

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств»
(код и наименование направления подготовки)

Передовые технологии в машиностроении
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Исследование процессов диагностики процесса резания

Обучающийся

Д.А. Безрукавников

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, А.В. Зотов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Содержание

Введение.....	3
1 Состояние вопроса.....	5
1.1 Анализ производственных возможностей предприятия ООО «Токарка»	5
1.2 Анализ состояния вопроса токарной обработки высокоточных и сложнообрабатываемых деталей на станках с ЧПУ в производственных условиях ООО «Токарка».....	11
1.3 Формирование целей и задач исследований	19
2 Теоретические исследования процессов виброакустической диагностики при резании	20
2.1 Расчетные схемы колебаний заготовки, приводящих к возникновению вибрационной и шумовой картины в процессе резания	21
2.2 Разработка математической модели виброобработки как объекта управления	25
2.3 Теоретическое исследование влияния параметров инструмента и режимов обработки на характеристики возникающих вибраций и шума при резании.	37
2.4 Исследование информационно-измерительных систем мониторинга силовых и виброакустических параметров и звука в процессе резания.	44
3 Экспериментальные исследования процессов вибраций и акустических сигналов при токарной обработке	51
3.1 Методика анализа акустического сигнала процесса резания для диагностики состояния инструмента и качества обработанной поверхности	51
3.2 Выводы по итогам практической работы:	69
Заключение	71
Список используемых источников.....	72

Введение

Современные условия экономики и внешнеполитическая ситуация в России диктуют требования повышения эффективности машиностроительного производства.

Технологические процессы обработки конструкционных материалов (стальных, алюминиевых, чугуновых сплавов, а также полимеров) являются одной из самых значимых составляющих в цепочке создания и выпуска продукции. От верного определения параметров технологических процессов зависит эффективность производства и себестоимость конечных изделий.

Процессы лезвийной обработки со снятием стружки занимают значительную часть операций технологического воздействия, в результате которого происходит формирование заданных конфигураций деталей.

Современные средства автоматизированного проектирования (САПР) позволяют создавать сложные конфигурации конструктивов и деталей, из которых состоят изделия. Потребителям предлагается широкий спектр товаров, для изготовления которых используются различного вида технологические оснастка и приспособления. Сроки проектирования и изготовления технологической оснастки крайне сжаты и минимализированы в соответствие с рыночными реалиями. Для оперативного изготовления как средств производства, так и изделий для конечного потребителя широко внедрены и распространены различного вида технологические пакеты автоматизированного проектирования (САПР ТП), к которым относятся системы подготовки управляющих программ, а также диагностические системы для мониторинга и коррекции в реальном времени процессов обработки.

Целью магистерской работы является повышение эффективности токарной обработки (снижение времени обработки и расходов на обрабатываемые инструменты при обеспечении заданных требований к

качеству) на станках с числовым программным управлением путем внедрения оригинальных диагностических методов, обладающих практической применимостью и целесообразностью внедрения в текущих производственных условиях.

К возможным к применению диагностическим признакам, по которым оценивается процесс резания, относится акустический и вибрационный анализ динамической системы «заготовка – инструмент - приспособление – станок». Анализ звуковой (акустической) картинки является перспективным и недостаточно изученным методом диагностики в привязке к актуальным конструктивам станков, оснасток и режущего инструмента, а также систем числового программного управления. Поэтому формирование подхода к исследованию процессов резания с использованием акустического контроля является актуальным вопросом, решение которого способно повысить эффективность процессов резания, а полученные данные исследований могут быть применены в практических направлениях, а также в качестве базиса для более фундаментальных исследований и для внедрения в разрабатываемые и внедряемые в настоящее время отечественные системы управления металлорежущими станками.

1 Состояние вопроса

1.1 Анализ производственных возможностей предприятия ООО «Токарка»

ООО «Токарка» является малым производственным предприятием, решающим задачи инжиниринга, механической обработки и ремонтов узлов и механизмов оборудования.

Проектируются и изготавливаются как единичные изделия, так и продукция, выпускаемая мелкими и средними сериями. Механическая обработка выполняется как в отношении деталей и конструктивов собственной разработки, так и по чертежам для сторонних заказчиков.

Одним из важных и значимых направлений деятельности предприятия является ремонт и восстановление деталей и узлов, с разработкой ремонтных технологий, обеспечивающих высокий пост-ремонтный ресурс изделий.

На предприятии имеется основное необходимое для решения задач металлообрабатывающее и сварочное оборудование с необходимыми комплектами технологической оснастки, режущего и мерительного инструмента, а также технологические приспособления разного вида.

Парк металлообрабатывающего оборудования представлен станками токарной, сверлильной, фрезерной и шлифовальной групп, а также электроискровыми (электроэрозионными) станками проволоочно – вырезного типа. Также используются лазерные установки для наплавки и очистки поверхностей. Имеются и используются как универсальные станки, так и станки с числовым программным управлением. Технологические процессы получения и изготовления изделий построены с учетом имеющегося опыта производственных предприятий по изготовлению оснастки, ремонтной службы ОАО «АВТОВАЗ», ООО «АЗОТРЕММАШ» и других.

Процессы механической обработки построены в основном на принципах разделения операций на черновые и чистовые с использованием соответствующих станков. Заготовки для механической обработки

конструктивов изделий используются в виде круглого и сортового проката, в том числе калиброванного. Для изготовления корпусных деталей используются листовые заготовки, заказываемые на предприятиях и фирмах, реализующих плазменную, лазерную, гидроабразивную резку. Резка сортового и листового проката осуществляется на ленточнопильных станках, также имеющихся в станочном парке ООО «Токарка».

Черновые и предварительные фрезерные операции осуществляются на вертикально-фрезерных станках 6р12 (заготовки с максимальным габаритом до 500х500х300 мм), 6р13м (заготовки с максимальным габаритом до 1000х500х350 мм). Чистовая фрезерная обработка, а также расточные операции производятся на станках с числовым программным управлением. Используются станки 2С150ПМФ4 (стойка числового программного управления ФМС-3000) с рабочим столом размером 500х1000 мм и высотой обработки до 400 мм. Также используется станок китайского производства VMC-1050 с размером рабочего стола 500х1000 мм и стойкой числового программного управления Фанук-ОІ. На рисунке 1 представлен общий вид данного станка.



Рисунок 1 - Общий вид фрезерного станка с ЧПУ

На рисунке 2 представлены основные элементы фрезерного станка с числовым программным управлением, влияющие на изготовление высокоточных деталей.



Рисунок 2 - Основные элементы фрезерного станка с ЧПУ

Для осуществления операций по контурной резке сквозных отверстий на предприятии используется электроискровой проволочно-вырезной станок DK7745. Применение данного станка позволяет осуществлять получение сложноконтурных конфигураций с минимальными радиусами в двухмерной системе координат (с возможностью наклона проволоки до 15 градусов). Станок ощутимо расширяет технологические возможности в результате отказа от традиционных методов получения поверхностей долблением, строганием. Возможна и реализуется вырезка наружных конфигураций и зубчатых наружных и внутренних венцов (с прямолинейным зубом), шпоночных и шлицевых пазов, лысок и тд. Станок оснащен оригинальной системой числового программного управления, не использующей традиционных G кодов (как на станках токарной и фрезерной групп). Фото

станка показано на Рисунке 3. Габаритные размеры обрабатываемых заготовок составляют до 500x500x500 мм.



Рисунок - 3 Общий вид электроэрозионного проволочно – вырезного станка DK-7745

На предприятии ООО «Токарка» я работал, начиная с подсобного рабочего, помощника фрезеровщика на универсальном фрезерном станке. Параллельно мною были изучены азы и основы современных актуальных система числового программного управления и получены практические навыки работы на этих станках. В настоящий момент я работаю в должности «инженер-технолог-наладчик токарных станков с числовым программным управлением». В результате разработанных и реализованных мною и предприятием технологий и технологических наладок изготавливается как серийная, так и единично выпускаемая продукция. Некоторые детали, на которые были разработаны технологии и которые были выпущены и переданы заказчикам, представлены на рисунке 4.

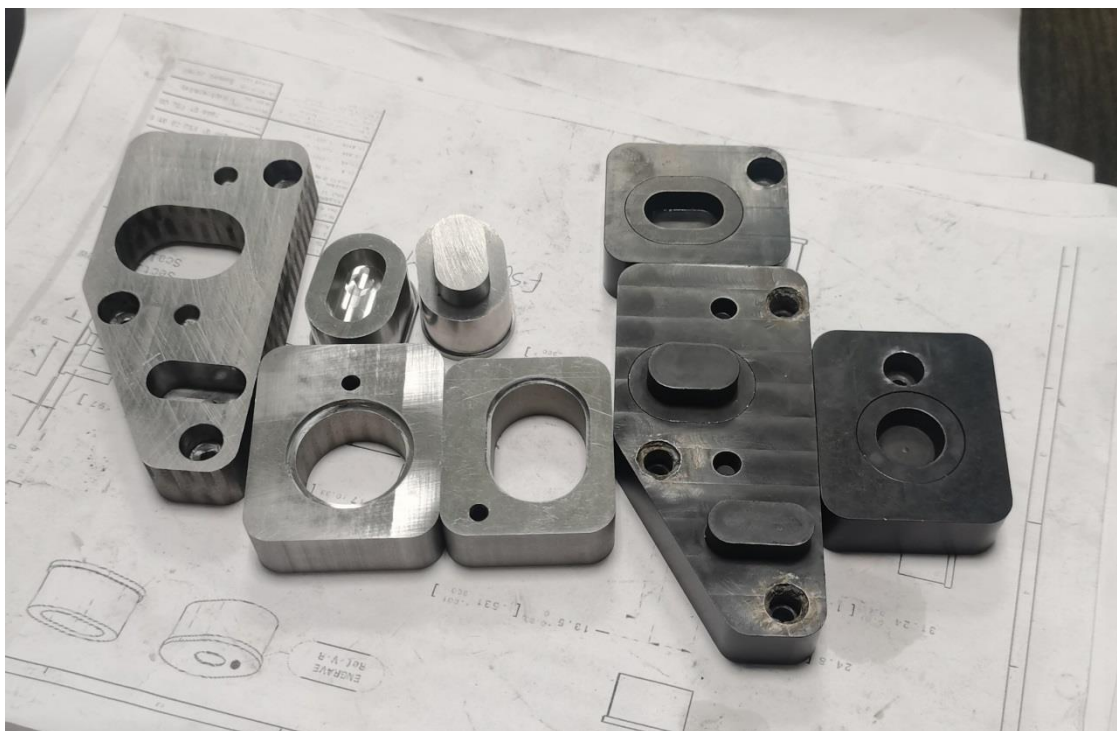


Рисунок 4 - Примеры изготовленных деталей

Детали на рисунке 4 - комплект вставок для пресс-формы, которая используется на предприятии «ДИПО АВТОМОТИВ» (г. Тольятти, производство полимерных пластиковых бензобаков для ОАО «АВТОВАЗ»).

На рисунке 5 представлен общий вид установки вставок в пресс-форму для многослойного экструзионного литья пластикового бензобака на автомобиль «Солярис» (который в настоящий момент вновь запущен для серийного выпуска на территории РФ с локализацией производства компонентов).

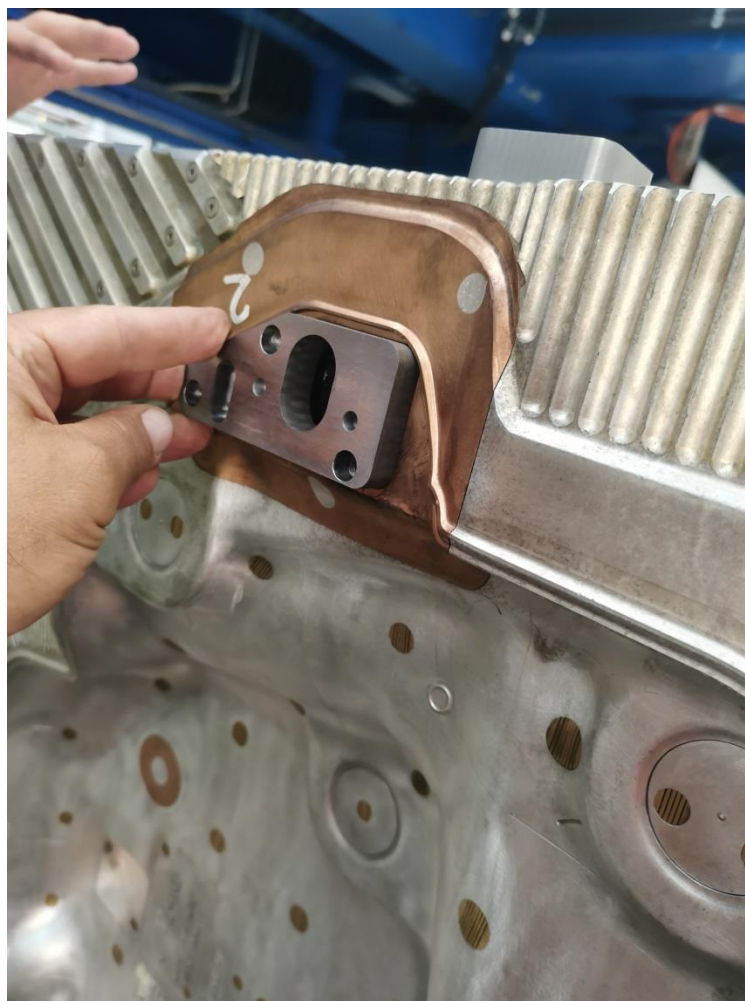


Рисунок - 5 Общий вид установки вставок в пресс-форму для литья бензобака

Основная часть технологических операций при изготовлении комплекта вставок – фрезерные и электроэрозионные, а также шлифовальные работы. Детали изготавливаются из стали 40х13. Заготовки предварительно обрабатываются (подготавливаются габариты с припуском 3...5 мм и с отверстиями для захода проволоки электроэрозионного станка, либо державки с резцом для операции расточки на токарном и координатно – расточном станке. Высокие требования к точности и шероховатости деталей выявляют необходимость использования высокоточных инструментов, правильно подобранных режимов резания, соответствующей оснастки и технологических приспособления. Круглые отверстия вставок обрабатывались после термической обработки на токарном станке с числовым программным управлением (с установкой в четырехкулачковый

несамоцентрирующий патрон и с выкатыванием по предварительно полученным до термической обработки отверстиям). Определенные в результате проведения работ закономерности позволяют говорить о необходимости точной и эффективной диагностики процесса токарной обработки. Лимитирующим элементом технологического процесса закаленной детали (твердость 55...58 HRCэ) является стойкость твердосплавных пластин токарного и расточного инструмента, а также сложность адекватной диагностики момента корректировки режимов резания на стойке системы числового программного управления.

В п.1.2 данной работы проведен отдельный анализ состояния вопроса токарной обработки сложноконтурных и высокоточных изделий, так как данная часть технологических процессов является лимитирующей и выбрана в качестве базиса для проведения исследований и для практической реализации инженерно-технических и технологических решений.

1.2 Анализ состояния вопроса токарной обработки высокоточных и сложнообрабатываемых деталей на станках с ЧПУ в производственных условиях ООО «Токарка»

Накопленный сотрудниками за годы работы в ООО «Токарка» опыт позволяет грамотно формировать технологические процессы токарной обработки, с использованием всех базовых правил и канонов науки «Технология машиностроения», с практической реализацией в условиях настоящего времени. Станочный парк токарных станков с ЧПУ в ООО «Токарка» позволяет обрабатывать детали диаметром до 600 мм, длиной до 1050 мм. В работе будут рассматриваться вопросы обработки и технические решения, касающиеся заготовок диаметром 5...250 мм и длиной до 300 мм. Для этих целей на предприятии используются две единицы оборудования с ЧПУ- токарные станки типа 16A20, модернизированные путем установки современных приводных систем и стоек систем числового программного управления. На рисунке 6 представлено фото станка ООО «Токарка», на

котором реализуются технологические процессы обработки сложноконтурных и труднообрабатываемых заготовок.



Рисунок - 6 Общий вид станка 16A20 с системой числового программного управления

Данный токарный станок предназначен для обработки различного вида деталей типа тел вращения, в том числе сложноконтурных. Станок обладает техническими преимуществами по сравнению с типовыми станками на рынке РФ в виде станков китайских производителей. У данного станка станина выполнена из высокопрочного чугуна, обладающего значительно большим ресурсом по сравнению с китайскими аналогами у станков такого типа. В отличие от устаревших станков данной модели, выпускаемых ранее, рассматриваемый и используемый при выполнении работы станок оснащен современными приводными системами с частотными регуляторами

двигателей переменного тока. Система числового программного управления станка – модели SZGH1000TDb китайского производства. На рисунке 7 показан общий вид стойки системы числового программного управления.



Рисунок 7 - Общий вид стойки системы числового программного управления SZGH1000TDb

Стойка системы ЧПУ взаимодействует с приводами системы управления, которые в свою очередь связаны с серводвигателями и с приводом шпинделя. Также в данной стойке имеется выносной пульт для осуществления включения/выключения шпинделя, быстрого подвода инструмента и задней бабки станка. На рисунке 8 показана схема связи стойки системы ЧПУ с данными элементами управления.



Рисунок 8 - Схема взаимодействия стойки системы ЧПУ SZGH1000TDb

Следует перечислить основные решаемые задачи, технологические процессы для которых разрабатываются и реализуются в настоящее время на предприятии.

Значительная часть работ связана с обработкой труднообрабатываемых материалов, таких, как нержавейки. На Рисунке 9 показана одна из базовых деталей нового конструктивного исполнения корпуса датчика гидростатического давления, применяемого в нефтяной промышленности. Эта деталь наряду с другими комплектующими датчика изготавливается в ООО «Токарка».



Рисунок 9 - Корпуса датчиков гидростатического давления, изготавливаемые в ООО «Токарка»

В качестве материала для корпусов задана нержавеющая аустенитная сталь 12X18Н10Т. Исходная заготовка – круг (диаметром 70 либо 65 мм). Рабочие чертежи корпусов представлены в Приложении настоящей работы. Предъявляются высокие требования к точности наружных и внутренних поверхностей корпусов. Точность механической обработки наружных поверхностей – 0.03 мм (диаметр ф63 мм, длина обработки 217 и 195 мм). Задача осложняется наличием внутри корпуса эксцентричного относительно наружной поверхности отверстия с высокой точностью. Отверстие имеет диаметр ф25 мм с допуском +0.033 мм. Эксцентриситет относительно наружной базовой поверхности составляет значение 7,5 мм. Первоначальное формирование заданного эксцентриситета получается путем смещения обрабатываемой детали в кулачках и заднем центре самоцентрирующего трехкулачкового патрона, с установкой под один из кулачков шлифованной подкладки. Проверка установки и соответствие заданного эксцентриситета проводится при помощи микрометрического индикатора.

Значительная часть трудоемкости работы при обработке корпусов составляет предварительная расточка эксцентричного отверстия диаметром 25 мм. На этом технологическом переходе производится обработка инструментом с державкой большого вылета. Общая длина державки составляет 280 мм, длина части, выступающей из резцедержателя составляет 252 мм. В процессе обработки возникает действие значительных по своей величине сил, приводящих к упругим отжатию инструмента. Обработка на разных режимах также приводит к возникновению различного вида колебательных процессов (вибраций). Часть этого процесса диагностируется как акустический шум разной интенсивности. Предварительно «на слух» проводились периодические остановки процесса расточки с целью контроля состояния рабочей кромки режущей пластины, закрепленной на державке. Для данного технологического перехода изначально виделось правильным и оптимальным осуществлять контроль и диагностику процесса резания с замерами и записью «звуковой картинки», с расшифровкой показаний записанного современными программными средствами.

Также одной из серьезных и непростых задач, решаемых мною при работе технологом и наладчиком, является механическая токарная обработка роликов, предназначенных для транспортирования отлитых заготовок после процесса литья в литейном производстве ОАО «АВТОВАЗ». Данные детали изготавливаются в ООО «Токарка» в рамках модернизации производства литых деталей на ВАЗе. На рисунке 10 представлена полученная (обработанная) деталь «Ролик». В приложении к работе представлен рабочий чертеж детали, который был переработан относительно изначального базового варианта. Необходимость переработки вызвана тем, что в базовом варианте использовалась литая заготовка. В нынешних реалиях при решении задачи получения роликов в количестве 15 штук оказывается нецелесообразным вложение финансов и проведение инженерии для такого литья. Также задача осложнена тем, что материал детали – нержавеющая сталь 20х23Н18 (классификация AISI 309 по международной системе).



Рисунок 10 - Изготовленный ролик для транспортировки заготовок в литейном производстве ОАО «АВТОВАЗ»

Изначальная конфигурация литой заготовки предусматривала формирование технологических выборок для облегчения детали (снижения нагрузки на опорные подшипники) в процессе литья. Но на переходах токарной обработки получение этих выборок стало лимитирующим технологическим переходом (наряду со сложностями по снятию припуска у данного труднообрабатываемого материала). Именно на данных переходах наблюдается максимально интенсивная «звуковая картинка» процесса резания, которую можно использовать для процесса диагностики и регулирования резания. Исходная заготовка для ролика – круглый прокат диаметром 180 мм. Стоимость одной тонны такой стали в настоящий момент составляет около 1 млн рублей. Стоимость заготовки на один ролик с учетом подготовки на ленточно-пильном станке составляет около 65 тысяч рублей.

На рисунке 11 представлена еще одна типовая деталь из труднообрабатываемой аустенитной нержавеющей стали, которая

изготавливается в ООО «Токарка». Данная деталь – сферический наконечник. Применяется в составе датчика гидростатического давления. Эти детали ООО «Токарка» выпускает с партийностью 100-200 штук в месяц.



Рисунок 11 - Сферический наконечник, входящий в состав датчика гидростатического давления

Исходной заготовкой для получения данной детали является круглый прокат диаметром 50 мм. В процессе обработки производится наружное предварительное точение, сверление отверстия под расточку, чистовая расточка отверстия наконечника, чистовая наружная токарная обработка и контурная обработка сферической части заготовки. Лимитирующими технологическими операциями при изготовлении данной детали является внутренняя расточка и наружное контурное точение конфигурации заготовки. Обработка заготовки также сопровождается значительным уровнем акустического воздействия со стороны процесса резания.

1.3 Формирование целей и задач исследований

Учитывая изложенное в п. 1.1 – 1.2, можно сформировать цели и задачи исследований.

Цель работы – повышение эффективности технологических процессов механической обработки путем использования методик и средств для акустического и вибродинамического контроля процесса резания.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- Теоретически обосновать подход к вопросам диагностики с использованием акустической и вибрационной картинки процесса резания.
- Разработать практически применимые средства (устройства, механизмы), реализующие данный вид диагностики.
- Провести практические работы и эксперименты по внедрению данных видов диагностики в производственные процессы, реализуемые в ООО «Токарка».

2 Теоретические исследования процессов виброакустической диагностики при резании

Технология обработки металлов резанием характеризуется высокой сложностью и требует междисциплинарного подхода с опорой на знания ряда технических наук. Вибродиагностика, включая ее акустические аспекты, выступает ключевым компонентом данного подхода. Обусловлено это фундаментальной связью механической обработки с вибрационными и акустическими явлениями. Полное устранение данных явлений невозможно, поскольку источником вибраций и шума служат все без исключения узлы станка и этапы технологического процесса, совместно формирующие интегральный виброакустический фон.

Стоит подчеркнуть тот факт, что практически колебания негативно влияют на процесс резания. Они всегда снижают качество обработки поверхностей, увеличивают время обработки (за счет необходимости корректирования и снижения режимов резания) и приводят к более быстрому износу инструмента. Однако наличие адекватной и преобразуемой в возможный к использованию вид информации о колебательных и звуковых процессах является положительным и перспективным фактором, при помощи которого возможны корректировки параметров технологических процессов механической обработки.

Определенные значения и параметры вибрационного процесса при резании является фактором, негативно влияющими на итоговые результаты разрабатываемой и внедряемой технологии. Возникновение резонансных частот (резонансов) при совпадении собственной частоты системы и частоты в процессе резания значительно увеличивают амплитуды колебаний механической системы, что сказывается на ресурсе технологической оснастки и элементов станка, таких как направляющие, резцедержатели и суппортные блоки, revolverные головки и тд.

Однако вибрация и шум (звук) в процессе резания являются параметром, который можно измерить и оценить при использовании современных аппаратно-программных средств и измерительных преобразователей. Вибрация и шум (звук) являются крайне информативным параметром. Системы замеров вибрационных процессов давно нашли применение в инженерной практике. Современная индустрия измерительных преобразователей предлагает в основном пьезоэлектрические преобразователи и комплексы для обработки сигналов, которые формируют многоканальные вибродиагностические системы. Еще одним важным направлением является запись звуковой картинки (шума). В настоящее время, учитывая развитие бытовой микроэлектроники, качественные и возможные к применению звукозаписывающие и звукопреобразующие устройства имеются даже в бытовых устройствах, например в таких, как современные смартфоны (многофункциональные телефоны).

Теоретическое обоснование возможности использования данных о колебаниях и звуковой картинки, регистрируемых в процессе резания, необходимо для дальнейшего обоснования применения этих данных в практических реализациях. Моделирование циклических процессов схода стружки по кромкам режущего инструмента и формируемые при этом шум и вибрация необходимо для дальнейших практических исследований.

2.1 Расчетные схемы колебаний заготовки, приводящих к возникновению вибрационной и шумовой картины в процессе резания

Колебания, воздействующие на заготовку в процессе механической обработки (от первой до « ∞ » моды), служат источником шума и формируют акустическую картину процесса.

Фокус анализа – поперечные колебания заготовки при продольном тчении (Рисунок 12), происходящие в плоскости симметрии ее поперечных сечений. В монографии предлагаются следующие расчёты:

«Пусть $w(x)$ описывает поперечное смещение элемента стержня, находящегося на расстоянии x от левого конца. Величина EI характеризует изгибную жесткость заготовки. На Рисунке 12, б изображен малый элемент вала (dx) под действием внутренних и внешних сил в режиме ВИО с возбужденными поперечными колебаниями. При этом направления поперечной силы Q и изгибающего момента M заданы согласно общепринятым в теории изгиба правилам знаков. Динамическое равновесие сил, приложенных к элементу вала вдоль оси w при его поперечных колебаниях, выражается уравнением:

$$V - V - \frac{\partial V}{\partial x} dx - \rho F dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

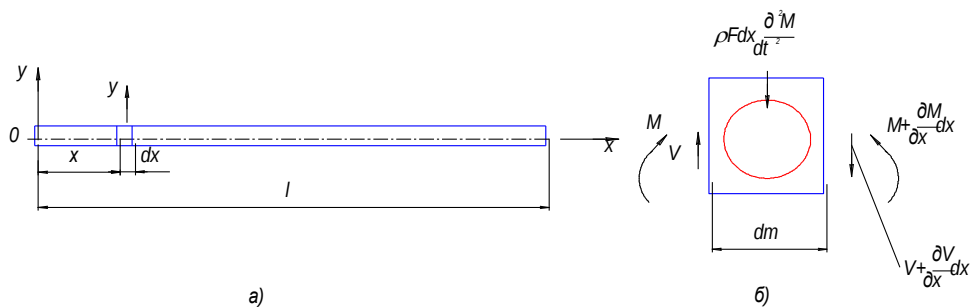


Рисунок 12 - Схема колебаний обрабатываемой заготовки при продольном течении

Получаем следующую зависимость согласно уравнению моментов:

$$-Vdx + \frac{\partial M}{\partial x} dx \approx 0 \quad (2)$$

Далее необходимо выразить V из представленной выше формулы (2) и подставить получившийся результат в (1). Таким образом, получается:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} dx = -\rho F dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (3)$$

По элементарной теории изгиба стержней известно тождество

$$M = EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (4)$$

Подставляя это выражение в уравнение (3), получим

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}) dx = -\rho F dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (5)$$

Что является общим уравнением поперечных свободных колебаний стержней. В частном случае призматического стержня с жесткостью EJ при изгибе, не зависящей от x , имеем

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (6)$$

Это уравнение может быть представлено и в такой форме

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (7)$$

где

$$a = \sqrt{\frac{EJ}{\rho F}} \quad (8)$$

Когда стержень колеблется по одной из форм собственных колебаний, его прогибы в произвольной точке будут изменяться во времени по гармоническому закону

$$y = X(A \cos pt + B \sin pt) \quad (9)$$

В этой зависимости для удобства представления опущен индекс i , обозначающий i -ю форму колебаний. Подставив выражение (9) в (7), получим

$$\frac{\partial^4 x}{\partial x^4} - \frac{p^2}{a^2} X = 0 \quad (10)$$

Учитывая необходимость решать обыкновенное дифференциальное уравнение четвертого порядка, введем обозначение

$$\frac{p^2}{a^2} = r^4 \quad (11)$$

И перепишем уравнение (2.10) в виде

$$\frac{\partial^4 x}{\partial x^4} - r^4 X = 0 \quad (12)$$

Примем в уравнении (2.12) $X = e^{nx}$, что даст

$$e^{nx}(n^4 - r^4) = 0 \quad (13)$$

Таким образом, видим, что величина n может принимать следующие значения: $n_1 = r$, $n_2 = -r$, $n_3 = iR$, $n_4 = -iR$, где $i^2 = -1$. Общее решение уравнения (13)

$$X = Ce^{rx} + De^{-rx} + Ee^{ikx} + Fe^{-irx} \quad (14)$$

Которое можно записать в следующей эквивалентной форме:

$$X = C_1 \sin rx + C_2 \cos rx + C_3 \sin irx + C_4 \cos irx \quad (15)$$

Полученное выражение является нормальной функцией задачи о поперечных колебаниях мало жесткого вала.

Постоянные C_1 , C_2 , C_3 и C_4 , входящие в выражение (15) являются произвольными и могут определяться в каждом частном случае в соответствии с условиями, заданными на концах стержня» [24, с. 57-62].

Анализ экспериментальных данных и данные авторов говорят о «целесообразности приложения нагрузки при виброобработке в зонах пучности и расположении опор в зонах узлов соответствующих форм колебаний, при этом будет обеспечиваться равномерное микропластическое деформирование по диаметру и длине заготовки. В мало жестких деталях с отношением $l/d > 50$ ВИО следует проводить в узлах пучностей более высоких форм, второй, третьей, и более, что позволит обеспечить микропластическую деформацию по всему объему заготовки и свести к минимуму неравномерность остаточных напряжений по всей длине заготовки» [19].

2.2 Разработка математической модели виброобработки как объекта управления

Цель данного раздела – теоретическое обоснование характерного отклика неупругого материала при резании на вариации входных и выходных параметров воздействия. Этого результата можно добиться путём трудоёмкого процесса формального определения данного отклика.

Никитин Ю.В. и Абрамов И.Р. в своём исследовании подчёркивают, что «в случае произвольной деформации напряжения и деформация должны быть выражены тензорами второго ранга, и тогда закон Гука превращается в систему линейных уравнений, выражающих каждую компоненту тензора напряжений через компоненту тензора деформации и наоборот. Для нашего случая это обобщение привело бы лишь к ненужному усложнению, поэтому будем исходить из формулировки закона Гука, определяемого соотношениями $\sigma = E \cdot \varepsilon$ или $\varepsilon = j \cdot \sigma$, где $E = \frac{1}{j}$. Отметим, что при таком подходе предполагается простой способ деформации – чистый сдвиг или одноосная деформация.

Неупругость материала можно определить тремя условиями: каждому значению напряжения соответствует единственное равновесное значение деформации и наоборот; равновесное значение выходной величины достигается только по истечении достаточного времени, для достижения равновесия может потребоваться от микросекунд до очень больших промежутков времени; связь между деформацией и напряжением линейна. Первое и третье условия – повторение условий идеальной упругости. Неупругость подразумевает, что кроме мгновенного упругого выходного параметра существует также зависимый от времени неупругий выходной параметр. В данной постановке задачи смысл линейности охватывает следующее утверждение: если данное изменение во времени напряжения $\sigma_1(t)$ создает деформацию $\varepsilon(t)$, и если $\sigma_2(t)$ вызывает деформацию $\varepsilon_2(t)$, то $\sigma_1(t) + \sigma_2(t)$ приведет к деформации $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$ » [5, с. 15-19].

Известно, что «термодинамической системой является любое вещество, которое на ряд бесконечно малых изменений внешнего параметра может проходить через непрерывный ряд равновесных состояний. Поэтому первому условию неупругости, включающему требования однозначности равновесного соотношения между напряжением и деформацией и вследствие полной восстанавливаемости, удовлетворяют все материалы, которые подходят под определение термодинамических твердых тел. Второе условие означает, что в ответ на изменение приложенного механического напряжения для установления равновесия в неупругом материале необходимо время» [8, с.3].

Козлов А.М. в своей монографии утверждает следующее: «Самоподстройка термодинамической системы во времени к новому равновесному состоянию в ответ на изменения входного параметра и будет называться релаксацией. Если в качестве входного воздействия выступает напряжение, неупругая релаксация проявляется как зависимое от времени установление равновесного значения выходных параметров – деформации и температуры (или наоборот). Следует отметить, что внешнее проявление релаксации отражает просто подстройку внутренних параметров к новым равновесным значениям. С точки зрения теории автоматического управления внутренние параметры системы будут влиять на количественную сторону переходного процесса, считая релаксацию переходным процессом. Между σ и ε существует не прямая чисто упругая связь, но также и косвенная связь через внутренний параметр. Таким образом, по мере релаксации внутреннего параметра к равновесному значению, деформация ε также стремится к соответствующему значению, с конечной скоростью, а не мгновенно (мгновенное изменение соответствует случаю чистой упругости).

Неупругая релаксация является по существу термодинамическим свойством, обусловленным связью σ и ε с определенными внутренними параметрами, изменение которых к равновесным значениям может происходить в результате кинетических процессов (например, диффузии).

Внешним проявлением такой внутренней релаксации являются зависимые от времени деформационные свойства» [14, с. 67-68].

Гуриным В.Д. и Козочкиным М.П. отмечен тот факт, что «коробление функционально связано с неоднородностью пластического деформирования и температурного поля, и, естественно, с несовместимостью упругих и пластических деформаций при разгрузке. Аналогичный процесс происходит и с остаточными напряжениями, их релаксация начинается не одновременно по времени и в разных участках изделия как в продольном, так и в поперечном сечениях.

Для количественного исследования процессов прежде всего необходимы уравнения, описывающие ВИО как объект управления. Для этого удобным представляется разбить модели на динамические звенья (таблица 2.1). Существенно то, что динамическое звено не обязательно является конструктивно или схемно оформленным. В отдельных случаях динамические звенья могут вообще не иметь физического смысла, характеризуя лишь математические зависимости, имеющие место между некоторыми величинами автоматической системы с объектом. Чтобы охарактеризовать состояние динамического звена, примем за обобщенную координату на входе звена $\sigma(\varepsilon)$, а на выходе $\varepsilon(\sigma)$ и назовем их соответственно входной и выходной величинами звена направленного действия (однонаправленности). Процесс упруго-пластической деформации можно представить звеном направленного действия с входной величиной σ и выходной ε и наоборот, в зависимости от того, что исследуется, релаксация напряжений или податливость. Приведенные переходные процессы позволяют на их основе разрабатывать законы управления упруго-пластической деформацией. Системы управления работают и в неустановившихся режимах, поэтому важной задачей для исследования динамики процесса ВИО является причина поведения динамических звеньев в переходных режимах. Целесообразно перейти к другому описанию на основе системы параметров, которые можно рассматривать как свойства

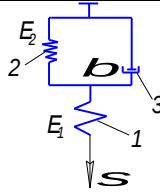
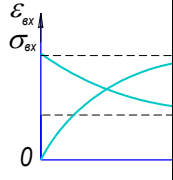
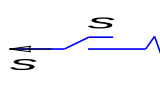
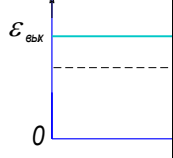
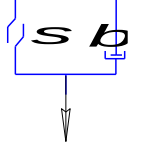
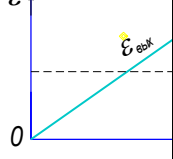
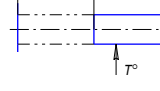
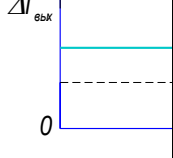
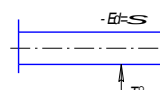
самого материала. Исходной точкой для такого подхода является соотношение между напряжением и деформацией, записанное в виде линейного дифференциального уравнения, включающего напряжение, деформацию и их производные по времени» [3].

В работе доказано, что линейные дифференциальные уравнения деформации, которые описывают неупругость, содержат три независимых параметра. Соответственно модель релаксации строится из трех основных элементов – двух пружин и демпфера. Поведение, описываемое уравнением или моделью с тремя параметрами, имеет такое важное значение, что материал, характеризующийся таким поведением, называется стандартным неупругим телом.

Динамические звенья, формирующие процессы возникновения вибраций и звуков и их математические описания приведены в Таблице 2.1

Таблица 1 - Динамические звенья, формирующие процессы возникновения вибраций и звуков в ходе резания

Механическая модель	Математическое описание	Переходный процесс	Передаточные функции
	$\sigma = E\varepsilon + \beta\dot{\varepsilon}$ $T\dot{\varepsilon} + \varepsilon = K\sigma_{ex}$ $\sigma = \sigma_0 / E(1 - e^{-t/T})$		$W(s) = \varepsilon(s) / \sigma(s) =$ $= \frac{K}{TP + 1}$
	$\dot{\varepsilon} = \sigma / \beta + \dot{\sigma} / E$ $T\dot{\sigma} + \sigma = K\dot{\varepsilon}$ $\sigma = \sigma_0 \varepsilon^{\frac{-t}{T}}$		$W(s) = \sigma(s) / \varepsilon(s) =$ $= \frac{KP}{TP + 1}$

	$E_2 \dot{\varepsilon} + \beta \dot{\varepsilon} = (1 + \frac{E_2}{E_1}) \sigma + \frac{\beta}{E_4} \dot{\sigma}$ $T_1 \dot{\varepsilon} + \varepsilon = T_2 \dot{\sigma} + K \sigma$ $\sigma = \varepsilon_0 (E' + (E_1 - E') e^{\frac{-t(E_1 + E_2)}{\beta}})$		$W(s) = \varepsilon(s) / \sigma(s) = \frac{K(T_2 P + 1)}{T_1 P + 1}$
	$\sigma < \sigma_T, \quad \sigma \geq \sigma_T$ $\sigma = \varepsilon E, \quad \sigma_T = \sigma_{6bx}$ $\sigma = K \varepsilon_{6x}, \quad \sigma_{6x} \geq \sigma_T \varepsilon$		$W(s) = \varepsilon(s) / \sigma(s) = K = 1/E, \text{ при } \sigma < \sigma_T$
	$\sigma \geq \sigma_T, \quad \sigma = \sigma_T + \beta \dot{\varepsilon}$ $\sigma \leq \sigma_T, \quad \sigma / \beta = \dot{\varepsilon}$ $\sigma = \sigma_0 > \sigma_T, \quad \dot{\varepsilon} = K(\sigma_0 - \sigma_T)$ $S \varepsilon_{6bx} = K \sigma_{6x}$		$W(s) = \varepsilon(s) / \sigma(s) = \frac{K}{P}$
	$\varepsilon = \alpha e T_{6x}^0$ $(TS + 1) \varepsilon = K T_{6x}^0$ $T = CQ / KF$		$W(s) = \varepsilon(s) / T^0(s) = K = \alpha e$ $W(s) = K / TP + 1$
	$\sigma = \alpha E T^0 > \sigma_T$ $T^0 = \sigma_T / E_\alpha$		

В общем виде линейное уравнение можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 a_0 \sigma + a_1 \frac{d\sigma}{dt} + \dots + a_n \frac{d^n \sigma}{dt^n} = \\
 = b_0 \varepsilon + b_1 \frac{d\varepsilon}{dt} + \dots + b_n \frac{d^n \varepsilon}{dt^n}
 \end{aligned}
 \quad (16)$$

Или $P\sigma = Q\varepsilon$, где P и Q - линейные операторы, включающие соответственно коэффициенты a_n и b_n .

Утверждается следующее: «Механическая модель тогда может служить моделью заданного неупругого материала, когда она подчиняется тем же соотношениям между силой, смещением и временем, которые справедливы для напряжения, деформации и времени в неупругом теле соответственно.

Так, сила, действующая на пружину, представляет напряжение и смещение - деформацию, а коэффициенты жесткости пружины K соответствуют модулю упругости E или податливости j . Характерная особенность такой пружины: запасенная в ней энергия обратима. Другим элементом, необходимым для обеспечения внутреннего трения, является ньютоновский демпфер, который представляет собой поршень, движущийся в идеально вязкой жидкости. Скорость движения поршня пропорциональна действующей силе, следовательно, произведенная полностью работа расходуется на образование тепла. Для описания твердых тел демпфер используется только в комбинации с пружинами.

При конструировании моделей механические элементы могут соединяться последовательно и параллельно. При последовательном соединении двух элементов (таблица 2.1, п.2), напряжения σ_1 и σ_2 равны, а деформации складываются. Таким образом $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$. Комбинации моделей различных сочетаний из двух и трех элементов представлены в таблице 1.

При разработке структурной схемы объекта управления использовались данные экспериментальных исследований, которые показали изменение в процессе воздействия значений собственных частот и температуры. Разработанная структурная схема объекта управления представлена на рисунке 13. Входом объекта является вводимая в процессе вибровоздействия амплитуда колебаний, а выходом - наблюдаемые соответственно температура и значение собственной частоты. Согласно уравнений, Табл. 1, определена передаточная функция объекта в виде

$$W_{об}(p) = \frac{k \cdot k_a \cdot k_T \cdot k_f \cdot p}{T \cdot p + 1} \quad (17)$$

Здесь k , k_a , k_T , k_f - коэффициенты пропорциональности, характеризующие дифференцирующие звенья, входящие в структуру объекта управления» [6].

Структурная схема объекта управления

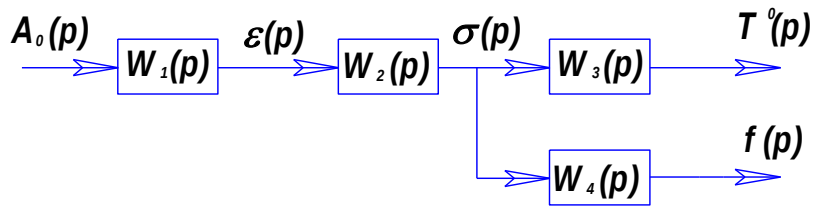


Рисунок 13 - структурная схема объекта управления

Бумашов М.А. и Прежбилов А.Н. делают следующие замечания по физике процесса: «В настоящее время не представляется возможным описать уравнениями состояние реономного тела, как бы тщательно оно не было изучено. Применение макроскопического реономологического подхода, при котором не учитываются детальные устройства системы и работа отдельных элементов, а изучается функционирование системы в целом, как связь между выходом и входом, также не решает поставленную задачу. Процесс ВЮ имеет ряд особенностей. Одна из них – это зависимость сопротивления деформации в данный момент времени от истории деформации – технологической наследственности, т.е. от закона развития деформации во времени. Сопротивление пластической деформации нельзя задать в виде $\sigma = f(\varepsilon)$, т.е. как функцию от степени деформации при заданной фиксированной температуре. Если достичь заданного $\varepsilon = 0.2\%$ и далее обеспечить $\varepsilon = \text{const}$, то напряжение будет уменьшаться, хотя степень деформации останется неизменной. Это свидетельствует о том, что единой формулы $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ не существует. Приведенные авторами уравнения моделей неупругих тел и их решения показывают, что напряжение σ не определяется значением ε в данный момент времени, а зависит от функции $\varepsilon(t)$. Допущение, что время релаксации постоянно для материалов, не соответствует экспериментальным данным. Нельзя считать известной функцию $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t)$, если в заданный момент времени известны $\varepsilon, \dot{\varepsilon}$, и t .

Деформация до определенной величины может быть осуществлена различными путями, т.е. при одной и той же величине деформации напряжения имеют существенно иные величины. Сами факты ползучести и релаксации показывают, что нет единой функции $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t)$ и попытки получить такого рода формулы обречены на неудачу. В чем тут суть вопроса. На участке установившейся податливости при $\varepsilon = \text{const}$ степень деформации возрастает, а σ остается постоянной. Если бы при $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ напряжение σ было бы функцией ε , то была бы достигнута величина ε , соответствующая данному σ , и податливость не происходила бы. Однако это не верно. При релаксации $\varepsilon = \text{const}$ и $\dot{\varepsilon} = \text{const} = 0$, а σ , тем не менее, изменяется от начальной, и при этом может быть от очень большой величины до весьма малой. Если бы имело место $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$, то при ε и $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ получили бы и $\sigma = \text{const}$, т.е. релаксация не происходила бы. Если за время t произошла деформация ε_0 , то σ не определяется ни величиной ε , ни величиной $\dot{\varepsilon}_0$, так как не является функцией двух и более переменных, а зависит от всей функции $\varepsilon(t)$.

Из определения остаточных напряжений не ясно, какие же причины лежат в основе образования поля остаточных напряжений. Единственное, что можно выяснить, это способ их определения, известный как теорема о разгрузке.

Для пояснения происхождения остаточных напряжений рассмотрим графическую интерпретацию образования остаточных напряжений с помощью схематизированной кривой $\sigma - \varepsilon$. Представим вал (Рис. 13, а) в виде стержневой плоской модели (три стержня одинакового диаметра 1, 2 и 3 и скрепленных недеформируемой поперечиной 4, в плоскости максимального прогиба). Будем считать, что до приложения внешней нагрузки стержни находились в начальном ненапряженном состоянии. Под действием растягивающей силы P все стержни получают одинаковое удлинение $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_3 = \Delta l$ и деформации $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$ » [18, с. 55-57].

Рассмотрим три наиболее характерных варианта несовместимости деформаций при разгрузке: «Первый – модули упругости $E_3 > E_2$, а $E_2 > E_1$ и модули упрочнения $E_{y1} > E_{y2} > E_{y1}$, т.е. поверхность изделия, в плоскости максимальной деформации, и его сердцевина имеют не равные модули упругости (Рисунок 14, а). Второй вариант – изделие с однородными свойствами до деформации, а в процессе нагружения стержни 1, 2 и 3 получили различные пластические деформации (Рисунок 14, в).

При первом варианте, когда модули упругости стержней не равны между собой, как и их модули упрочнения (Рисунок 14, б) целесообразно сравнить два стержня 1 и 2, это не нарушит понимание физики процесса и упростит рисунок. Рассмотрим два варианта разгрузки, стержень 2 находится при нагрузке еще в упругом состоянии и его деформация по закону Гука $\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2}$, где σ_2 - напряжение в стержне 2, а стержень 1 находится при той же нагрузке в пластическом состоянии и его деформацию можно представить в виде $\varepsilon_1 = \varepsilon_{nl} + \varepsilon_y$ где ε_{nl} и ε_y - пластическая и упругая деформация, соответственно. При снятии внешней нагрузки деформация и напряжение в стержне 1 убывает по линии АК, а в стержне 2 по линии NO. После разгрузки величина деформации в стержне 1 равна $OK = \varepsilon_{nl}^1$, а напряжение в последнем равно нулю, а в стержне 2 $\sigma_2 = \sigma_2^k$, т.е. стержень 2 еще упруго растянут и обладает потенциальной энергией $\Pi_2^k = \sigma_2^k \frac{\sigma_{nl}^1}{2}$, т.е. под действием потенциальной энергии, соответствующей σ_2^k , стержень 2 будет продолжать укорачиваться. Так как стержни связаны поперечиной 4, то укорачивающийся стержень 2 вызовет в стержне 1 деформацию и напряжение сжатия. Деформация сжатия стержней будет идти до тех пор, пока не наступит упругое равновесие $\Pi_2 = \Pi_1$.

Во втором варианте разгрузки стержень 2, как и стержень 1 имеет пластическую, неравную деформацию и разгрузка идет по линиям Вв и Мм.

При полной разгрузке стержня 1, $\sigma_1 = 0$, а $\sigma_2 = \sigma_2^B$. Как и в первом случае, укорачивающийся стержень 2 вызовет деформацию сжатия, которая будет происходить до полного упругого равновесия потенциальных энергий $\Pi_2 = \Pi_1$. Из приведенного примера видно, что различие в механических свойствах наружных и внутренних частей изделия (вала) приводит к тому, что при разгрузке не вся накопленная системой потенциальная энергия рассеивается, причем, чем больше величина пластической деформации, тем больше накапливается энергии. Если тело до деформации имело однородные свойства в сечении, а при деформации, в процессе нагружения, три соседних стержня 1, 2 и 3 получили различные пластические деформации, то при одной и той же полной деформации элементы достигли предела упругости σ_{02} (Рисунок 14, в), и начиная с этой точки происходили неодинаковые пластические деформации» [13, с. 10-12].

Ниже представлены диаграммы нагружения и разгрузки стержневой модели деталей типа вал.

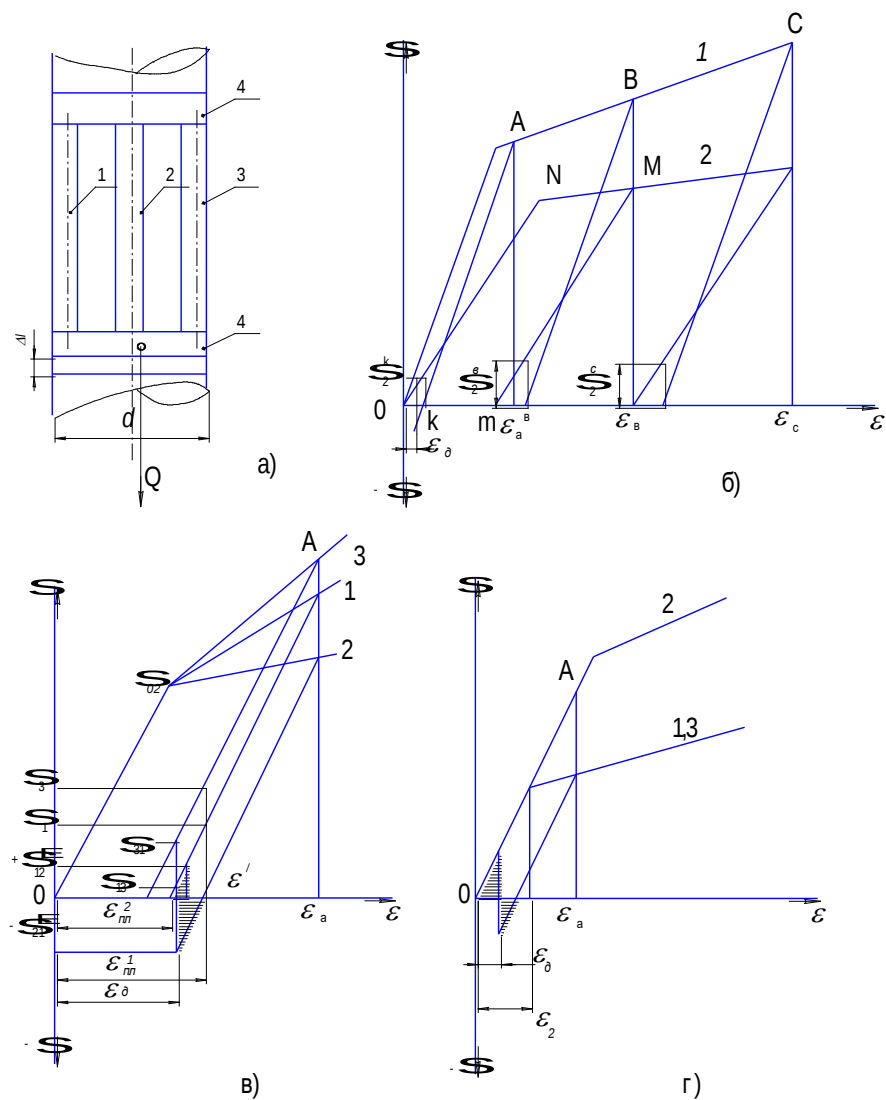


Рисунок 14 - Диаграммы нагружения и разгрузки стержневой модели деталей типа "вал"

Как можно заметить, углы наклона кривых упрочнения стержней 1 – 3 неодинаковы при нагружении. Если разгрузить тело начиная от ε_a , то в точке ε' второй элемент будет свободен от напряжений, и первый будет нагружен напряжениями растяжения σ_1 . Утверждается следующее: «Этим напряжениям соответствует некоторый уровень потенциальной энергии $\Pi_1 = \frac{\sigma_1(\varepsilon_{nl}^2 - \varepsilon_{nl}^1)}{2}$, вызывающей в стержне 2 напряжения сжатия. При равновесии стержень 2 упруго сжат ($-\sigma_{21}^0$), а стержень 1 упруго растянут.

Площади заштрихованных треугольников соответствуют уровням потенциальных энергий $\Pi_1 = \Pi_2$. аналогичным образом можно описать поведение стержня 3 относительно стержней 1 и 2. Таким образом, вследствие неодинаковых пластических деформаций в поперечном сечении вала механические свойства от элемента к элементу (от наружной поверхности вала к внутренней) различны, в результате чего возникновение остаточных напряжений неизбежно, а следовательно, с учетом знака остаточные напряжения создают изгибающий момент, который приводит к эксплуатационному короблению МЖД. С учетом релаксационных процессов это явление может проявляться через длительные периоды (спустя месяцы после изготовления)» [24].

Третий вариант – все три стержня имеют одинаковый момент упругости, но температура 1-го и 3-го стержней (наружные поверхности вала) повышается настолько, что их пределы текучести заметно меньше предела текучести стержня 2 (Рисунок 14, г). Здесь и в предыдущих случаях различные пластические деформации приводят к появлению остаточных напряжений.

Следует отметить, что «во всех рассмотренных случаях остаточные напряжения исчезают, если элементы системы (стержни) освободить от взаимных связей (это условие реализуется, например, при виброобработке). Тогда система свободно рассеивает накопленную потенциальную энергию, хотя следует заметить, что геометрия таких свободных элементов будет другой, т.е. нарушается совместность пластических деформаций. В процессе разгрузки действительное перемещение в координатах $\sigma - \varepsilon$ начинается в точках ε_a (Рисунок 14) и заканчивается в точке ε_o . Интервал $\varepsilon_a - \varepsilon_o$ соответствует вектору действительного упругого перемещения при разгрузке. В точке ε_o система упругих остаточных напряжений в элементах тела уравнивается, и

дальнейшее движение - разгрузка – возможна либо при обтачивании, либо при виброобработке вала.

Если в качестве внешнего воздействия выступает разновременность фазовых превращений различных окрестностей деформируемого тела, то можно построить диаграммы, подобные приведенным на рисунке 14, т.к. фазовые изменения в общем случае вызывают изменения объема и механических характеристик в различных точках тела в разное время. Такое же физическое толкование справедливо и для микронапряжений второго рода» [6].

2.3 Теоретическое исследование влияния параметров инструмента и режимов обработки на характеристики возникающих вибраций и шума при резании

Важной и значимой частью теоретического обоснования влияния параметров вибрации и шума (звука) при резании является исследование актуальных технических характеристик и особенностей инструмента, а также взаимосвязи этих особенностей с возникающими шумами и вибрациями.

При механической обработке труднообрабатываемых материалов, таких, как аустенитные нержавеющие стали, жаропрочные коррозионостойкие стали следует максимально точно определить диапазон режимов резания, «при котором имеет место быть минимальная величина износа инструмента при его максимальной стойкости. В данном диапазоне режимов определяется коэффициент максимальной обрабатываемости заданного материала. Процесс резания в этом диапазоне сопровождается изменением вида стружки – стружка имеет признаки элементной, в отличие от сливной стружки (которая возникает вне этой зоны режимов)» [10, с. 1]. Переход стружкообразования в зону возникновения элементной стружки значительно изменяет параметры звуков и спектр и вибраций, диагностируемых как

визуально (на слух и по ощущениям и «отклику» в виде различий параметров обработанных поверхностей заготовки), так и при помощи аппаратно-программных комплексов.

На рисунке 15 приведена классификация стружки. Выделены следующие виды: сливная, суставчатая, элементная, надлома.

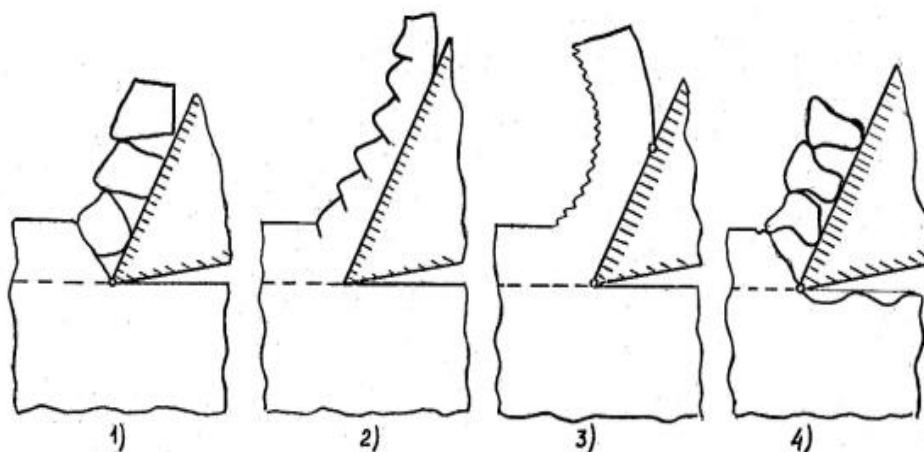


Рисунок 15 - Классификация видов стружки

Сливная стружка (рисунок 3, 3) характеризуется непрерывностью, сплошностью при снятии с поверхности заготовки. Такой вид стружки крайне негативен в любом технологическом процессе резания (при точении или фрезеровании). Основные минусы такого вида стружки – сложность удаления из зоны резания (стружка навивается на поверхности заготовки и элементов режущего инструмента и приспособлений). При навивании нескольких слоев стружки возникают значительные усилия, действующие на станочные элементы и инструмент. Также данный вид стружки крайне опасен с точки зрения риска для рабочего и обслуживающего персонала. Известны случаи производственного травматизма, в том числе с летальным исходом, возникшие при «наматывании» частей тела при действии такой стружки.

Комбинированная стружка (2, 4 на рисунке 15) характеризуется промежуточным состоянием между элементной (сегментной) и сливной стружкой. Практическое стружкоудаление данного вида стружки является более простым, нежели стружки сливного характера (при навивании стружки

происходит ее последующее разрушение в зонах надломов), однако при удалении стружки возникает ряд объективных проблем и трудностей.

Элементная (сегментная) стружка, сходящая по передней поверхности, является предпочтительным вариантом образования стружки при резании (1 на рисунке 15).

При изменении характера образования стружки изменяется и вибрационный спектр в колебательном процессе резания. Это следует из влияния составляющей силы резания – а именно проекции вертикальной составляющей P_z . Давление стружки на переднюю поверхность резца является определяющим значением силы резания.

Васин С.А. пишет следующее «Диагностика изменений колебательных и звуковых спектров при использовании актуальных аппаратно – программных комплексов позволяет производить динамическое корректирование параметров процесса с целью обеспечения наилучшей обрабатываемости заданного материала и заготовки.

Для проведения экспериментальных исследований необходимо осуществлять сбор данных о виде образующейся стружки. Для этого требуется записывать сигнал о значении составляющей силы резания P_z и параметрах виброускорения a_z в процессе схода стружки. Эксперимент следует повторять до тех пор, пока не будут выработаны и однозначно определены значения режимов резания для однозначного схода элементной и суставчатой стружки.

Синтез получаемой информации дает спектры виброускорений и шумовой картинки, а также соответствие этих параметров значению силы резания для образования элементной стружки.

Частота образования элементов (сегментов) стружки f определяется размером элемента Δx и скоростью резания V :

$$f = \frac{V}{\Delta x}, \quad (18)$$

где f – расчетная частота образования элементов [Гц]; V – скорость резания, [м/с]; Δx – расстояние между гребешками (или впадинами) суставчатой стружки [7].

$$V = \pi \times D \times n, (19)$$

где D – диаметр заготовки, [м]; n – число оборотов в секунду, [Гц].

На рисунке 16 показана методика проведения эксперимента по определению оптимальных режимов резания и их взаимосвязи с вибрационной и шумовой картинкой процесса резания.

Измерение Δx проводилось по фотографиям с цифрового микроскопа. Величина Δx принята равной среднему арифметическому по 10 измерениям (рисунок 16)» [22].

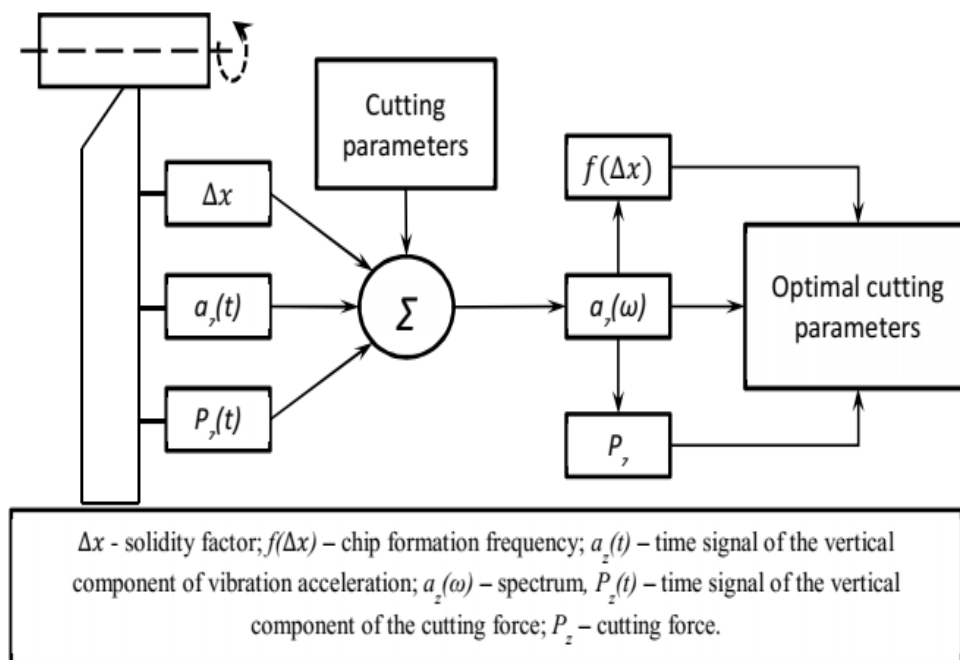


Рисунок 16 - Методика проведения эксперимента

Также Васин С.А. утверждает, что «изменения в спектре необходимо искать в окрестностях расчетной частоты стружкообразования (сегментообразования) f , для этого посредством цифровой обработки данных,

а именно полосового КИХ фильтра, выделим область $f_{low} > f > f_{high}$ и сравним спектры, относящиеся к сливной и суставчатой стружкам.

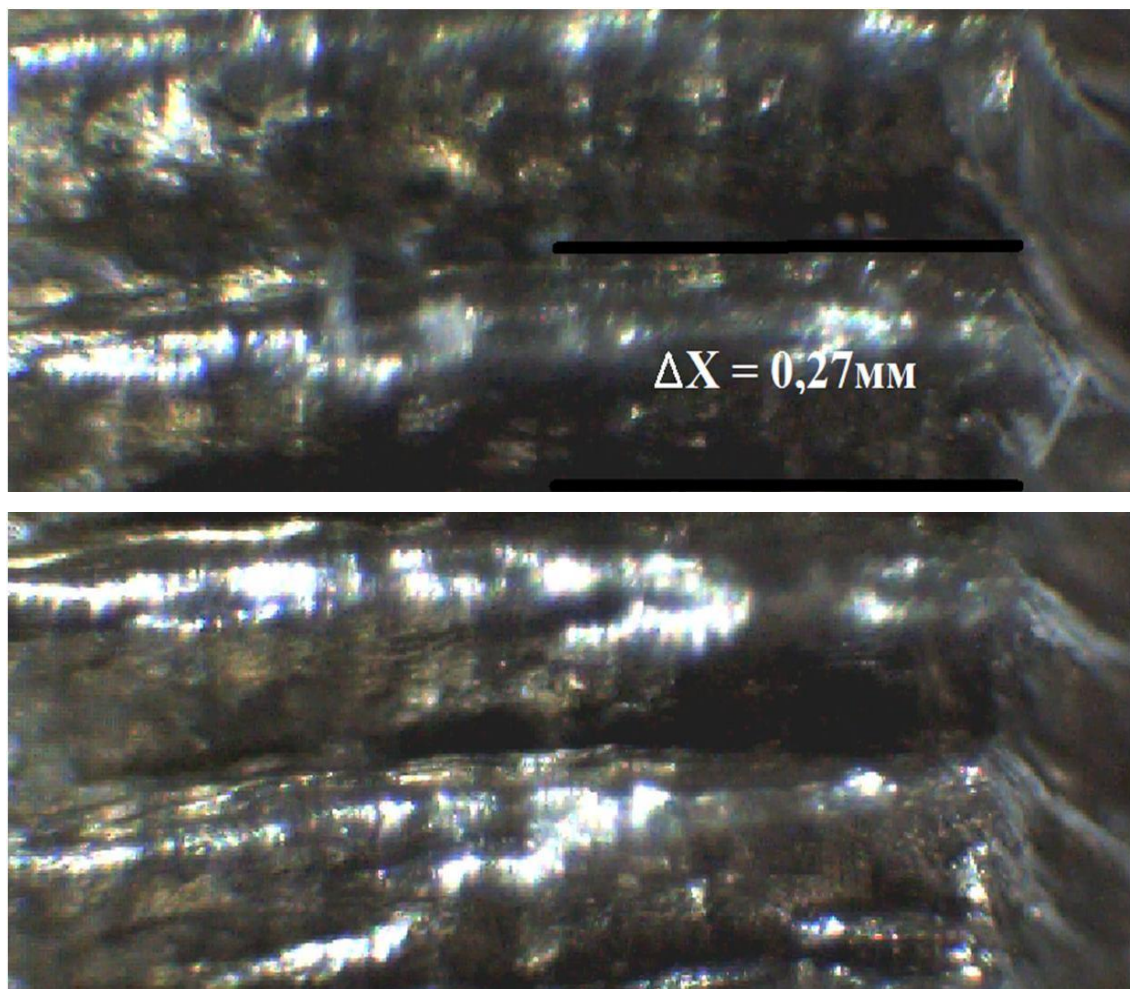


Рисунок 17 - Увеличенное фото стружки.. Сталь 12X18H9Т. Режущий инструмент с твердосплавными режущими пластинами. Продольная подача 0.31 мм/об.,

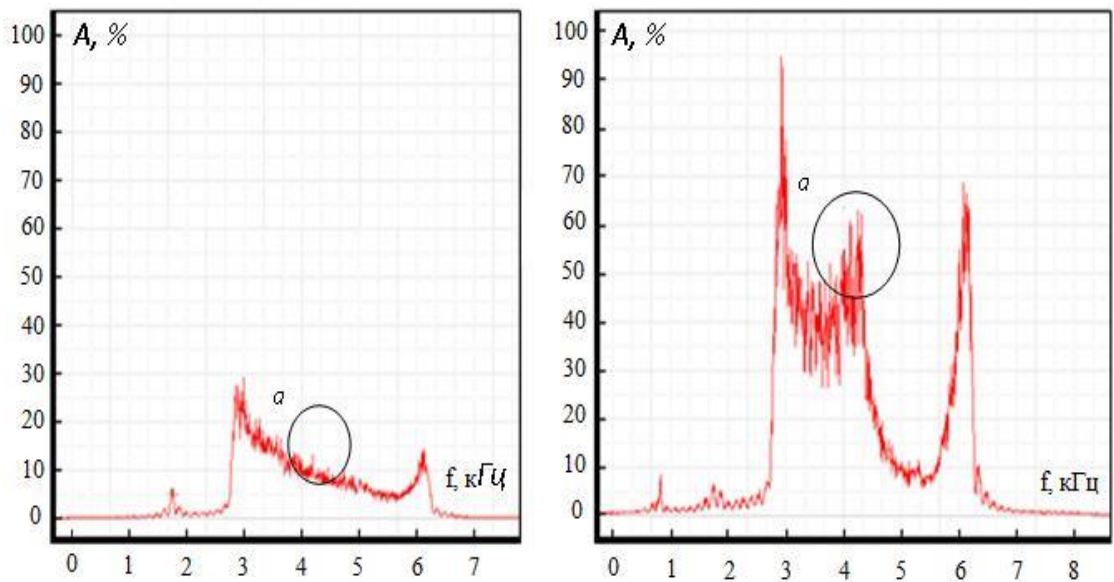


Рисунок 18 - Сравнение вибрационных спектров при образовании стружки разного вида

Рисунок 18 показывает два спектра вертикальной составляющей виброускорения державки инструмента (токарного резца) при точении. Левый соответствует точению со сходящей сливной стружкой: $n = 100$ об/мин; $S=0,31$ мм/об.; $t = 1$ мм; $D = 54$ мм; правый спектр – с сегментной стружкой: $n = 400$ об/мин; $S = 0.39$ мм/об.; $t = 1$ мм, $D = 54$ мм. Отчетливо видно наличие пика в области a на спектре справа на ожидаемой частоте стружкообразования f , в то время как на левом спектре пики отсутствуют. Расчет средней частоты сегментообразования приведен ниже:

$$f = \frac{\pi \times D \times n}{\Delta x} = \frac{\pi \times 54 \times 400}{0,27 \times 60} = 4189 \text{ Гц. (20)}$$

Выражение (3) определяет среднюю частоту сегментообразования, поскольку в расчет берется средняя величина ΔX . В реальном спектре наблюдается группа пиков, соответствующих ряду наиболее часто встречающихся значений ΔX . Девиация частоты оценивается предельным значением в 300 Гц в момент изменения вида стружки, далее величина отклонения уменьшается. Однако данное наблюдение требует

дальнейшей проверки, поскольку необходима более обширная база экспериментальных данных.

Таким образом, вибрация державки резца определенно несет в себе информацию о виде стружки, образующейся в момент наблюдения.

Чтобы подтвердить адекватность снятого вибросигнала необходимо сравнить его с силой резания, поскольку именно она является вынуждающей силой исследуемых осцилляций.

На рисунке 19 представлены спектр вертикальной составляющей силы резания P_z и спектр вертикальной составляющей виброускорения a_z .

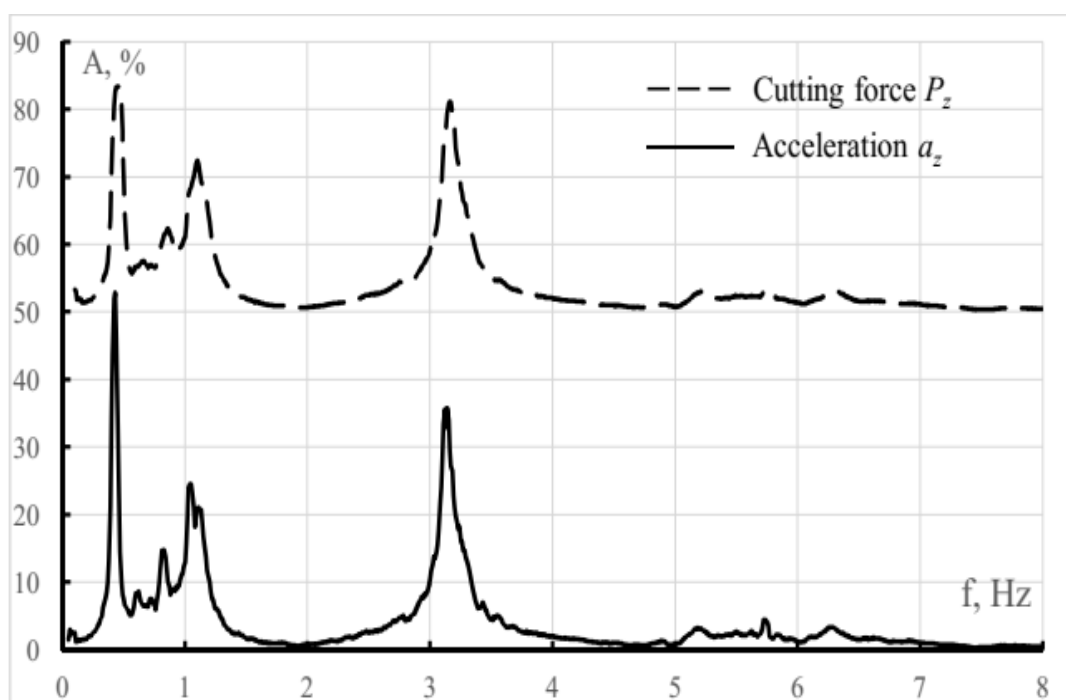


Рисунок 19 Сравнение спектров виброускорения и составляющей силы резания P_z

Они качественно повторяют друг друга на всех наблюдаемых частотах, поскольку связаны как причина и следствие.

Таким образом, было доказано, что вибрация действительно несет информацию об основных параметрах процесса резания. Следовательно, спектральный анализ вибрации может стать основой оперативной диагностики токарной обработки металлов резанием и лечь в основу

адаптивной системы управления режимами резания в станках с числовым программным управлением» [22].

2.4 Исследование информационно-измерительных систем мониторинга силовых и виброакустических параметров и звука в процессе резания

Центральной задачей дальнейшего исследования является разработка информационно-измерительной системы, способной регистрировать силовые и виброакустические параметры в процессе резания. Ключевое требование к такой системе - универсальность применяемых технических решений.

Анализ эксплуатационных данных и производственной практики свидетельствует, что в автоматизированных линиях массового производства преобладающее количество отказов (до 60-70%) обусловлено выходом из строя режущего инструмента. Этот критически важный компонент технологической системы подвергается экстремальным нагрузкам в зоне резания, что приводит к комплексным повреждениям: абразивному и адгезионному износу, хрупкому разрушению, выкрашиванию режущей кромки и другим дефектам.

Следует отметить, что «интенсивность износа инструмента на порядок превышает показатели изнашивания станочных компонентов и оснастки. Это делает режущий инструмент ключевым лимитирующим звеном в вопросах надежности автоматизированных производственных систем. В отличие от других видов повреждений, износ инструмента неизбежно приводит к полному отказу технологической системы, если не осуществляется его плановая замена на резервный» [24, с. 3].

Подробно рассмотрим Анализ эксплуатационных практик ГПС

Международный и российский опыт эксплуатации гибких производственных систем свидетельствует о распространенной практике занижения режимов резания на 20-30% относительно нормативных значений. Такая мера применяется для «повышения надежности режущего

инструмента, однако приводит к значительным временным потерям - простой оборудования, связанные с заменой инструмента, достигают 40% от общего вспомогательного времени» [5].

Ключевым решением данной проблемы является организация безостановочной замены инструмента через инструментальный магазин станка. Для реализации этого требуется:

- Непрерывный мониторинг текущего состояния каждого инструмента
- Точная оценка остаточного ресурса режущего элемента
- Автоматизированный подбор дублирующего инструмента с достаточным ресурсом для завершения текущей операции

Внедрение такой системы управления даст производству следующие преимущества:

- Полностью исключить отказы инструмента во время обработки
- Осуществлять замену без остановки производственного процесса
- Оптимизировать режимы резания, отказавшись от их искусственного занижения
- Повысить общую производительность оборудования
- Снизить долю вспомогательного времени в производственном цикле

Алгоритм работы системы следующий:

- В реальном времени оценивается степень износа каждого инструмента;
- Рассчитывается остаточный ресурс с учетом параметров обработки;
- Производится автоматический выбор резервного инструмента;
- Осуществляется заблаговременная подготовка к замене;
- Процесс замены выполняется в оптимальный момент без прерывания работы станка.

Такой подход позволяет максимально использовать ресурс инструмента без риска выхода его из строя во время обработки, что в конечном итоге повышает экономическую эффективность производства.

Фрезерование, как ключевая технология металлообработки, занимает важное место в современном машиностроении, особенно при изготовлении плоских поверхностей призматических деталей из труднообрабатываемых материалов. Этот метод получил широкое распространение благодаря своей универсальности и высокой производительности.

В современной промышленности доминирующим материалом для режущего инструмента стали твердые сплавы. Статистика показывает следующие результаты касательно данного вопроса:

- 60-65% всех обрабатываемых заготовок используют твердосплавный инструмент
- В японском автопроме доля твердосплавных торцевых фрез достигает 70%
- Производительность обработки повышается в 2,5-3 раза по сравнению с инструментами из быстрорежущей стали

Твердые сплавы обладают уникальным сочетанием свойств:

- Исключительная твердость (до 92 HRA)
- Высокая теплостойкость (до 1000°C)
- Превосходная износостойкость

Однако этим материалам присущ существенный недостаток - повышенная хрупкость, что ограничивает их применение при ударных нагрузках, требует особых условий эксплуатации и увеличивает риск внезапного разрушения инструмента

Современные разработки направлены на преодоление хрупкости твердых сплавов за счет:

- Нанесения многослойных износостойких покрытий
- Оптимизации состава и структуры сплавов
- Применения композитных материалов

- Совершенствования геометрии режущей части

Такие усовершенствования позволяют расширить область применения твердосплавного инструментария и повысить его надежность в сложных условиях обработки.

Прямой контроль параметров инструмента в процессе обработки представляет значительные технологические сложности, обусловленные следующими факторами:

Физические ограничения доступа:

- Рабочие поверхности инструмента находятся в зоне активного резания
- Наличие стружки и охлаждающей жидкости создает барьер для измерительных устройств
- Экстремальные температурные и механические нагрузки препятствуют проведению измерений

Технические ограничения:

- Современные сенсорные системы не обладают необходимой устойчивостью к условиям резания
- Отсутствие технологических окон для установки измерительных устройств
- Высокие динамические нагрузки делают невозможным контактный контроль

В связи с этим актуальной задачей становится разработка косвенных методов диагностики, основанных на:

- Анализе виброакустических характеристик процесса
- Мониторинге силовых параметров резания
- Контроле энергопотребления привода шпинделя
- Анализе качества обработанной поверхности

Перспективные направления развития систем диагностики включают:

- Разработку интеллектуальных алгоритмов обработки сигналов
- Создание комбинированных систем сенсоров

- Внедрение методов машинного обучения для прогнозирования износа
- Использование беспроводных систем сбора данных

Особое внимание уделяется повышению достоверности диагностики за счет корреляции нескольких диагностических признаков, учета технологических параметров обработки, адаптации к конкретным условиям резания, а также снижения влияния внешних возмущений.

Гурин В.Д. писал: «Оснащение современных фрезерных станков системами диагностирования состояния инструмента ограничено вследствие их недостаточной достоверности и сложной реализации. Для создания современных систем диагностирования необходим комплекс теоретических и экспериментальных исследований по расчету и выбору наиболее информативного диагностического признака, адекватно отображающего реальное состояние инструмента. Анализ как зарубежного, так и отечественного опыта показывает, что поломка (дискретное изменение состояния) инструмента наиболее эффективно распознается по уровню виброакустического сигнала, а износ (монотонное непрерывное изменение состояния) – с использованием силовых параметров. Надежная работа информационно-измерительной системы для повышения производительности фрезерования изделий из труднообрабатываемых материалов на основе диагностирования состояния инструмента возможна при синтезе в ней комплекса силовых и вибрационных параметров. В этом случае прогнозирование поведения системы без предварительного «обучения» можно вести по силовому параметру, а осложнения ситуации резания, вызванные поломками зубьев, изменением динамических характеристик технологической системы, случайными возмущениями, можно контролировать с помощью контроля параметров вибрационного сигнала» [21, с. 15-19].

Григорьев С.Н. подчёркивает, что «для создания такой информационно-измерительной системы необходимо провести анализ

разрушения рабочих поверхностей твердосплавных торцевых фрез, исследование начального состояния твердосплавных пластин торцевых фрез, особенности их изнашивания, выявить критерии состояния и отказа инструмента как с износостойким покрытием, так и без него.

Виброакустический контроль процесса резания при торцевом фрезеровании труднообрабатываемых материалов проводится с исследованием особенностей изменения параметров виброакустического сигнала на различных схемах обработки, а также реакции виброакустического сигнала на поломку зубьев фрезы» [21].

Отмечается следующее: «Исследование силовых параметров при фрезеровании труднообрабатываемых материалов включает в себя разработку методики исследования составляющих силы резания и методику расчета их мгновенных значений.

Исследование силовых параметров при обработке труднообрабатываемых материалов фрезерованием предполагает создание методики изучения компонентов силы резания и способов вычисления их мгновенных величин.

Перед созданием алгоритма и программного обеспечения для измерительной системы требуется выполнить моделирование силовых характеристик при торцевом фрезеровании, которое должно включать:

- Разработку аналитических соотношений, описывающих воздействие факторов процесса резания на составляющие силы резания с учетом износа инструмента;
- Создание математического обеспечения алгоритма для определения и вычисления предельного значения силового диагностического параметра» [19].

При этом особое внимание уделяется:

- Установлению зависимостей между параметрами обработки и силовыми характеристиками

- Учету влияния износа режущего инструмента на изменение сил резания
- Разработке критериев оценки предельных состояний инструмента по силовым параметрам

Выводы по разделу 2 работы:

- Проведены исследования процессов колебания и выделения звуковой картинки с определением расчетных схем с сопоставлением элементов системы по правилам теории автоматического управления.
- Выполнены теоретические исследования влияния параметров режущего инструмента и основных режимов резания при продольном точении на характер распределения и изменения звуковой картинки и вибрации в процессе резания. Обоснованы оптимальные режимы процесса резания (глубина резания и подача) при продольном точении заготовок, изготавливаемых из аустенитной нержавеющей стали 12х18н9т.
- Выполнены исследования характеристик вибрационных и виброакустических процессов, сопровождающих резание при токарной обработке с оптимальными технологическими режимами.

3 Экспериментальные исследования процессов вибраций и акустических сигналов при токарной обработке

3.1 методика анализа акустического сигнала процесса резания для диагностики состояния инструмента и качества обработанной поверхности

Методика должна обеспечить комплексный подход к анализу акустического сигнала, получаемого при резании и направленного на получение информационных признаков для оценки и диагностики состояния элементов технологической системы, в частности режущего инструмента для оценки качества обработки.

Методика включает следующие этапы:

- сбор данных;
- предварительная обработка сигнала;
- выделение признаков во временной и время –частотной областях;
- классификация и обработка результатов замеров.

Сбор данных реализуется непосредственно на станке с помощью высокочувствительного микрофона. Это может быть, например, электретный или MEMS с широким диапазоном частот. Желательно диапазон чтобы был до 20 кГц или выше, в зависимости от скорости резания и материала.

Сигнал с микрофона пропускается через предусилитель для усиления слабого сигнала микрофона. Далее аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с высокой частотой дискретизации преобразует сигнал в дискретную форму с заданной частотой дискретизации. Рекомендуется не менее 44.1 кГц, а лучше 96 кГц или выше для захвата высокочастотных составляющих сигнала, связанных со стружкообразованием.

Персональный компьютер с программным обеспечением для записи и обработки звука (например, MATLAB, Python с библиотеками SciPy, Librosa).

Используется токарный станок с числовым программным управлением 16K20. Расположение микрофонов (микрофона) максимально близко к зоне

резания. Дополнительно фиксируются технологические параметры резания (скорость резания, подача, глубина резания).

После фиксации микрофона как можно ближе к зоне резания, но без прямого контакта с элементами наладки, необходимо обеспечить его звукоизоляцию от окружающей обстановки. Это важно для минимизации влияния окружающего шума от соседних станков и даже от элементов самого станка (привод, коробка скоростей или подач).

В ходе серии экспериментов с различными параметрами резания (скорость, подача, глубина) и разной степенью износа инструмента фиксируются соответствующие звуковые файлы. Также дополнительно может проводиться контроль качества обработанной поверхности.

АС в каждом файле для каждого набора параметров обладает своими особенностями, которые необходимо выделить. Для достоверности необходимо, чтобы каждый эксперимент с определенным набором входных параметров повторялся не менее 3 раз. Это достаточное количество данных для каждого случая, чтобы обеспечить статистическую значимость результатов.

Для учета особых случаев возмущений, которые проявляются в выбросах данных, для каждого эксперимента обязательно записываются параметры резания, состояние инструмента (износ, сколы, затупление) и измеренные параметры качества обработанной поверхности (шероховатость, волнистость).

Предварительная обработка сигнала состоит в выделении постоянной составляющей. Это тренд сигнала, который определяется систематическими факторами. Для выделения динамической составляющей проводится вычитание среднего значения сигнала для центрирования вокруг нуля.

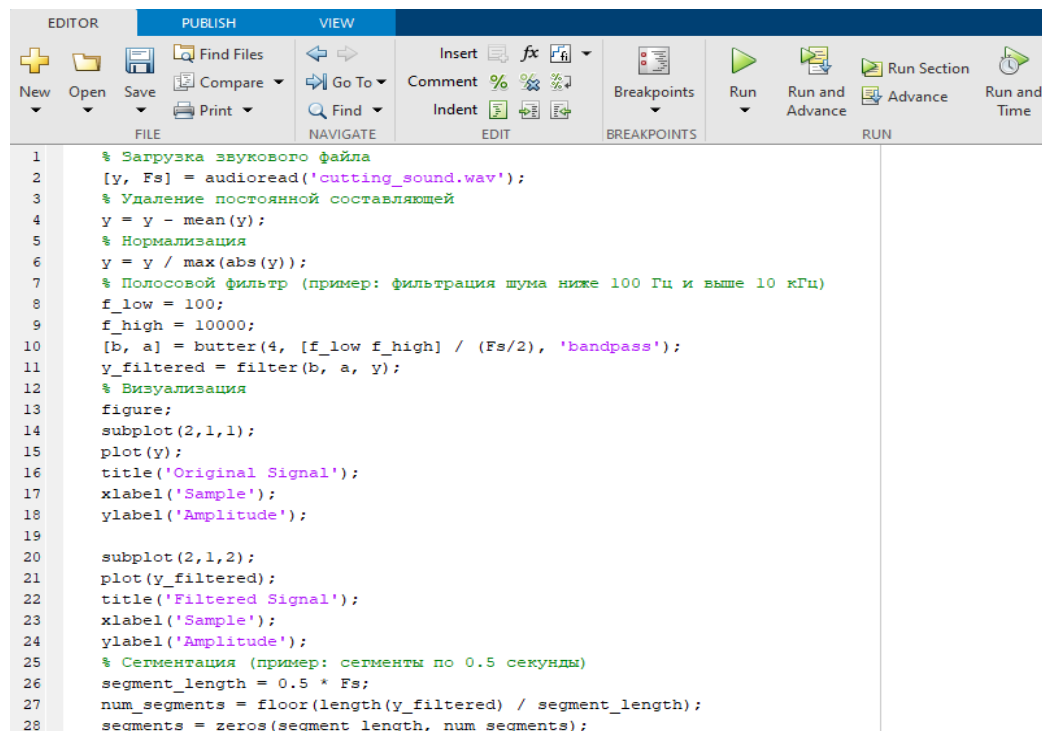
Нормализация проводится путем приведения амплитуды сигнала к диапазону $[-1, 1]$ для уменьшения влияния неконтролируемых, случайных изменений уровня сигнала в виде возмущений.

Фильтрация для разделения на частотные диапазоны проводится полосовыми фильтрами. Это может быть связано с удалением нежелательных частотных составляющих (например, сетевой шум электрооборудования 50/60 Гц) и выделение частотного диапазона, содержащего наиболее полезную информацию о процессе резания. Подбор частот полосовых фильтров в соответствии с характеристиками оборудования и материала является одной из ключевых задач исследований.

Вейвлет-фильтрация проводится для двух задач. Это шумоподавление и выделение локальных особенностей сигнала.

Сегментация в виде разделения записи на отдельные сегменты фиксированной длины. Длина сегмента должна быть достаточно большой, чтобы захватить характерные особенности процесса резания, но достаточно короткой, чтобы изменения в параметрах резания внутри сегмента были незначительными. Часто рекомендуется сегменты брать от 0,1 до 1 секунды.

Пример реализации в MATLAB (предварительная обработка) – рисунок 20.



```

1  % Загрузка звукового файла
2  [y, Fs] = audioread('cutting_sound.wav');
3  % Удаление постоянной составляющей
4  y = y - mean(y);
5  % Нормализация
6  y = y / max(abs(y));
7  % Полосовой фильтр (пример: фильтрация шума ниже 100 Гц и выше 10 кГц)
8  f_low = 100;
9  f_high = 10000;
10 [b, a] = butter(4, [f_low f_high] / (Fs/2), 'bandpass');
11 y_filtered = filter(b, a, y);
12 % Визуализация
13 figure;
14 subplot(2,1,1);
15 plot(y);
16 title('Original Signal');
17 xlabel('Sample');
18 ylabel('Amplitude');
19
20 subplot(2,1,2);
21 plot(y_filtered);
22 title('Filtered Signal');
23 xlabel('Sample');
24 ylabel('Amplitude');
25 % Сегментация (пример: сегменты по 0.5 секунды)
26 segment_length = 0.5 * Fs;
27 num_segments = floor(length(y_filtered) / segment_length);
28 segments = zeros(segment_length, num_segments);

```

Рисунок 20 – Пример листинга в Матлаб

Исходный сигнал в начале обработки (оригинальный сигнал и после удаления постоянной составляющей) (рисунок 21) и в конце с существенным износом инструмента показан (рисунок 22).

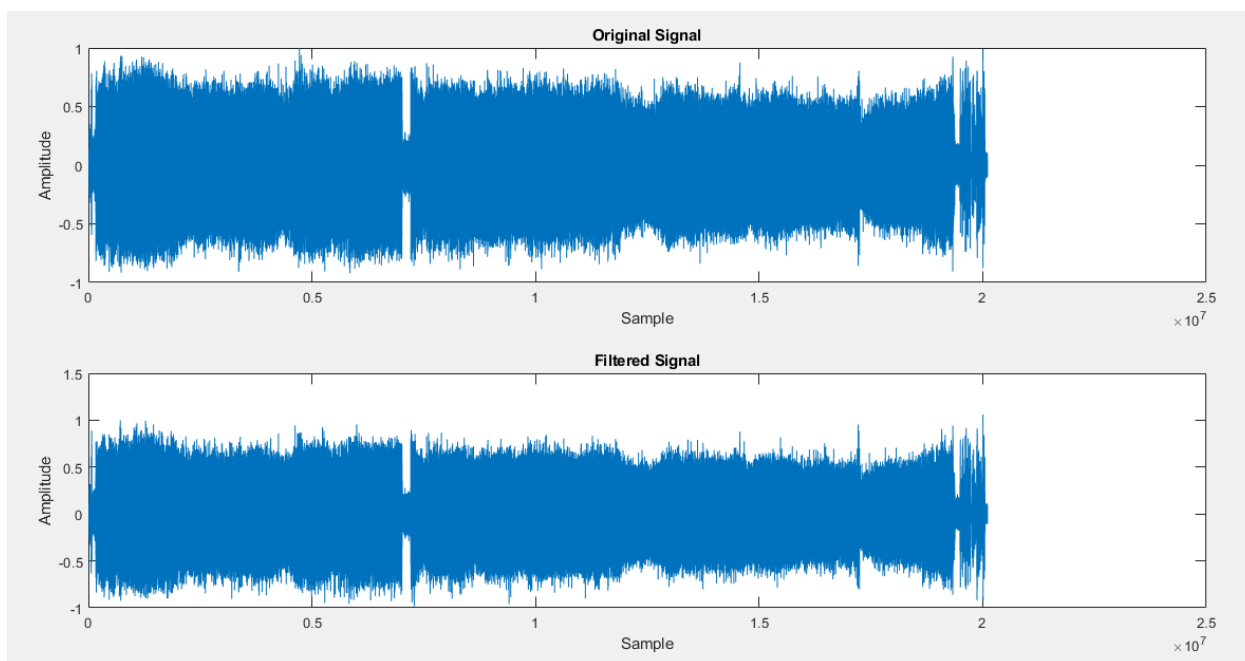


Рисунок 21 – Сигнал с микрофона для начального состояния резца

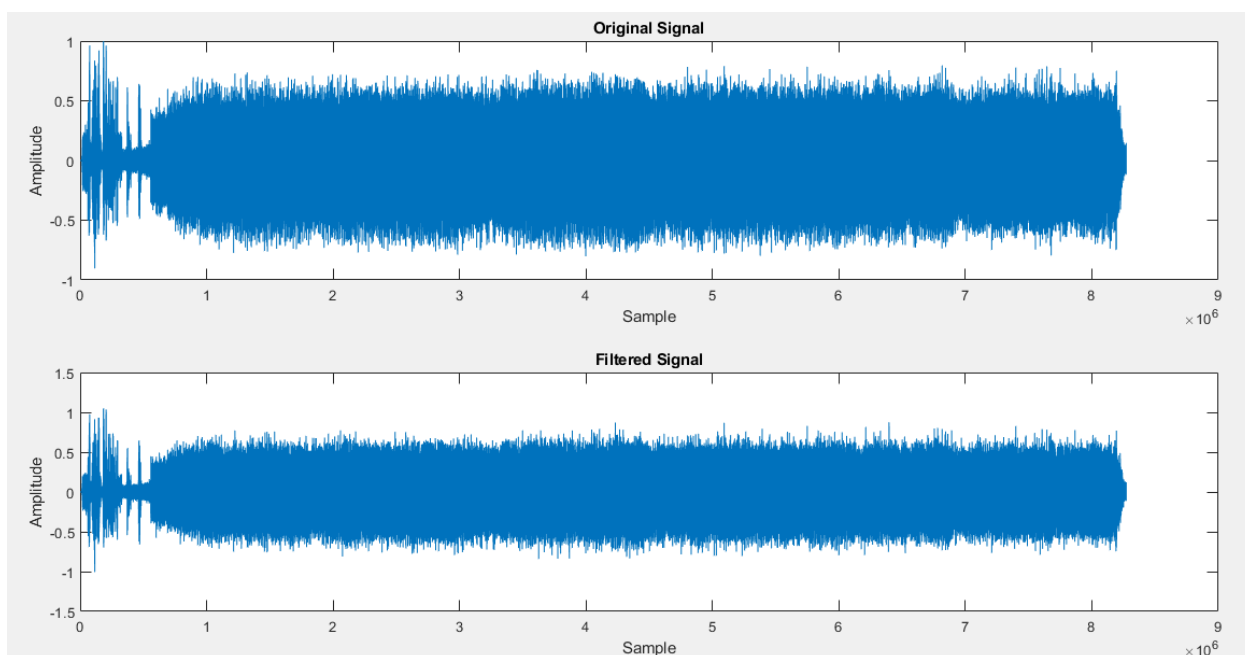


Рисунок 22 – Сигнал с микрофона для изношенного резца

Работать со всем сигналом трудоемко и не всегда информативно. Для анализа необходимо выделить небольшой участок (сегментировать), как показано на рисунках 23 и 24.

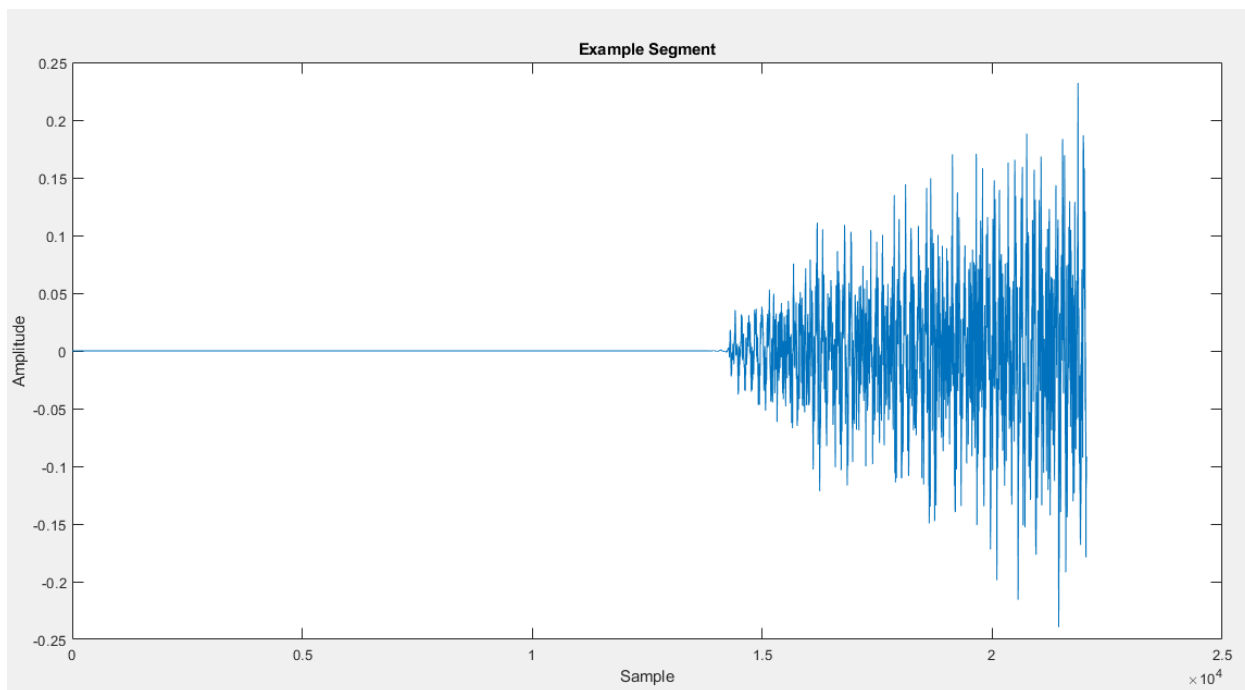


Рисунок 23 – Начальный сигнал с микрофона для начального состояния резца

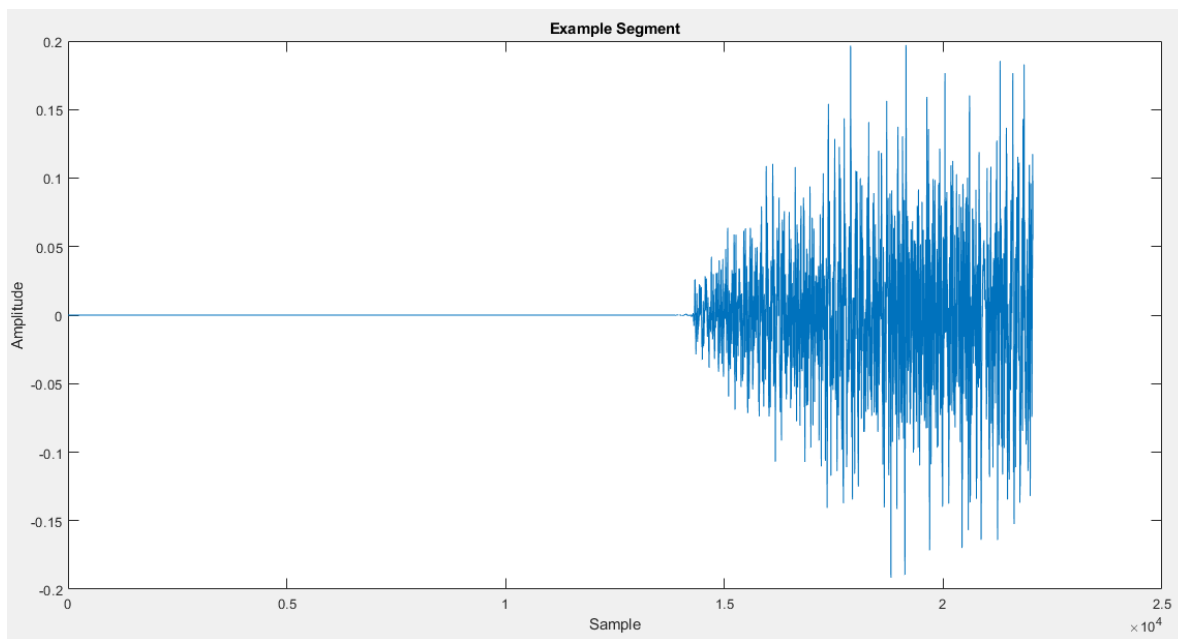


Рисунок 24 – Начальный сигнал с микрофона для изношенного резца

Выделение признаков проводится статистическими методами. Это временные признаки в виде среднего и среднеквадратичного значения (RMS). Если первое значение после удаления тренда 0, то второе является мерой энергии звукового сигнала. Она чувствительна к изменениям амплитуды, связанным с износом инструмента и сопутствующими вибрациями.

Пиковое значение – это наибольшее абсолютное значение сигнала. Может указывать на удары или другие аномалии. Может быть выбросом или информативным признаком в случае поломки инструмента.

Коэффициент формы (Shape Factor) определяется как отношение RMS к среднему абсолютному значению.

Коэффициент выброса (Crest Factor) – это отношение пикового значения к RMS. Указывает на наличие импульсных компонентов в сигнале (резание с ударами как при фрезеровании).

Энергия динамического сигнала находится как сумма квадратов значений сигнала.

Нулевые переходы определяются частотой сигнала и показывают количество раз, когда сигнал пересекает нулевой уровень. Отражает частоту сигнала при условии симметричности сигнала.

Другой группой информационных признаков являются частотные признаки.

Самый главный и самый распространенный признак - спектральная плотность мощности (power spectral density - PSD). Она оценивает распределение энергии сигнала по частотам и вычисляется с помощью быстрого преобразования Фурье (fast Furrier transformation - FFT) или других методов спектрального анализа. На получившемся спектре можно выявить доминирующие частоты, связанные с вибрациями, износом инструмента, и другими факторами.

Другая характеристика спектра - центроид спектра (Spectral Centroid) как средневзвешенная частота, отражающая "центр тяжести" спектра и

ширина спектра (Spectral Bandwidth) как мера разброса частот вокруг центроида.

Спектральный спад (Spectral Rolloff), это частота, ниже которой содержится определенный процент энергии спектра (например, 85%).

Особые характеристики именно звуковых файлов это мел-частотные кепстральные коэффициенты (mel-frequency cepstral coefficient - MFCC) в виде компактного представления спектра, используемое в распознавании речи. Они могут быть полезны для классификации различных состояний инструмента.

Время-частотные признаки показываются в виде спектрограммы - визуального представления частотного состава сигнала во времени, что позволяет наблюдать изменения частотных характеристик сигнала во времени.

Вейвлет-преобразование в отличие от спектрограммы показывает преобразование сигнала в виде набора вейвлет-коэффициентов, представляющих сигнал в различных масштабах (частотах) и в разное время.

Дополнительно к этим двум основным методам (частотному и время-частотному) есть еще эмпирическая модовая декомпозиция (empirical mode decomposition - EMD), как разложение сигнала на набор внутренних модовых функций (intrinsic mode frequencies - IMF), каждая из которых представляет собой колебание с определенной частотой. Данный метод позволяет выделить нелинейные и нестационарные компоненты сигнала.

Преобразование Гильберт-Хуанга (Hilbert-Huang transformation - ННТ) это комбинация EMD и преобразования Гильберта, которая позволяет получить время-частотную характеристику сигнала, основанную на IMF.

Пример реализации в MATLAB с выделением признаков из акустического сигнала – рисунки 25 и 26.

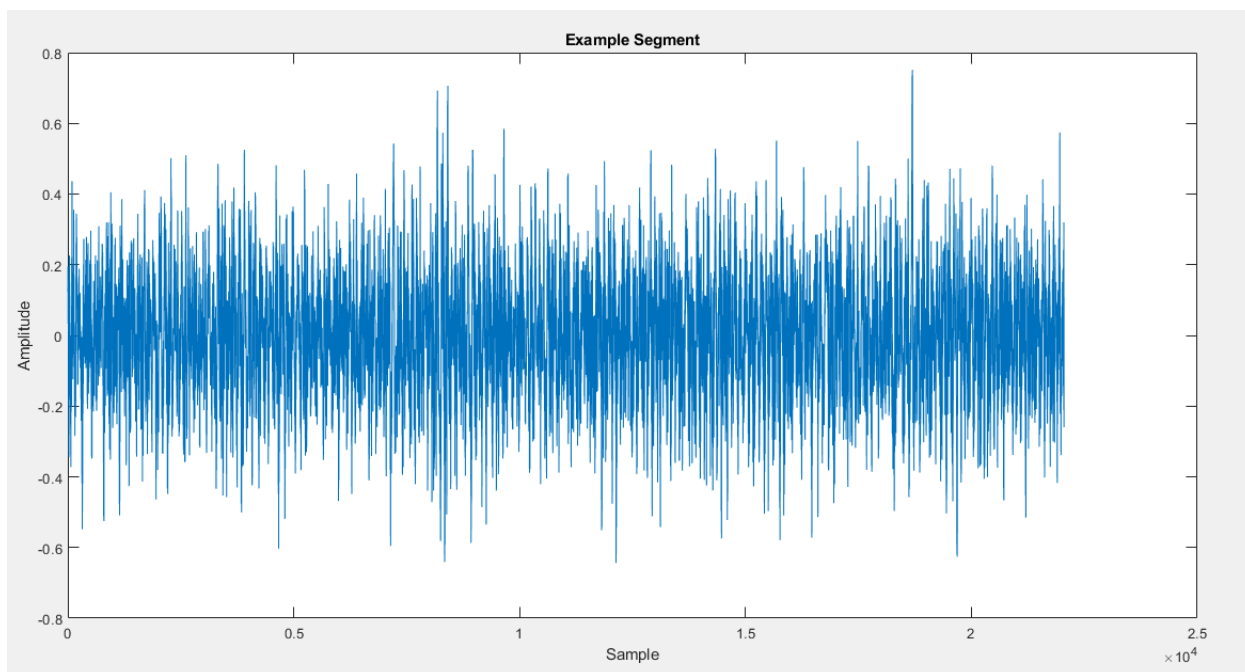


Рисунок 25 – Рабочий участок сигнала S_0

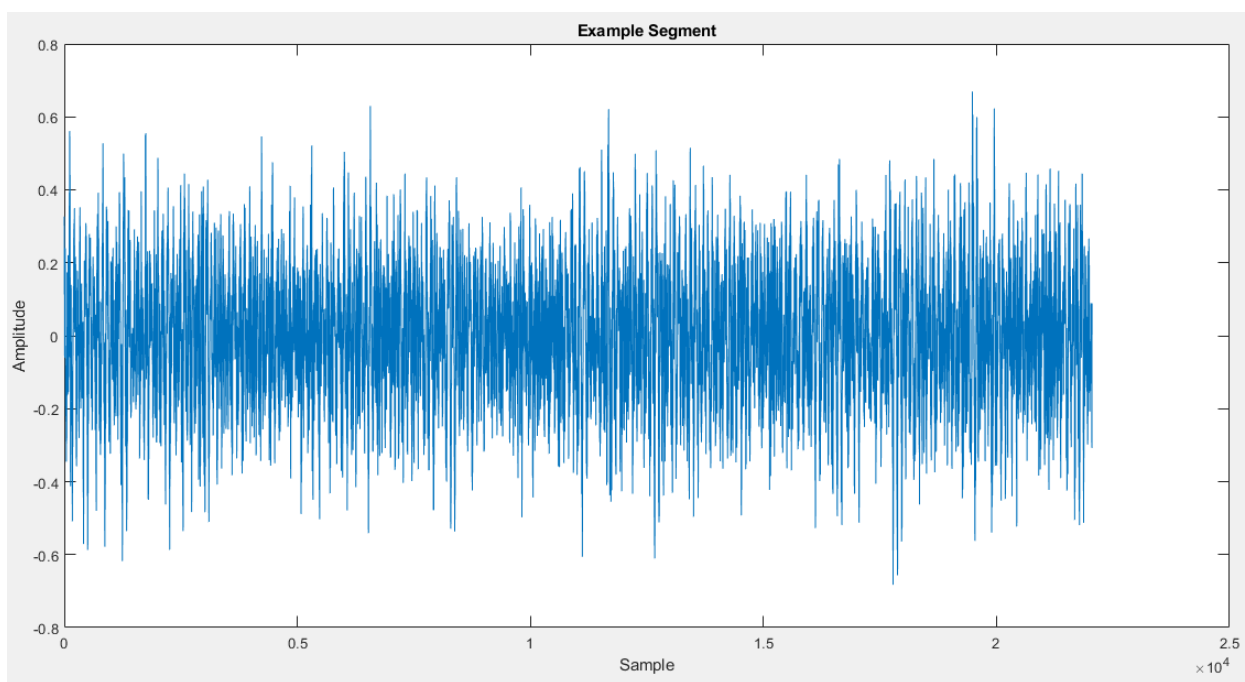


Рисунок 26 – Рабочий участок сигнала S_1

Спектр сигнала (рисунки 27 и 28), карта MFCC (рисунки 29 и 30).

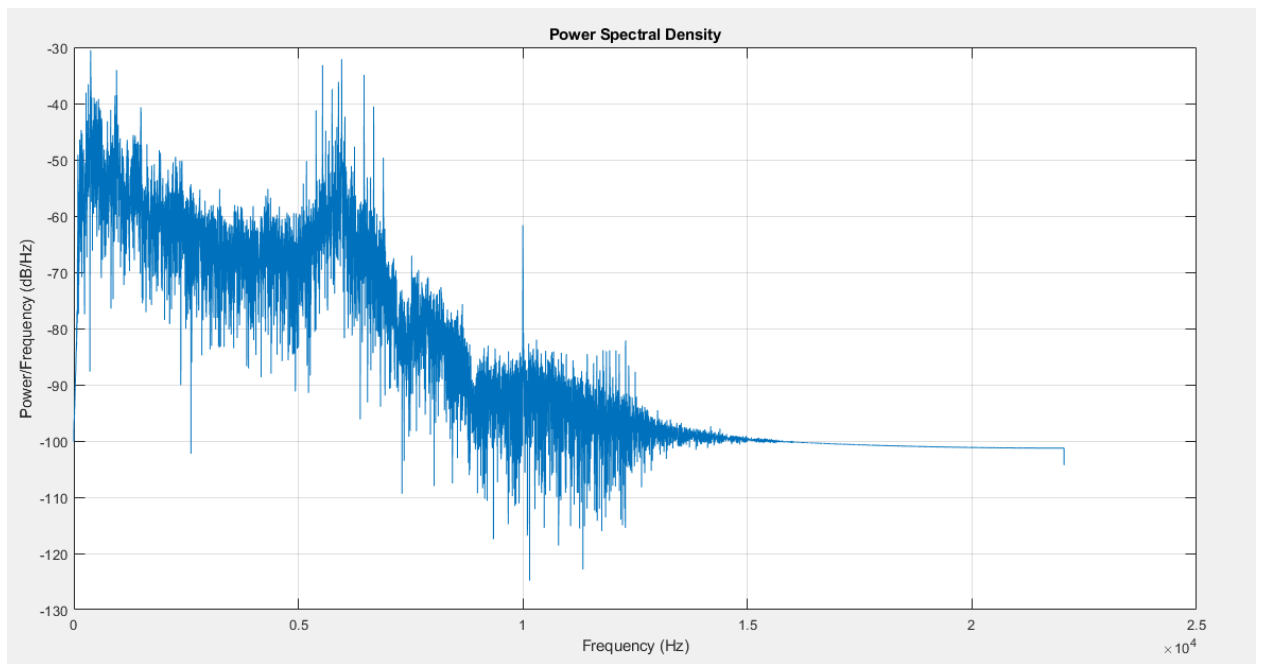


Рисунок 27 – Спектр сигнала S_0

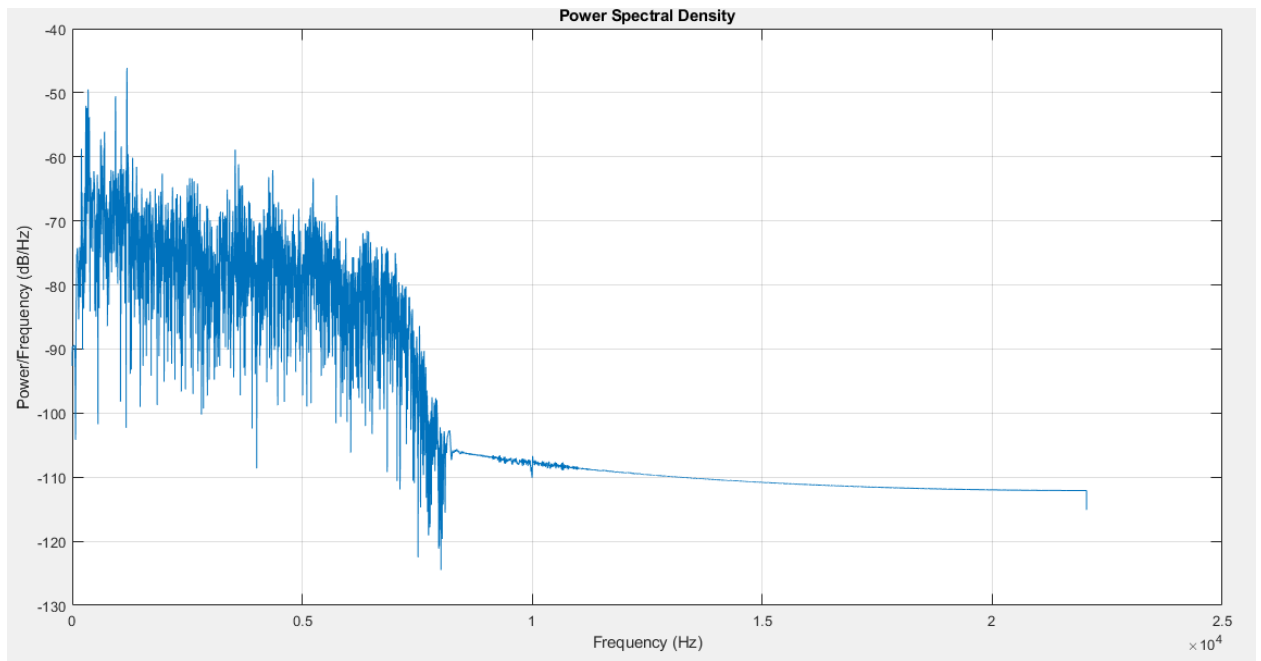


Рисунок 28 – Спектр сигнала S_1

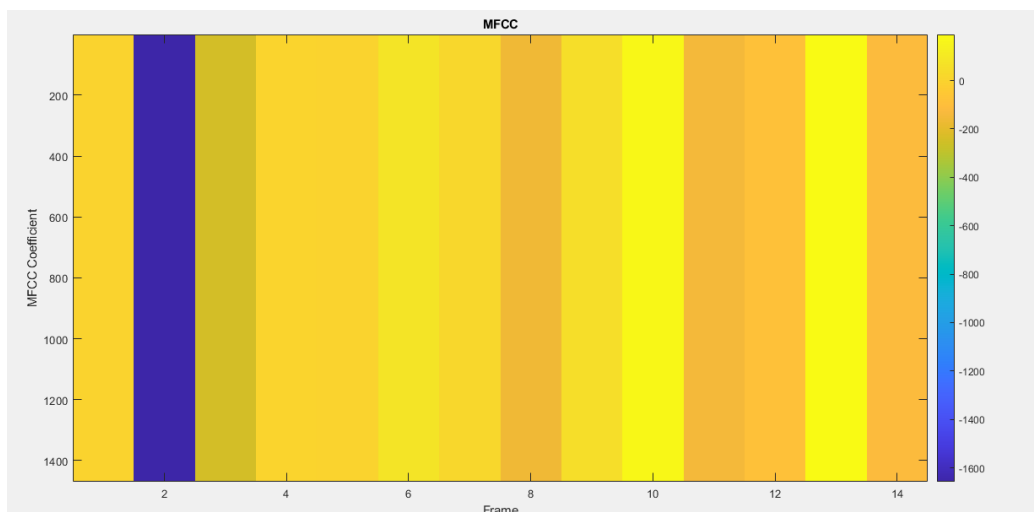


Рисунок 29 – Карта MFCC сигнала S_0

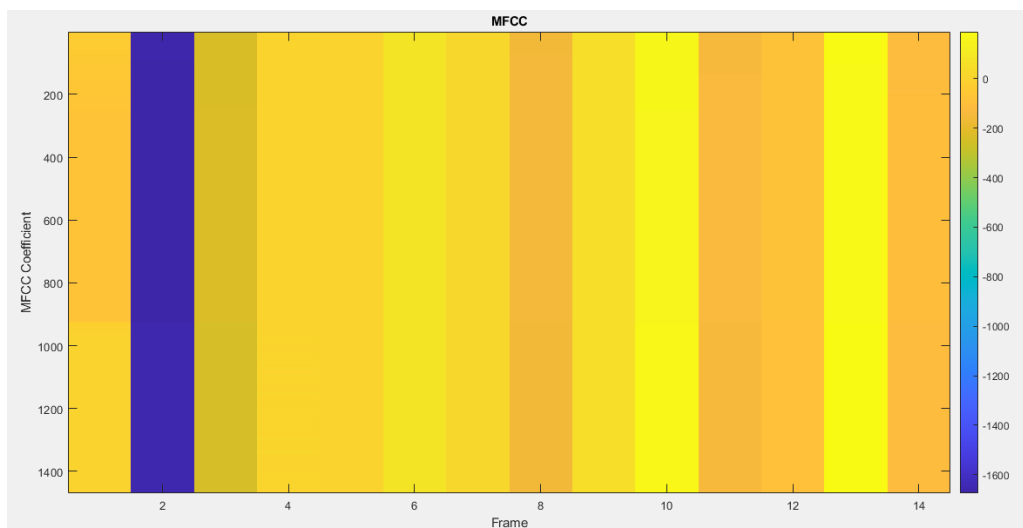


Рисунок 30 – Карта MFCC сигнала S_1

На рисунках 31 и 32 приведены результаты расчета статистических характеристик сигналов, представленных в рабочей области Матлаб.

num_segments	911	segments	22050x375 double
peak_value	0.7515	shape_factor	2.2146
psdx	11026x1 double	sig1_1	441000x1 double
rms_value	0.1715	sig1_1_4_9	222018x1 double
segment	22050x1 double	sig1_1_ROI	89567x1 double
segment_length	22050	sig1_1_ROI_1	89946x1 double
segments	22050x911 double	sig1_1_ROI_2	136627x1 double
shape_factor	1.2589	sig1_1t20	882000x1 double
sig1_1	441000x1 double	sig1_2	441000x1 double
sig1_1_4_9	222018x1 double	signal	20107008x1 double
sig1_1_ROI	89567x1 double	signal_energy	18.9545
sig1_1_ROI_1	89946x1 double	spectral_centroid	1x11026 double
sig1_1_ROI_2	136627x1 double	t1	1x20107008 double
sig1_1t20	882000x1 double	t2	1x8271360 double
sig1_2	441000x1 double	window	512x1 double
signal_energy	648.6955	xdft	11026x1 complex double
spectral_centroid	1x11026 double	y	8271360x1 double
t1	1x20107008 double	Y	20107008x1 complex double
t2	1x8271360 double	y_filtered	8271360x1 double
xdft	11026x1 complex double	zero_crossings	782
y	20107008x1 double		
y_filtered	20107008x1 double		
zero_crossings	3103		

Рисунок 31 – Результат расчета параметров сигнала S_0

a	[1,-4.3448,7.9428,-8.3...	a	[1,-4.3448,7.9428,-8.3...
b	[0.0670,0,-0.2681,0,0...	approx	628350x1 double
coeffs	1469x14 double	b	[0.0670,0,-0.2681,0...
crest_factor	4.3813	c	20107040x1 double
data1	20107008x2 double	coeffs	1469x14 double
data1_1	20107008x1 double	crest_factor	6.7208
data1_2	20107008x1 double	cumvar	20107008x1 double
data2	8271360x2 double	data1	20107008x2 double
data2_1	8271360x1 double	data1_1	20107008x1 double
data2_2	8271360x1 double	data1_2	20107008x1 double
delta	1469x14 double		
deltaDelta	1469x14 double		
f_high	10000		
f_low	100		
freq	1x11026 double		
Fs	44100		
i	911		

Рисунок 32 – Результат расчета параметров сигнала S_1

Для более качественного анализа необходима синхронизация записи АС с данными о параметрах резания и состоянием инструмента.

Также выполняется калибровка микрофона и измерительной системы для обеспечения точности измерений. Обработка больших данных для анализа больших объемов данных, полученных в ходе экспериментов.

Комбинация с другими датчиками позволяет расширить признаковое пространство, значит повысить точность вывода об интересующих параметрах обработки. Объединение АС с данными, полученными от

датчиков вибрации, силы резания, тока привода главного движения повысит точности диагностики.

Результаты статистического анализа можно представить в виде гистограммы (рисунок 33). Спектр сигнала полученный методом FFT показан на рисунке 34.

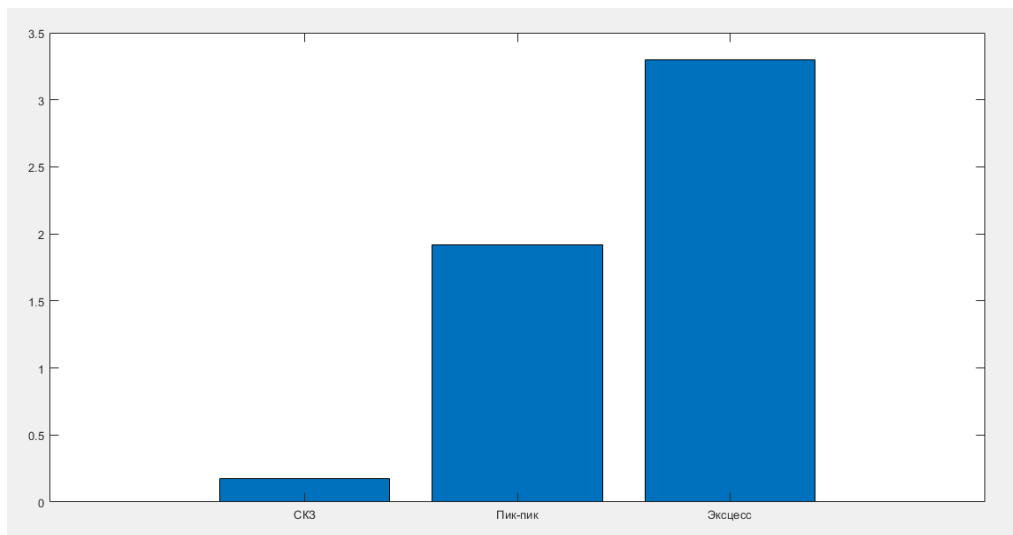


Рисунок 33 – Результат расчета параметров сигнала S_0

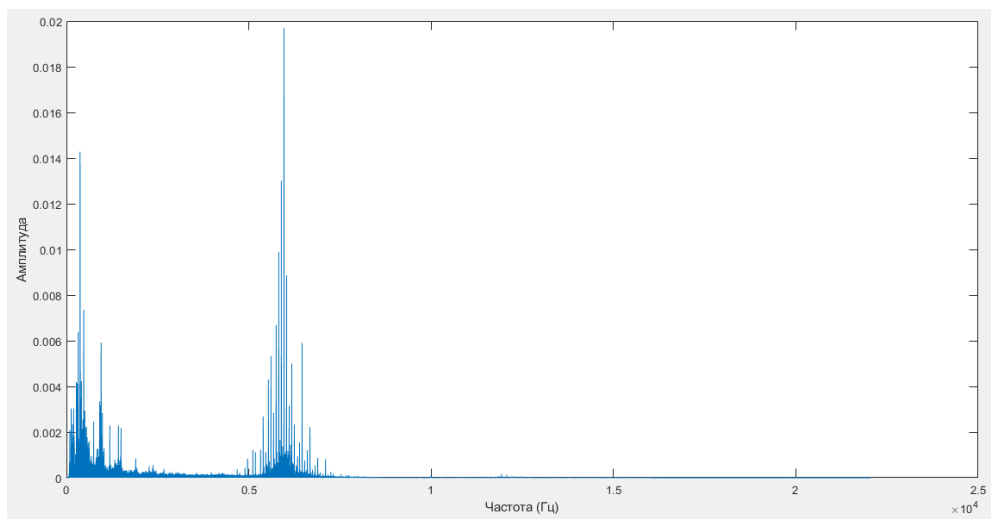


Рисунок 34 – Результат расчета параметров сигнала S_0

Для сигнала для изношенного резца тоже самое на рисунках 35 и 36.

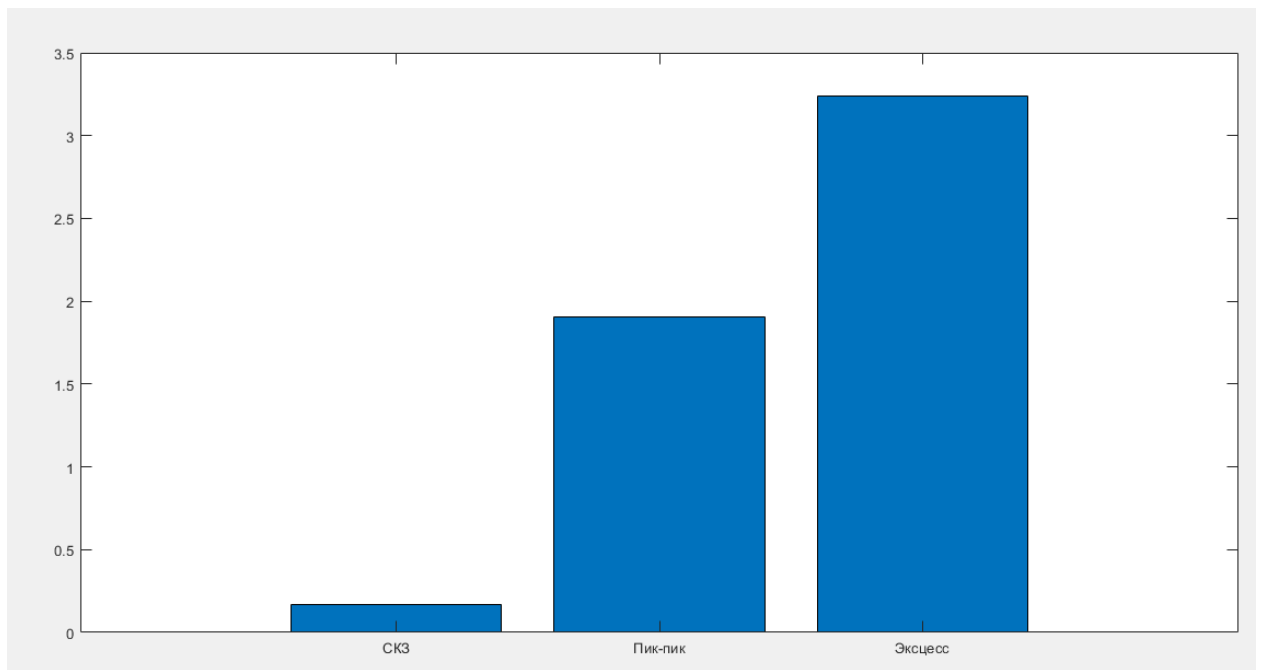


Рисунок 35 – Результат расчета параметров сигнала S_1

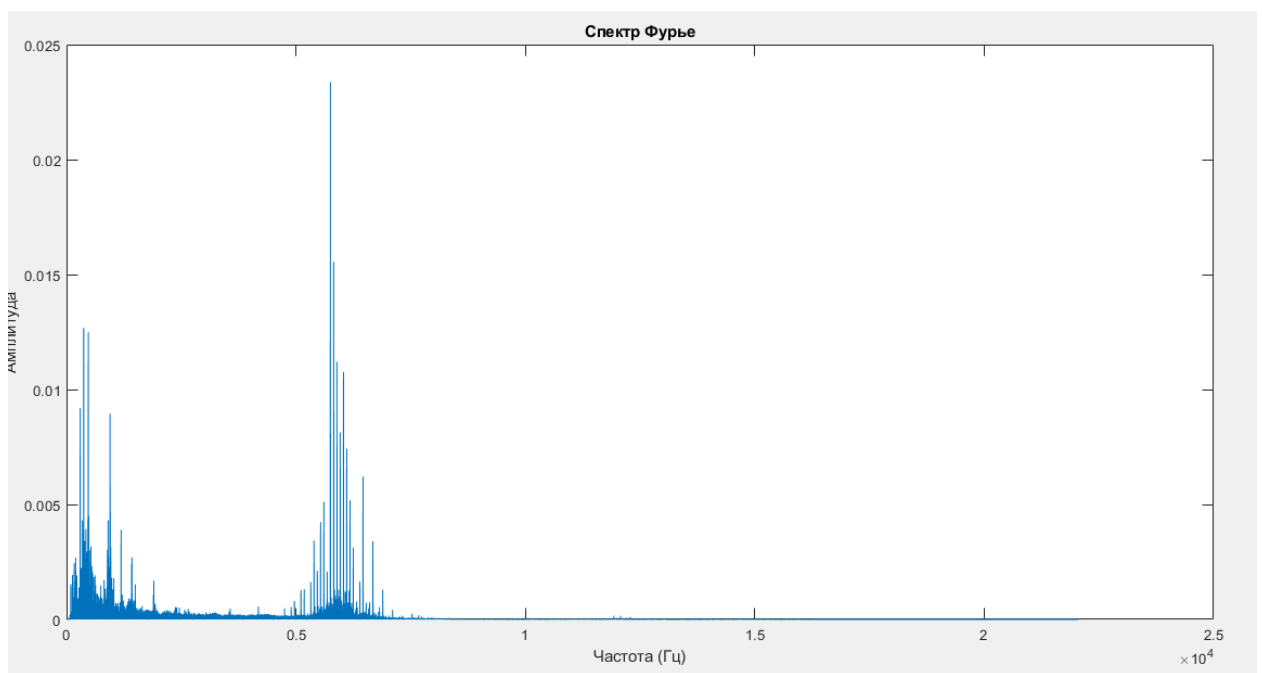


Рисунок 36 – Результат расчета параметров сигнала S_1

Данные по доминирующим частотам с графиков на рисунках 33 и 34 отображены в рисунках 37 и 38, где чётко прослеживается изменение частотного состава.

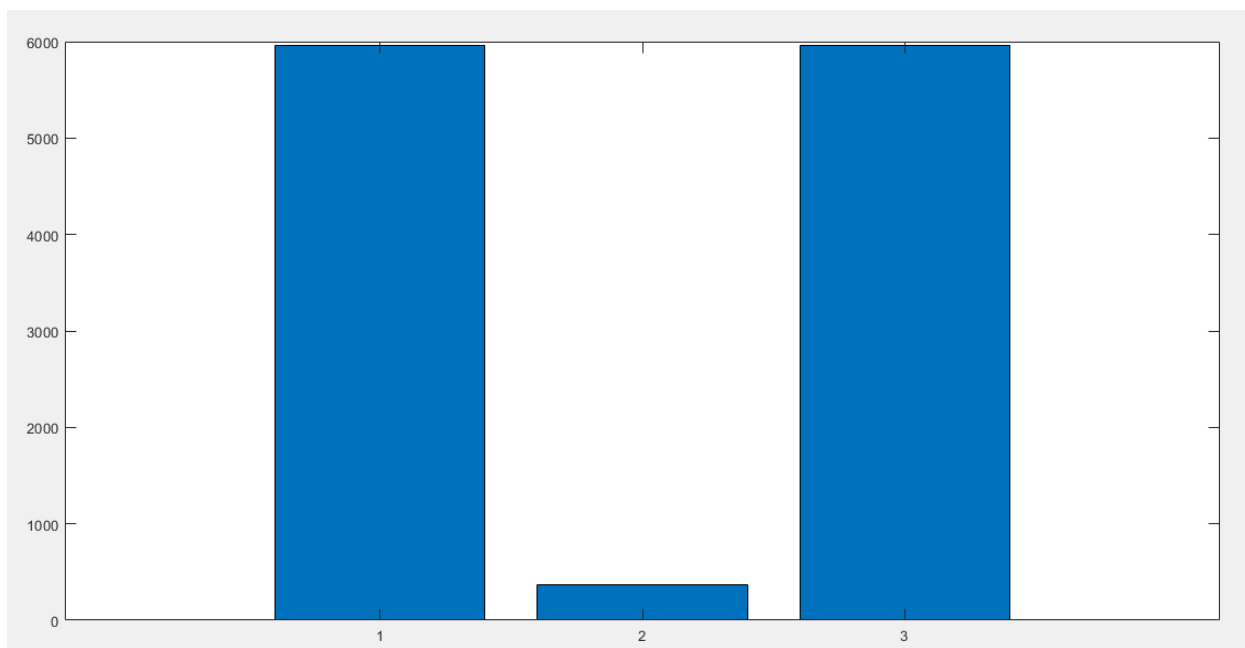


Рисунок 37 – Результат расчета параметров сигнала S_1

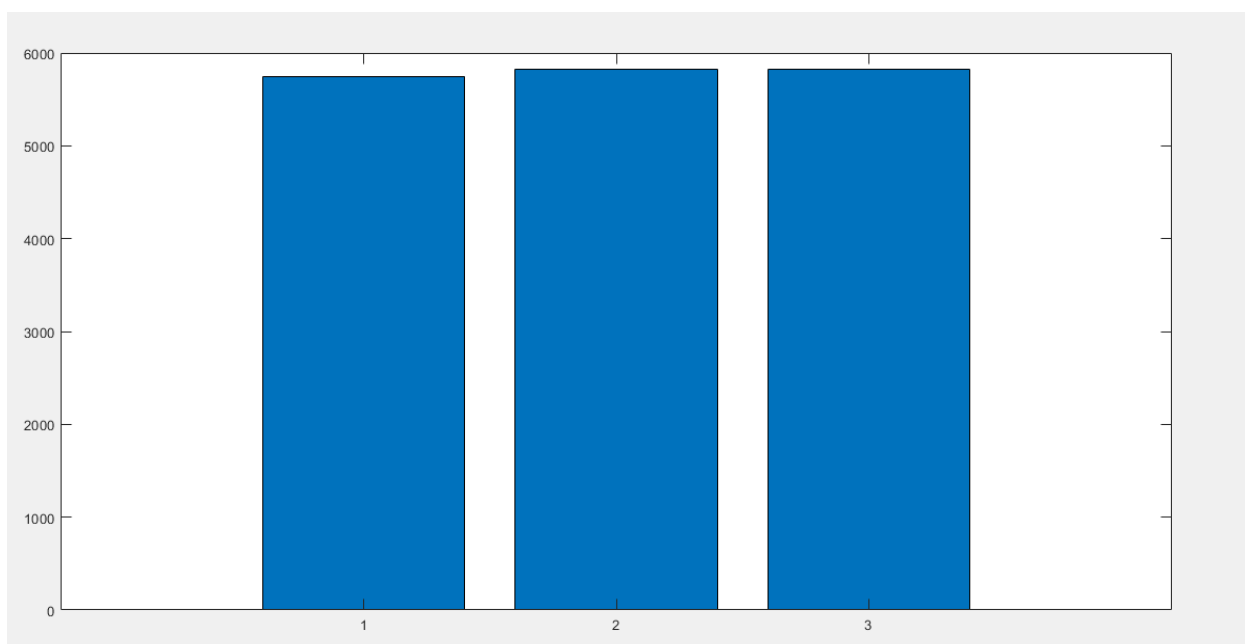


Рисунок 38 – Результат расчета параметров сигнала S_1

Отображение результатов в виде графиков временных сигналов позволяет отобразить акустические сигналы во времени для визуального анализа. К таким графикам относят спектрограммы - отображение частотного состава сигнала во времени (рисунки 39 и 40). Диаграммы рассеяния для выбранных информационных признаков в многомерном пространстве для визуальной оценки разделимости классов.

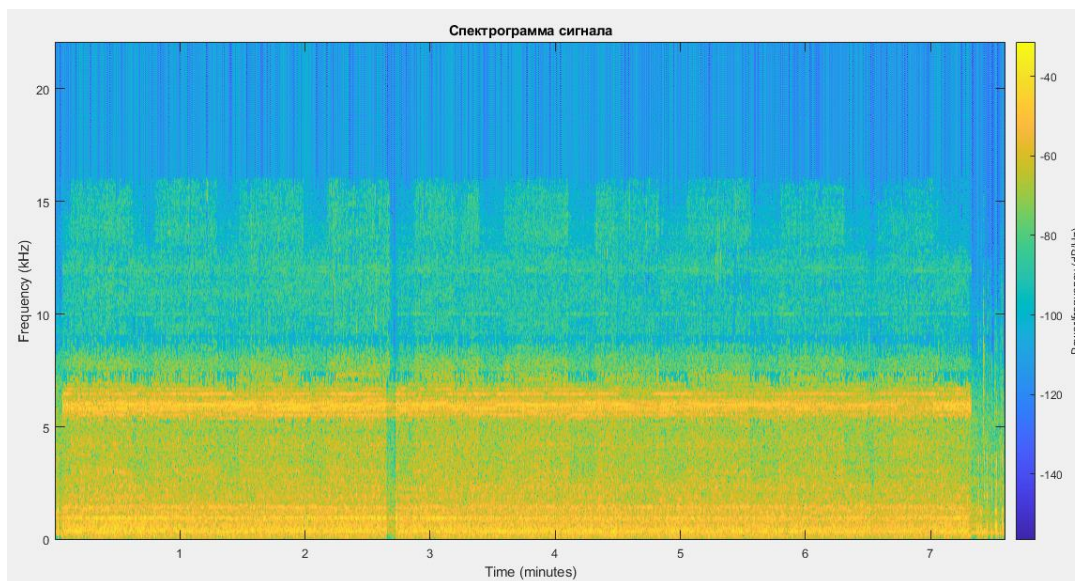


Рисунок 39 – Результат расчета параметров сигнала S_0

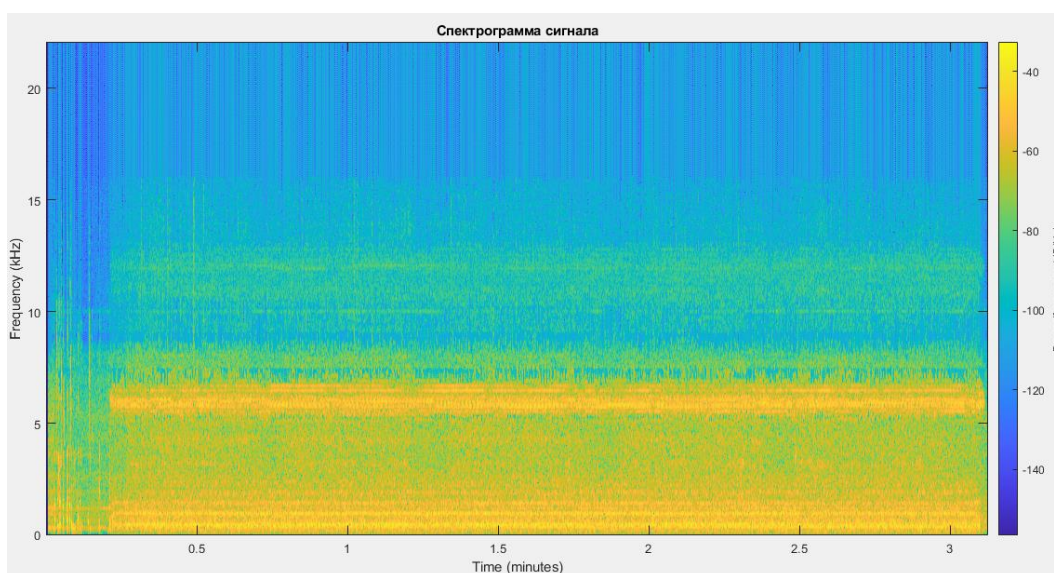


Рисунок 40 – Результат расчета параметров сигнала S_1

На графике для нового инструмента явно наблюдается модуляция на верхних частотах, которая пропадает при износе инструмента.

Как видно из рисунков 41 и 42, для изношенного резца кумулятивная дисперсия сигнала нарастает на порядок быстрее, чем для нового резца.

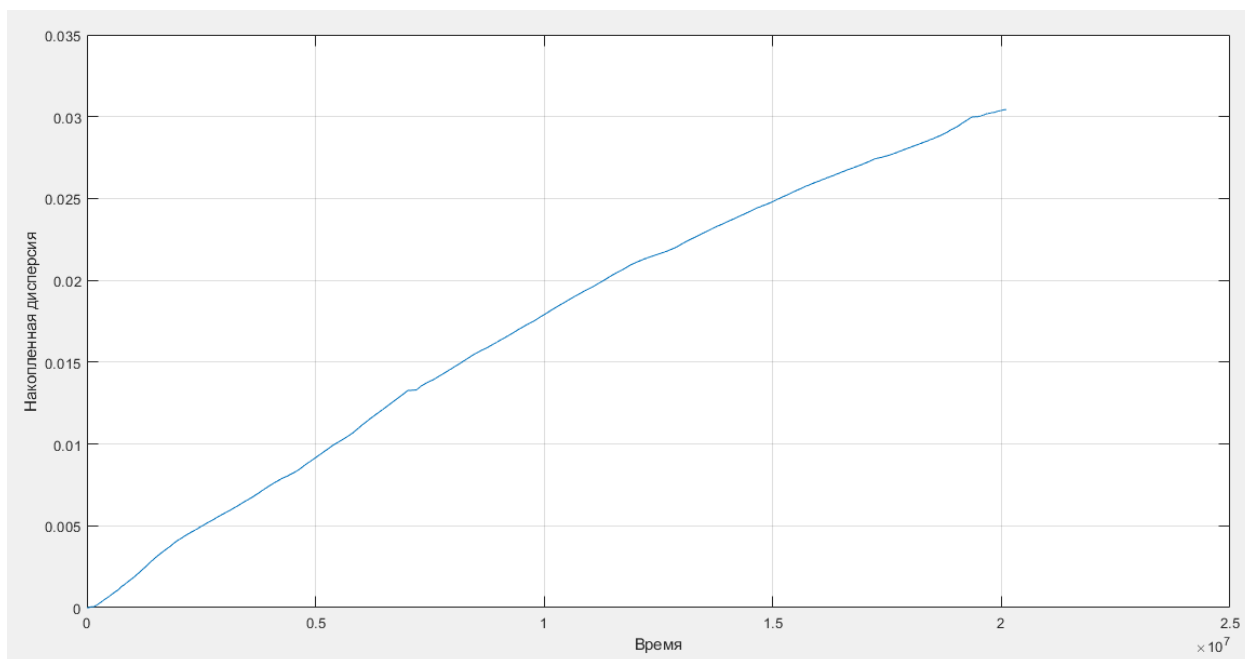


Рисунок 41 – Результат расчета параметров сигнала S_0

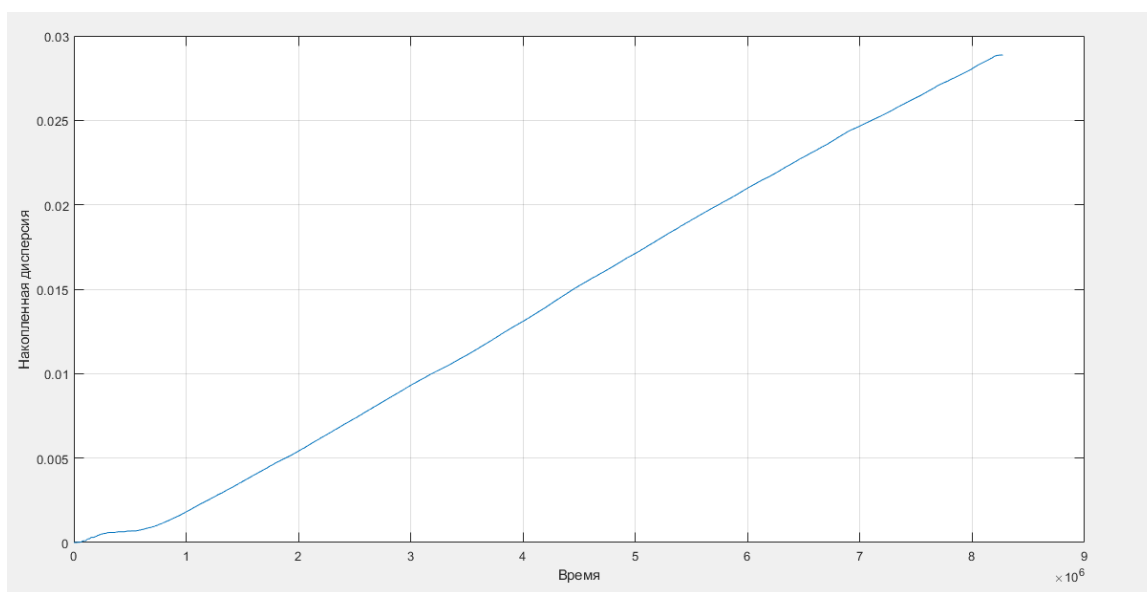


Рисунок 42 – Результат расчета параметров сигнала S_1

Как известно, при износе происходит расширение спектра колебаний, а значит и звука. Как видно из рисунков 43 и 44, для изношенного резца еще и распределение амплитуды на 20% больше, чем для нового резца.

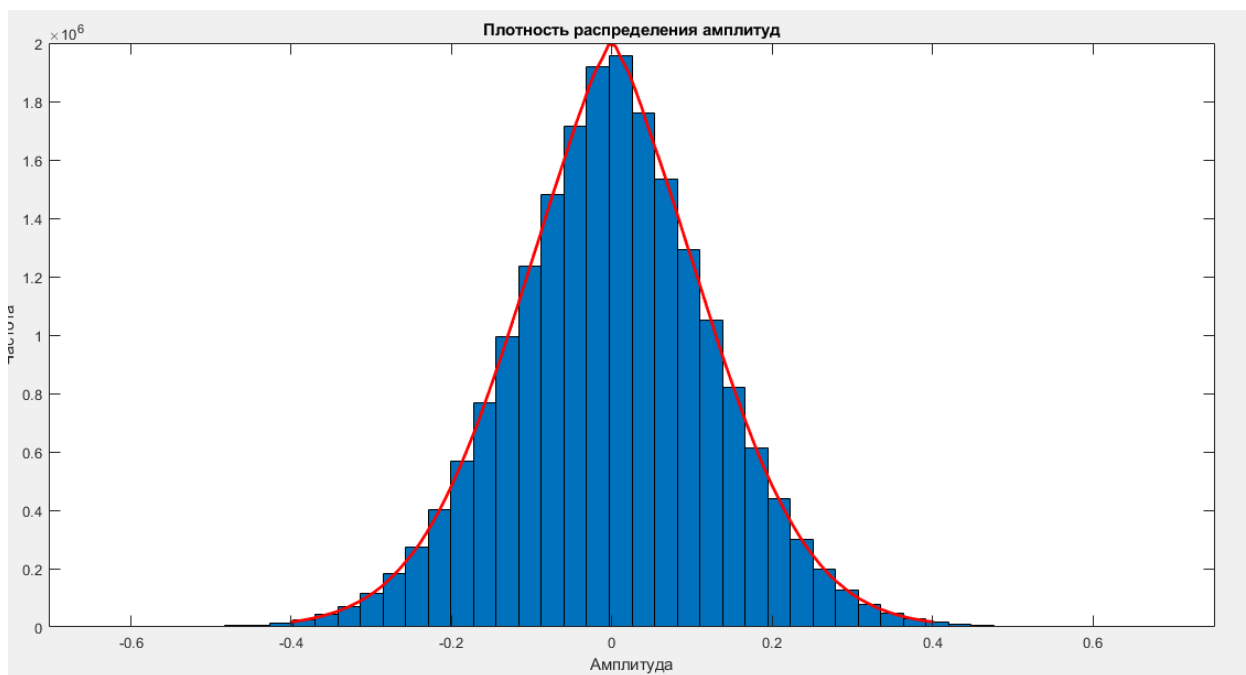


Рисунок 43 – Результат расчета параметров сигнала S_0

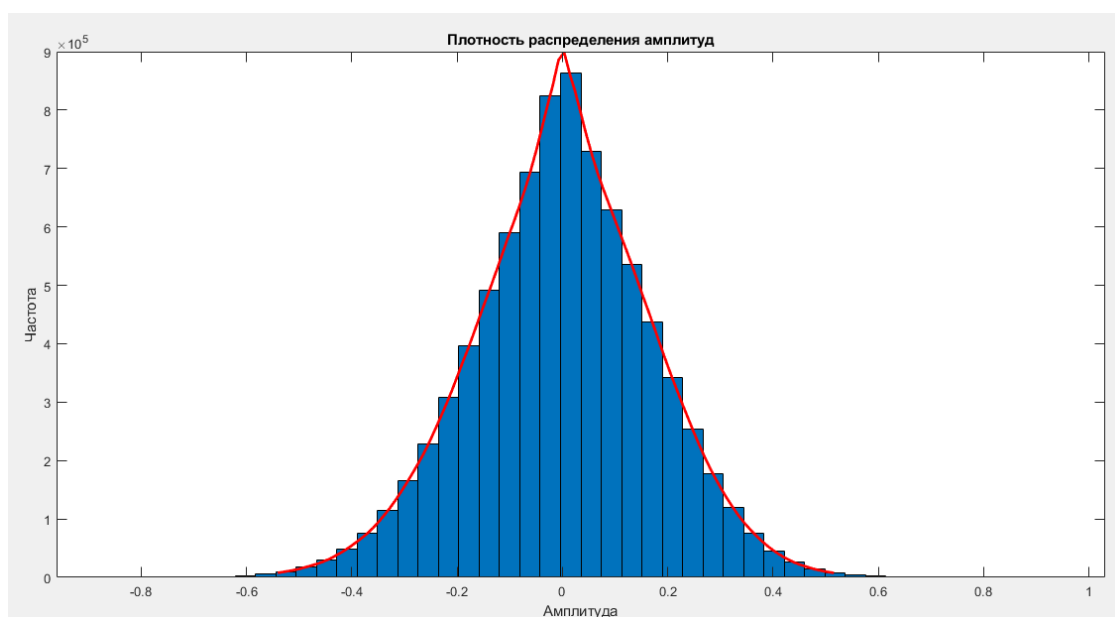


Рисунок 44 – Результат расчета параметров сигнала S_1

Показанные методы обработки сигнала обеспечивают необходимую информацию о контроле состояния инструмента.

Диагностика технологических процессов способна повысить эффективность машиностроительного производства. Она позволяет отслеживать в реальном времени износ режущего инструмента, размерную точность и качество поверхности [1, 2]. С её помощью можно заранее

вносить корректировки в технологический процесс для предотвращения брака.

Одним из видов диагностики является акустическая диагностика, основанная на записи звукового сигнала при резании материалов. На основе математической обработки звукового сигнала можно сделать вывод о состоянии технологического процесса.

Проведен эксперимент на токарном станке 16к20 с системой ЧПУ SZGH-CNC1000TDb Series. Материал заготовки – сталь 20, начальный диаметр 36 мм. Число оборотов шпинделя составляло 600 об/мин, подача 0,08 мм/об, глубина резания 0,5 мм. Всего сделано 10 проходов. В ходе обработки проводилась видеосъемка процесса на смартфон модели Honor x9b. Извлеченный из видео звуковой сигнал проанализирован в MATLAB. Для анализа использована одна (первая) дорожка из файла .mp3. Частота дискретизации сигнала 44100 Гц. Спектрограмма сигнала показана на рисунке 45.

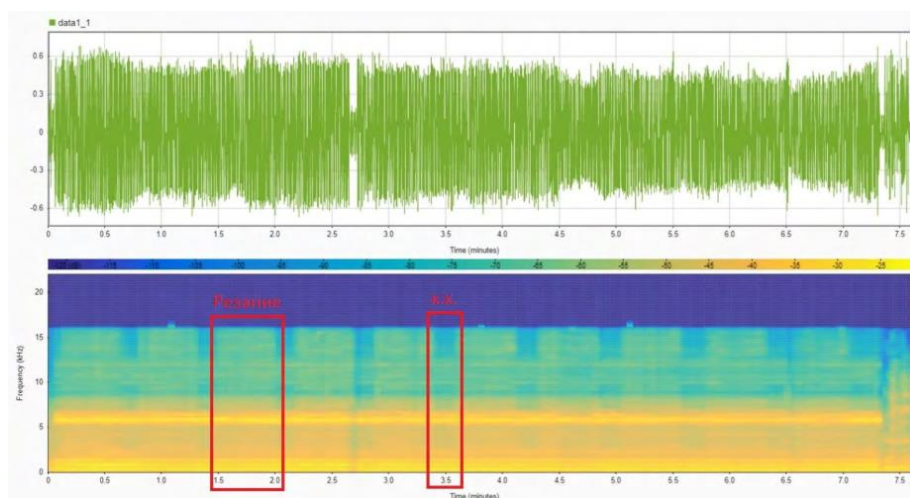


Рисунок 45 – Спектрограмма звукового сигнала

Как видно из рисунка 45, резание сопровождается усилением в спектре сигнала высокочастотных компонент.

Чтобы детально исследовать зависимость свойств сигнала от условий обработки, сигнал обработан следующим образом:

- сигнал отфильтрован высокочастотным фильтром с частотой среза 9 кГц. После этого в сигнале остались только компоненты частотой выше 9 кГц;
- сигнал разделен на последовательные участки длиной 1 сек. Внутри каждого участка рассчитана энергия сигнала как сумма квадратов значений сигнала;
- для каждого прохода найдено среднее значение энергии сигнала за время резания.

Результат представлен на рисунке 46.

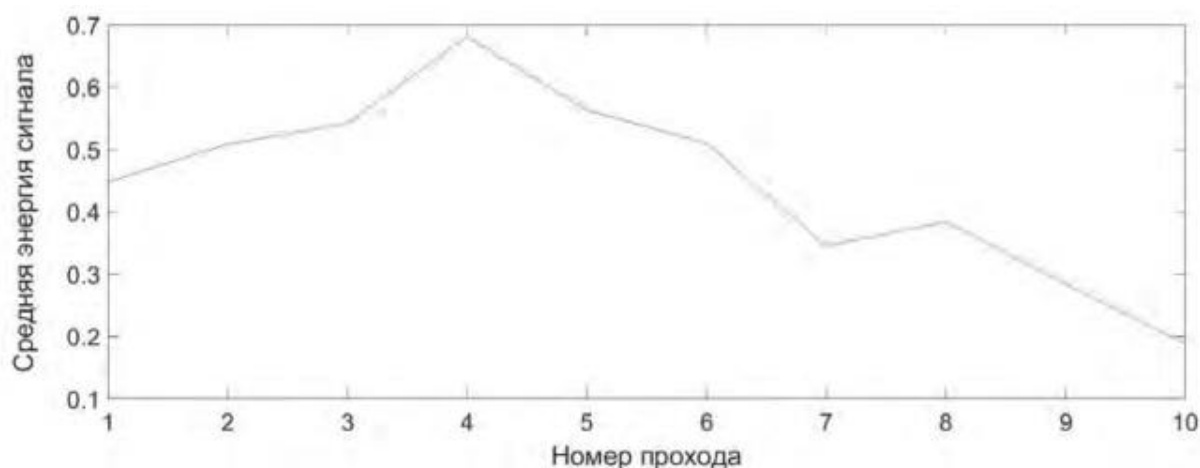


Рисунок 46 – Средняя энергия сигнала

Таким образом, средняя энергия сигнала растет до 4 прохода, а затем снижается. Значит, с помощью звукового сигнала можно делать вывод о состоянии процесса резания. В данном случае изменения связаны со снижением скорости резания, которая уменьшается вместе с уменьшением диаметра заготовки при неизменных оборотах шпинделя. Полученный результат может быть использован для разработки системы диагностики и управления процессом резания.

3.2 Выводы по итогам практической работы

- Определены методики замера акустического сигнала в процессе резания.

- Предложена методика замеров параметров звука при токарной обработке на станке 16K20 с числовым программным управлением.
- Предложены аппаратно –программные средства для получения и последующей обработки акустического сигнала в процессе резания.
- Получены экспериментальные данные по акустическим сигналам в процессе обработки.
- Проведено преобразование сигналов и расшифровка для получения информации по определению оптимальных режимов процессов токарной обработки.

Заключение

В работе выполнен анализ состояния вопроса. Проведен обзор технологических процессов механической обработки, в том числе токарных операций, реализуемых в производственных условиях ООО «Токарка». Определены основные технологические и технические сложности при механической обработке на станках с ЧПУ. Установлено, что основные проблемы, на решение которых должна быть направлена данная работа, связаны с механической обработкой на токарных станках заготовок из нержавеющей сталей, в том числе из жаропрочных. На практическом опыте показано, что значимым диагностическим фактором процесса резания

Выполнено теоретическое обоснование процессов. В частности, исследован процесс колебания и его влияние на формирование звуковой картинки. Также было подробно изучено влияние параметров режущего инструмента и режимов резания на изменения в звуковом фоне и вибрациях. Были подобраны оптимальные режимы резания в рамках отдельных тех. процессов, подробно исследованы вибрационные и виброакустические процессы, возникавшие в ходе токарной обработки.

Определена методика замера акустического сигнала, возникающего в ходе резания. В частности, протестирован процесс получения данных на токарном станке 16к20 с ЧПУ. Вся информация была собрана и расшифрована с целью определить оптимальные режимы резания для обработки того или иного типа заготовок. Были получены удовлетворительные результаты практической деятельности, а также определены следующие шаги для совершенствования процесса диагностики процесса резания посредством расшифровки вибрационных и виброакустических сигналов.

Список используемых источников

1. Гурин В.Д., Григорьев С.Н., Алешин С.В., Семенов В.А. Диагностирование состояния концевых фрез по силовым параметрам // ИТО: инструмент, технология, оборудование. – 2005. – № 6 (95). – С. 15-19.
2. Диагностика автоматизированного производства / С.Н. Григорьев, В.Д. Гурин, М.П. Козочкин и др.; под ред. С.Н. Григорьева. – М.: Машиностроение, 2011. – 600 с.
3. Игнатъев А.А., Добряков В.А., Захарченко М.Ю., Игнатъев С.А., Каракозова В.А., Березина Е.В. Автоматизированный неразрушающий контроль в системе мониторинга технологического процесса производства подшипников // Инженерный вестник Дона, 2021. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7193/.
4. Никитин Ю.Р., Абрамов И.В. Диагностика мехатронных систем: учебник - Электрон. Текстовые данные. - Саратов: Университетское образование, 2019. - 116 с.
5. Пономарев А.И., Игнатъев А.А. Контроль состояния инструмента при токарной обработке на основе оценки показателя колебательности динамической системы // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 3 (86). С. 19-24.
6. Черняева Е.В. Оценка состояния термообработанных сталей по сигналам акустической эмиссии. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Санкт Петербург, 2007, 17 с.
7. Формирование параметров шероховатости на основе корреляционных связей при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей / В. М. Давыдов, М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, А. В. Сарыгин // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2019. — Т. 15, № 6 (174). — С. 243–248.
8. Пономарев, Б. Б. Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании / Б. Б. Пономарев, Ши Хьен Нгуен //

Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2019. — № 3 (708). — С. 11–20. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-3-11-20>

9. Козлов, А.М. Повышение эффективности чистовой обработки вогнутых по-верхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с ЧПУ/ А.М. Козлов, Г.Е. Малютин// Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. Том VII. Коллективная монография. Под ред. Киричека А.В. - М.: Изда-тельский дом«Спектр», 2016. - С.66-123.

10. Григорьев С.Н., Гурин В.Д., Козочкин М.П., Кузовкин В.А., Мартинов Г.М., Сабиров Ф.С., Синопальников В.А., Филатов В.В. Диагностика автоматизированного производства. - М.: Машиностроение, 2011,- 600 с.

11. Остапчук А.К., Маслов Д.А., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю., Комиссаров А.Ю. Применение виброакустики для контроля износа режущего инструмента// Естественные и технические науки. 2009. №2. С. 266-268.

12. Анцев А.В., Янов Е.С., Губин В.Ю. Анализ параметров вибрационных сигналов во временном пространстве// Вестник Тульского госу-дарственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. научных трудов национальной научно-техн. конф. с еждународным уча-стием: «АПИР-24». Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. С. 188-192.

13. Контроль состояния режущего инструмента на основе анализа параметров вибрационных сигналов в частотном пространстве/ А.В. Ан-цев, Е.С. Янов Е.С., Х.Ч. Данг[и др.] // «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники», международная научно-техническая конференция. Брянск: Изд-во БГТУ, 2020. С. 308-312.

14. Гурин В.Д., Григорьев С.Н., Алешин С.В., Семенов В.А. Диагностирование состояния концевых фрез по силовым параметрам // ИТО: инструмент, технология, оборудование. – 2005. – № 6 (95). – С. 15-19.

15. Васин С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. Серия «Библиотека инструментальщика». М.: Машиностроение, 2006. 384 с.
16. Вибродиагностика : моногр. / Г. Ш. Розенберг, Е. З. Мадорский [и др.]; под ред. Г.Ш. Розенберга. СПб.: ПЭИПК, 2003. 284 с.
17. Хоменко А. П., Елисеев С. В., Засядко А. А. Формирование концепции вибродиагностических методов неразрушающего контроля. Современные представления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. №1.
18. Kek T., Grum J. Assessment of laser cutting quality using acoustic emission signals. Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering: The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing. Ljubljana. Slovenia, 2009, pp. 325–332.
19. Burnashov M.A., Prezhbilov A.N. Energeticheskii analiz protsessa nagreva ledianoi chastitsy pri vodoledianoi ochistke detalei mashin [The power analysis of process of heating of the ice particle at water ice cleaning of details]. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology]. 2014, no. 6(308), pp. 96–98.
20. Gimadeev, M. R. Cutting Forces and Roughness During Ball End Milling of Inclined Surfaces / M. R. Gimadeev, V. A. Stelmakov, V. V. Gusliakov // In: Proc. the 6th International Conference on Industrial Engineering – 2021. - Vol. II. - P. 926–937. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_107
21. Amal, T. S. Machining parameters optimization in end milling of Ti6Al4V using Taguchi method / T. S. Amal, V. Vidya, A. K. Abraham // International Journal of Research in Engineering and Technology. - 2015. - Vol. 3. - P. 31–40.
22. Xiurong Zhu. Process analysis and parameter optimization of five axis NC machine for machining complex curved surface impellers / Xiurong Zhu, Yeu Wang // In: Proc. 2019 IEEE Int. Conf. on Intelligent Transportation, Big Data

& Smart City (ICITBS). — 2019. — P. 122–124.
<https://doi.org/10.1109/ICITBS.2019.00036>

23. M. R. Gimadeev, A. A. Li. Analysis of automated surface roughness parameter support systems based on dynamic monitoring. *Advanced Engineering Research*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 116–129. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129>

24. Optimization of milling parameters of EN8 using Taguchi methodology / R. Ashok Raj, T. Parun, K. Sivaraj, T. T. M. Kannan // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. — 2013. — Vol. 2. — P. 202–208.