислять) одни информационные единицы через другие. Для процедурной информации требуется выбор и реализация *способа представления знаний* [86] (п.3.3.2.2).

Третьи задают причинно - следственные связи. Причинно-следственные связи учитываются в модели БД вида $f(x1,\ldots x2,T)$, где Т – время или другая переменная, характеризующая меру эволюции процесса. Таким образом, причинно-следственные связи учитываются через процедурные отношения.

Четвертые соответствуют всем остальным отношениям. Между информационными единицами устанавливаются связи, определяющие приоритетность выбора из БД, которая вычисляется на основании статистики достоверности прогноза в прошлом и отношения релевантности, т.е. силу ассоциативной связи между информационными единицами. Данный тип отношений для процесса резания самый слабый и используется только в случае полной неудачи поиска информационных единиц, близких по другим видам отношений.

Данный вид отношений устанавливает поиск модели в БД в порядке следующего приоритета:

- поиск по типу используемого оборудования аналогичной группы;
- поиск с игнорированием особенностей обработки;
- поиск по материалам заготовки аналогичной группы с близкими физико-механическими свойствами;
- поиск по материалам инструмента аналогичной группы с близкими физико-механическими свойствами.

3.3.2.2. Выбор способа представления знаний

Существуют два типа методов представления знаний (ПЗ):

- формальные модели ПЗ;

- неформальные (семантические, реляционные) модели ПЗ.

Недостатки формальных моделей, выражающиеся в сложности учета происходящих изменений, ”закрытости" формальных систем (ФС), их негибкость, требующей перестройкой всей ФС при модификации и расширении, что делает формальную систему неприемлемой для представления знаний о процессе резания.

Среди формальных систем выделяют следующие способы представления знаний:

- логическая модель;

- сетевая модель;

- продукционная модель;

- фреймовая модель.

Продукции наряду с фреймами являются наиболее популярными средствами представления знаний [86]. Продукции, с одной стороны, близки к логическим моделям, что позволяет организовывать на них эффективные процедуры вывода, а с другой стороны, более наглядно отражают знания, чем классические логические модели. В моделях этого типа используются некоторые элементы логических и сетевых моделей. Из логических моделей заимствована идея правил вывода, а из сетевых моделей – описание знаний в виде семантической сети. В результате применения правил вывода к фрагментам сетевого описания происходит трансформация семантической сети за счет смены ее фрагментов, наращивания сети и исключения из нее ненужных фрагментов. Таким образом, в продукционных моделях процедурная информация явно выделена и описывается иными средствами, чем декларативная информация. Вместо логического вывода, характерного для логических моделей, в продукционных моделях появляется *вывод на знаниях*.

В общем виде продукцией описывается выражение следующего вида:

$$i : S;\ L;\ A \rightarrow B;\ Q \qquad (3.4)$$

где *i* – индивидуальный номер продукции;

S – описание класса ситуаций, в котором данная структура может использоваться;

L – условие, при котором продукция активизируется;

А→В – ядро продукции, например: «ЕСЛИ А1, А2,,..., Ап ТО В». Такая запись означает, что «если все условия от А1 до А*n* являются истиной, то В также истина» или же «когда все условия от А1 до А*n* становятся истиной, то следует выполнить действие В»;

Q – постусловие продукционного правила, описывает операции и действия (процедуры), которые необходимо выполнить после выполнения В. Например, внести изменения в данные либо в саму продукцию.

Пример:

Рассмотрим продукцию №1 (Таблица 3.2). **Если** найдена параметрическая зависимость ТЭДС *E* от скорости резания *V*, подачи инструмента *S*, глубины резания *t* и износа инструмента по задней поверхности h_3 **И**, найдена тарировочная зависимость, однозначно связывающая температуру с ТЭДС, **ТО** формируется функциональная зависимость, связывающая температуру РИ со скоростью резания, подачей, глубиной и износом РИ.

Таблица 3.2. Пример процедурных знаний, хранимых в базе правил

1	E = f(V,S,t,hз)	&	Q = f(E)	→	Q = f(V,S,t,hз)
2	E = f(V,S,t,hз)	&	E = f(Q)	→	E = f(V,S,t,hз)
3	G =f(V,S,t,L)	&	hz=f(L)	→	G =f(V,S,t,hз)
	…				

В синтезированной продукционной системе с целью экономии времени и дискового пространства, процесс обработки информации осуществляется в обратном направлении – методом «генерации» или выдвижения гипотезы и ее проверки (стратегия «от цели к данным»). При каждом обратном движении возникает подцелевое состояние, из которого целевое может быть получено при

прямом движении. В этом случае проверяются правые части продукционных правил с целью обнаружить в них искомое утверждение. Если такие продукционные правила существуют, то проверяется, удовлетворяется ли левая часть продукционного правила. Если да, то гипотеза считается подтвержденной и поиск завершается, если нет – гипотеза отвергается и выполняется поиск «ближайшего соседа» (п.3.3.2.1) на основе анализа семантической близости.

Результаты:

Разработана база знаний процесса резания. Определены отношения структуризации, функциональные, каузальные и семантические. Разработана база процедурных правил вывода.

3.3.3. Разработка алгоритма работы предикатора

Для выполнения прогноза состояния РИ по алгоритму, предложенному в начале раздела (с.123), требуется реализовать выбор из БД модели, наиболее точно описывающей поведение оперативно регистрируемых параметров процесса резания.

Первый этап – формирование функционала базовых моделей **Y**, размерности N. Размерность функционала базовых моделей является величиной заданной и определяется на основе анализа объема базы данных, быстродействия вычислителя и объема ресурсов памяти.

Алгоритм формирования выборки:

1. В процессе инициализации в подсистему обработки данных направляется SQL запрос (Рисунок 3.10), формируемый исполняемым модулем MatLab (приложение Д), который содержит информацию о структуре функции (входной и выходные параметры) и условиях процесса резания;

2. Если длина возвращенной выборки **M** больше либо равна заранее заданной размерности *N*, то возвращается функционал $\mathbf{Y}=[y_i, \ldots y_N]$. Выход.

3. Иначе возвращается функционал $\mathbf{Y}=[y_i, \ldots y_M]$; N = N – M; производится поиск продукционного правила вывода для данных условий процесса резания

(марка инструмента и обрабатываемого материала, геометрия инструмента, и т.д.) с шага k (по умолчанию равен нулю);

4. Если поиск успешен, то найденное правило k выполняется и осуществляется переход к шагу 1;

5. Иначе изменяются условия SQL-запроса в соответствии с приоритетом определенным семантической близостью информационных единиц (п.3.3.2.1), переход к шагу 1;

6. Выход.

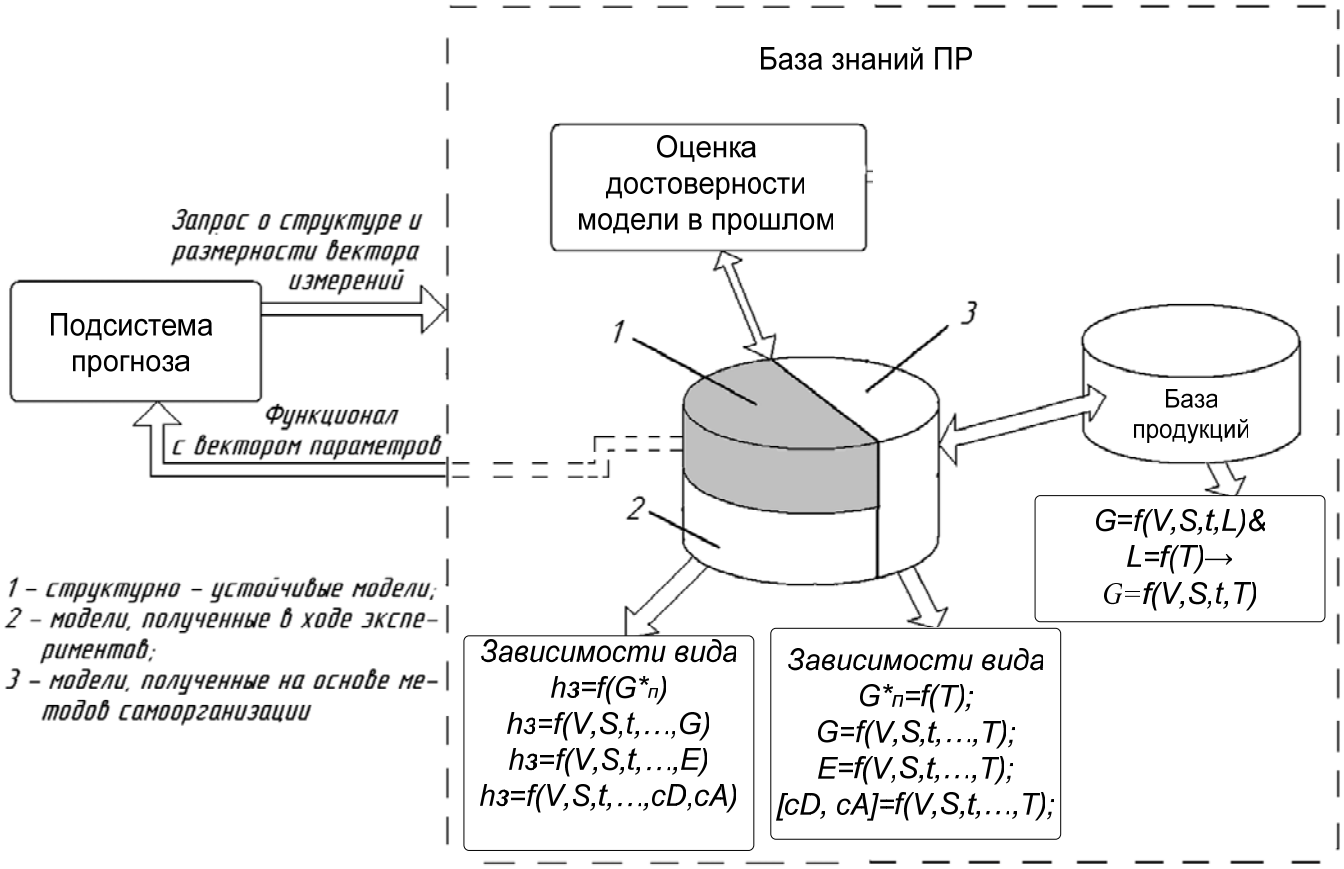


Рисунок 3.10. Инициализация работы подсистемы прогноза состояния РИ

Второй этап – выбор наилучшей модели $\boldsymbol{y}$ из предложенного функционала моделей $\mathbf{Y}$ осуществляется простой подстановкой вектора измерений $\mathbf{W}(\tau)$ в модель $\boldsymbol{y_i}$. Результат в виде функции невязки анализируется на сходимость. Из функций, обеспечивших сходимость, выбирается та, у которой интегральный показатель рассогласования оцененного и действительного значения за период $[0; \tau] \rightarrow \min$. Так

как оценка происходит в реальном времени, алгоритм выбора модели и формирования оценки прогнозируемого параметра реализован в виде итерационной процедуры (Рисунок 3.12).

Третий этап – непосредственно сам прогноз, выполняется по выбранной модели, назовем ее «базовым предиктором». Затем «подправляют» предсказанные значения с помощью дополнительного модельного отображения – так называемого «корректора», – которое строится по тренировочному ряду и связывает ошибки прогнозов базового предиктора для упреждения с самими прогнозами (Рисунок 3.11). Для коррекции используют линейную экстраполяцию функции невязки.

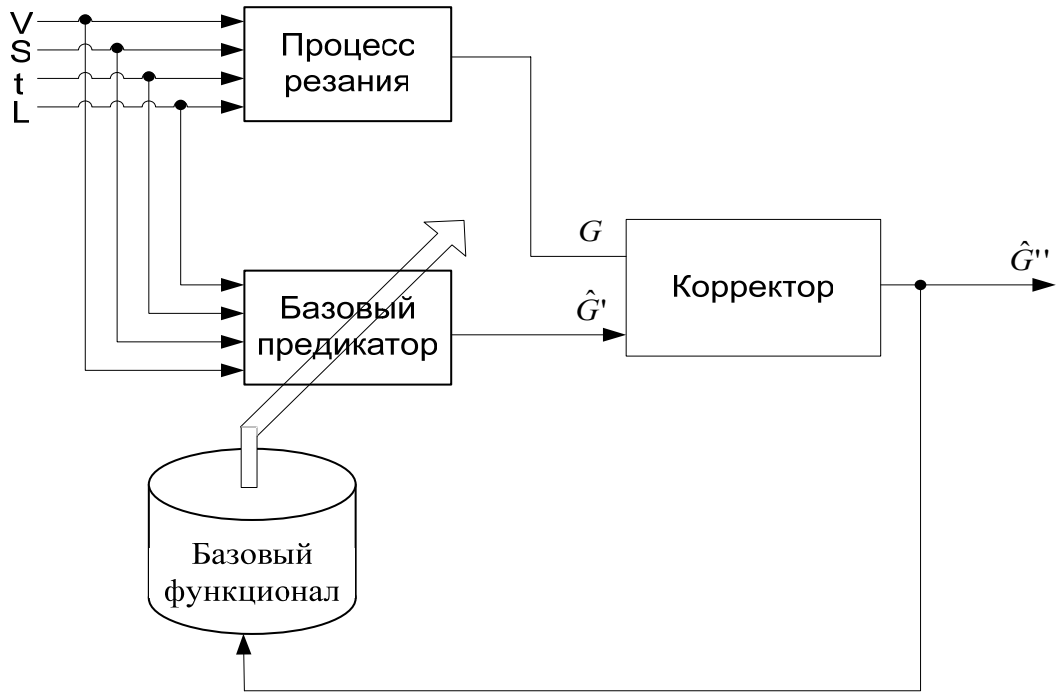


Рисунок 3.11. Функциональная схема устройства прогноза параметров процесса резания, типа «предиктор-корректор»

Используя таблицу оценок достоверности модели и экстраполируя ошибку прогноза, полученного в данной сессии, формируется общая достоверность прогноза, зависящая от горизонта прогноза.

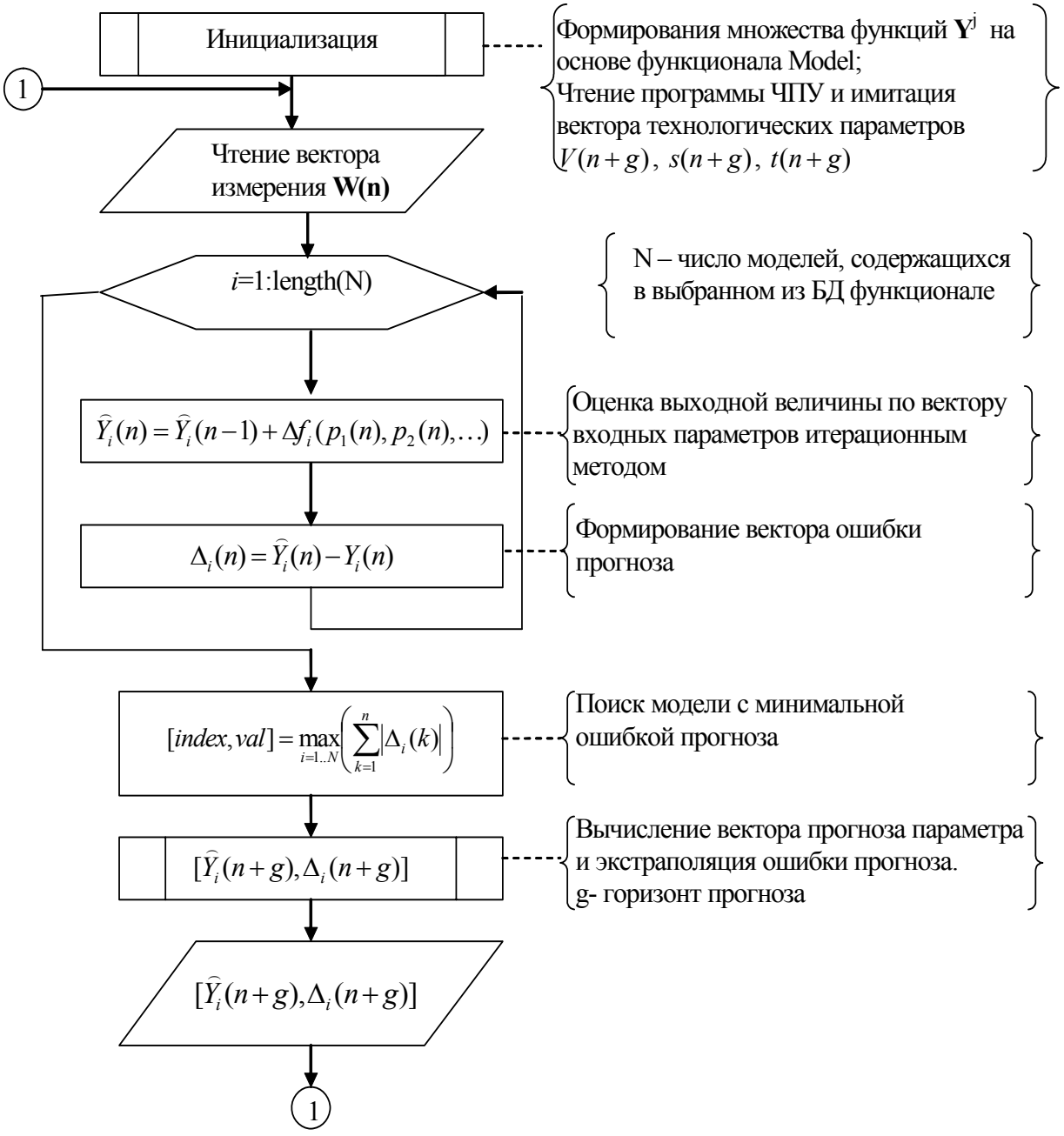


Рисунок 3.12. Упрощенная блок схема алгоритма прогноза и оценки схожести измеренного сигнала и сигнала сгенерированного моделью

3.3.4.Экспериментальная проверка адекватности прогнозируемой оценки работоспособности РИ

Проиллюстрируем работу алгоритма прогноза на примере модели резания, построенной на основе экспериментальных данных (приложение Б).

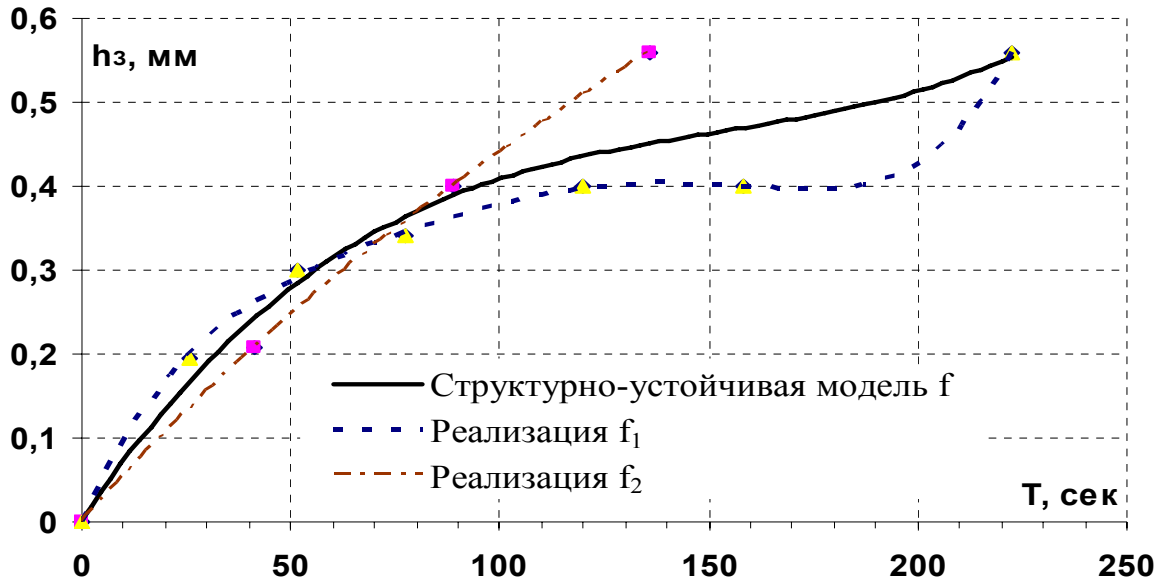


Рисунок 3.13. Статистическая зависимость hЗ = f(t) (структурно-устойчивая модель) и частные реализации f_1,f_2 процесса износа при обработке ЭИ698-ВК8, V=30 м/мин; s=0,1 мм/об; t = 0,1 мм

Из анализа графика следует, что пользуясь временной зависимостью, f ошибка оценки износа по задней поверхности составит +/-0,1 мм, ошибка оценки ресурса РИ ~30%. Такой разброс параметров в производстве может привести к браку (Реализация f_2) или неполного использования ресурса инструмента (Реализация f_1).

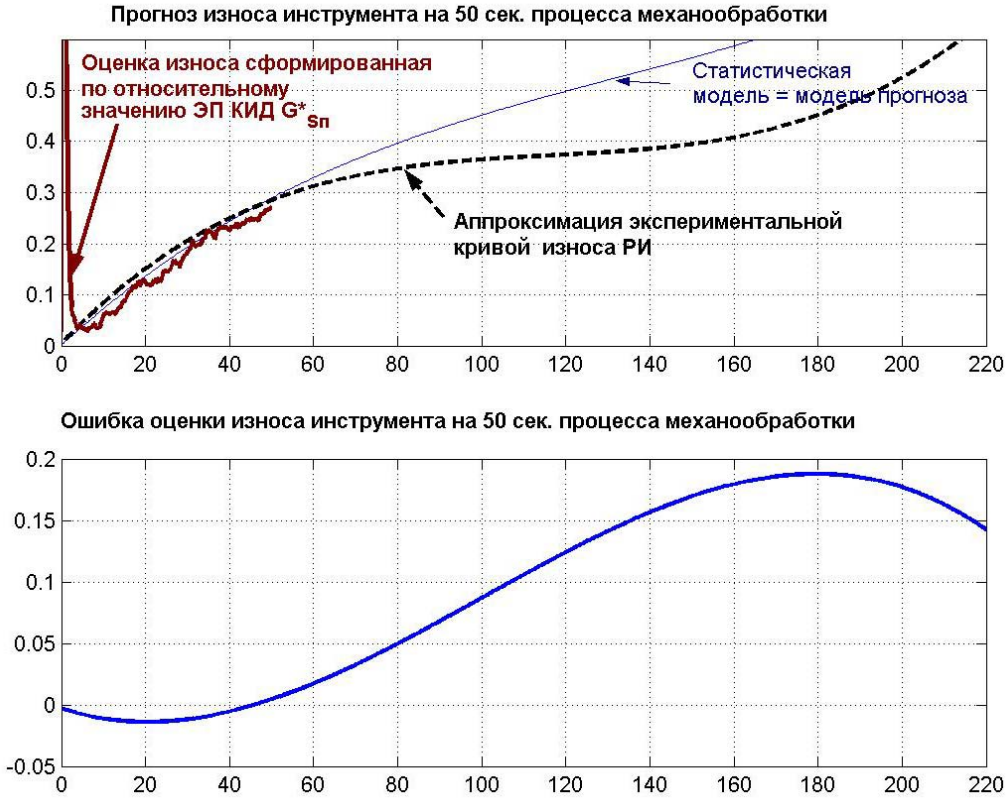


Рисунок 3.14. Прогноз износа РИ на 50 секунде процесса механообработки

В течение первой минуты износ инструмента имеет характер, тождественный статистически полученной модели, поэтому коррекция не производится, и ошибка прогноза высока.

На второй минуте рассогласования между оперативной оценкой износа РИ, полученной от системы мониторинга, превышают величину среднематематического отклонения, и система прогноза должна принять одно из решений: если функционал, сформированный по алгоритму инициализации (рисунок 3.12) содержит модель, более точно описывающую характер износа РИ, чем используемая, она принимается в качестве базовой. Иначе формируется уравнение корректирующей функции путем аппроксимации разницы между экспериментальными данными и статистической моделью (Рисунок 3.15).

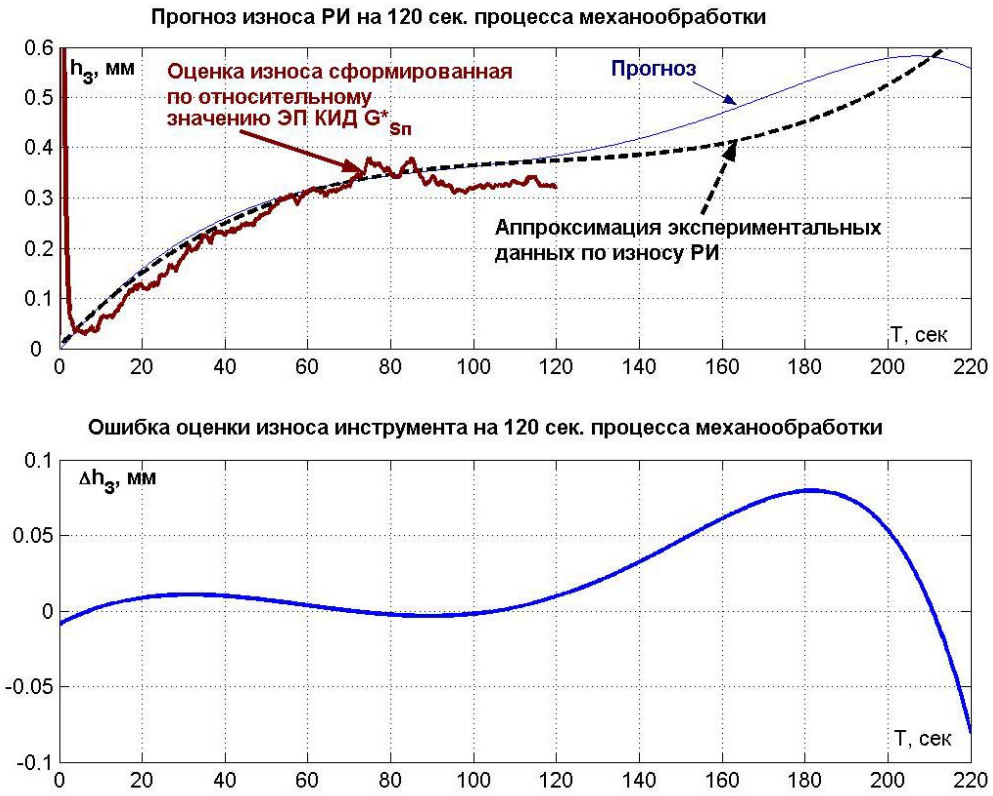


Рисунок 3.15. Прогноз износа РИ на 120 секунде процесса резания

Таблица 3.3. Анализ эффективности алгоритма прогноза

Время от начала процесса резания	**Точность прогноза наступления критического износа ($h_{3кр}$ = 0,5 мм)**		**Прогноз оставшегося ресурса РИ**	
сек	**мм**	**%**	**сек**	**%**
0	1,3	74	65	34
50	1,3	74	65	34
120	0,6	88	20	11
180	0,5	90	14	7

Таким образом, для наихудшего случая, когда зависимость износа инструмента от времени для данной пары инструмент-материал не определена, разработанный алгоритм прогноза становится эффективным на второй минуте от начала процесса механообработки. В другом случае, если подобная пара материалов в данных технологических условиях уже подвергалась обработке, алгоритм прогноза эффективен с первой минуты обработки металла резанием.

Процедура расчета корректирующей функции является итерационной и выполняется в реальном масштабе времени в фоновом режиме.

3.4. Выводы

1. Установлено, что результат успешного распознавания состояния инструмента, соответствующего острому ($h_З$<0,2 мм) и изношенному ($h_З$>$h_{кр}$) на основе оценки энергетического спектра коэффициентов детализации wavelet-разложения с помощью классифицирующей нейронной сети, инвариантен к режимам обработки.

2. Достоверность классификации состояния инструмента на основе энергетического спектра коэффициентов детализации wavelet-разложения сигнала виброакустической эмиссии с точностью +/-0,1 мм не удовлетворительна, поскольку различные состояния РИ способны порождать близкие вектора значений энергией wavelet-коэффициентов вибро-аккустических колебаний.

3. Разработана методика идентификации износа РИ по относительной электропроводимости контакта «инструмент-деталь» с обучением по параметрам сигнала виброакустической эмиссии. Разработанная методика отличается способностью к адаптации и самообучению в процессе механообработки. Обладает инвариантностью к режимам и технологическим условиям обработки и имеет ошибку оценки значения износа РИ по задней поверхности на участке нормального износа 0,05 мм.

4. Разработана база данных моделей ПР, удовлетворяющая требованиям иерархичности, гибкости, расширяемости, что позволило унифицировать и систематизировать модели ПР из литературных источников. Особенность БД состоит в векторно-матричном представлении входных аргументов. Разработана база знаний о диагностических моделях процесса резания, для информационных единиц которой определены отношения структуризации, функциональные, каузальные и семантические.

5. С применением метода «предикатор-корректор» разработана методика прогнозирования износа инструмента по экспериментальным данным.

ГЛАВА 4. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОЛУЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Проблемой для получения моделей идентификации и прогноза в задачах диагностики состояния РИ является «некорректность» поставленной задачи.

Задача называется корректно поставленной (по Адамару), если выполняются три условия:

1) решение существует;

2) решение единственно;

3) задача устойчива по входным данным. Если хотя бы одно из трех условий нарушается, то задача называется некорректной (по Адамару).

Для реальной системы:

• наблюдаемый процесс $x(t)$ всегда отличается от исследуемого процесса $\eta(t)$ из-за влияния приборов – регистрирующих устройств (измерительный шум $\nu(t)$);

• существуют неучтенные внешние воздействия μ (t) (так называемый «динамический шум»), случайные и/или неслучайные. Последние, в принципе, можно ввести в качестве поправки в модель;

• модель не адекватно отражает свойства объекта («шумы незнания» $\Delta M(t)$). Это связано с ее структурой или значениями параметров.

Широко распространен [14, 66] следующий вариант постановки и решения некорректной задачи. Пусть при входных данных X' существует решение задачи Y'. Пусть данные X' заданы с погрешностями, обозначим такой «зашумленный вход» X. Строгого решения при входных данных X задача может и не иметь. Тогда ищут величину $Z = \Phi(X)$, в некотором смысле близкую к решению, и такую, что отображение Φ – непрерывно, и $\Phi(X) \to Y'$ при $X - X' \to 0$. Величину Z называют квазирешением.

Постановки задачи моделирования по временному ряду снимается также за счет дополнительных предположений или априорной информации о структуре модели (и соответствующего выбора базисных функций, см. п. 4.6.1.1).

Существуют также процедуры, которые обеспечивают корректность постановки: построение так называемых регуляризирующих функционалов [101,18]. Типичным примером последней ситуации может служить задача аппроксимации зависимости одной величины Y от другой X на основе конечной «обучающей» выборки (см. ниже п. 4.6.1.1). Довольно легко подобрать кривую, проходящую через каждую экспериментальную точку на плоскости (X,Y) (п. 4.1.3.1). Однако, в общем случае, существует бесконечное множество кривых, которые отличаются от выбранной произвольными осцилляциями между точками. Все они доставляют минимум эмпирической среднеквадратичной ошибке аппроксимации и в этом смысле являются равноправными решениями задачи. Число решений можно уменьшить, если наложить условие на величину межточечных осцилляций. Это как раз и делает регуляризирующий функционал (подробнее см. п. 7.2.3). Так что анализ корректности задачи важен: он помогает выбрать эффективный способ ее решения и, если нужно, несколько изменить саму постановку.

4.1. Алгоритмы параметрической идентификации моделей

Значение износа инструмента успешно [80] идентифицируется с помощью моделей вида: hз $= f(V,s,t,G)$, полученных в результате полнофакторного эксперимента приложение А.

Постановка задачи идентификации износа инструмента

Дана исходная матрица прецедентов, содержащая векторы значений входных параметров (режимы обработки, сигналы, содержащие информацию о термо-электрическом и деформационном состоянии инструмента) $\chi(X_1, X_2, \ldots, X_n)$ и соответствующие им $\Upsilon(Y_1, Y_2, \ldots, Y_m)$ вектора выходных параметров (значения размера или интенсивности износа по задней/передней поверхности, глубина лунки износа и т.д.) где $n>k$. Идентифицировать параметры $K = \begin{bmatrix} k_{1,1} & \cdots & k_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{m,1} & \cdots & k_{m,n} \end{bmatrix}$ степенной модели следующего вида:

$$Y_m = C_m \cdot X_1^{K_{1,m}} \cdot X_2^{K_{2,m}} \ldots X_n^{K_{n,m}}, \quad (4.1)$$

где X_1, X_2, X_n – входные параметры;

С – экспериментально определяемый коэффициент;

K_1, K_2, K_n – степенные коэффициенты полинома, описывающего функциональную зависимость выходных параметров процесса механообработки от входных.

Алгоритмов нахождения коэффициентов для (3.5) в исходном виде нет. Преобразуем исходный полином, прологарифмировав левую и правую часть, к виду:

$$Ln(Y_j) = LnC_j + K_{1,j} LnX_1 + K_{2,j} LnX_2 \ldots K_{n,j} LnX_n, j = 1,2,\ldots m \quad (4.2)$$

Идентификация коэффициентов полученного уравнения предложена в [23]. После преобразования исходного выражения система может быть описана следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} z_1 &= k_{1,1}u_1 + \ldots + k_{1,i}u_i + \ldots k_{1,n}u_n, \\ &\vdots \\ z_j &= k_{j,1}u_1 + \ldots + k_{j,i}u_i + \ldots k_{j,n}u_n, \\ &\vdots \\ z_m &= k_{m,1}u_1 + \ldots + k_{m,i}u_i + \ldots k_{m,n}u_n, \end{aligned} \quad (4.3)$$

или в векторной форме

$$z = \mathrm{Ku}, \quad (4.4)$$

где $z=(Ln(Y_1),\ldots,Ln(Y_m))\mathrm{T}=(z_1,\ldots,z_m)^T$,

$u=(1,Ln(X_1),\ldots,Ln(X_n))\mathrm{T}=(u_1,\ldots,u_n)^T$,

$$K = \begin{bmatrix} k_{1,1} & \cdots & k_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{m,1} & \cdots & k_{m,n} \end{bmatrix}.$$

Наилучшим в смысле регрессии по методу наименьших квадратов оценки $\hat{k}_i$ параметров $k_i \forall i$ удовлетворяют соотношению

$$\hat{\mathbf{k}}_j = (\mathbf{U}^T\mathbf{U})^{-1}\cdot\mathbf{U}^T\cdot\mathbf{z}_j = (\hat{k}_{j,1},\ldots,\hat{k}_{j,n}), \tag{4.5}$$

где

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_{1,1} & \cdots & u_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ u_{j,1} & \cdots & u_{j,n} \\ \vdots & & \vdots \\ u_{m,1} & \cdots & u_{m,n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z}_j = \begin{bmatrix} z_{1,j} \\ \vdots \\ z_{i,j} \\ \\ z_{m,j} \end{bmatrix},$$

Для большей наглядности алгоритм в виде блок-схемы приведен на рисунке 4.1.

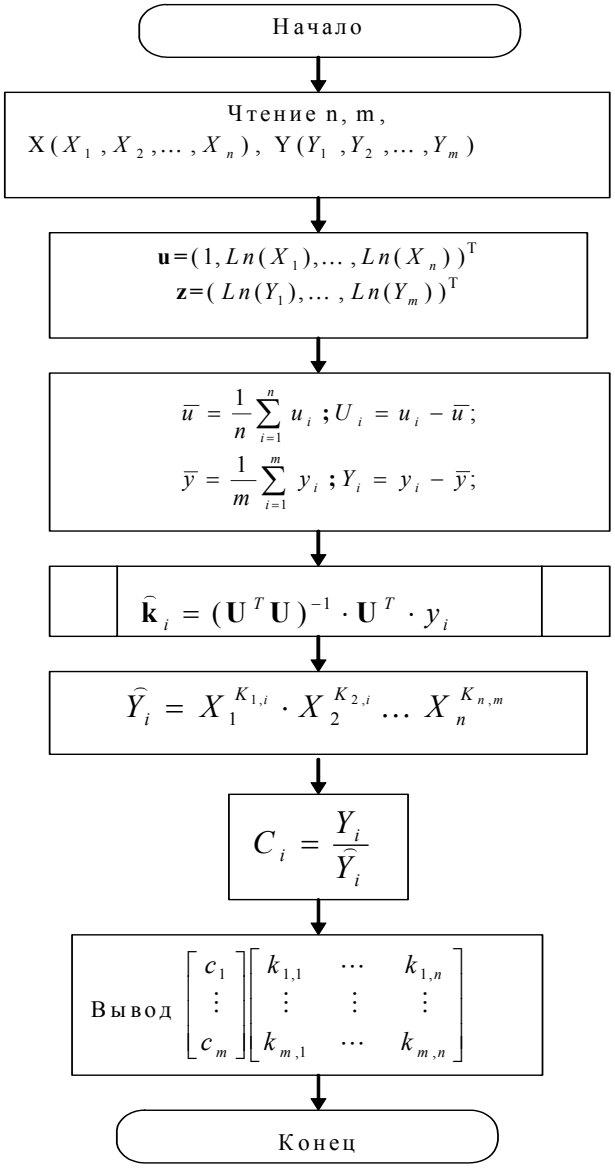
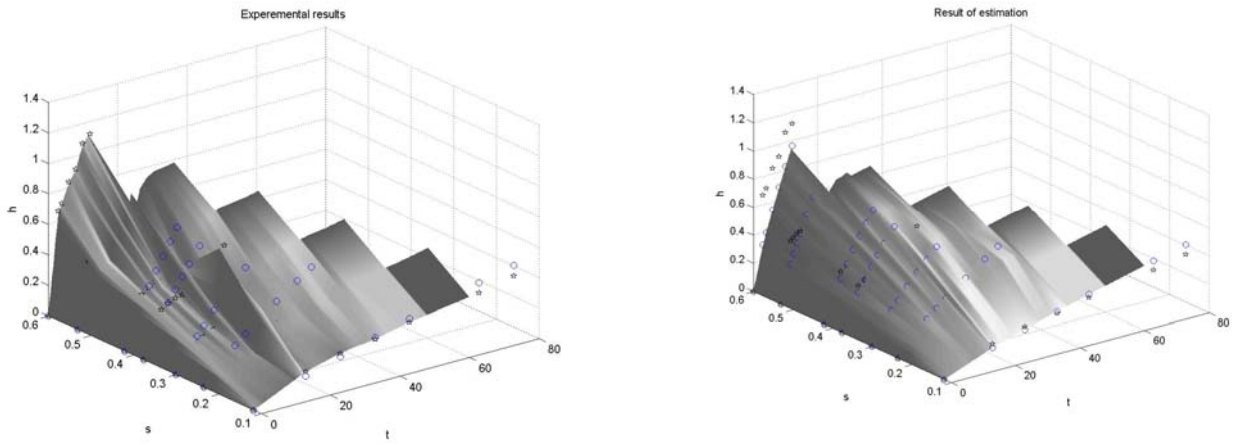


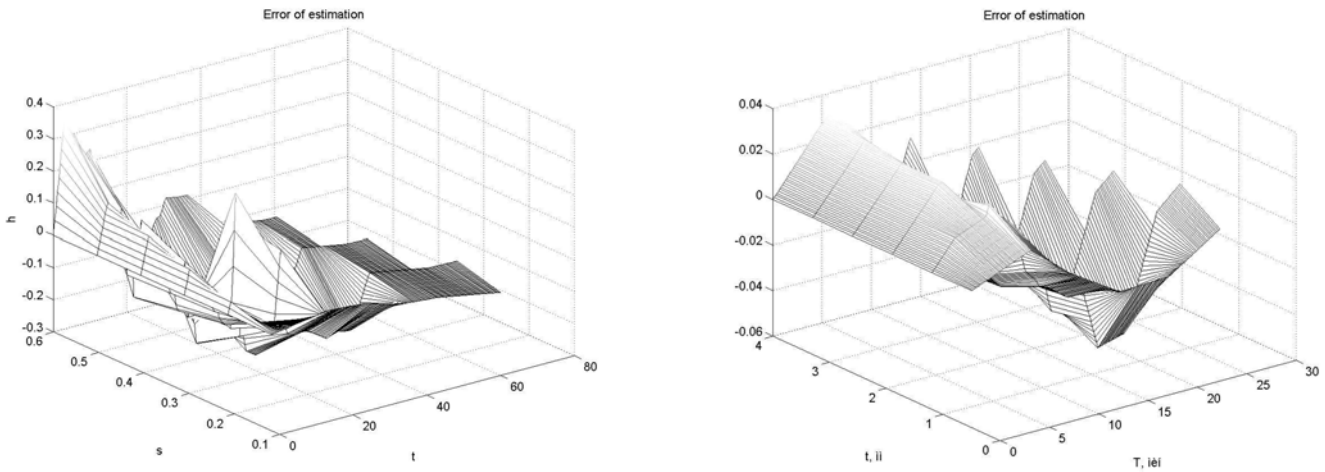
Рисунок 4.1. Блок-схема алгоритма идентификации методом МНК

Программная реализация алгоритма приведена в приложении Д. Приведем результаты оценки при варьировании подачи резания (скорость и глубина постоянные) и изобразим в виде поверхностей, построенной по экспериментальным данным в приложении Б и полученных путем построения полиномов вида: $h_з = C \cdot V^{K_1} \cdot s^{K_2} \cdot t^{K_2} \cdot \tau^{K_4}$, где коэффициенты определены с помощью алгоритма МНК.



а – экспериментальная поверхность *б* – поверхность, полученная в результате аппроксимации методом МНК

Рисунок 4.2. График зависимости износа по задней поверхности резца ВК6М от продолжительности резания при различных подачах. Обрабатываемый материал – ЭИ437БУ; v=45 м/мин; *t*=1 мм. ○ – точки, полученные в результате аппроксимации степенным полиномом вида $h_з = C \cdot V^{K_1} \cdot s^{K_2} \cdot t^{K_2} \cdot \tau^{K_4}$.; * – экспериментальные точки



а – s=0,084÷0,1 мм/об (v=30м/мин; t=1 мм) б– t = 0,5 ÷ 4 мм (v=45 м/мин; s=0,1мм/об)

Рисунок 4.3. Поверхности функций невязки оценки износа при варьировании подачи и глубины резания при точении сплава ЭИ437БУ резцом ВК6М по данным приложения Б

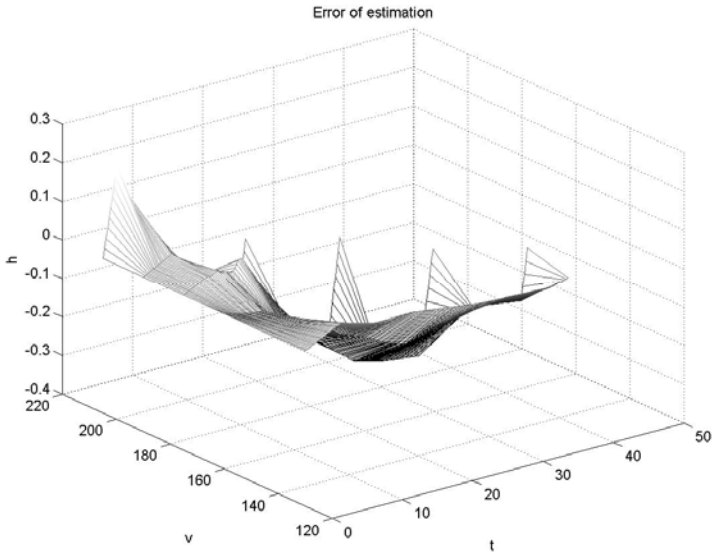


Рисунок 4.4. Поверхности функций невязки оценки износа при варьировании скорости резания при точении сплава ЭИ437БУ резцом ВК6М по данным приложения Б. v = 20 – 50м/мин; t=1 мм; s=0,1мм/об

Выводы, которые можно сделать на основе анализа полученных данных, свидетельствуют о значительных погрешностях аппроксимации, связанных со сглаживанием реальных данных. Функция невязки для приведенных в приложении А экспериментальных данных приведена на рисунке 4.3, 4.4. Наибольшие погрешности аппроксимации обнаруживаются при аппроксимации функции подачи. Даже в области рабочих скоростей резания ошибка идентификации по модели составляет +/-0,2 мм. (При принятой 5% точности она не должна превышать 0,03 мм).

Исследования, проведенные для имеющих место в литературе степенных моделей по различному сочетанию электрических параметров (термоЭДС, электропроводимости), а также сил резания, мощности показывают высокую погрешность, которая возрастает при анализе экспериментальных данных из различных источников.

4.2. Структурная идентификация

Неверно выбранная структура модели приводит к серьезным погрешностям в оценке параметров (п. 4.1). Выбор структуры должен основываться на требованиях к точности и проверяться с помощью методов статистического анализа. Но даже корректно выбранная структура модели может оказаться неадекватной при изменении внешних условий работы. Смена оборудования, оснастки, приспособления, конструктивных изменений, номенклатуры обрабатываемых изделий может повлечь не только изменение параметров системы, но и изменения самой структуры модели. С целью адаптируемости системы диагностики к структурным изменениям проведем исследование механизма структурной идентификации. Для определения модели предлагается следующая схема идентификатора (рисунок 4.5).

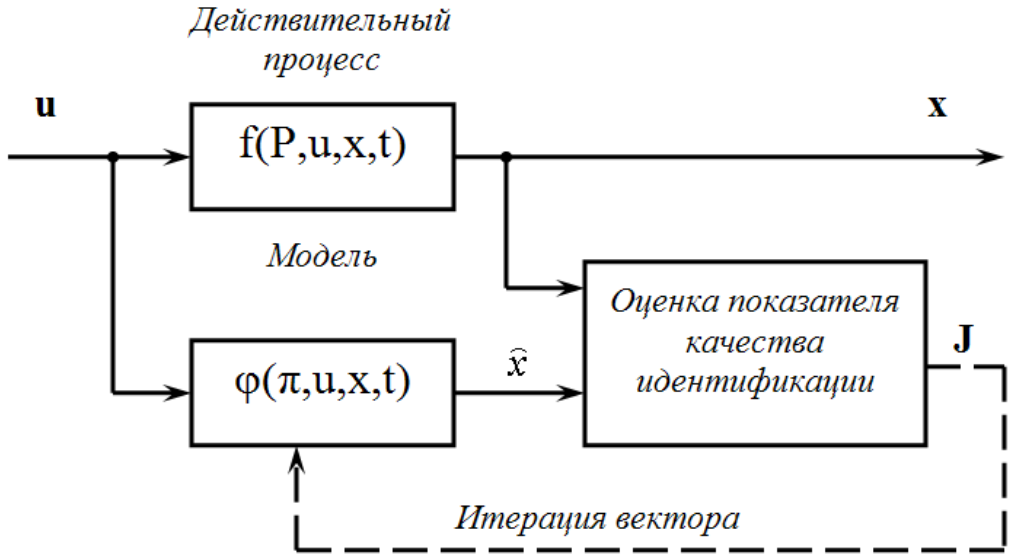


Рисунок 4.5. Общая схема идентификатора

Эта модель описывается следующим разностным выражением:

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \psi[\pi, \mathbf{u}(k), \mathbf{x}(k), k], \qquad (4.6)$$

где $\hat{\mathbf{x}}$ – оценка вектора x при использовании модели ψ с вектором оцениваемых параметров π. Вид функции ψ должен быть задан, а компоненты вектора параметров π не известны.

Алгоритм идентификации производится по следующей схеме:

Шаг 1. Выбрать вид аппроксимирующей функции Ψ наименьшего порядка из базы данных, успешных на предыдущих шагах.

Шаг 2. Идентифицировать вектор параметров π выбранной модели.

Шаг 3. Произвести оценку правдоподобности для принятого значения предельного относительного отклонения δ и времени вычислений:

$$J = \left[\frac{\left| \delta_{i,j} \right|}{\max\left(\delta_{1..n,1..n} \right)} \right]^{\alpha} \cdot \left[\frac{t}{\max\left(t_{1..n,1..n} \right)} \right]^{\beta}, \tag{4.7}$$

где α, β – коэффициенты значимости. Они могут варьироваться в зависимости от величины дефицита машинного времени (уменьшение β) или повышения достоверности модели (уменьшение α).

Шаг 4. Поиск осуществляется в окрестностях значений параметров, принятых в качестве оптимальных на предыдущем шаге. Время поиска ограничивается ведущим процессом более высокого уровня. Модель, соответствующая найденному минимуму функционала, принимается и записывается в файл базы данных.

Если в базе данных отсутствует информация об успешных на предыдущих шагах моделях, они выбираются из ранее сформированного функционала.

Определение вида аппроксимирующего полинома из функционала (4.8) для продольного точения произведем для экспериментальных данных, представленных в таблице 4.1, полученных на основе временных осциллограмм сигналов ТЭДС и ЭП КИД (приложение Б) при точении ЭИ698 резцом ВК8.

$$\Phi = \left\{ \begin{array}{l} Y_j = C_j + \sum\limits_{i=1}^{N_j} \sum\limits_{m=1}^{\mu_{i,j}} K_{m,i,j} \cdot X_i^m, \mathrm{j} = 1..\mathrm{M} \\ Y_j = e^{C_j} \cdot \prod\limits_{i=1}^{N_j} \prod\limits_{m=}^{\mu_{i,j}} \left[X_i^m \right]^{K_{m,i,j}}, \mathrm{j} = 1..\mathrm{M} \\ Y_j = \ln C_j + \sum\limits_{i=1}^{N_j} \sum\limits_{m=1}^{\mu_{i,j}} K_{m,i,j} \cdot \ln(X_i^m), \mathrm{j} = 1..\mathrm{M} \\ y(k) = \sum\limits_{i=0}^{N} \left(\sum\limits_{m_1=1}^{M} \ldots \sum\limits_{m_i=1}^{M} g_i(m_1, \ldots, m_i) x(k-m_1) \ldots x(k-m_i) \right) \end{array} \right\}. \tag{4.8}$$

Таблица 4.1. Анализ экспериментальных данных

V, м/мин	S, мм/об	t, мм	L, м	hз, мм	E, мВ	G, 1/Ом
20,00	0,10	0,50	0,00	0,01	18,20	160,82
20,00	0,10	0,50	23,75	0,80	21,75	180,00
30,00	0,10	0,50	0,00	0,01	20,65	165,55
30,00	0,10	0,50	20,67	0,21	21,00	150,00
30,00	0,10	0,50	44,30	0,40	22,00	170,00
30,00	0,10	0,50	67,92	0,56	22,00	180,00
40,00	0,10	0,50	0,00	0,01	23,11	170,28
40,00	0,10	0,50	26,58	0,38	25,00	180,00
40,00	0,10	0,50	50,08	0,48	27,50	175,00
50,00	0,10	0,50	0,00	0,01	25,56	175,01
50,00	0,10	0,50	29,37	0,28	26,00	190,00
50,00	0,10	0,50	52,87	0,32	27,50	200,00
50,00	0,10	0,50	70,50	0,34	29,00	195,00
50,00	0,10	0,50	93,87	0,47	29,50	210,00
50,00	0,10	0,50	117,24	0,59	30,30	215,00
60,00	0,10	0,50	0,00	0,01	28,01	179,74
60,00	0,10	0,50	23,37	0,10	29,50	186,00
60,00	0,10	0,50	52,59	0,38	31,00	194,00
60,00	0,10	0,50	78,89	0,56	32,00	197,00
70,00	0,10	0,50	0,00	0,01	30,47	184,47
70,00	0,10	0,50	11,62	0,17	29,00	174,00
70,00	0,10	0,50	34,87	0,31	31,00	185,00
70,00	0,10	0,50	58,12	0,45	32,50	190,00
70,00	0,10	0,50	81,37	1,02	34,00	200,00

Таблица 4.2. Функционал простых аппроксимирующих полиномов функции вида $G = f(V, hз)$, $E = f(V, hз)$, $hз = f(V,G)$.

Вид апрокс.	**Порядок**	**Функция аппроксимации**	**Максимальная ошибка** $\max\left\|\frac{\varepsilon_i \cdot 100\%}{G_i}\right\|$	**Средняя ошибка** $\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\|\frac{\varepsilon_i \cdot 100\%}{G_i}\right\|$
R=R1=R2	1	G = 151.356+0.473V+28.192hz E = 13.291+0.24538V+5.0386hz hz = -1.6061-0.005344V+0.011954G	11.2524 % 6.9005 % 26 %	3.5606 % 2.6663 % 10 %
R1	2	G = 41.3078+5.0713V+ 50.7519hz-0.047151V^2-4.6895hz^2 E = 2.9035+0.66514V+9.2591hz-	14.2049 % 9.1812 %	3.3843 % 2.5379 %

		$0.0043316\ V^2-2.4906\ hz^2$ $hz = -1.0137-0.0338V+0.0065G-0.00029V^2-1.3\cdot10^{-5}G^2$	23 %	6.5 %
R1	3	$G = 68.1388+2.8665V+ 54.4554hz-0.00094026V^2+ 44.255hz^2-0.0003V^3-55.6315hz^3$ $E = 5.6653+0.40193V+8.07hz+0.001877V^2+6.293hz^3-7.9751hz^3$	12.2143 % 8.306 %	3.3181 % 2.4464 %
R2	2	$G = 13.0014+5.893V+86.55hz-0.04998V^2-1.285V\cdot hz+26.49hz^2$ $E = -1.5223+0.7717V+15.67hz-0.004809V^2-0.115V*hz-2.26\ hz^2$ $hz = -1.0137-0.0338V+0.0065G-0.000293V^2-1.3\cdot10^{-5}G^2$	17.9819 % 11.3607 % 23 %	3.2852% 2.6152 % 6.5 %
R2	3	$G = 55.2985+2.506V+60.57hz+ 0.0133V^2-0.1743V\cdot hz+28.69hz^2+0.01335V^2-0.00057V^3+0.00249V^2\cdot hz-0.6914V\cdot hz^2+28.69hz^2+11.15hz^3$ E = … $hz = -1.08-0.0045V-0.04G-0.0007V\cdot G$	18.1857 % 6.083 % 24 %	3.3417 % 2.3814 % 9 %
S		$G = 116.9\cdot V^{0.2931}\cdot hz^{0.2303}\cdot (V\cdot hz)^{-0.15223}$ $E = 5.791\cdot V^{0.43807}\cdot hz^{0.10079}\cdot (V\cdot hz)^{-0.01267}$ $hz = 3.31\cdot10^{-37}\cdot V^{-7.25}\cdot G^{8.47}\cdot (V\cdot G)^{7.34}$	9.186 % 6.5126 % 43.5 %	3.3856 % 2.2996 % 14.8 %

Из анализа свойств функции невязки следует, что для функциональных зависимостей $G = f(V,$ hз$)$, $E = f(V,$ hз$)$ наиболее эффективно применение аппроксимации степенной зависимостью вида S. Зависимость hз $= f(V,G)$ плохо описывается всеми исследуемыми видами элементарных аппроксимирующих зависимостей.

4.3. Оптимизация структуры модели

Итоговая модель с многочленом порядка K обязательно содержит все слагаемые до порядка K включительно. Но нетрудно представить ситуацию, когда некоторые из промежуточных степеней лишние и их лучше бы исключить из модели. Этот недостаток возникает из-за того, что слагаемые добавляются в модель в наперед заданном порядке. В общем случае требуется разрабатывать методы поиска оптимальной модели размера P, где рассматриваются всевозможные комбинации P функций-слагаемых из более широкого множества $P_{\max}$ функций. Так как система базисных функций ортогональна на множестве наблюдений, то оптимизация может быть достигнута путем прямого перебора всех комбинаций. Поиск оптимальной комбинации функций-слагаемых называют оптимизацией структуры модели.

Алгоритм поиска оптимального порядка аппроксимирующего полинома заключается в оценке показателя качества идентификации J (4.7). Проиллюстрируем работу данного алгоритма на базовой функции R2 (таблица 4.2).

Предложена аппроксимация полиномом вида:

$$Y = C + K_{1,1} \cdot X_1 + K_{2,1} \cdot X_1^2 + \ldots + K_{\mu_1,1} \cdot X_1^{\mu_1} + K_{1,2} \cdot X_2 + K_{2,2} \cdot X_2^2 + \ldots \quad (4.9)$$
$$\ldots + K_{\mu_2,2} \cdot X_2^{\mu_2} + K_{1,N} \cdot X_N + K_{2,N} \cdot X_N^2 + \ldots + K_{\mu_N,N} \cdot X_N^{\mu_N},$$

где Y – значение выходного параметра,

X_1, X_2, X_N – входные параметры;

N – число входных параметров;

$K_{i,j}$ – i-й параметр j-го входного аргумента; j=1..N, i=1..μ_i;

μi – порядок полиномиальной зависимости, индивидуальный для различных входных параметров.

Перепишем уравнение (4.9) в следующем виде:

$$Y = C + \sum_{i=1}^{N} \sum_{m=1}^{\mu_i} K_{m,i} \cdot X_i^m, \quad (4.10)$$

Для идентификации M выходных параметров уравнение (4.10) легко преобразовать к следующему виду:

$$Y_j = C_j + \sum_{i=1}^{N_j} \sum_{m=1}^{\mu_{i,j}} K_{m,i,j} \cdot X_i^m, \text{j} = 1..\text{M} \tag{4.11}$$

Оценку параметров можно получить по формуле (4.5), где

$$\mathbf{U} = \left[\begin{array}{cccc|cccc|c|cccc} X_{1,1} & X_{1,1}^2 & \cdots & X_{1,1}^{\mu_1} & X_{1,2} & X_{1,2}^2 & \cdots & X_{1,2}^{\mu_2} & \cdots & X_{1,N} & X_{1,N}^2 & \cdots & X_{1,N}^{\mu_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{r,1} & X_{r,1}^2 & \cdots & X_{r,1}^{\mu_1} & X_{r,2} & X_{r,2}^2 & \cdots & X_{r,2}^{\mu_2} & \cdots & X_{r,N} & X_{r,N}^2 & \cdots & X_{r,N}^{\mu_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{R,1} & X_{R,1}^2 & \cdots & X_{R,1}^{\mu_1} & X_{R,2} & X_{R,2}^2 & \cdots & X_{R,2}^{\mu_2} & \cdots & X_{R,N} & X_{R,N}^2 & \cdots & X_{R,N}^{\mu_N} \end{array}\right]$$

Результаты поиска минимума функционала представлены в Таблице 4.15.

Таблица 4.3. Относительная ошибка аппроксимации экспериментальных данных (приложение Б) функцией $h_3 = f(G,V)$ в зависимости от порядка входного параметра

Относительная ошибка аппроксимации в зависимости от порядка полинома (%)							
	1	2	3	4	5	6	7
1	15,8	5	3,3	3,2	3,2	9,8	649,5
2	15,7	5	3,3	3,2	3	6,6	2211,6
3	13,6	5,7	3,8	3	3,4	25,5	1177
4	14,1	5,6	4	3,3	3,2	2,7	959,4
5	13,6	4,6	2,8	2,8	2,6	7,8	1276,7
6	9	4,7	3,1	2,7	3	9,6	827,3
7	6,9	4,7	3,1	2,6	3,2	25,1	1582,1

В данном примере по строкам указан показатель степени при параметре X_1 (ЭП КИД), а по столбцам производится варьирование показателя степени при X_2.(скорость резания). Таким образом, для второй строки и первого столбца уравнение выглядит следующим образом:

$$Y = C + K_{1,1} \cdot X_1 + K_{2,1} \cdot X_1^2 + K_{1,2} \cdot X_2 \tag{4.12}$$

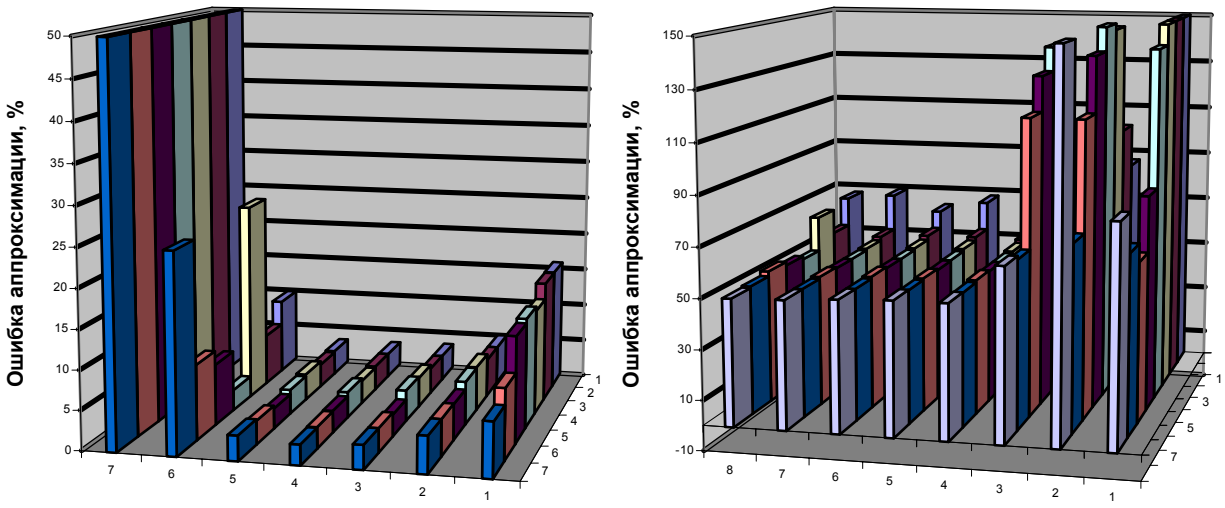
Таблица 4.4. Относительная ошибка аппроксимации экспериментальных данных приложение А функцией $h_3 = f(G,S)$ в зависимости от порядка входного параметра

Относительная ошибка аппроксимации в зависимости от порядка полинома (%)								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	205,74	85,97	90,05	67,88	67,33	62,58	68,91	66,85
2	181,49	103,72	91,70	55,32	55,47	55,23	53,82	54,77
3	168,75	147,43	131,4	53,92	54,03	53,44	52,26	64,89
4	141,60	155,9	141,65	53,19	53,03	52,67	51,65	50,55
5	86,073	140,3	132,02	53,21	52,82	52,61	51,60	51,88
6	63,73	117,9	117,92	53,73	53,37	53,09	52,05	53,32
7	71,09	73,99	66,753	52,94	52,82	52,36	51,24	51,38
8	86,51	383,8	68,21	53,19	53,14	52,38	51,12	50,66

Таблица 4.5. Относительная ошибка аппроксимации экспериментальных данных приложение Б функцией $h_3 = f(G,t)$ в зависимости от порядка входного параметра

Относительная ошибка аппроксимации в зависимости от порядка полинома (%)								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	93,95	81,82	50,76	21,54	10,55	41,16	10,56	13,37
2	57,29	60,41	46,63	21,44	9,95	62,48	9,96	23,82
3	27,67	27,70	25,74	18,50	9,36	99,86	68,29	9,93
4	16,17	15,74	15,00	14,54	9,40	99,48	30,80	9,95
5	11,29	10,51	10,28	10,29	9,39	31,60	30,78	379,83
6	10,67	10,73	10,41	10,04	8,09	967,63	62,36	300,49
7	9,68	9,69	9,34	8,93	12,84	31,23	19,16	11,94
8	53,78	9,23	9,14	8,24	104,95	104,96	83,37	2579,27

Результаты полученные в таблице 4.4, таблице 4.5 представим в виде диаграммы.



$а - h_3 = f(G,V)$ $б - h_3 = f(G,S)$

Рисунок 4.6. Сравнительный анализ относительных ошибок при аппроксимации данных приложения А полиномами вида $Y = C + \sum_{i=1}^{N} \sum_{m=1}^{\mu_i} K_{m,i} \cdot X_i^m$. различных порядков

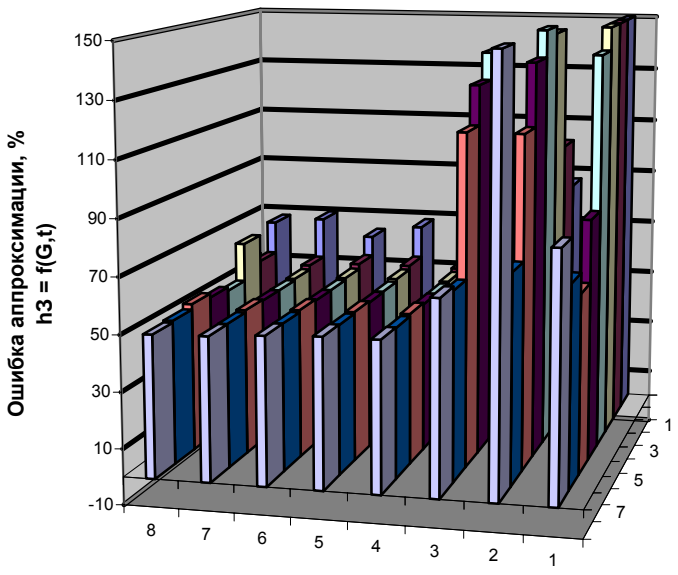


Рисунок 4.7. Сравнительный анализ относительных ошибок при аппроксимации полиномами вида $Y = C + \sum_{i=1}^{N} \sum_{m=1}^{\mu_i} K_{m,i} \cdot X_i^m$. различных порядков, данных приложения В

По оси абсцисс варьируется степень полинома по первому параметру, по оси ординат – максимальная степень второго параметра (подача, скорость резания, глубина). Графическая иллюстрация результатов численного машинного моделирования в виде диаграммы приведена на рисунке 3.17, 3.18. Для оценки функционала требуется машинное время вычисления коэффициентов аппроксимирующего полинома, результаты моделирования на ЭВМ, с ЦП: Celeron 4, 1715 MHz (4.25 x 404); материнской платой Asus P4B266-C (6 PCI, 1 AGP, 2 DIMM), Системная память 256 Мб (DDR SDRAM).

Таблица 4.6. Машинное время вычисления коэффициентов аппроксимирующего полинома

Время вычислений, сек.								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,65	0,11	0,11	0,11	0,11	0,44	0,28	0,33
2	0,11	0,27	0,11	0,1	0,06	0,11	0,11	0,16
3	0,05	0,11	0,06	0,06	0,06	0,11	0,11	0,06
4	0,06	0,11	0,11	0,06	0,11	0,16	0,22	0,11
5	0,05	0,11	0,05	0,22	0,16	0,11	0,11	0,16
6	0,17	0,17	0,27	0,11	0,11	0,22	0,22	0,11
7	0,11	0,22	0,11	0,11	0,11	0,11	0,22	0,33
8	0,11	0,16	0,16	0,16	0,11	0,17	0,11	0,11

Таблица 4.7. Значение критерия оптимизации J в зависимости от порядка полинома

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,036425	0,002115	0,001312	0,000557	0,000273	0,004255	0,000695	0,001037
2	0,001481	0,003833	0,001205	0,000504	0,00014	0,001615	0,000257	0,000895
3	0,000325	0,000716	0,000363	0,000261	0,000132	0,002581	0,001765	0,00014
4	0,000228	0,000407	0,000388	0,000205	0,000243	0,00374	0,001592	0,000257
5	0,000133	0,000272	0,000121	0,000532	0,000353	0,000817	0,000796	0,01428
6	0,000426	0,000429	0,00066	0,00026	0,000209	0,050021	0,003223	0,007767
7	0,00025	0,000501	0,000241	0,000231	0,000332	0,000807	0,00099	0,000926
8	0,00139	0,000347	0,000344	0,00031	0,002713	0,004193	0,002155	0,066667

Графическое представление функции оптимизации представлено на Рисунок 4.8.

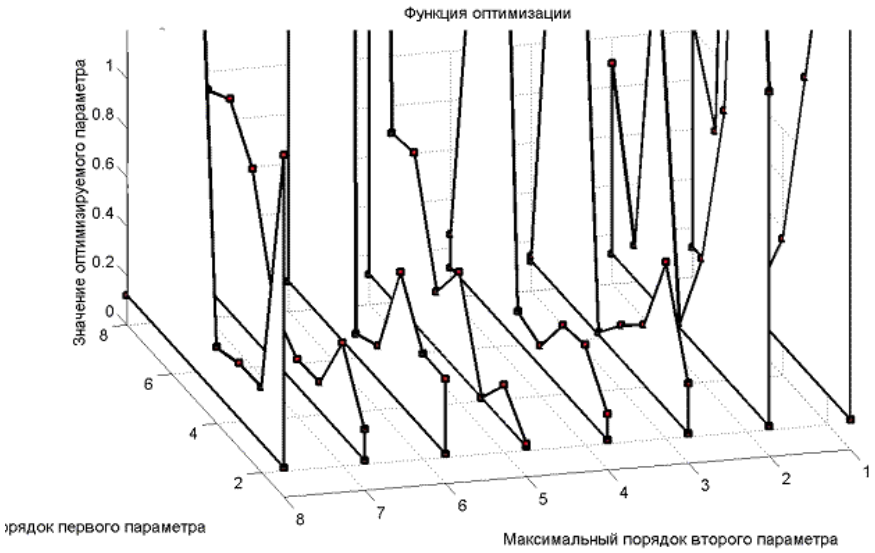


Рисунок 4.8. Сравнительный анализ относительных ошибок при аппроксимации полиномами различных порядков данных

Выводы:

1. Увеличение степени полинома эффективно лишь до 3-5 порядков. Для эффективного использования машинного времени рационально выбирать порядок для каждого параметра отдельно.
2. Высокие порядки (выше шестого) приводят к цифровой неустойчивости результатов вычислений.
3. Используемый вид полинома точнее описывает поведение процесса механообработки, чем модель вида (4.33), но для некоторых случаев не гарантируют достаточной адекватности и правдоподобности.

4.3.1. Самоорганизация моделей

Дальнейшие исследования показали, что максимум функции невязки между экспериментальными данными и аппроксимирующими функциями обнаруживается вблизи оптимальной скорости резания (Рисунок 4.9). Существенная нелинейность функции $h_З = f(V,s,t,G)$, не позволяет произвести аппроксимацию удовлетворительной точности (менее 5%) в предложенном (3.12) функционале.

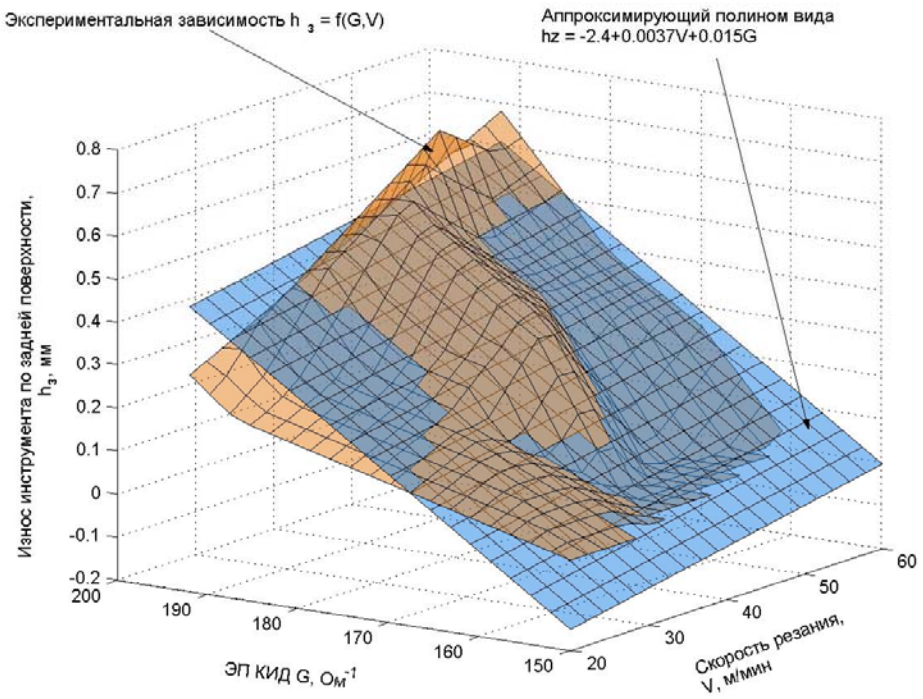


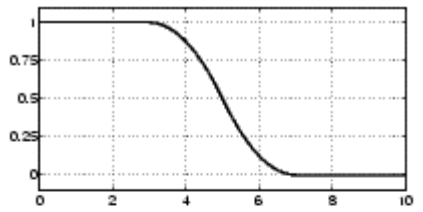
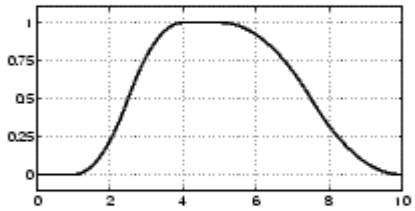
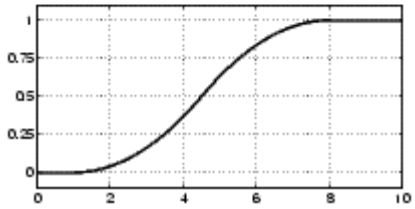
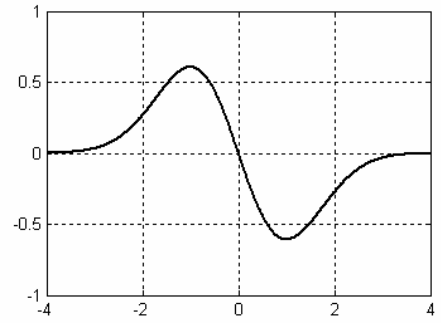
Рисунок 4.9. Экспериментальная и аппроксимирующая поверхности функции h_3 =f(G, V). Продольное точение сплава ЭИ698 резцом ВК8, t=0,5мм, s=0,1 мм/об

Согласно теории организации эксперимента и принципам извлечения полезной информации из данных, в конечном итоге интеллектуальная обработка экспериментальных данных сводится к необходимости решения наиболее общей задачи – выбору одной из набора возможных гипотез о модели изучаемого объекта или явления и оцениванию параметров этой модели. В литературе встречаются решения, основанные на теории искусственных нейронных сетей [10], но помимо проблемы выбора структуры и объема обучающей выборки, основной недостаток такого подхода состоит в отсутствии гарантий структурной устойчивости полученной модели.

Для повышения точности прогностических свойств модели в литературных источниках [43] предлагается ввести аддитивную составляющую к полученному аппроксимирующему полиному, полученную путем аппроксимации функции невязки.

Результирующая функция в этом случае представляется арифметической суммой базовой функции, входящей в функционал (таблица 3.4), и некоторой переменной функцией из функционала (таблица 3.9).

Таблица 4.8. Функционал переменных функции

Графическая иллюстрация	Функциональная зависимость
	$y = k_1+k_2\cdot\tanh(k_3\cdot x-k_4)$
	$y = k_1+k_2\cdot\tanh(k_3\cdot x-k_4) + k_5\cdot\tanh(-k_6\cdot x+k_7)$
	$y = k_1 + k_5\cdot\tanh(-k_6\cdot x+k_7)$
	$y = k_2 \cdot (x - k_3 - k_4) \cdot e^{-(x-k_4)^2}$

Оценку показателя качества идентификации произведем по предложенной выше методике (п.3.1.1.2). Количество функций в исследуемом функционале определяется по формуле:

$N_\psi = N_{баз} (1+n_{var}^m)$,

где m – количество входных параметров;

$N_{баз}$ – размерность функционала базовых функций;

N_{var} – размерность функционала переменных функций;

Результат вычисления представляет таблицу (рисунок) включающий 119 функций.

Базовая функция	Переменная функция	Максимальная ошибка	Средняя ошибка	Время вычисления, сек
…	…	…	…	…
Equetion: hz = 0.041901+ 0.00087214V+ 0.73128G K_base: [0.0419 8.7214e-004 0.7313]	EquetionVar:F = k(1)+ k(2).*tanh(k(3).*(X(:,1)-k(4)))+ k(8).*tanh(k(9).*(X(:,2)-k(10)))+k(11).*tanh(k(12).*(-X(:,2)+k(13))); K_var: [0.1794 -0.2191 0.8465 21.5320 0 1.0 50.0 0.0385 406.5107 0.3416 0.3515 74.39 0.55]	Disp_max: 31.0669	Disp_avg: 8.7238	Time: 0.0320
…	…	…	…	…

Рисунок 4.10. Фрагмент полученной таблицы моделей с оценкой точности и времени вычисления

4.3.2. Оценка значимости коэффициентов модели

Для упрощения полученной модели проверяют значимость ее коэффициентов. Ее выполняют для каждого коэффициента отдельно. Оценка значимости коэффициентов производится по критерию Стьюдента, либо по доверительному интервалу, который при использовании факторного эксперимента одинаков для всех коэффициентов.

Критерий Стьюдента

$$t_j = \frac{|a_j|}{\sigma_{aj}}, j = 0,1,2,\ldots, \quad (4.13)$$

где a_j – j-й коэффициент уравнения регрессии;

σ_{aj} – среднее квадратичное отклонение коэффициента a_j.

Диагональные элементы ковариационной матрицы $\left(X^T X\right)^{-1}$ равны между собой, поэтому все коэффициенты уравнения регрессии определяются с одинаковой точностью:

$$\sigma_{aj} = \sqrt{\sigma_{aj}^2} = \sqrt{\frac{\sigma_{воспр}^2}{\mathrm{N}}}, \quad (4.14)$$

где $\sigma_{воспр}^2$ – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсия воспроизводимости, как правило, определяется с помощью повторных опытов в нулевой точке (центре эксперимента):

$$\sigma_{воспр}^2 = \frac{S_{воспр}}{f_{воспр}} = \frac{1}{\mathrm{m}\text{-}1}\sum_{i=1}^{m}\left(y_i^0 - \bar{y}^0\right)^2, \quad (4.15)$$

где m – число повторных опытов;

$f_{воспр} = m$-1 – число степеней свободы дисперсии воспроизводимости;

$S_{воспр}$ – остаточная сумма квадратов воспроизводимости.

$$\bar{y}^0 = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} y_i^0, \quad (4.16)$$

4.4. Проверка адекватности модели

Полученную модель объекта необходимо проверить на адекватность. Это осуществляется с помощью критерия Фишера (при наличии степеней свободы):

$$F = \sigma_1^2 \Big/ \sigma_2^2, \quad (4.17)$$

где $\sigma_1^2, \sigma_2^2,$ – дисперсии двух независимых выборок.

При расчете F – критерия в числитель ставят большую из двух эмпирических дисперсий, поэтому $F \geq 1$. Критерий Фишера показывает значимо ли отличаются друг от друга эти дисперсии.

F – критерий формируют следующим образом:

$$F = \begin{cases} \sigma^2_{ад} / \sigma^2_{воспр}, \text{если } \sigma^2_{ад} \geq \sigma^2_{воспр}; \\ \sigma^2_{воспр} / \sigma^2_{ад}, \text{если } \sigma^2_{ад} < \sigma^2_{воспр}; \end{cases}, \quad (4.18)$$

где $\sigma^2_{ад}$ – дисперсия адекватности (остаточная дисперсия).

4.5. Извлечение моделей из экспериментальных данных

После завершения эксперимента полученные данные анализируются и сохраняются в виде аналитически записанных моделей. Далее производится анализ имеющихся экспериментальных моделей на соответствие критериям самоорганизации рисунок 1.18.

Проверку адекватности алгоритма самоорганизации проведем на данных приложение Б.

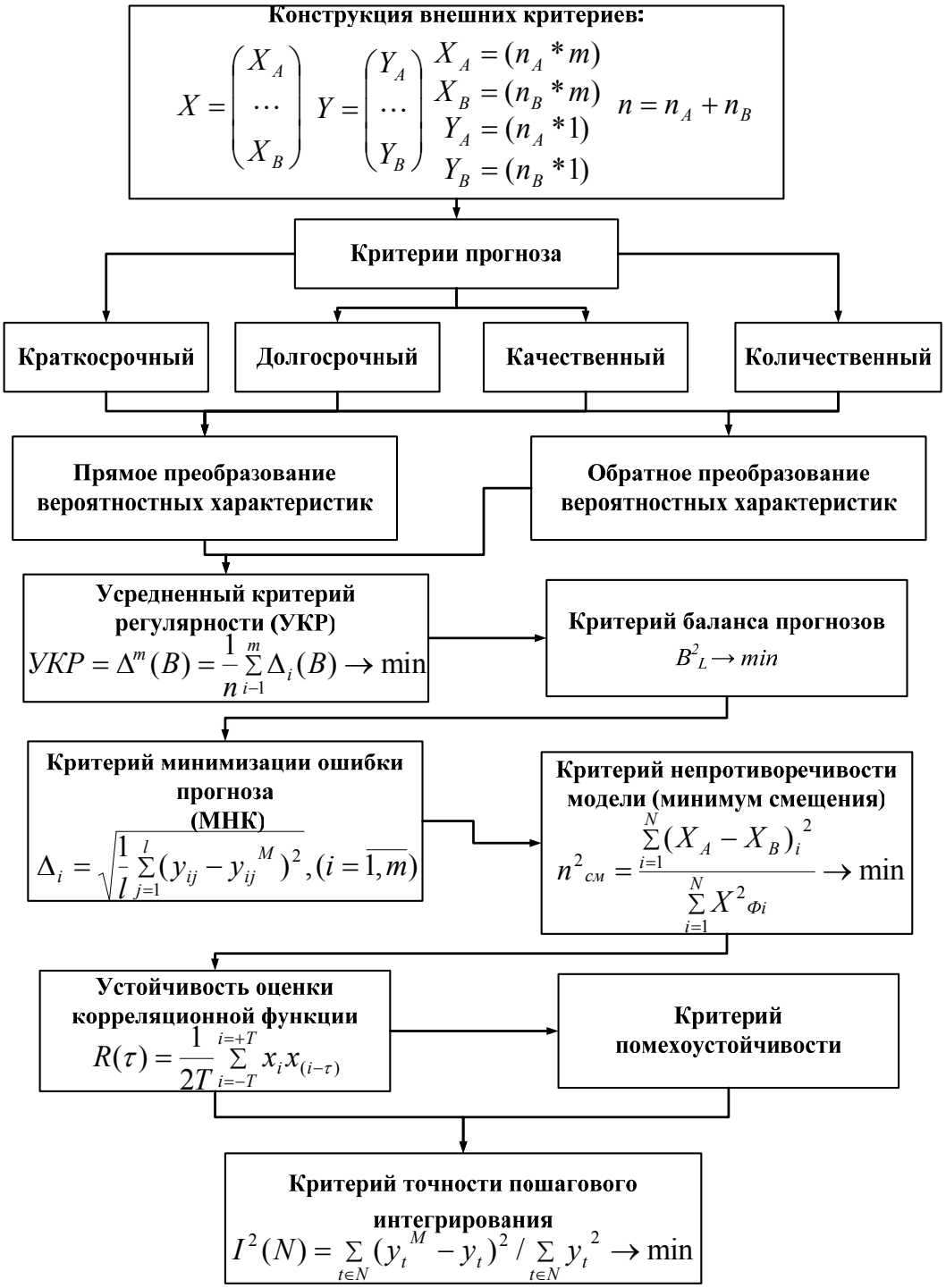


Рисунок 4.11. Критерии, участвующие в алгоритмах самоорганизации моделей

При удовлетворении экспериментальных моделей критериям самоорганизации создается новая структурно-устойчивая модель, которая может быть использована для формирования прогноза состояния РИ

4.6. Выводы

1. Анализ широко распространненых в литературных источниках степенных статистических зависимостей связывающих износ РИ с режимами обработки и электрическими параметрами показал, что они имеют высокие погрешности при моделировании износа конкретных инструментов. Для повышения точности моделей реализован алгоритм структурно-параметрической идентификации, для построение которого выбран функционал моделей и определен критерий качества обучения.

2. Разработана методика автоматического формирования диагностических моделей процесса резания на основе экспериментальных данных, основанных на принципе перебора структур и параметрической идентификации параметров модели.

3. Реализован алгоритм поиска оптимальной размерности модели. Проведена оценка оптимального порядка аппроксимирующего полинома для экспериментальных данных, полученных при точении труднообрабатываемых материалов.Экспериментально определено для моделей связывающих износ РИ с режимами ПР и электирческими параметрами, что увеличение степени полинома эффективно лишь до 3-5 порядков. Высокие порядки (выше шестого) приводят к цифровой неустойчивости результатов вычислений. В результате выбора оптимальной структуры погрешность модели по сравнению с моделью вида (4.1), снизилась до 6% с 35% (до 1 % в области оптимальных скоростей резания и нормального износа РИ с 6 %).

4. Определен функционал корректирующих функций и критерии самоорганизации, на основе которых предложен алгоритм самоорганизации, позволяющий создать новуя структурно-устойчивуя модель путем обобщения частных, которая может быть использована для формирования прогноза состояния РИ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Усовершенствована методика идентификации износа РИ по сигналу виброакустической эмиссии путем оценки энергии спектра детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования. Усовершенствование методики повысило инвариантность оценки износа к режимам механообработки.

2. Разработана методика коррекции модели износа РИ по относительной электропроводимости контакта «инструмент-деталь». Заключающаяся в идентификации момента наступления катастрофического износа РИ по энергетическому спектру детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования сигнала ВАЭ, линейной интерполяции функции $h_3(t)$ в зоне нормального износа и коррекции модели на основе данной информации. Синтез методов контроля на основе электрических и виброакустических сигналов позволил повысить точность и обеспечить универсальность оценки текущего износа РИ.

3. Разработан алгоритм прогнозирования диагностических параметров процесса резания и износа РИ, на основе имеющихся априорных и эмпирических данных, который учитывает нелинейность функции износа РИ во времени и вариацию стойкости инструментов в партии. Алгоритм заключается в коррекции оценки базовой модели, по результатам текущих измерений, путем добавления аддитивной составляющей полученной на основе экстраполяции функции невязки, что позволяет: снизить затраты на инструментальный материал; произвести оценку оставшегося ресурса инструмента, перед началом обработки новой заготовки; ввести оптимальное управление по состоянию режущего инструмента.

4. Разработана база данных диагностических параметров процесса резания, особенность которой состоит в векторно-матричном представлении входных аргументов, что позволило унифицировать и систематизировать модели ПР из литературных источников, включая частотно-временные и многомерные модели. Разработана база знаний о диагностических моделях процесса резания, что позволило организовать сложные алгоритмы поиска: поиск функциональной

зависимости от аргумента, не входящего в описание функции явно, но присутствующего в БД неявно; поиск «ближайшего соседа».

5. Разработана цифровая информационно-измерительная система, которая позволяет сохранить все измеренные диагностические параметры процесса резания, произвести анализ (фильтрацию, децимацию, спектральный и вейвлет-анализ) и т.д., и воспроизвести сигналы, полученные от датчиков, что устраняет необходимость в повторных реальных экспериментах. Созданный в среде программирования виртуальный процесс полностью эмитирует условия протекания физического процесса со всеми его особенностями (нестационарностью, стохастичностью и т.д.).

Полученные результаты в совокупности совершенствуют методы мониторинга и прогноза износа РИ и решают важную научно-практическую задачу наблюдаемости и прогнозируемости износа РИ в процессе резания, что в итоге открывает возможности управления процессом механообработки по состояния режущего инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.С. 494656 СССР, М.Кл.G01N3/58. Способ определения момента затупления режущего инструмента /О. В. Кретинин, А. В. Денисенко, А. П. Елепн (СССР)//Открытия. Изобретения. – 1975. №45.

2. Авиационные материалы. Справочник в 5 т. /Под редакцией А. Т.Туманова. М.: ОНТИ, 1975.-Т.1. Конструкционные стали, 1975. – 358 с.

3. Авиационные материалы. Справочник в 5 т./Под редакцией А.Т.Туманова. М.:ОНТИ, 1975.-Т.2 Корозионностойкие и жаростойкие стали и сплавы, 1975. – 358 с.

4. Адаптивное управление металлорежущими станками //Обзор НИИМаш. Серия С-1/ Г. В. Броншетйн, М. С. Городецкий, Е. Р. Гордон и др. – М.:ЭНИМС, 1973. – 227с.

5. Адаптивное управление технологическими процессами Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрафанов, Ф. П. Протопопов и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 536с.

6. Адаптивные фильтры: пер. с англ./Под ред. К. Ф. Н. Коуэна и П. М. Гранта. – М.: Мир, 1988.

7. Армарего И. Дж.А., Браун Р. Х. Обработка металлов резанием /Пер. с англ. В. А.Патунова. – М.:Машиностроение, 1977. – 325 с.

8. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения //Успехи физических наук, 1996. Т. 166, № 11. С. 1145 – 1170.

9. Багряцкий Ю. А., Тяпкин Ю. Д. Рентгенографическое изучение старения сплавов на никелевой основе //Проблемы металловедения и физики металлов, 1958, вып.5. – С.241-265.

10. Балакин А. Ю., Нгуен Хай-Винь, Шкодырев В. П. Интеллектуальные измерительные системы: информационно-аналитический подход к теории самоорганизации адаптивных моделей обработки данных. Труды международной конференции «Датчики и Системы» 2002.

11. Барзов А. А., Горелов В. А., Игонькин Б. А. Акустоэлектрическая диагностика процесса резания полимерных композиционных материалов. – Авиационная промышленность, 1986, №12 – С. 36-37.

12. Барзов А. А., Денчик А. И. Диагностика технологической наследственности методом акустической эмиссии. – Обработка резанием, 1983, №4 - С.1-5.

13. Барков А. В., Баркова Н. А. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации http://www.vibrotek.com/russian/articles/ref.htm

14. Безручко Б. П., Смирнов Д. А. Математическое моделирование и хаотические временные ряды. Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2005. 320 с.

15. Безручко Б. П., Смирнов Д. А. Статистическое моделирование по временным рядам: учебно-методическое пособие. – Саратов: «Колледж», 2000. – 23 с.

16. Биленко С. В. Повышение эффективности высокоскоростной механической обработки на основе подходов нелинейной динамики и нейросетевого моделирования.: автореф. дис. … д-ра техн. наук (05.03.01). – Комсомольск-на-Амуре, 2006. – 47с.

17. Браверман Э. М., Мучник И. Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. – М.:Наука, 1983. – 464с.

18. Вапник В. Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.:Наука, 1979. 448 с.

19. Глазунов Л. П., Смирнов А. Н. Проектирование технических систем диагностирования.– М.:Наука, 1986.

20. Гончарова С. Г. Интеллектуальная система управления процесса механообработки с оперативным использованием нечеткой нейросетевой модели знаний. Автореф. дис. … канд. техн. наук. по спец. 05.03.01, Уфа-2001

21. Горбунов С. С. Нейросетевое моделирование контактных процессов при резании по сигналам термоЭДС и акустической эмиссии, автореф. дисс. … канд. техн. наук по специальности 05.03.01, Нижний Новгород, 2004.

22. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.

23. Гроп Д. Методы идентификации систем: Пер. с англ./Под ред. Е. И Кринецкого. – М.: Мир, 1979.

24. Даниелян А. М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов. Машгиз, 1954.

25. Даниелян А. М., Бобровский В. А. Температура при резании металлов и способы ее измерения. – М.: Машгиз., 1954.

26. Деревянченко А. Г. Алгоритмы автоматического контроля износа лезвий инструментов в гибких производственных системах. – Металлорежущие станки 1985, №13, С.37 – 46.

27. Диагностика автоматических станочных модулей /Под ред. Б. М. Бржозовского. – Саратов.: Изд-во Сарат.ун-та, 1987.–152с.

28. Дилатонный механизм прочности твердых тел. С. Н. Журков // Физика прочности и пластичности. – Л.: Наука, 1986. – С.5-11.

29. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Пер. с англ. — Ижевск, НИЦ регулярная и хаотическая динамика, 2001.

30. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.:СОЛОН-Пресс, 2004. – 400 с.

31. Дьяконов В. П., Круглов В. В. MATLAB6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Siulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 456 с.

32. Жуков А.И. Метод Фурье в вычислительной математике. – М.: Наука. Физматлит. – 1992.

33. Журавлев В. Н. Николаева В. И. Машиностроительные стали: Справочник. – М.: Машиностроение, 1992. – 480с.

34. Заковоротный В. Л., Борачев Е. В. Информационное обеспечение системы динамической диагностики износа режущего инструмента на примере токарной обработки // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. -№3. –С.118-133.

35. Заковоротный В. Л., Лукьянов А. Д., Волошин Д. А., Флек М. Б. Моделирование процесса изнашивания инструмента с помощью интегральных операторов//СТИН.- 2004. - №3. С.9-14.

36. Зорев Н. Н и др. О процессе износа твердосплавного инструмента. – Вестник машиностроения, 1971. №9.-С. 70-71

37. Зорев Н. Н. Расчет проекций силы резания. – М.: Машгиз, 1958. – 56с.

38. Зориктуев В. Ц. Идентификация и автоматическое управление температурно-силовым режимом обработки резанием труднообрабатываемых материалов по термоЭДС и электропроводимости контакта "инструмент-деталь" в условиях автоматизированного производства: Дис.док.техн.наук. Уфа, 1988. 416с.

39. Зориктуев В. Ц. Идентификация и оптимальное управление автоматизированными технологическими системами: учеб. пособие. – Уфа: УАИ 1992, 118с.

40. Зориктуев В. Ц., Латыпов Р. Р., Постнов В. В., Никин А. Д. Диагностика состояния режущего инструмента в автоматизированном производстве: учеб. пособие. – Уфа: УГАТУ, 1994. – 58с

41. Зориктуев В. Ц., Постнов В. В., Шустер Л. Ш., Дерябин С. А. Режимы лезвийной обработки детаталей ГТД: учеб. пособие. – Уфа: УГАТУ, 1991.

42. Зориктуев В. Ц., Хузин И. С. Электропроводимость контакта «инстурмент-деталь» – физический и информационный параметр в станочных системах. – М.:Машиностроение, 1998. – 176с.

43. Ивахненко А. Г., Юрачковский Ю. П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. – М. Радио и связь, 1987.

44. Иглин С. П. Математические расчеты на базе MATLAB.-СПб.:БХВ-Петербург, 2005. – 640 с.

45. Ильин А. Н. – Разработка системы оперативной диагностики режущего инструмента по электрическим параметрам процесса резания// Диссертация на соискание уч.ст.к.т.н, Уфа 2000г.

46. Исаев Ш. Г. Разработка системы автоматического управления силами резания по электрической проводимости контакта «инструмент-деталь». Дис…. канд. техн. наук. Уфа, 1987.

47. Кабалдин Ю. Г., Шпилев А. М., Просолович А. А. Синергетический анализ причин возмущения вибраций при резании // Вестник машиностроения. 1997. №10. С. 21 – 29.

48. Кадыров Ж. Н. Диагностика и адаптация станочного оборудования гибких производственных систем. – Л.: Политехника, 1991.-144с.

49. Калашников М. А. Разработка и исследование переменно-частотного метода электрических измерений параметров поверхностных слоев металлических изделий: Автореферат дисс. ….ст. канд. техн. наук (05.246). - Н.: Новочеркасский политехнический институт, 1974. – 24 с.

50. Калиткин Н. Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978.

51. Кацев П. К. Статистические методы исследования ри. – М.Машиностроение, 1968 .– 156с

52. Каширин А. И. Исследование вибраций при резании. – М.;Л.: Изд-во АН СССР. 1944. 184с.

53. Кибальченко А. В. Контроль состояния режущего инструмента обзорная информация, Выпуск 2 .– М.: ВНИИТЭМР, 1986.

54. Козочкин М. П. Исследование и разработка системы защиты режущего инструмента от поломок в токарных станках с ЧПУ: автореф. дис. … канд. техн. наук (05.169). – М.:1975. – 25 с.

55. Контроль поломки износа режущего инструмента /Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. Серия 2. Режущие инструменты, Вып.15. – М.:1987. – С. 1-5.

56. Коуров Г. Н., Кичко Ю. М., Зубарев И. Идентификация температуры резания в САУ процесса точения на токарном станке /Сб. науч. трудов: Интеллектуальные мехатронные станочные системы. – Уфа, 2003.

57. Кравцов Ю. А. Случайность, детерминированность, предсказуемость //Успехи физических наук, 1989. Т. 158, № 1. С. 93 – 115.

58. Кретинин О. В. и др. К вопросу получения оперативной оценки параметров изнашивания быстрорежущего инструмента / О. В.Кретинин, А. П. Клепин, А. Р. Кварталов, А. В.Денисенко // Теория трения, смазки и обрабатываемость металлов: Труды ГПИ (Горький), 1977. - Вып. №4. - С.112 - 121.

59. Кретинин О.В. Исследование спектра термоЭДС и сил при резании // Труды ГПИ (Горький), 1970. Т.26, вып.4. - С.17-18

60. Кретинин О. В., Кудрявцев С. А. О возможном подходе к оценке контактных явлений при граничном трении. - Автоматизированные технологические и мехатронные системы в машиностроении /Сб. науч. трудов, Уфа: УГАТУ, 1997. - С.152-159.

61. Кудинов В. А. Динамика станков . – М.: Машиностроение. 1967, –377с.

62. Кучма Л. К. Экспериментальные исследования вибраций при резании на токарных станках // Новые исследования в области обработки резанием. – М.: Машгиз., 1948.С.100-128.

63. Лоладзе Т. Н. Износ режущего инструмента. – М.:Машгиз, 1958. –356 с.

64. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.:Машиностроение, 1982. -320с.

65. Лукьянов А.Д. Разработка систем виброакустической диагностики эволюции процесса точения на основе построения авторегрессионных моделей: автореф. дис. … канд. техн. наук. (05.13.07 и 05.03.01). Ростов-на-Дону, 1998. – 19с.

66. Лютов А. Г. Синтез адаптивных систем оптимального управления мехатронными станочными модулями. Диссертация … доктора техн. наук. –Уфа, 2005.

67. Макаров А. Д. Вопросы разработки режимов резания с учетом размерной стойкости инструмента, точности, производительности и себестоимости / Сб. науч. тр. МВССО РСФСР. – Л., 1961. - С.50-56

68. Макаров А. Д. Дальнейшее развитие оптимального резания металлов. /Проспект. – Уфа,1982. - 55 с.

69. Макаров А. Д. Износ и стойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1966.–264с.

70. Макаров А. Д., Волгарев Л. Н., Назаренко Е. А. Устройство адаптивного управления процессом резания и использование его для разработки оптимальных режимов резания /Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов. Межвуз.тем.сб.-Уфа:УАИ, 1983. С.14-19.

71. Макаров А. Д., Мухин В. С., Шустер Л. Ш. Износ инструмента, качество и долговечность деталей из авиационных материалов: учеб. пособие.– Уфа: УГАТУ, 1974. 372 с.

72. Макаров А. Д., Мухин В. С. Исследование наклепа при обработке сплава ЭИ437БУ Вопросы оптимального резания металлов. – Уфа, 1972. Вып.29.

73. Манжурнет В.К. Косвенный контроль размеров детали при точении по силе резания // Технология и автоматизация машиностроения: Респ. межвед. науч.-техн. сб. (Харьков). – 1972. – Вып.9 – С.81-84.

74. Малинецкий Г. Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент (введение в нелинейную динамику). М.: Эдиторил УРСС, 2000. 256 с.

75. Мигранов М. Ш. Изнашивание инструмента в условиях нестационарности процесса точения при изготовлении деталей ГТД. Дис. канд. техн. наук - Уфа, 1994. – 241 с.

76. Надеинская Е. П. Исследование износа режущего инструмента с помощью радиоактивных изотопов. – М.:Машгиз, 1956.

77. Никитин Ю. А. Диагностика мехатронных систем // Интеллектуальные мехатронные системы/ Сб. науч. трудов. Уфа, 2003. С.49-53.

78. Носенков Д. А. , Череватенко В.А., Череватенко Ю. В. //Метод повышения точности видеоизмерительной системы диагностики состояния режущего инструмента: Межвуз. сб. науч. ст. – Ростов н / Д , 1998.

79. Носенков Д. А., Лукьянов Е. А, Зайцев А. Ю. Модель формирования сигнала изображения при видеоизмерениях формы объекта. - Информационное обеспечение и управление в мехатронных производственных системах/ Межвуз. сб. науч. ст. - Ростов н / Д , 1998.

80. Основы автоматизации и управление технологическими процессами в машиностроении: учеб. пособие для студентов технических вузов/ В. Ц.Зориктуев,

Н. С.Буткин, А. Г.Схиртладзе и др./Под общ. ред. В. Ц.Зориктуева, Н. С. Буткина. – Уфа: УГАТУ, 2000. – 406с.

81. Подгорков В. В. Теория резания: учеб. пособие. Иваново: ИвГУ. 1986. 80с.

82. Подураев В. Н., Барзов А. А., Горелов В. А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.

83. Подураев В. Н., Барзов А. А., Кибальченко А. В. Активный контроль износа инструмента методом акустической эмиссии // Вестник машиностроения, 1985. - №4. – С.14 – 19.

84. Постников С. Н. Электрические явления при трении и резании. Горький, Волго-Вятское кн. изд-во, 1975. – 280 с.

85. Постнов В. В. Интенсификация нестационарного резания труднообрабатываемых материалов на основе оптимизации термодинамических условий изнашивания режущего инструмента. Диссертация … доктора техн. наук. Уфа, 2005 .

86. Представление и использование знаний. Пер. с япон. / Под ред.Х.Уэно, М.: Исидзука. М.: Мир, 1989.

87. Режимы резания труднообрабатываемых материалов /Под ред. Я. Л. Гуревича. Справочник. – М.: Машиностроение, 1986.– 240 с.

88. Рюков Д. И. Исследование влияния состава твердых сплавов на основные параметры оптимального резания при точении жаропрочных сплавов и разработка ускоренных методов из опредения. Дис. … канд. техн. наук. Уфа, 1979. –197 с.

89. Самарский А. А. Введение в численные методы. – М.: Наука, 1982.

90. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.

91. Сидоров А. С. Подходы к решению задачи прогноза в системе оперативной диагностики состояния режущего инструмента// Мехатроника, робототехника, автоматизация. - Сборник научных трудов: Москва – 2006 – вып.1 С.158 – 164.

92. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.

93. Иконин С. Ю., Сарана Д. В. Система автоматического распознавания речи SPIRIT ASR Engine/ Статья опубликована в журнале "Цифровая обработка сигналов" #3/2003.

94. Система комплексного контроля инструмента для токарной обработки. /Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. Серия 2. Режущие инструменты, Вып. 9, М.,1987. – С.1-7.

95. Смит Л. А. http://www.maths.ox.ac.uk/~lenny/ Oxford Centre for Industrial and Applied Mathematics. Работы Л.А. Смита по нелинейному анализу временных рядов.

96. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с.

97. Спектроскопическое изучение разрушающих флуктуаций плотность. Веттегрень В.И. Физика прочности и пластичности. – Л.: Наука, 1986. – С.17-27.

98. Ташлинцкий Н. И. Первичный источник автоколебаний при резании металлов //Вестник машиностроения, 1960. №2. С. 45-50.

99. Телегин А.А. Расчет максимальной температуры токарного резца по его инфракрасному излучению// Самотостроение и техника воздушного флота: Республ. межвед. науч. техн. сб. (Харьков), 1967. – Вып.12. – С.27-31.

100. Тепловые флуктуации как генератор зародышевых трещин В. А Петров// Физика прочности и пластичности. – Л.: Наука, 1986. - С.17-27.

101. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974.

102. Трент Е. М. Резание металлов/Пер. с англ. – М.:Машиностроение, 1980. – 263 с.

103. Туманов В. И. Свойства сплавов систем карбид – вольфрама-кобальт. – М.: Металлургия, 1971. – 95 с.

104. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1969. – 752с.

105. Чуи К. Введение в вейвлеты. — М.: Мир, 2001.

106. Шитов А. Б., Разработка численных методов и программ, связанных с применением вейвлет-анализа для моделирования и обработки экспериментальных данных: Дисс. … уч. степени канд. физ.-мат. наук . – Иваново, 2001.

107. Электрические измерения и автоматический контроль в станкостроении: учебное пособие / Ленинградский политехн. ин-т им. М.И.Калинина.–Л.: ЛПИ, 1989

108. Эльясберг М.Н., Савинов И.А. Экспериментальное определение параметров обрабатываемого материала, влияющих на устойчивость против автоколебаний, и расчет станков //Станки и инструмент, 1979. №12. С. 23-27.

109. 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.

110. Янбухтин Р. М., Канзафаров Р. С., Постнов В. В. О некоторых физических причинах изменения интенсивности вибрационных явлений при резании жаропрочных материалов // Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов: Межвуз. науч. сб. –Уфа: УАИ, 1988. С.85-90.

111. Ящирицын П. И, Еременко М. Л., Фельдштейн Е. Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учеб. для вузов Мн. высш. шк., 1990. 512С.

112. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1978. – 316 с.

113. Рабинер Л. Р., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. 495 с.

114. Bayramoglu, M., and Dungel, U., 1998, ‘‘A Systematic Investigation on the Use of Forces Ratios in Tool Condition Monitoring for Turning Operations,’’ Trans. Inst. Meas. Control ~London!, 20, pp. 92–97.

115. Blum, T., and Inasaki, I., 1990, ‘‘A Study of Acoustic Emission from Orthogonal Cutting Process,’’ ASME J. Eng. Ind., 112, pp. 203–211.

116. Carranza R., Andina D. Medical Wavelet-Neural Diagnostics in Chagastic Cardiopaties. — Politechnical University of Madrid, 2000.

117. Casdagli M. Nonlinear prediction of chaotic time series // Physica D. 1989. V.35. P. 335-356.

118. Daubeches I . Ten Lectures on Wavelets. — MIAN, Philadelphia, 1992.

119. Daubechies I. Recent Results in Wavelet Applications. — Proceedings of SPIE Aerosense Symposium, 1998, pp. 23–31.

120. Dimla D.E. Sr. a, P.M. Lister b. On-line metal cutting tool condition monitoring. I: force and vibration analyses, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2000)

121. Ghasempoor A. , Moore T. N. and Jeswiet J. 1998 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – B, Vol. 212, 105–112. On-line wear estimation using neural networks.

122. Ghasempoor A., Moore T. N. and Jeswiet J. 1998 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – B, Vol. 212, 105–112. On-line wear estimation using neural networks.

123. Gould, L., 1998, ‘‘Sensing Tool and Drive Element Condition in Machine Tools,’’ Sensors, pp. 5–13.

124. Huang X. D., Ariki Y., Jack M. A. Hidden Markov Models for Speech Recognition. Edinburgh University Press, 1990, 275 p.

125. Judd K., Mees A.I. On selecting models for nonlinear time series // Physica D.1995. V. 82. P. 426-444.

126. Judd K., Small M. Towards long-term prediction // Physica D. 2000. V.136.P.31-44.

127. Kantz H., Schreiber T. Nonlinear time series analysis. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

128. Kugiumtzis D., Lingjaerde O.C., Christophersen N. Regularized local linear prediction of chaotic time series // Physica D. 1998. V. 112. P. 344-360.

129. Kuljanic E., Sortino M. TWEM, a method based on cutting forces—monitoring tool wear in face milling. Department of Electrical, Management and Mechanical Engineering—DIEGM, University of Udine, Udine, Italy, June 2004

130. Lee, Kai-Fu, 1989, Automatic Speech Recognition, Kluwer Academic Publishers.

131. Leem C. S. 1997 International Journal of Production Research 35, 1051–1066. A practical monitoring strategyfor machining process control.

132. Liang, S. Y., Dornfeld, D. A., 1989, ‘‘Detection of Cutting Tool Wear Using Time Series Modeling of Acoustic Emission Signals,’’ ASME J. Eng. Ind., 111, pp.199–205.

133. Lister, P. M., 1993, ‘‘On Line Measure of Tool Wear,’’ Ph.D. thesis, Manufacturing and Machine Tools Division, Department of Mechanical Engineering, UMIST, Manchester, United Kingdom.

134. Litao Wang, Mostafa G. Mehrabi, and Elijah Kannatey-Asibu, Jr Tool wear monitoring in reconfigurable machining systems through Wavelet analysis //Engineering Research Center for Reconfigurable Machining Systems University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2125

135. Manning C. D., Schutze H. Foundations of Statistical Natural Language Processing. MIT Press, 1999, 680 p.

136. Maydl W. and Sick B. 2000 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2000), Vol. 6, Como, 73–78. Recurrent and non-recurrent dynamic network paradigms: A case study.

137. Moriwaki, T., and Tobito, M., 1990, ‘‘A New Approach to Automatic Detection of Life of Coated Tool Based on Acoustic Emission Measurement,’’ ASME J. Eng. Ind., 112, pp. 212–218.

138. Nobushge Sawai Automated measurement of tool wear using image processing system. International journal of the Japan Society for precision engineering.- 1996г. -т.30 №2, С. 112-117.

139. Oraby, S. E., and Hayhurst, D. R., 1991, ‘‘Development of Models for Tool Wear Force Relationship in Metal Cutting,’’ Int. J. Mach. Tools Manuf., 33, pp. 125–138.

140. Pittner S., Kamarthi S. V. and Gao Q. 1998 Journal of Intelligent Manufacturing 9, 315–322.Wavelet networks for sensor signal classification in flank wear assessment.

141. Quan Y., Zhou M. and Luo Z. 1998 Engineering Applications of Arti,cial Intelligence 11, 717-722. On-line robust identi"cation of tool-wear via multi-sensor neural network fusion.

142. Rabiner, L. R., 1989, “A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition,” Proc. IEEE, Vol. 77, No. 2, pp. 257-286.

143. Ramakrishna Rao P. K., P. Prasad, P. Srinivasa Pai and V. Shantha Acoustic emission technique as a means for monitoring single point cutting tool wear, 2000.

144. Renishaw Лазерный контроль размеров инструментов в процессе обработки Maschinenmarkt. 2003. Nr. 46 (10 ноября), с. 38, 40, 41, ил. 3

145. Review on-line and indirect tool wear monitoring in turning with artifical neural networks: a review of more than a decade of research. Bernhard Sick / University of Passau, Chair of Computer Arhitectures (Prof. Dr.-Ing. W.Grass) , Germany, 2001

146. Richard Y. Chiou a, Steven Y. Liang b Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning //International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2000)

147. Rodolfo E. Haber, Jose E. Jiménez, C. Ronei Peres, José R. Alique An investigation of tool-wear monitoring in a high-speed machining process www.since@direct.com, 2004.

148. Scheffer C. a, H. Kratz b, P.S. Heyns a, F. Klocke b. Development of a tool wear-monitoring system for hard turning // International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003)

149. Scheffer C. and Heyns P. S. Wear monitoring in turning operations using vibration and strain measurements Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Pretoria, Pretoria, 0002, South Africa

150. Sick B. , Sicheneder A. and Lindinger H.-J. 1998 3rd International Workshop Neural Networks in Applications (NN ’98), Magdeburg, 139–146. D. Nauck, G. Krell, R. Kruse and B. Michaelis (eds). A comparative evaluation of different neural network paradigms for tool wear classification in turning.

151. Silva R. G., Baker K. J., Wilcox S. J. and Reuben R. L. 2000 Mechanical Systems and Signal Processing 14, 287–298. The adaptability of a tool wear monitoring system under changing cutting conditions.

152. Silva R. G., Reuben R. L., Baker K. J. and Wilcox S. J. 1998 Mechanical Systems and Signal Processing 12, 319–332. Tool wear monitoring of turning operations byneural network and expert system classi.cation of a feature set generated from multiple sensors.

153. Silva R. G., Baker K. J., Wilcox S. J. and Reuben R. L. The adaptability of a tool wear monitoring system under changing cutting conditions //Mechanical Systems and Signal Processing (2000) (School of Technology (DoDAT), University of Glamorgan, Pontypridd, Wales CF37 1DL, U.K.,Department of Mechanical and Chemical Engineering, Heriot-Watt University, Riccarton, Edinburgh, EH14 4AS, U.K.)

154. Steven Y.Liang, Rogelio L. Hecker, Robert G. Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art. Landers Journal of Manufacturing Science and Engineering, MAY 2004, Vol.126/297

155. Shao H., Wang H.L., Zhao X.M. A cutting power model for tool wear monitoring in milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004), February 2004

156. Tool wear and failure monitoring techniques for turning-a review.- International journal of machine tools and manufacturing.- 1990 . -T.30. №4, C. 579-598.

157. Wan E.A. Time series prediction by using a connectionist network with internal delay lines // [326]. P. 195-217.

158. Yao, Y., Fang, X. D., and Arndt, G., 1990, ‘‘Comprehensive Tool Wear Estimation in Finish-Machining Via Multivariate Time-Series Analysis of 3-D Cutting Forces,’’ CIRP Ann., 39, pp. 57–60.

159. @ Microsoft Corporation Администрирование Microsoft SQL Server 2000. Учебный курс MCSA/ MCSE, MCDBA/Пер. с англ. — 2-е изд., испр. — М.: Издательско-торговый дом «Русская Редакция», 2002. — 640 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛА В ПАКЕТЕ MATLAB

```
function filer_after_40Gz_before60Gz()
close all;
%_____________________________________________________________________
%_____________________________Инициализация переменных _____________________
%_____________________________________________________________________
% Имя файла
%Name_of_file = 'C:\Documents and Settings\Stan\Рабочий стол\Тарировка\123.dat';
Name_of_file = 'C:\Мои документы\Science\Now\2005\Exsperiment\Dat10_50_009.001.dat';
% Частота дискретизации (на канал)
Fs = 8e4;
% Число опрашиваемых каналов
Namber_chanel = 5;
% Коэффициент усиления
K = 200; %Viewer/Saver
Namber_chanel_screen = 1; %Число каналов для вывода на экран
t_begin = 5; n_begin=t_begin * Fs ;t_end = 6;  n_end=t_end * Fs ; % Параметры масштабирования по
шкале времени
legend_y{1}=['ТЭДС, дБ'];legend_y_db{1}=['ТермоЭДС, дБ'];
%_____________________________________________________________________
%_____________________________Чтение файла с данными  _____________________
%_____________________________________________________________________
fid = fopen( Name_of_file, 'rb' ); % Открытие двоичного файла для чтения
   if (fid ==1 )
      error('File is not opened')
   end
[ Array_of_Data , Count ] = fread( fid, inf, 'int16' );
   if fix(Count/Namber_chanel) ~= Count/Namber_chanel
      %error ('Ошибочно задано число опрашиваемых каналов')
      Count = fix(Count/Namber_chanel)*Namber_chanel;
       Array_of_Data =  Array_of_Data (1:Count);
   end
N = Count/Namber_chanel;                    % Количество точек измерений по одному каналу
% Перевод от безразмерной величины типа int16 к вольтам
Array_of_Data = ( Array_of_Data ./ 32768 ) .* K;
Array_of_Data = reshape(Array_of_Data, Namber_chanel, N);
fclose( fid );                  % Закрытие файла
Tmax = N/Fs;
 t=0:1/Fs:(N-1)/Fs;
%_____________________________________________________________________
%_____________________________ Расчет фильтра ФНЧ  _____________________
%_____________________________________________________________________
[b,a] = ellip(4,0.1,40,20*2/Fs);
[H,w] = freqz(b,a,4096);
fig1 = figure;subplot(2,1,1);
```

П.А.

```
plot(w*Fs/(2*pi),abs(H));xlabel('Frequency (Hz)'); ylabel('Mag. of frequency response');grid; axis([0 100
0 1]);title('ФНЧ');
%_____________________________________________________________________
%_____________________________Фильтрация ФНЧ  _____________________________
%_____________________________________________________________________
for i = 1:Namber_chanel_screen
    h(i,:) = filter(b, a, Array_of_Data(i,:)); %Фильтрация i-го канала
 fig(i)= figure;
 subplot(3,2,1);plot(t,Array_of_Data(i,:));grid on; title(['Исходный сигнал по каналу  ' num2str(i)]);
 scale_ = axis; axis ([0 Tmax  scale_(3:4)]); xlabel('Время, с'); ylabel(legend_y(i));
 subplot(3,2,3);plot(t,h(i,:));grid on;title ('Низкочастотная составляющая сигнала');
  scale_ = axis; axis ([0 Tmax  scale_(3:4)]);xlabel('Время, с'); ylabel(legend_y(i));
 subplot(3,2,2);plot(t(n_begin:n_end),Array_of_Data(i,n_begin:n_end));grid on; title(['Исходный сигнал
по каналу № ' num2str(i) ' (увеличение по шкале времени)']);  scale_ = axis; axis ([t_begin t_end
scale_(3:4)]);xlabel('Время, с'); ylabel(legend_y(i));
 subplot(3,2,4);plot(t(n_begin:n_end),h(i,n_begin:n_end));grid on;title ('Низкочастотная составляющая
сигнала (увеличение по шкале времени)' ); scale_ = axis; axis ([t_begin t_end
scale_(3:4)]);xlabel('Время, с') ; ylabel(legend_y(i));
end
%_____________________________________________________________________
%_____________________________ Расчет фильтра ФВЧ  _____________________________
%_____________________________________________________________________
Wp=200*2/Fs;                              %Частота пропускания 200 Гц
Ws=100*2/Fs; Rs=10;Rp=0.01;         %Частота задерживания 100Гц, неравномерность в полосах
[n,Wn]=buttord(Wp,Ws,Rp,Rs);          %Расчет порядка фильтра Баттерворда
[bl,al]=butter(n,Wn,'high');                %Расчет фильтра
%График АЧХ фильтра
[H1,w1]=freqz(bl,al,4096);
figure(fig1);subplot(2,1,2);plot(w1*Fs/(2*pi),abs(H1));xlabel('Frequency (Hz)'); ylabel('Mag. of
frequency response');grid; axis([0 300 0 1]);title('ФВЧ');
%_____________________________________________________________________
%_____________________________Фильтрация ФВЧ  _____________________________
%_____________________________________________________________________
for i = 1:Namber_chanel_screen
    g(i,:) = filter(bl,al, Array_of_Data(i,:)); %Фильтрация i-го канала
   figure(fig(i));subplot(3,2,5);plot(t,g(i,:));grid on;title ('Высокочастотная составляющая сигнала');
scale_ = axis; axis ([0 Tmax  scale_(3:4)]);xlabel('Время, с');ylabel(legend_y(i));
   subplot(3,2,6);plot(t(n_begin:n_end),g(i,n_begin:n_end));grid on;title ('Высокочастотная
составляющая сигнала (увеличение по шкале времени)' ); scale_ = axis; axis ([t_begin t_end
scale_(3:4)]);xlabel('Время, с'); ylabel(legend_y(i));
end
%_____________________________________________________________________
%__________Разложение в ряд Фурье и построение спектра сигнала  _____________________
%_____________________________________________________________________
for i=1:Namber_chanel_screen
figure;
    y(i,:)=abs(fftshift(fft(Array_of_Data(i,:))));
     subplot(3,2,1);    plot((Fs/2-Fs*t/Tmax),20*log10(abs(y(i,:))));  title(['Спектр сигнала канала N '
num2str(i)]'); ylabel(['Мощность сигнала ' legend_y{i} '^2']); xlabel ('Частота сигнала, Гц')
     y_scale(i,:)=abs(fftshift(fft(Array_of_Data(i,n_begin:n_end))));
```

П.А.

```
subplot(3,2,2);    plot((Fs/2-Fs.*(0:1/(n_end-n_begin):1)),20*log10(abs(y_scale(i,:))));  title('Спектр рабочей области сигнала '); ylabel(['Мощность сигнала ' legend_y{i} '^2']); xlabel ('Частота сигнала, Гц')
 end
 for i=1:Namber_chanel_screen
    yh(i,:)=abs(fftshift(fft(h(i,:))));
     subplot(3,2,3);    plot((Fs/2-Fs*t/Tmax),20*log10(abs(yh(i,:))));  title('Спектр низкочастотной составляющей сигнала '); ylabel(['Мощность сигнала ' legend_y{i} '^2']); xlabel ('Частота сигнала, Гц')
     yh_scale(i,:)=abs(fftshift(fft(h(i,n_begin:n_end))));
     subplot(3,2,4);    plot((Fs/2-Fs.*(0:1/(n_end-n_begin):1)),20*log10(abs(yh_scale(i,:))));  title('Спектр низкочастотной составляющей области сигнала ');ylabel(['Мощность сигнала ' legend_y{i} '^2']); xlabel ('Частота сигнала, Гц')
 end
 for i=1:Namber_chanel_screen
    yg(i,:)=abs(fftshift(fft(g(i,:))));
     subplot(3,2,5);    plot((Fs/2-Fs*t/Tmax),20*log10(abs(yg(i,:))));  title('Спектр высокочастотной составляющей сигнала '); ylabel(['Мощность сигнала ' legend_y{i} '^2']); xlabel ('Частота сигнала, Гц')
     yg_scale(i,:)=abs(fftshift(fft(g(i,n_begin:n_end))));
     subplot(3,2,6);    plot((Fs/2-Fs.*(0:1/(n_end-n_begin):1)),20*log10(abs(yg_scale(i,:))));  title('Спектр высокочастотной составляющей области сигнала '); ylabel(['Мощность сигнала ' legend_y{i} '^2']); xlabel ('Частота сигнала, Гц')
 end
%_____________________________________________________________________________
%___________ построение спектра сигнала  в логарифмических координатах _____________
%_____________________________________________________________________________
 tn=0:1/Fs:(N/(2*Fs)); %Время Найквиста = t/2
for i=1:Namber_chanel_screen
figure;
     subplot(3,2,1);    plot((Fs*tn/Tmax),(abs(y(i,N/2:N))));  title(['Спектр сигнала канал № ' num2str(i) ']'); ylabel(['Амплитуда сигнала ' legend_y_db{i} ]); xlabel ('Логарифм частоты Log(f), декады')
     subplot(3,2,2);    plot((Fs.*(0:1/(n_end-n_begin):0.5)),(abs(y_scale(i,(n_end-n_begin)/2:(n_end-n_begin)/Fs:(n_end-n_begin)))));  title('Спектр рабочей области сигнала '); ylabel(['Амплитуда сигнала ' legend_y_db{i} ]); xlabel ('Логарифм частоты Log(f), декады');
 end
 for i=1:Namber_chanel_screen
     subplot(3,2,3);   plot(log10(Fs*tn/Tmax),20*log10(abs(yh(i,N/2:N))));  title('Спектр низкочастотной составляющей сигнала ');  ylabel(['Амплитуда сигнала ' legend_y_db{i} ]);xlabel ('Логарифм частоты Log(f), декады')
     subplot(3,2,4);    plot(log10(Fs.*(0:1/(n_end-n_begin):0.5)),20*log10(abs(yh_scale(i,(n_end-n_begin)/2:(n_end-n_begin)/Fs:(n_end-n_begin)))));  title('Спектр низкочастотной составляющей области сигнала '); ylabel(['Амплитуда сигнала ' legend_y_db{i} ]); xlabel ('Логарифм частоты Log(f), декады');
 end
 for i=1:Namber_chanel_screen
     subplot(3,2,5);    plot(log10(Fs*tn/Tmax),20*log10(abs(yg(i,N/2:N))));  title('Спектр высокочастотной составляющей сигнала ');  ylabel(['Амплитуда сигнала ' legend_y_db{i} ]);xlabel ('Логарифм частоты Log(f), декады')
```

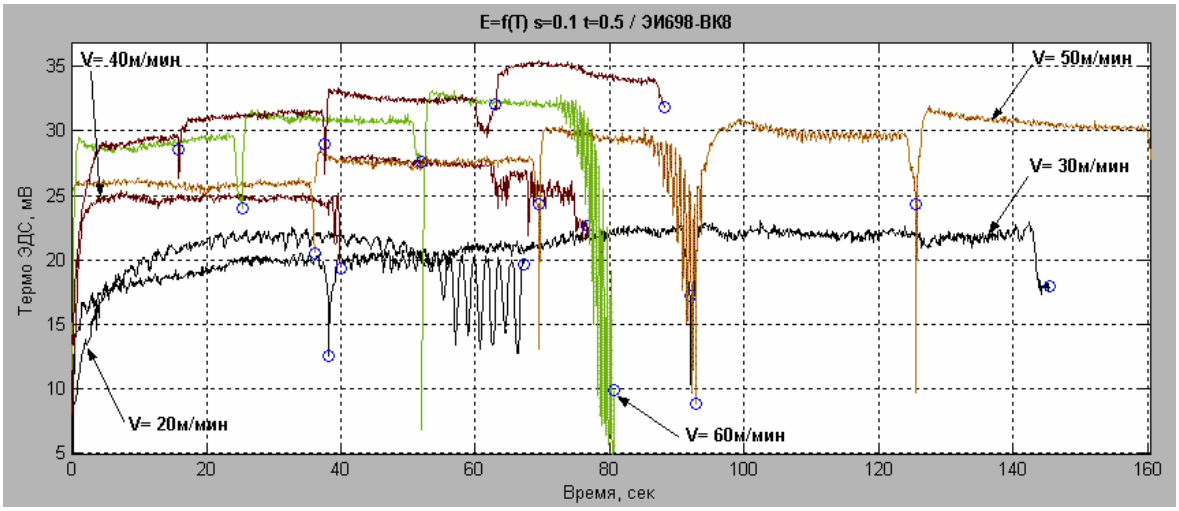
П.А.

```
subplot(3,2,6);    plot(log10(Fs.*(0:1/(n_end-n_begin):0.5)),20*log10(abs(yg_scale(i,(n_end-
n_begin)/2:(n_end-n_begin)/Fs:(n_end-n_begin)))));  title('Спектр высокочастотной составляющей
области сигнала ');  ylabel(['Амплитуда сигнала ' legend_y_db{i} ]); xlabel ('Логарифм частоты
Log(f), декады');
 end
%_____
%__________ построение периодограммы (спектр плотности мощности сигнала)
%_____for
i=1:Namber_chanel_screen
figure;
    subplot(3,2,1); periodogram(Array_of_Data(i,:)); title(['Периодограмма (спектр плотности
мощности) сигнала']);
    subplot(3,2,2); periodogram(Array_of_Data(i,n_begin:n_end));title(['Периодограмма (спектр
плотности мощности) рабочей области сигнала'])
end
for i=1:Namber_chanel_screen
    subplot(3,2,3); periodogram(h(i,:)); title(['Периодограмма низкочастотной составляющей
сигнала']);
    subplot(3,2,4); periodogram(h(i,n_begin:n_end));title(['Периодограмма низкочастотной
составляющей рабочей области сигнала'])
end
for i=1:Namber_chanel_screen
    subplot(3,2,5); periodogram(g(i,:)); title(['Периодограмма высокочастотной составляющей
сигнала']);
    subplot(3,2,6); periodogram(g(i,n_begin:n_end));title(['Периодограмма высокочастотной
составляющей рабочей области сигнала'])
end
%_____
%__________ построение периодограммы методом Уэлча_____
%_____
for i=1:Namber_chanel_screen
figure;
    subplot(3,2,1); pwelch(Array_of_Data(i,:)); title(['Периодограмма (спектр плотности мощности)
сигнала']);
    subplot(3,2,2); pwelch(Array_of_Data(i,n_begin:n_end));title(['Периодограмма (спектр плотности
мощности) рабочей области сигнала'])
end
for i=1:Namber_chanel_screen
    subplot(3,2,3); pwelch(h(i,:)); title(['Периодограмма низкочастотной составляющей сигнала']);
    subplot(3,2,4); pwelch(h(i,n_begin:n_end));title(['Периодограмма низкочастотной составляющей
рабочей области сигнала'])
end
for i=1:Namber_chanel_screen
    subplot(3,2,5); pwelch(g(i,:)); title(['Периодограмма высокочастотной составляющей сигнала']);
    subplot(3,2,6); pwelch(g(i,n_begin:n_end));title(['Периодограмма высокочастотной составляющей
рабочей области сигнала'])
end
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И СИГНАЛОВ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

П.Б.1. Осциллограмма сигнала термоЭДС при продольном точении сплава ЭИ698 инструментом марки ВК8

а



б

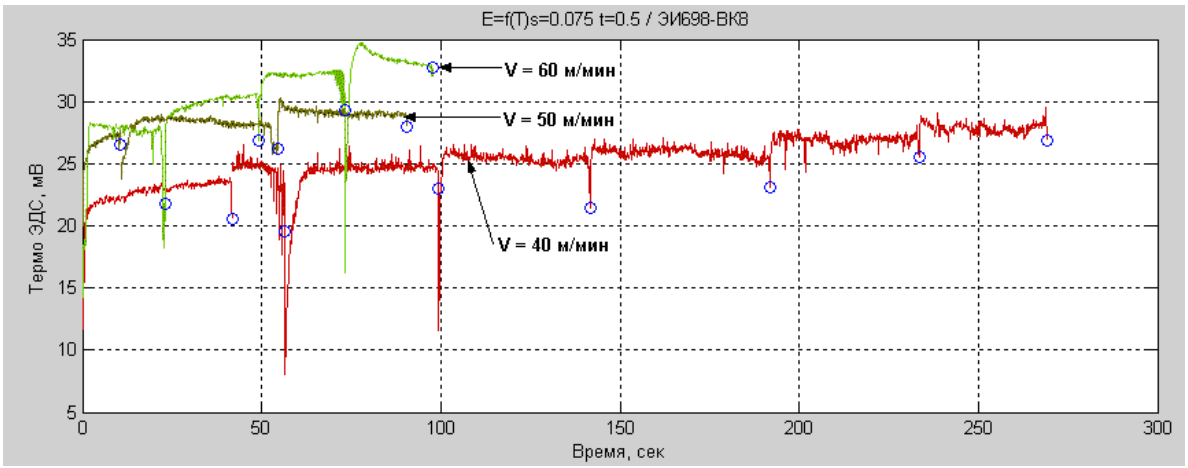
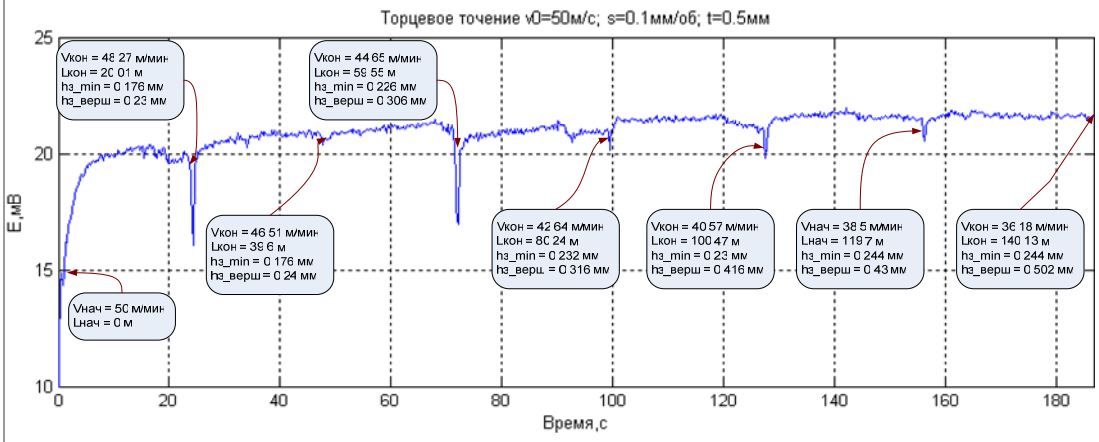


Рисунок 1. Осциллограмма сигнала термоЭДС при продольном точении сплава ЭИ698 инструментом марки ВК8 t = 0,5мм. *а* – s=0,1 мм/об; *б* – s=0,075 мм/об

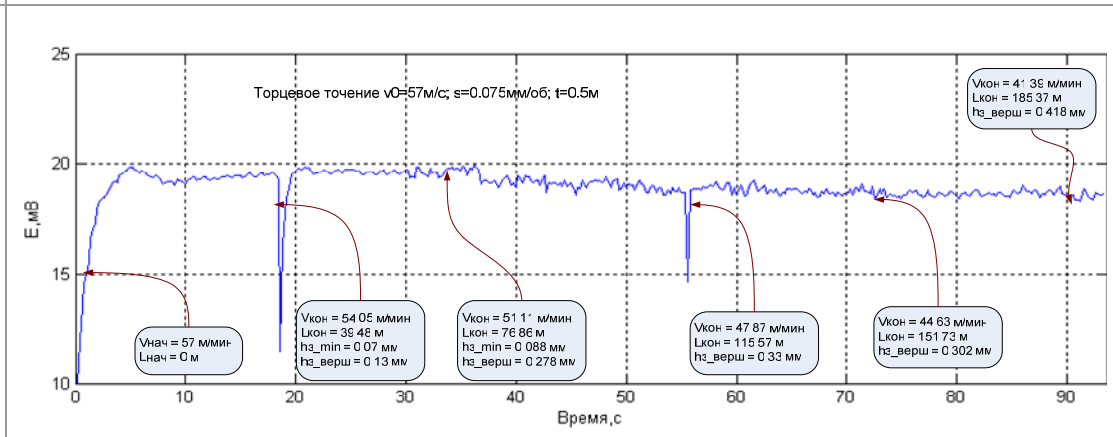
П.Б.

П.Б.2. Осциллограммы термоЭДС при торцевом точении сплава ХН73МБТЮ-ВД резцом ВК6ОМ.

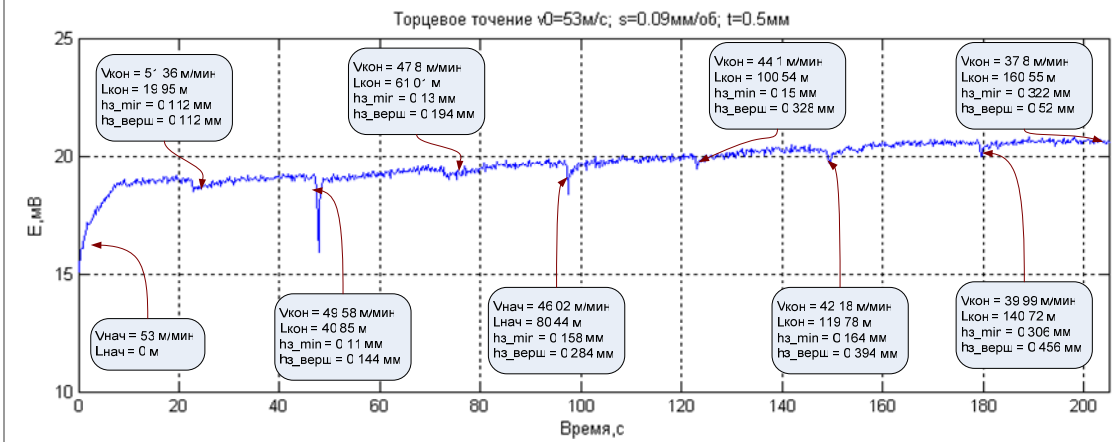
Vнач = 50 м/мин
Vкон = 36.18 м/мин
S = 0.1 мм/об; t = 0,5 мм



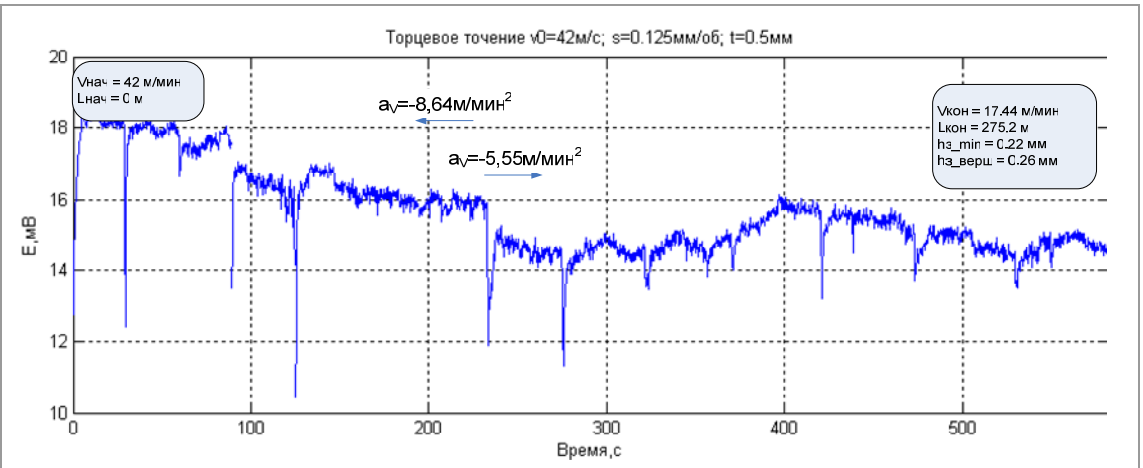
Vнач = 57 м/мин
Vкон = 41.4 м/мин
S = 0.075 мм/об; t = 0,5мм



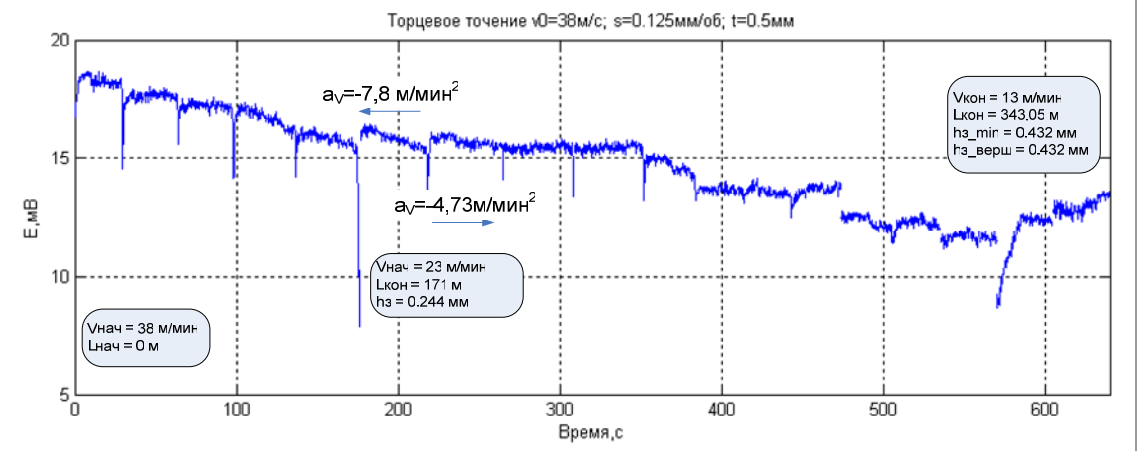
Vнач = 53 м/мин
Vкон = 37,8 м/мин
S = 0.09 мм/об; t = 0,5 мм



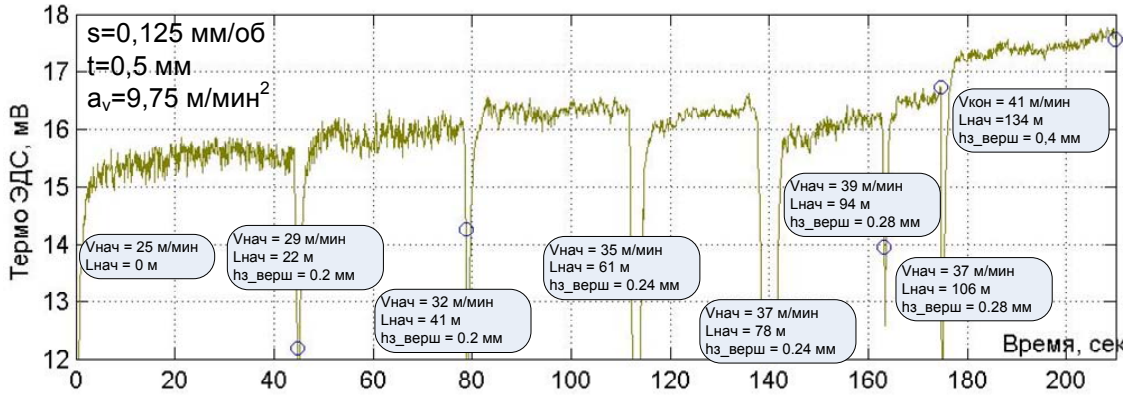
Vнач = 42 м/мин
Vкон = 17,44 м/мин
S = 0.125 мм/об; t = 0,5 мм



Vнач = 38 м/мин
Vкон = 20,94 м/мин
S = 0.125 мм/об; t = 0,5 мм

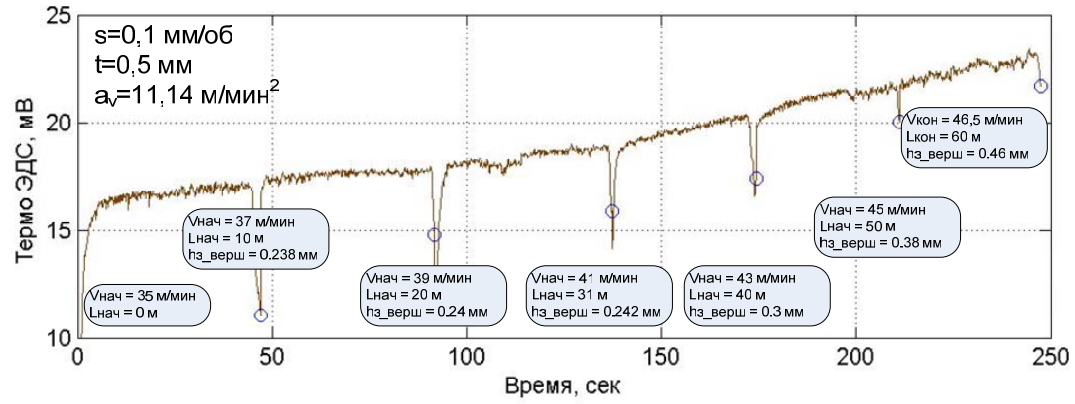


Vнач = 25 м/мин
Vкон = 41 м/мин
S = 0.125 мм/об; t = 0,5 мм
aV = 9.75 м/мин

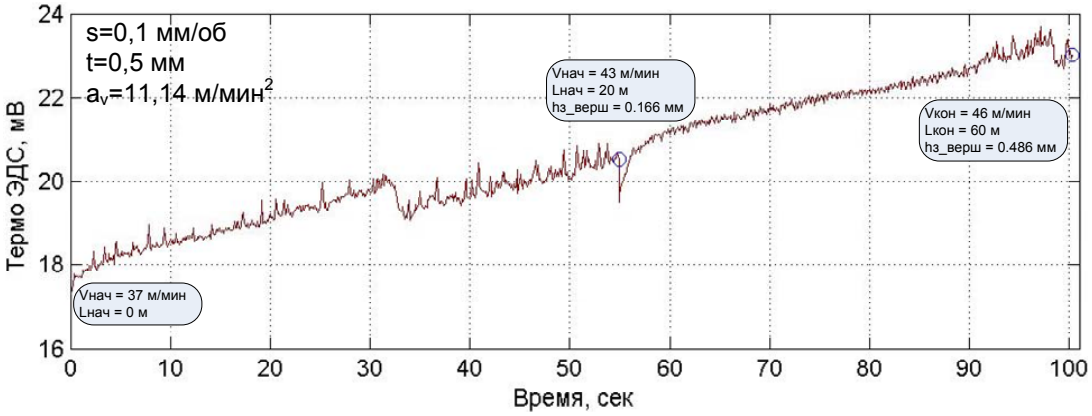


П.Б.

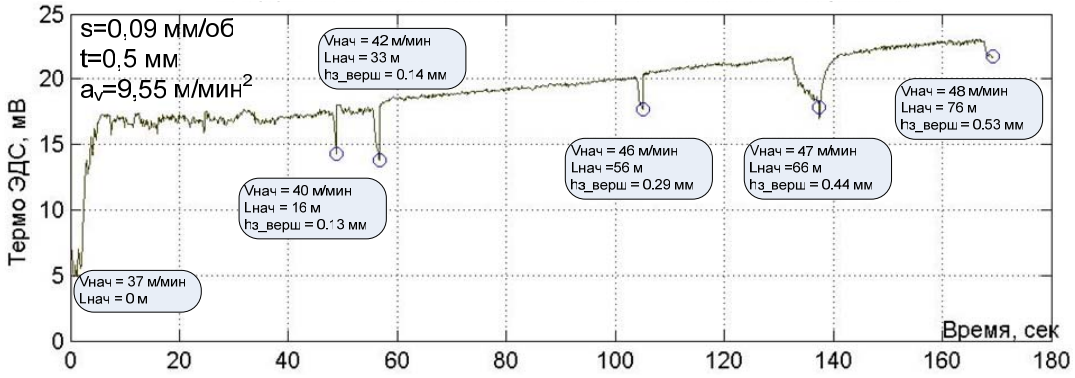
Vнач = 35 м/мин
Vкон = 46,5 м/мин
S = 0.1 мм/об; t = 0,5 мм
a_v = 11,14 м/мин



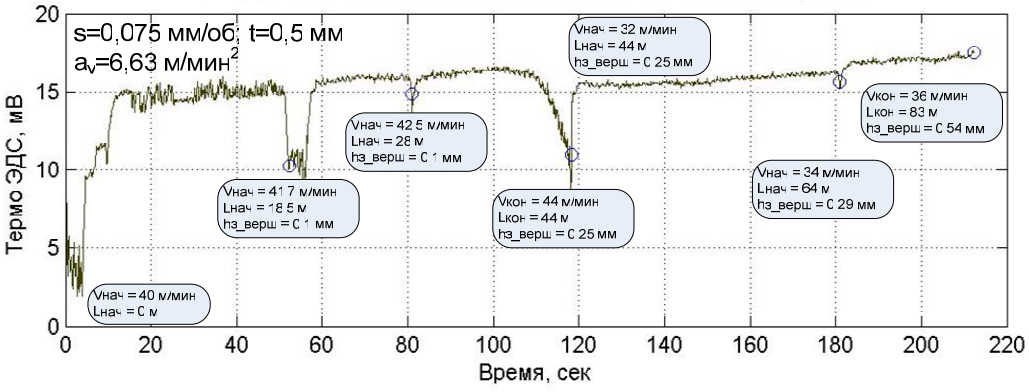
Vнач = 37 м/мин
Vкон = 46 м/мин
S = 0.1 мм/об; t = 0,5 мм
a_v = 11,14 м/мин



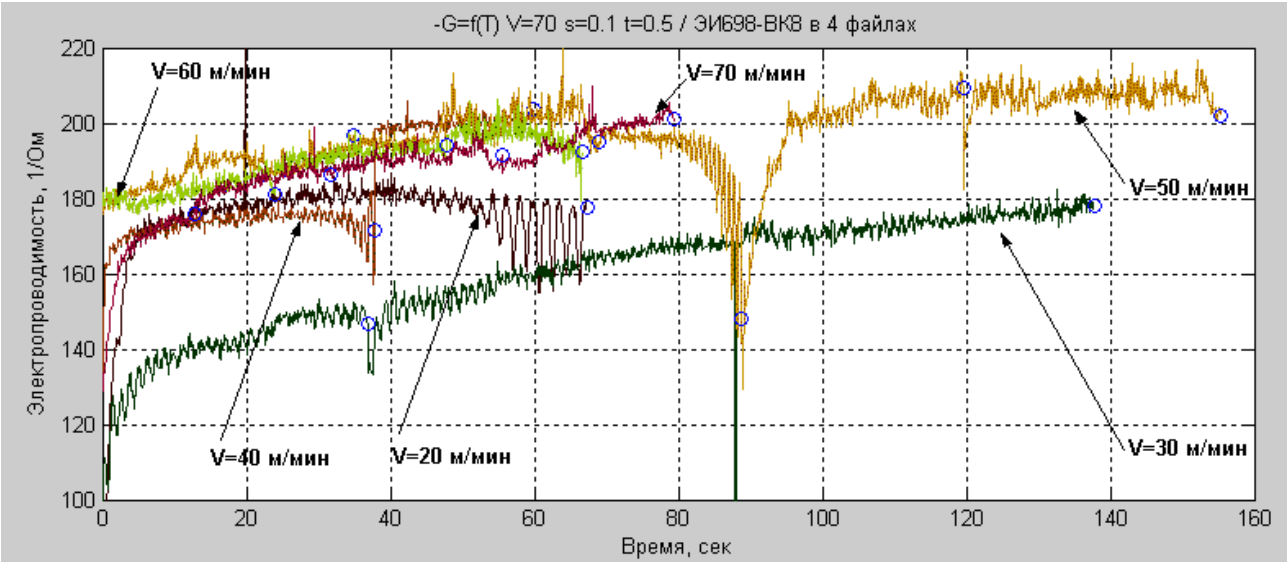
Vнач = 37 м/мин
Vкон = 48 м/мин
S = 0.09 мм/об; t = 0,5 мм
a_v = 9,55 м/мин



Vнач = 40 м/мин;Vкон = 44 м/мин
Vнач = 32 м/мин;Vкон = 38 м/мин
S = 0.09 мм/об; t = 0,5 мм
a_v = 6,63 м/мин



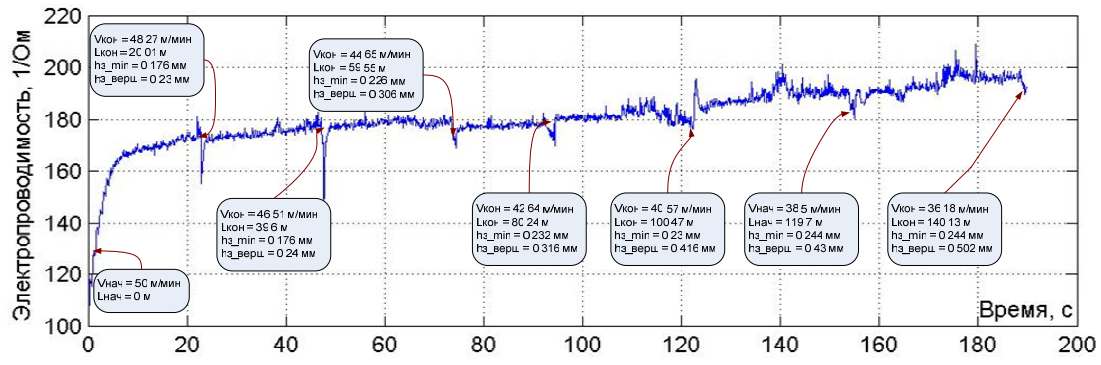
П.Б.3. Осциллограмма сигнала ЭП КИД при продольном точении сплава ЭИ698 инструментом марки ВК8



П.Б.4. Осциллограммы ЭП КИД при торцевом точении сплава ХН73МБТЮ-ВД резцом ВК6ОМ

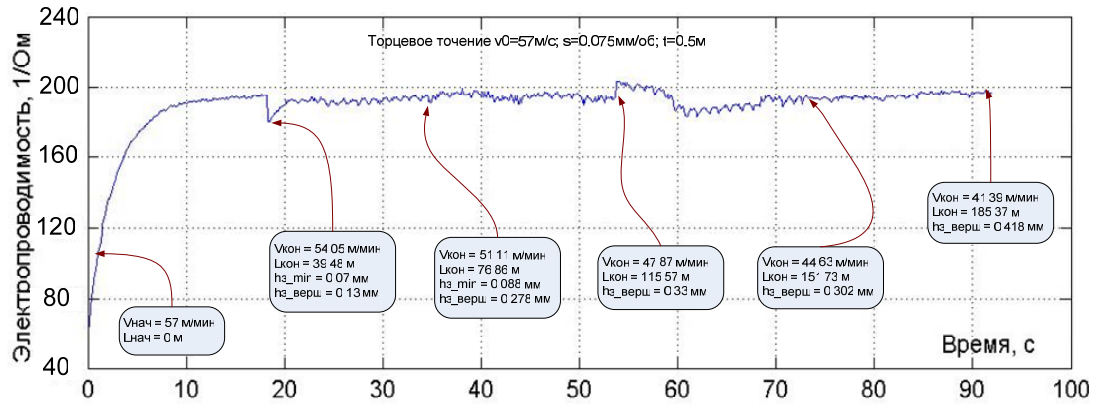
Vнач = 50 м/мин

Vкон = 36.18 м/мин

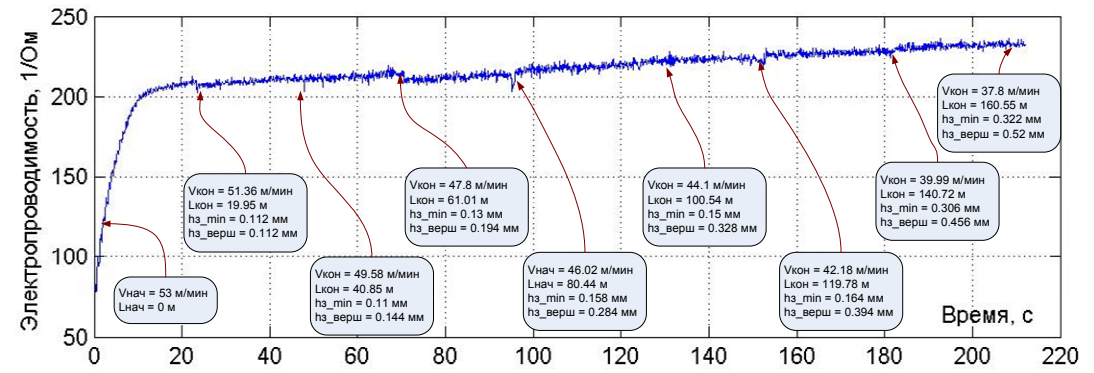


П.Б.

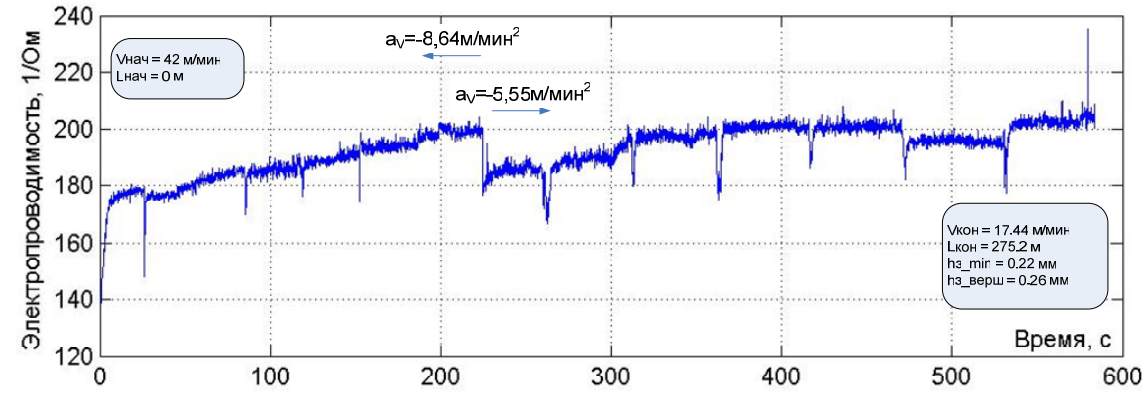
Vнач = 57 м/мин
Vкон = 41.4 м/мин



Vнач = 53 м/мин
Vкон = 37,8 м/мин
S = 0.09 мм/об; t = 0,5

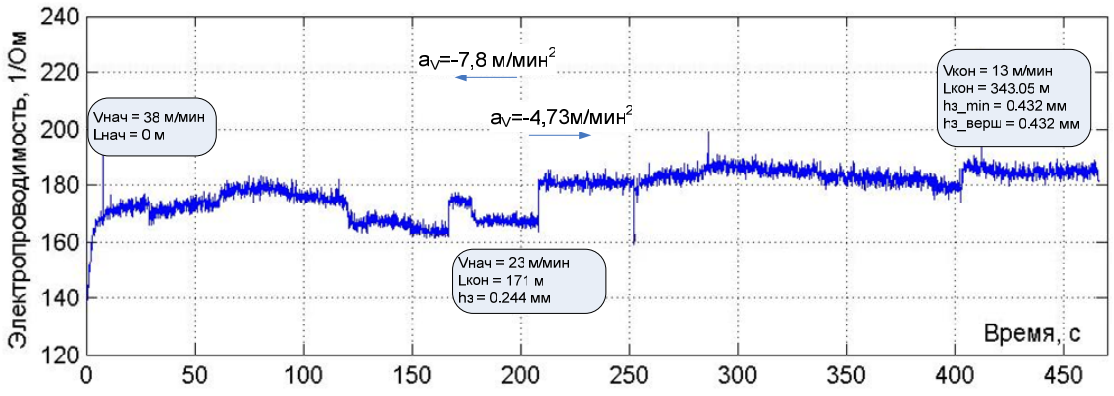


Vнач = 42 м/мин
Vкон = 17,44 м/мин
S = 0.125 мм/об; t = 0,5 мм

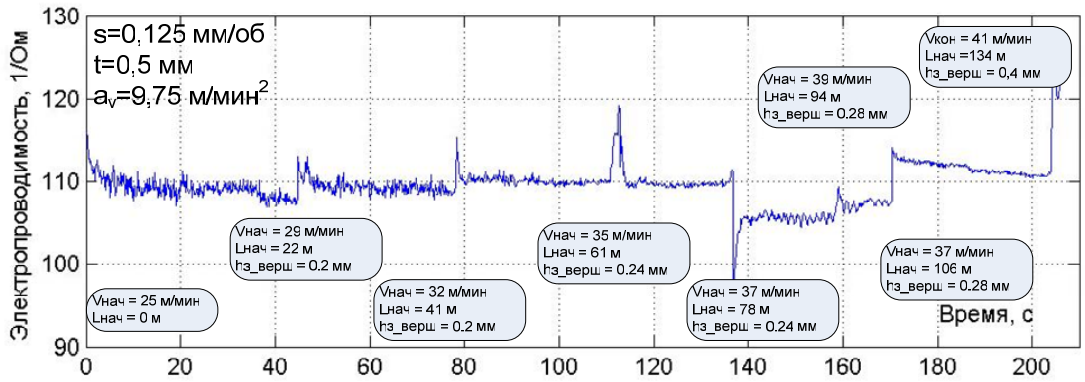


П.Б.

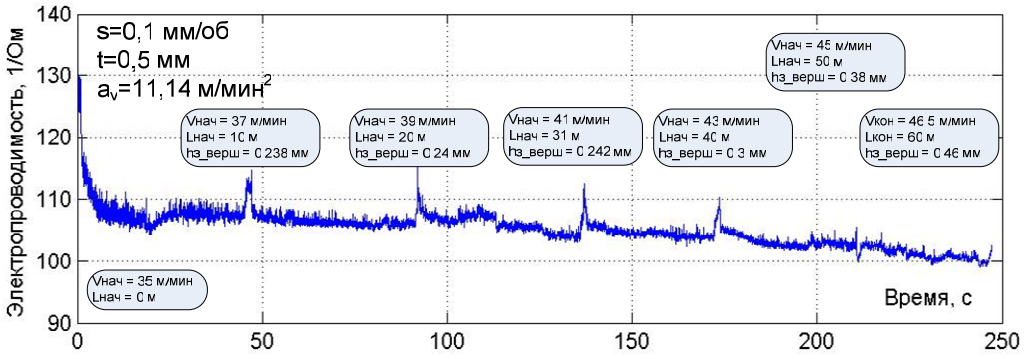
Vнач = 38 м/мин
Vкон = 20,94 м/мин
S = 0.125 мм/об; t = 0,5 мм



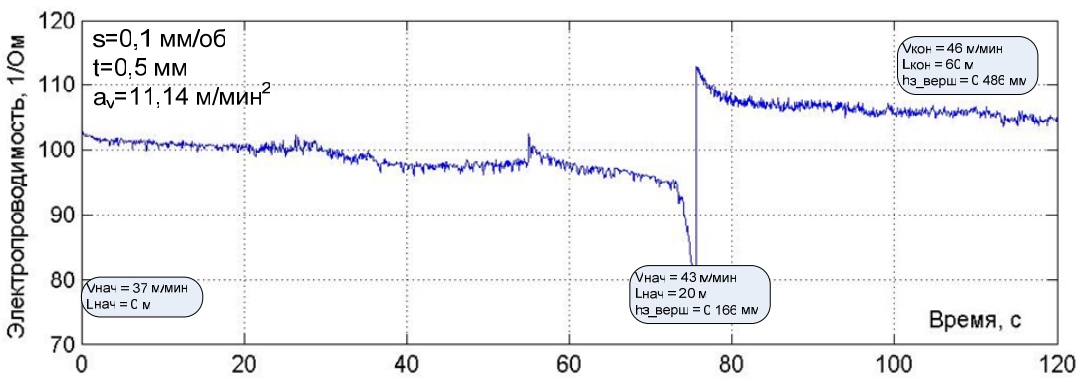
Vнач = 25 м/мин
Vкон = 41 м/мин
S = 0.125 мм/об; t = 0,5 мм



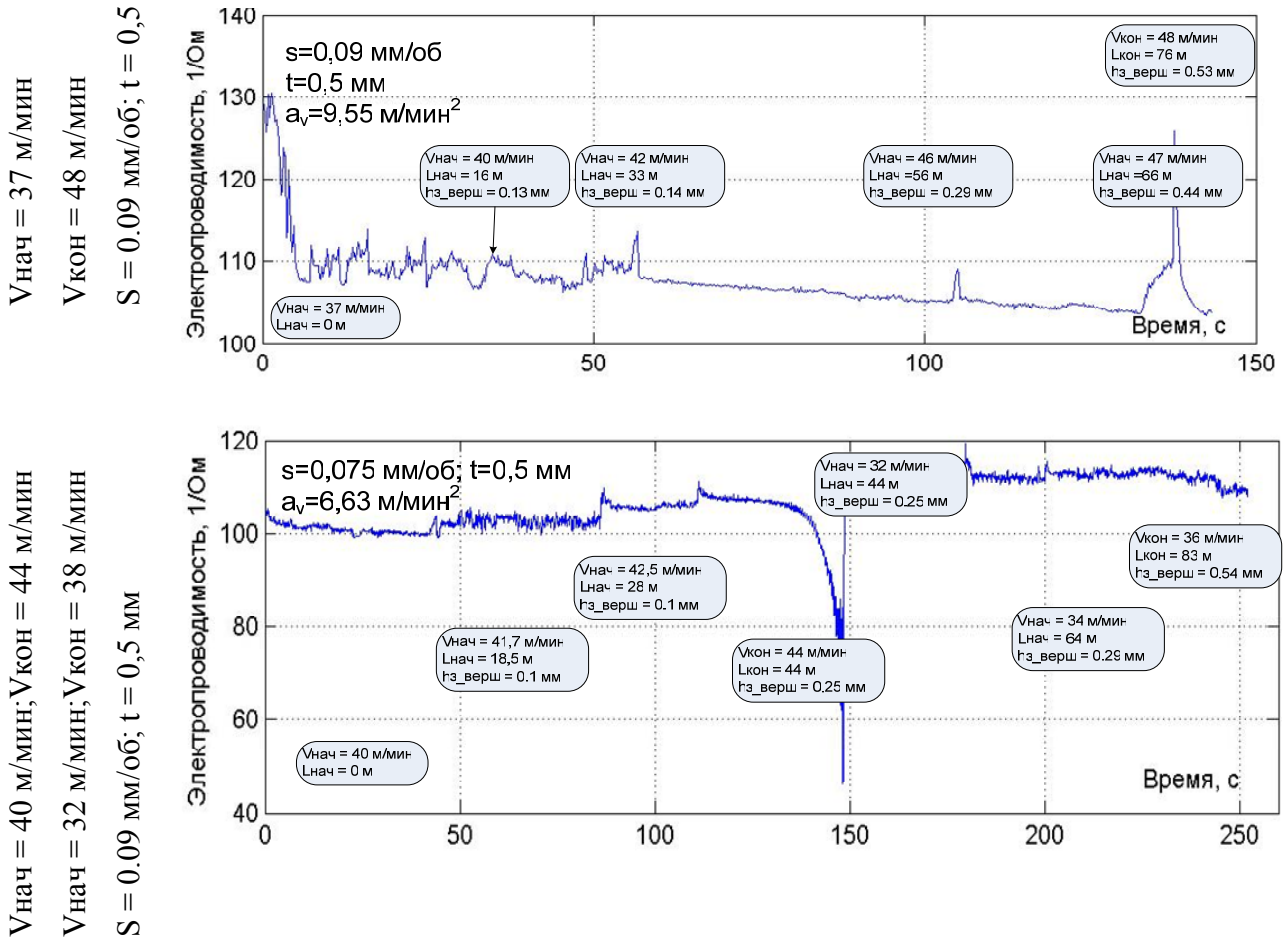
Vнач = 35 м/мин
Vкон = 46,5 м/мин
S = 0.1 мм/об; t = 0,5



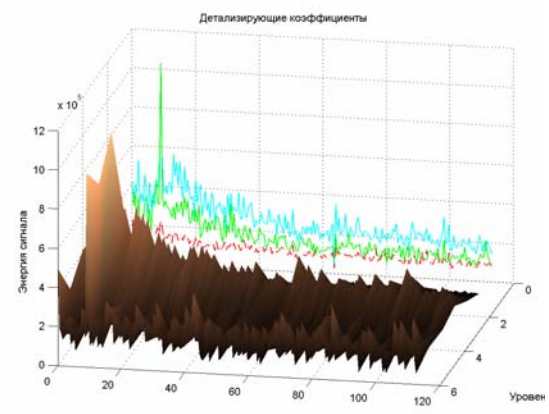
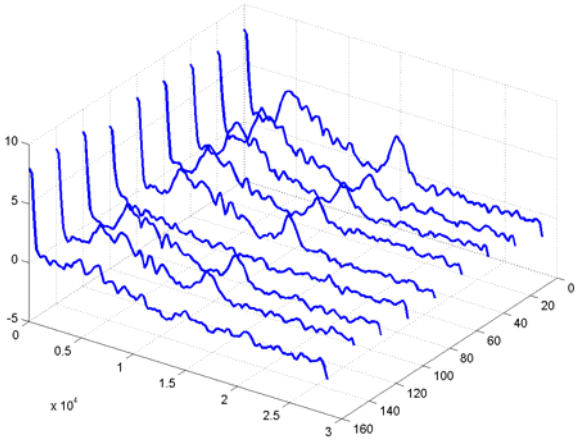
Vнач = 37 м/мин
Vкон = 46 м/мин
S = 0.1 мм/об; t = 0,5



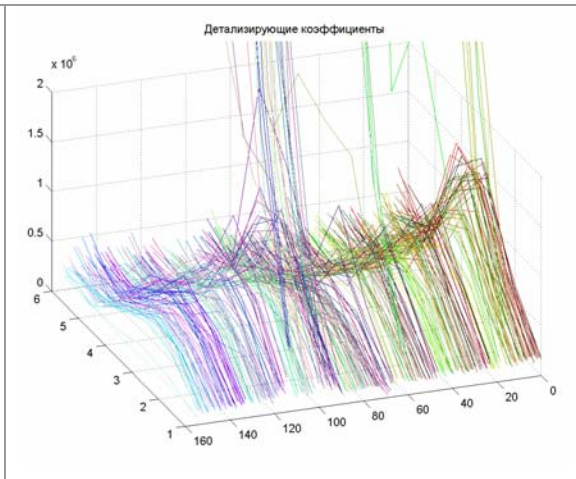
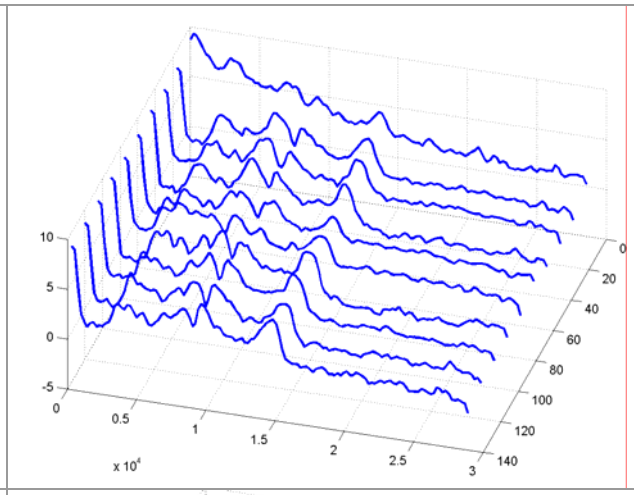
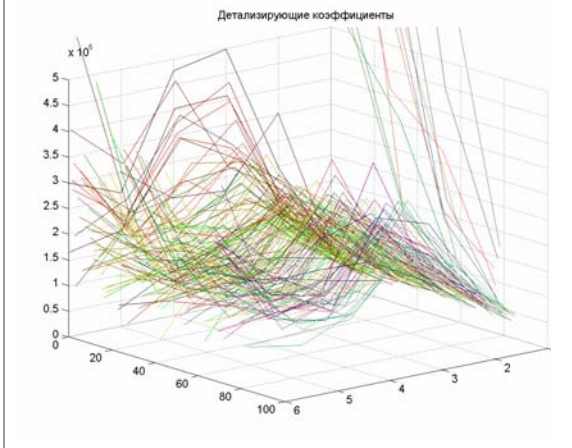
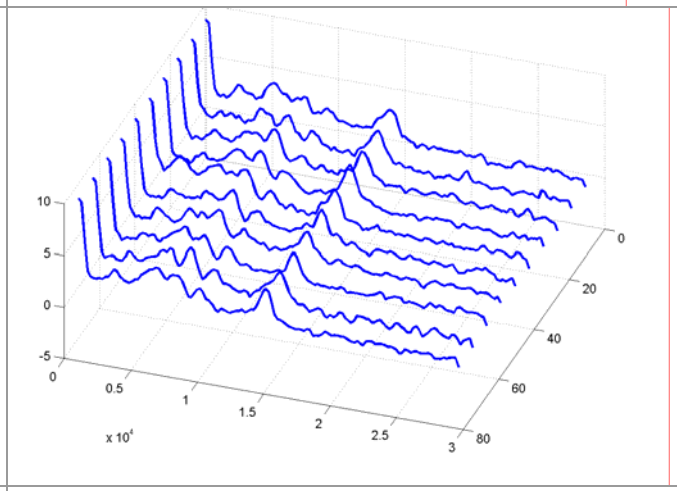
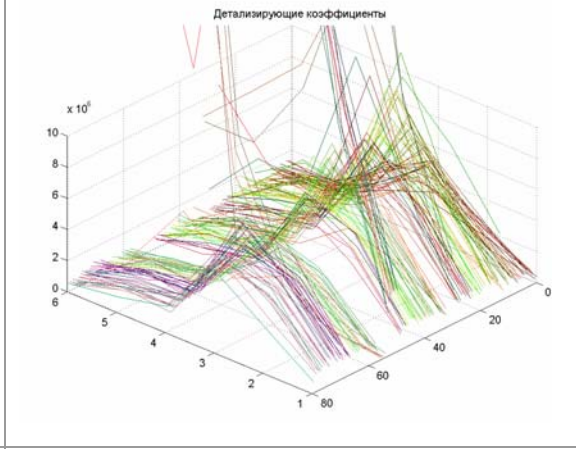
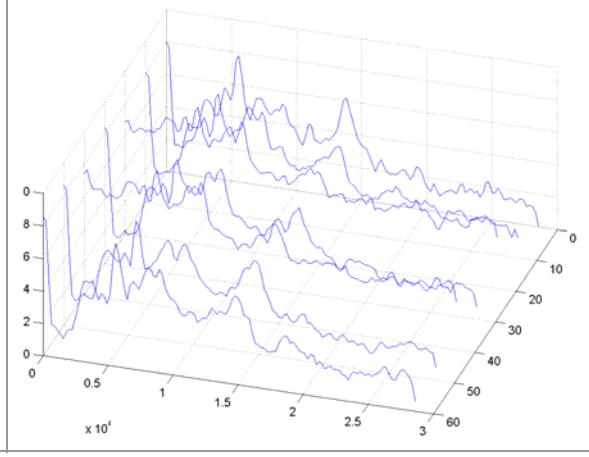
П.Б.



П.Б.4. Спектральный и вейвлет-образ сигнала при продольном точении сплава ХН73МБТЮ-ВД резцом ВК8

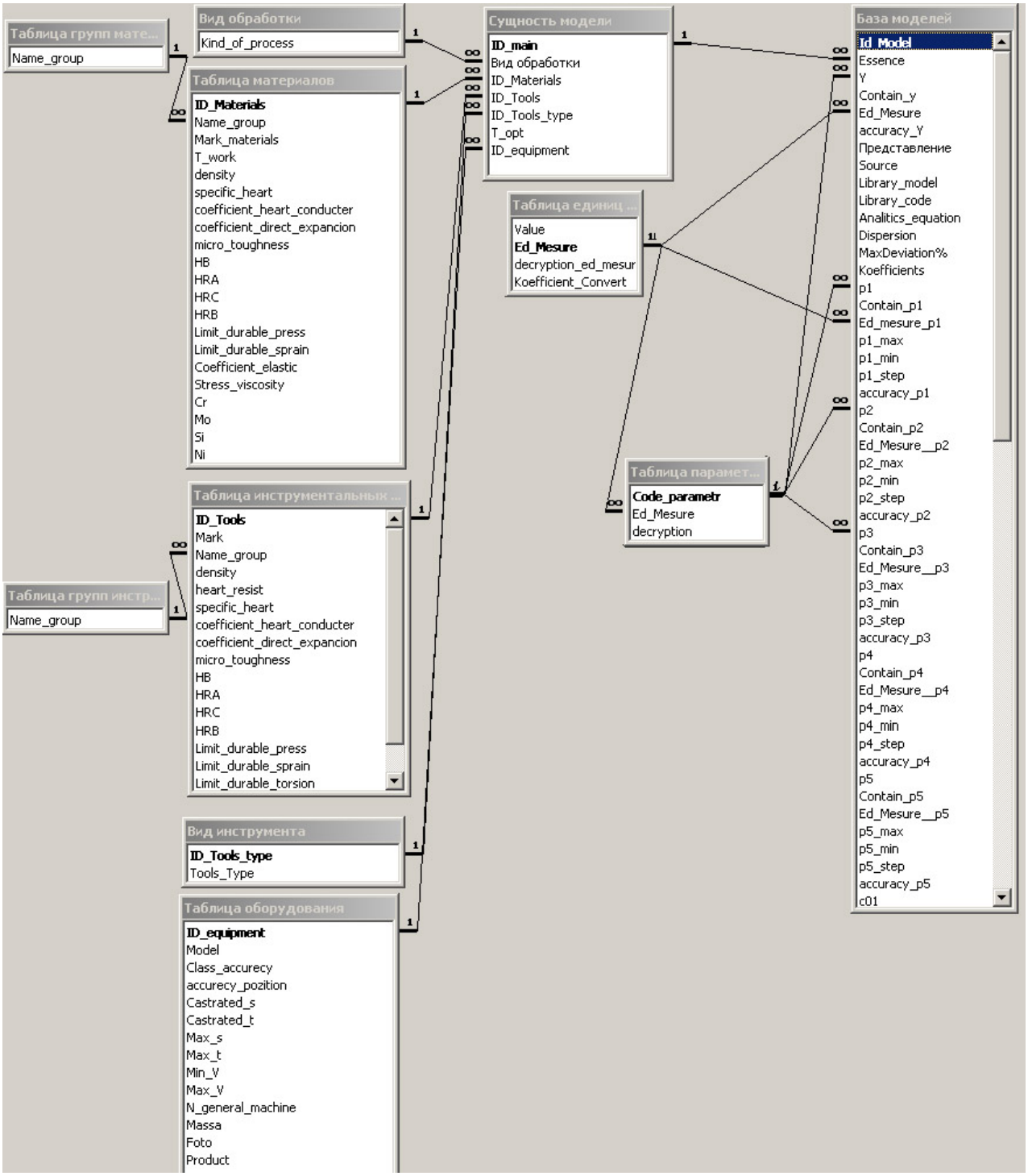
	Вейвлет-анализ	Спектральный анализ
V=30 м/мин		

П.Б.

V=50 м/мин м/мин		
V=60 м/мин		
V=70 м/мин		

ПРИЛОЖЕНИЕ В. СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Логическая модель БД



П.В.

Структура таблицы материалов

Имя поля	Тип данных	Описание
aterials	Счетчик	
_group	Текстовый	
_materials	Текстовый	
rk	Числовой	
ity	Числовой	плотность [г/см^3]
fic_heart	Числовой	удельная теплоемкость [кал/см^3"С]
icient_heart_conducter	Числовой	Коэффициент теплопроводности
icient_direct_expancion	Числовой	Коэффициент линейного расширения [10^-6 * 1/"С]
_toughness	Числовой	Микротвердость
	Числовой	Твердость по Бринеллю (определяют делением нагрузки на площадь сферического отпечатка закаленного шарика)
	Числовой	Твердость по Роквеллу (алмазный конус с нагрузкой 588 Н)
	Числовой	Твердость по Роквеллу (вдавливая алмазный конус при нагрузке 1470 Н)
	Числовой	Твердость по Роквеллу (Испытание твердости шариком с нагрузкой 980 Н)
_durable_press	Числовой	Предел прочности при сжатии
_durable_sprain	Числовой	Предел прочности при растяжении
ficient_elastic	Числовой	Модуль упругости
s_viscosity	Числовой	Ударная вязкость
	Числовой	
	Числовой	
	Числовой	
	Числовой	

Структура таблицы «Таблица инструментальных материалов»

Имя поля	Тип данных	
ID_equipment	Счетчик	
Model	Текстовый	Модель станка
Class_accurecy	Текстовый	Класс точности станка по ГОСТ 8-82
accurecy_pozition	Числовой	Точность позиционирования
Castrated_s	Числовой	Максимальная скорость быстрых перемещений (продольных)
Castrated_t	Числовой	Максимальная скорость быстрых перемещений (поперечных)
Max_s	Числовой	Максимальная скорость рабочей подачи (x)
Max_t	Числовой	Максимальная скорость рабочей подачи (y)
Min_V	Числовой	Минимальная частота вращения шпинделя
Max_V	Числовой	Максимальная частота вращения шпинделя
N_general_machine	Числовой	Мощность привода главного движения (кВт)
Massa	Числовой	Масса станка (кг)
Foto	Поле объекта OLE	
Product	Поле MEMO	производитель
M	Числовой	Наибольший крутящий момент

Структура таблицы «Таблица оборудования»

Имя поля	Тип данных	
ID_equipment	Счетчик	
Model	Текстовый	Модель станка
Class_accurecy	Текстовый	Класс точности станка по ГОСТ 8-82
accurecy_pozition	Числовой	Точность позиционирования
Castrated_s	Числовой	Максимальная скорость быстрых перемещений (продольных)
Castrated_t	Числовой	Максимальная скорость быстрых перемещений (поперечных)
Max_s	Числовой	Максимальная скорость рабочей подачи (x)
Max_t	Числовой	Максимальная скорость рабочей подачи (y)
Min_V	Числовой	Минимальная частота вращения шпинделя
Max_V	Числовой	Максимальная частота вращения шпинделя
N_general_machine	Числовой	Мощность привода главного движения (кВт)
Massa	Числовой	Масса станка (кг)
Foto	Поле объекта OLE	
Product	Поле MEMO	производитель
M	Числовой	Наибольший крутящий момент

Структура таблицы «Таблица единиц измерения»

Имя поля	Тип данных	Описание
Вид	Текстовый	Величина
Ed_Mesure	Текстовый	Единицы измерения
decryption_ed_mesure	Текстовый	Расшифровка
Koefficient_Convert	Текстовый	Коэффициент преобразования от Ed_Mesure к Единица измерения в СИ

П.В.

Структура таблицы «Таблица материалов»

Имя поля	Тип данных	
ID_MechanicalProperty	Числовой	
density	Числовой	плотность [г/см^3]
specific_heart	Числовой	удельная теплоемкость [кал/см^3"C]
coefficient_heart_conducter	Числовой	Коэффициент теплопроводности
coefficient_direct_expancion	Числовой	Коэффициент линейного расширения [10^-6 * 1/"C]
micro_toughness	Числовой	Микротвердость
HB_B	Числовой	Твердость по Брюнелю
HB_R	Числовой	
HB_V	Числовой	
Limit_durable_press	Числовой	Предел прочности при сжатии
Limit_durable_sprain	Числовой	Предел прочности при растяжении
Coefficient_elastic	Числовой	Модуль упругости
Stress_viscosity	Числовой	Ударная вязкость

Структура таблицы «Сущность модели»

Имя поля	Тип данных	
ID_main	Счетчик	
Вид обработки	Текстовый	Вид обработки
ID_Materials	Числовой	Обрабатываемый материал
ID_Tools	Числовой	Инструментальный материал
ID_Tools_type	Числовой	
T_opt	Числовой	Оптимальная температура
ID_equipment	Числовой	Модель станочного оборудования

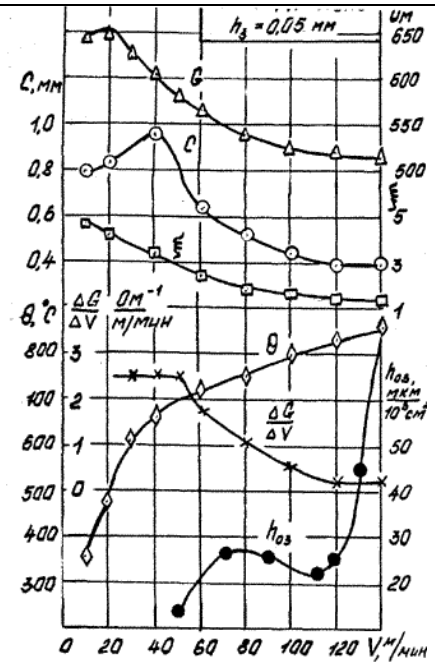
Структура таблицы «Таблица параметров»

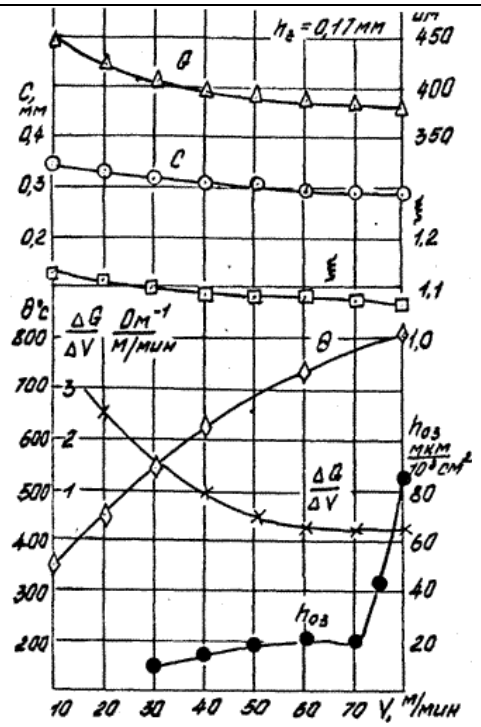
Имя поля	Тип данных	
Code_parametr	Текстовый	Условное обозначение параметра
Ed_Mesure	Текстовый	Единица измерения
decryption	Текстовый	Расшифровка

Фрагмент структуры таблицы «База моделей»

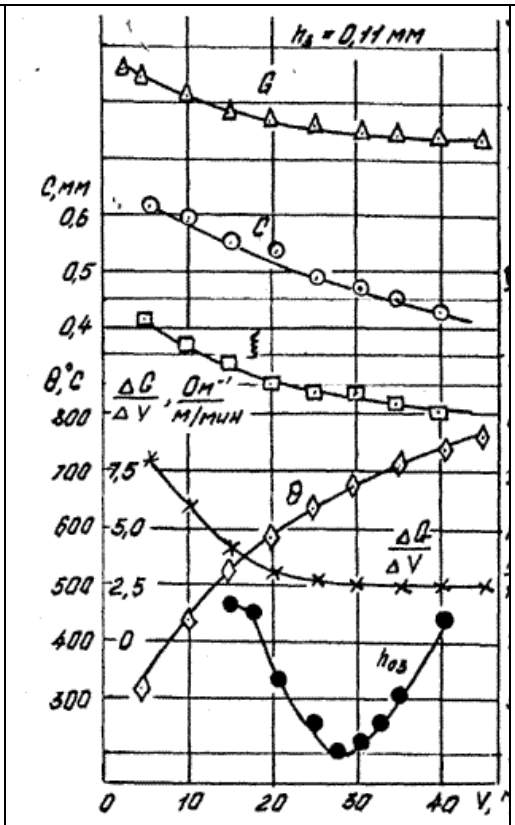
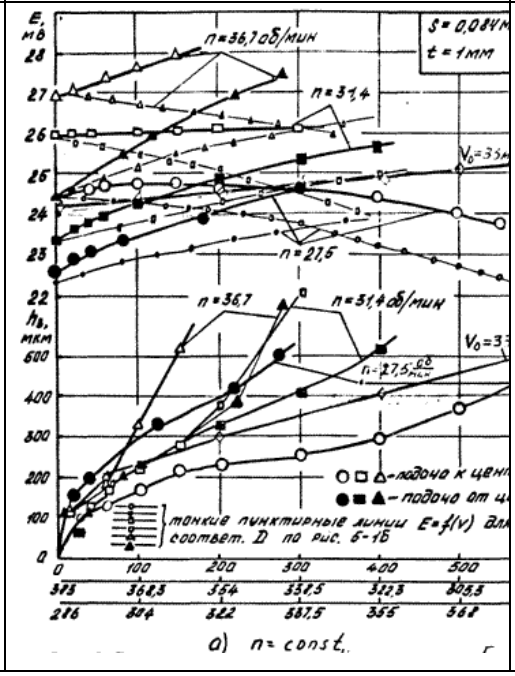
Имя поля	Тип данных	Описание
Id_Model	Счетчик	
Essence	Числовой	
Y	Текстовый	Условное обозначение выходного параметра (Пр.Pz)
Contain_y	Текстовый	Расшифровка выходного параметра (Пр. Главная составляющая силы резания)
Ed_Mesure	Текстовый	Единица измерения выходного параметра (Пр. Н)
accuracy_Y	Числовой	Точность измерения выходного параметра (зависит от измерительного оборудования и точночти метода измерения) [%]
Представление	Текстовый	Вид представления модели (аналитический, графический, табличный)
Source	Поле MEMO	Литературный источник
Library_model	Текстовый	Библиотека модели (для табличного представления данных)
Library_code	Текстовый	Код в библиотеке (для табличного представления данных присваивается автоматически)
Analitics_equation	Текстовый	Аналитическая формула (Пр. Y = k0*k1*p1-p2^k2...
Dispersion	Текстовый	Дисперсия
MaxDeviation%	Текстовый	максимальное отклонение от среднего (в %)
Koefficients	Текстовый	Содержит коэффициенты аналитической формулы, перечисленные через ";" в форме [k0;k1;k2;k3;k4...]
p1	Текстовый	Условное обозначение варьируемого фактора
Contain_p1	Текстовый	Расшифровка фактора
Ed_mesure_p1	Текстовый	Единица измерения фактора
p1_max	Числовой	Минимальное значение фактора
p1_min	Числовой	Максимальное значение фактора
p1_step	Числовой	Рекомендуемый шаг изменения фактора
accuracy_p1	Числовой	Точность измерения фактора (зависит от измерительного оборудования и точночти метода измерения) [%]
p2	Текстовый	Условное обозначение варьируемого фактора
Contain_p2	Текстовый	Расшифровка фактора
Ed_Mesure__p2	Текстовый	Единица измерения фактора
p2_max	Числовой	Минимальное значение фактора
p2_min	Числовой	Максимальное значение фактора
p2_step	Числовой	Рекомендуемый шаг изменения фактора
accuracy_p2	Числовой	Точность измерения фактора (зависит от измерительного оборудования и точночти метода измерения) [%]

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ФРАГМЕНТ БАЗЫ ДАННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПР

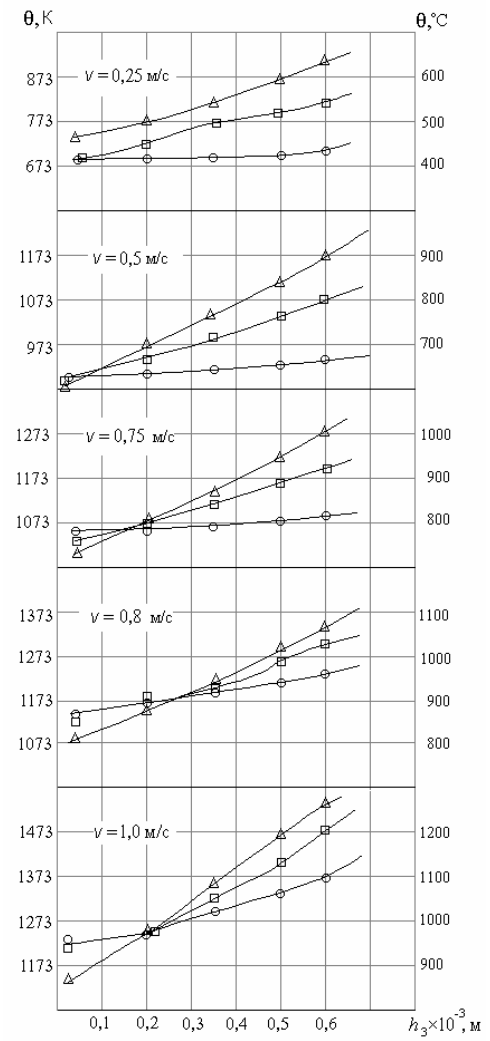
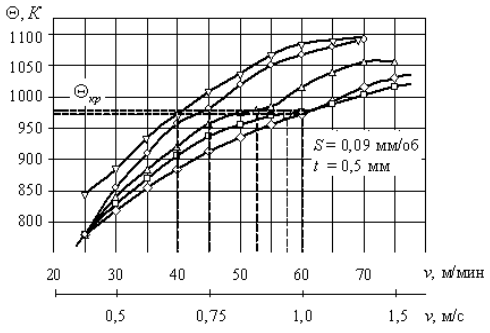
Пара деталь-инструмент	Модель в оригинальном представлении из литературного источника	Представление модели в БД	Источник
ОХН3МФА-Т15К6		Продольное точение s = 0,195мм/об; t = 0,5 мм; $h_з$=0,05мм; $\gamma = \lambda = 0°$; $\alpha = 10°$; $\varphi = \varphi_1 = 45°$; r = 0,5 мм. Модели вида для пары ВТ9 - ВК8, где *Pz* – сила резания, *G* – электропроводимость контакта «инструмент-деталь»:	[38]

9-ВК8		Продольное точение
		s = 0,195мм/об;t = 0,5 мм;$h_з$=0,17мм;γ =λ = 0°;
		α = 10°; φ=$φ_1$= 45°;
		r = 0,5 мм.Pz=f(V,s,t,h_3)
		`Model(1).function = 'k1+x1*k2+p2*k3+p3*k4+p4*k5+p 1*p2*k6+p1*p3*k7+ p1*p4*k8+p2*p3*k9+p2*p4*k10+p 3*p4*k11'`
		`Model(1).koeficient = [6.421 0.013 0.0658 0.294 0.117 - 0.0048 -0.0014 -0.0049 - 0.0017 -0.027 -0.017]`
		G=f(V,s,t,h_3)
		`Model(2).function = 'k1+p1*k2+p2*k3+p3*k4+p4*k5+p 1*p2*k6+p1*p3*k7+ p1*p4*k8+p2*p3*k9+p2*p4*k10+p 3*p4*k11'`
		Model(2).koeficient = [6.232 -0.0077 0.447 0.505 0.152 -0.0002 -0.0167 -0.0020 - 0.0164 -0.0558 -0.0163]
			[38]

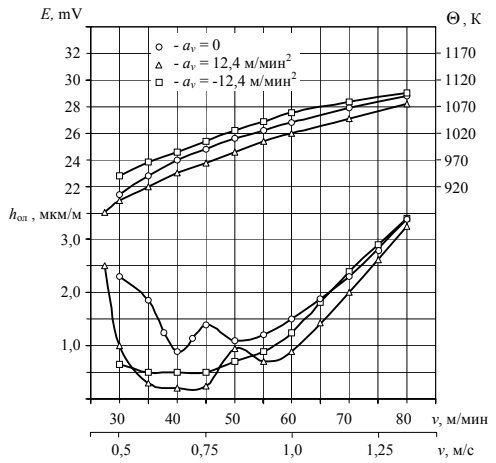
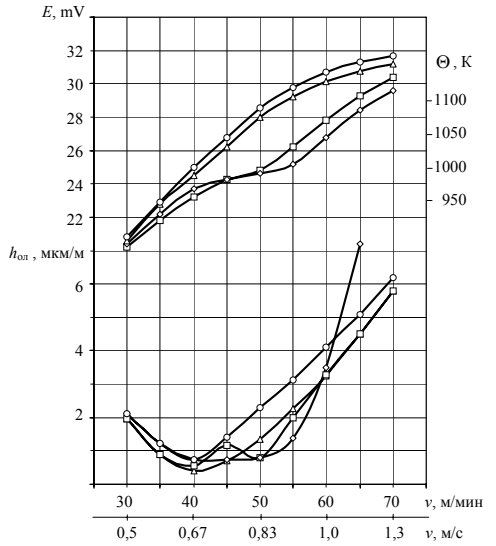
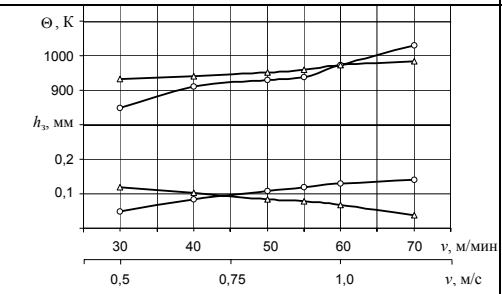
П.Г.

ХН73МБТЮ-ВК6М		Продольное точение s = 0,195мм/об; t = 0,5 мм; $h_з$=0,11мм; γ =λ = 0°; α = 10°; φ=φ$_1$= 45°; r = 0,5 мм.	[38]
ХН73МБТЮ-ВК6М		Торцевое точение γ =λ = 0°; α = 10°; φ=φ$_1$= 45°; r = 0,5 мм.	[38]

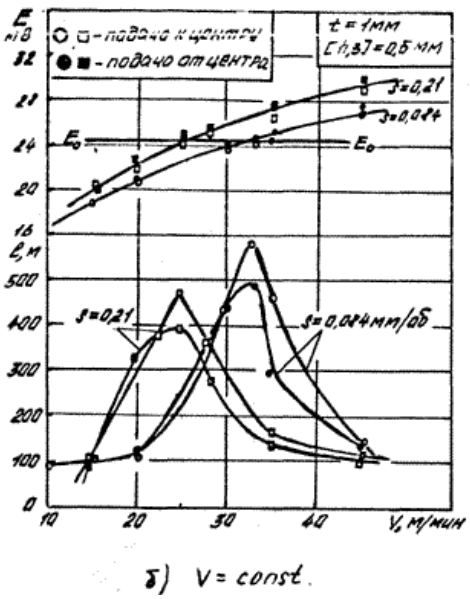
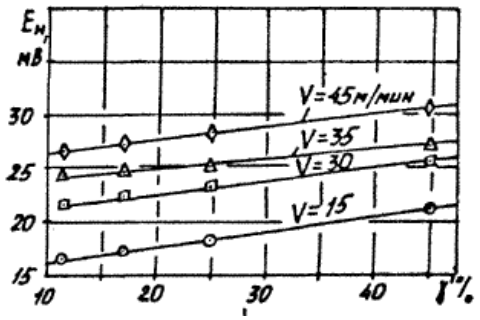
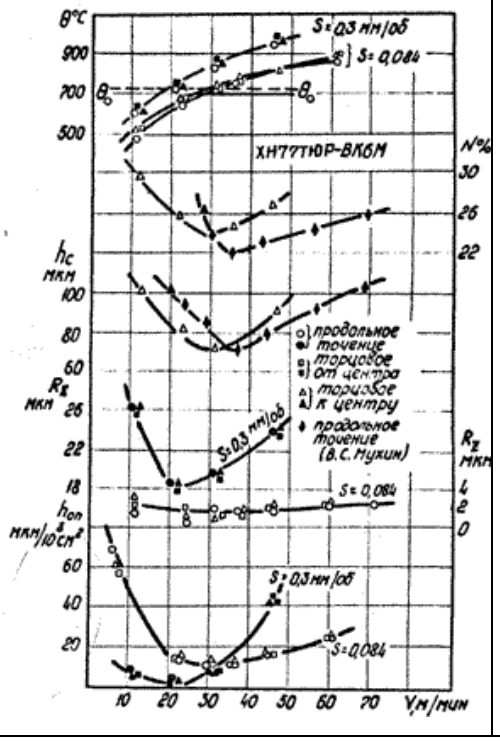
П.Г.

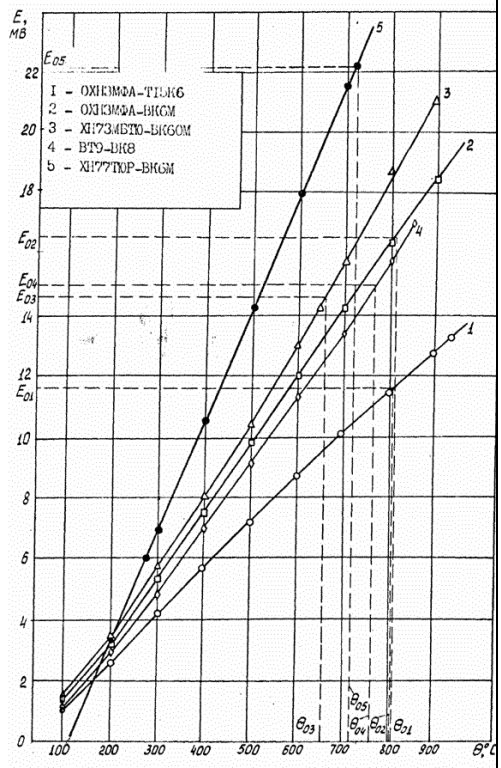
ХН73МБТЮ – ВК8		Влияние фаски износа задней поверхности инструмента на температуру передней (о), задней (Δ) поверхностей инструмента и среднюю (□) температуру резания	[85]
ХН73МБТЮ – ВК8	 Влияние скорости, величины и знака ускорения резания на температуру резания *о* - a_v = 0 м/мин^2; Δ - a_v = 2,7 м/мин^2; □- a_v = 3,6 м/мин^2; ◊ - a_v = 6,0 м/мин^2; ∇- a_v = - 3,6м/мин^2.		[85]

П.Г.

ХН73МБТЮ – ВК8			[85]
ХН73МБТЮ – ВК6М			[85]
15Х18Н12С4ТЮ - ВК8	 *o* - a_v = 12,4 м/мин^2; Δ - a_v = -12,4 м/мин^2.	*S*=0,1 мм/об; *t*=0,5 мм;	[85]

П.Г.

ХН73МБТЮ-ВК6М	 б) V = const.	Торцевое точение $\gamma = \lambda = 0°$; $\alpha = 10°$; $\varphi = \varphi_1 = 45°$; r = 0,5 мм.	[38]
ХН77ТЮ, ХН73МБТЮ, ХН70ВМФТЮ,		S=0,084 мм/об t=0,5мм $\gamma = \lambda = 0°$; $\alpha = 10°$; $\varphi = \varphi_1 = 45°$; r = 0,5 мм.	[38]
ХН77ТЮР-ВК6М		t = 1 мм; $h_з$=0,11мм; $\gamma = \lambda = 0°$; $\alpha = 10°$; $\varphi = \varphi_1 = 45°$; r = 0,5 мм.	[38]

(ЭИ437А, ЭИ437БУ, ЭИ617, ЭИ826, ЭИ929, ЭИ220) – ВК8	$\Theta = C + K_V \lg V + K_S \lg S_Z +$ $+ K_{h_3} \lg h_3 + K_{\alpha_\gamma} \lg \alpha_{\gamma'}$ $C = -1303$ $K_V = 10978 - 352 \lg \alpha_{\gamma'} - 123,$ $+ 125 \lg h_3 - 55,9 \lg V;$ $K_S = -25 - 49,5 \lg \alpha_{\gamma'} + 103,9$ $K_t = 239,4 - 53,2 \lg \alpha_{\gamma'} - 51,7$ $- 25,2 \lg t;$ $K_{h_3} = 410,3 + 227,3 \lg h_3;$ $K_{\alpha_\gamma} = 1452,3 - 271,5 \lg \alpha_{\gamma'}$ $\alpha_{\gamma'}$ - содержание γ'-фазы, %		[69]
ОХН3МФА – Т15К6;ОХН3МФА – ВК6М; ХН73МБТЮ – ВК6ОМ; ВТ9 - ВК8; ХН77ТЮР – ВК6М			[85]

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. ФРАГМЕНТ ЗАПРОСА К БАЗЕ ДАННЫХ МОДЕЛЕЙ ПР

```
function rom;
global wer;

conn = database('base', 'username', 'password')
a = isconnection(conn)
ping(conn)
dbmeta = dmd(conn)


Num=get(wer.hpop1, 'Value');
curs1=exec(conn,'SELECT ALL*FROM Таблица_оборудования')
curs1=fetch(curs1)
curs1.data
for i=1:2
switch Num
   case i
     set(wer.hedit1, 'string', curs1.data{i,2});
end
end

curs2=exec(conn,'SELECT ALL*FROM Таблица_инструментальных_материалов')
curs2 = fetch(curs2)
curs2.data
Num2=get(wer.hpop2, 'Value');
for i=1:5
switch Num2
   case i
      set(wer.hedit2, 'string', curs2.data{i,2});
   end
end


curs3=exec(conn,'SELECT ALL*FROM Таблица_материалов')
curs3 = fetch(curs3)
curs3.data
Num3=get(wer.hpop3, 'Value');
for i=1:12
switch Num3
   case i
```

П.Д.

```
      set(wer.hedit3, 'string', curs3.data{i,3});
   end
end

curs4=exec(conn,'SELECT ALL*FROM Вид_обработки')
curs4 = fetch(curs4)
curs4.data
Num4=get(wer.hpop4, 'Value');
for i=1:4
switch Num4
   case i
      set(wer.hedit4, 'string', curs4.data{i,:});
   end
end

%c1=exec(conn,'SELECT ALL*FROM Сущность_модели where
ID_materials=curs3.data end')
c1=exec(conn,'SELECT ALL ID_equipment FROM Сущность_модели')
c1=fetch(c1)
c1.data

c2=exec(conn,'SELECT ALL ID_Tools FROM Сущность_модели')
c2=fetch(c2)
c2.data

c3=exec(conn,'SELECT ALL ID_Materials FROM Сущность_модели')
c3=fetch(c3)
c3.data

c4=exec(conn,'SELECT ALL Vid_obrabotki FROM Сущность_модели')
c4=fetch(c4)
c4.data

close(conn);
```