

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

На правах рукописи



ДАНГ ХЫУ ЧОНГ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНЦЕВОГО И ТОРЦЕВОГО
ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ИЗНОСА ФРЕЗ
ПО УРОВНЮ ВИБРАЦИИ**

Специальность: 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
доцент А.В. Анцев

Тула 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ..... | 10 |
| 1.1 Влияние вибрации технологической системы на стойкость режущего инструмента, производительность обработки и качество обработанной поверхности..... | 10 |
| 1.2 Факторы, влияющие на вибрацию в процессе фрезерования..... | 13 |
| 1.2.1 Зависимость вибрации от режимов резания..... | 13 |
| 1.2.2 Зависимость вибрации от геометрии инструмента..... | 14 |
| 1.2.3 Зависимость вибрации от силы резания..... | 15 |
| 1.2.4 Зависимость вибрации от износа инструмента..... | 19 |
| 1.3 Методы контроля вибрации при фрезеровании..... | 22 |
| 1.4 Анализ методов интеллектуального управления режимами резания | 27 |
| 1.5 Выводы..... | 31 |
| 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ ВИБРАЦИИ ОТ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА..... | 33 |
| 2.1 Зависимость между амплитудой вибрации и износом режущего инструмента..... | 35 |
| 2.2 Определение силы резания при фрезеровании..... | 38 |
| 2.2.1 Определение силы резания при торцевом фрезеровании..... | 39 |
| 2.2.2 Определение силы резания при концевом фрезеровании..... | 42 |
| 2.3 Проверка предложенной модели..... | 45 |
| 2.3.1 Моделирование касательной составляющей силы резания..... | 45 |
| 2.3.2 Моделирование амплитуды вибрации..... | 48 |
| 2.4 Выводы..... | 51 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3 | КОНТРОЛЬ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ ПО УРОВНЮ ВИБРАЦИИ | 53 |
| 3.1 | Устройство контроля вибрации режущего инструмента при фрезеровании | 53 |
| 3.2 | Экспериментальная проверка устройства контроля вибрации режущего инструмента при фрезеровании | 60 |
| 3.3 | Методы обработки сигналов вибрации при контроле состояния режущего инструмента при фрезеровании | 64 |
| 3.3.1 | Обработка сигнала вибрации во временном пространстве | 65 |
| 3.3.2 | Обработка сигнала вибрации в частотном пространстве | 75 |
| 3.3.3 | Обработка сигнала вибрации на основе метода непрерывного вейвлет-анализа | 81 |
| 3.4 | Методика определения стадии изнашивания фрезы с использованием вибропаспорта системы СПИЗ | 85 |
| 3.5 | Выводы | 89 |
| 4 | НАЗНАЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ С УЧЕТОМ УРОВНЯ ВИБРАЦИИ | 91 |
| 4.1 | Разработка методики назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации | 91 |
| 4.1.1 | Определение целевой функции | 91 |
| 4.1.2 | Определение граничных условий модели | 95 |
| 4.1.3 | Разработка алгоритма назначения рациональных режимов резания при фрезеровании на основе метода роя частиц | 97 |
| 4.2 | Оценка параметров модели назначения рациональных режимов резания при фрезеровании | 102 |
| 4.2.1 | Построение зависимости шероховатости обработанной поверхности от режимов резания | 104 |
| 4.2.2 | Построение зависимости периода стойкости режущего инструмента от режима резания | 107 |

| | |
|---|-----|
| 4.2.3 Построение зависимости уровня вибрации фрезы от режима резания | 109 |
| 4.3 Система назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации..... | 111 |
| 4.4 Практическая реализация результатов диссертационного исследования | 114 |
| 4.5 Выводы..... | 116 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 118 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 121 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ | 140 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В современном машиностроении фрезерование является одним из основных методов обработки металлов резанием. Обработка резанием, особенно фрезерованием, характеризуется наличием тепловыделений, вибрации, магнитных и электрических полей и других факторов, снижающих как точность изготовления деталей на финишных операциях, так и точность измерений параметров компонентов технологической системы, включая режущий инструмент. Среди указанных факторов выделяется вибрация, из-за которой снижается период стойкости фрез, особенно в случае концевом и торцевом фрезерования. Это приводит к снижению периодичности восстановления фрез, которое осуществляется заточкой, заменой отказавшего лезвия и т. п., и к увеличению связанных с восстановлением затрат.

Для компенсации негативного влияния вибрации в процессе резания предприятия вынуждены занижать режимы резания, что ведет к снижению производительности обработки и повышению ее себестоимости и, как следствие, к снижению конкурентоспособности выпускаемой продукции. Уровень вибрации в процессе резания может служить методом косвенного контроля состояния режущего инструмента и критерием его отказа. Поэтому определение рациональных режимов резания при концевом и торцевом фрезеровании и разработка средств вибродиагностики в зоне резания является научной задачей, имеющей важное значение для развития машиностроения и требующей системного научно-обоснованного решения.

Степень разработанности темы. Исследованиями процессов механической обработки, в том числе фрезерования, с целью назначения рациональных режимов резания с учетом уровня вибрации технологической системы занимались Бармин Б.П., Безъязычный В.Ф., Бобров В.Ф., Васин Л.А., Васин С.А., Григорьев С.Н., Жарков И.Г., Ивахненко А.Г., Кабалдин Ю.Г., Козлов А.М., Козочкин М.П., Куц В.В., Макаров А.Д., Мартинов Г.М., Пасько Н.И., Подураев В.Н.,

Суслов А.Г., ХаеТ Г.Л., Шадский Г.В., Ямников А.С., Ямникова О.А., Altintas Y., Stephenson D.A. и др. ученые.

Однако, несмотря на многочисленные исследования в области фрезерной обработки, задача назначения рациональных режимов с учетом уровня вибрации и создания средств вибродиагностики состояния режущего инструмента до настоящего времени не нашла окончательного решения.

Цель работы: повышение эффективности концевое и торцевого фрезерования на основе назначения рациональных режимов резания с учетом уровня вибрации и косвенного контроля состояния режущего инструмента.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи:**

- 1) анализ методов повышения эффективности фрезерования на машиностроительных предприятиях;
- 2) установление взаимосвязи вибрации режущего инструмента в процессе концевое и торцевого фрезерования от величины его износа;
- 3) разработка устройства и методики контроля износа фрез по уровню вибрации в процессе концевое и торцевого фрезерования;
- 4) разработка методики назначения рациональных режимов резания при концевом и торцевом фрезеровании с учетом уровня вибрации и реализующего ее программного обеспечения;
- 5) практическая реализация результатов научных исследований на машиностроительном предприятии.

Объект исследования – процесс концевое и торцевого фрезерования.

Предмет исследования – зависимость уровня вибрации режущего инструмента в процессе концевое и торцевого фрезерования от величины его износа.

Соответствие паспорту специальности – содержание диссертации соответствует п. 2 «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий» Паспорта научной специальности 05.02.07 – «Тех-

нология и оборудование механической и физико-технической обработки» (технические науки).

Научная новизна результатов исследования заключается в раскрытии взаимосвязи между вибрацией, основными параметрами процесса концевом и торцевом фрезеровании и износом фрезы на основе учета изменения главной составляющей силы резания по мере изнашивания фрезы путем включения в нее помимо касательной составляющей силы резания также силы трения на фаске износа по задней поверхности фрезы, пропорциональной твердости материала, ширине и длине фаски износа режущей кромки фрезы по задней поверхности и коэффициенту трения скольжения между заготовкой и фрезой.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработанные методики назначения рациональных режимов резания при концевом и торцевом фрезеровании и контроля износа фрез по уровню вибрации режущего инструмента в процессе фрезерования углубляют и конкретизируют область применения методов технологии и оборудования механической и физико-технической обработки, как области науки и техники, в сфере решения задач повышения эффективности фрезерной обработки.

Практическая значимость работы заключается в создании программного обеспечения для назначения рациональных режимов резания при концевом и торцевом фрезеровании и оценки состояния фрезы в процессе обработки путем контроля вибрации непосредственно в зоне обработки.

Реализация работы. Результаты данной работы внедрены в ЗАО «ХИМПРИБОР-1» г. Тулы при снижении затрат на фрезерную обработку.

Методология и методы диссертационного исследования. При выполнении теоретических исследований использовались положения теории резания, технологии машиностроения, теории автоматического управления и искусственного интеллекта, законов теоретической механики, основных положений теории колебаний.

Экспериментальные исследования базировались на методах математиче-

ской статистики, теории планирования экспериментов и методах обработки экспериментальных данных. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры «Технология машиностроения» ТулГУ с использованием фрезерного станка с ЧПУ Topper TMV720AD, измерительной видеосистемы Starrett MV300, мобильного профилометра Hommel Tester T500, акселерометров ZETLab BC110, анализатора спектра Zet017-U4 фирмы ZETLab, а также разработанной автором диссертации экспериментальной установки для фрезерных станков.

Положения, выносимые на защиту:

- зависимость уровня вибрации режущего инструмента в процессе концевом и торцевого фрезерования от его износа;
- методика извлечения из сигналов вибрации информации, отображающей изнашивание режущей части инструмента;
- устройство контроля вибрации в процессе концевом и торцевого фрезерования, размещаемое на державке режущего инструмента;
- методика назначения рациональных режимов резания при концевом и торцевом фрезеровании с учетом уровня вибрации.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обусловлена использованием фундаментальных теоретических положений, соответствием разработанных математических моделей реальным процессам, использованием объективных исходных данных о надежности фрез, полученных в производственных условиях и в ходе стойкостных испытаний, положительными результатами практического использования.

Личный вклад автора. В диссертации приведены результаты, полученные автором лично или при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке задач, выполнении экспериментальных работ и моделировании, подготовке графических и табличных материалов, получении основных расчетных выражений, анализе экспериментальных данных, сопоставлении их с расчетными зависимостями и подготовке публикаций по результатам работы.

Апробация результатов. Основные положения работы докладывались на Международных научно-технических конференциях 4th International Conference on

Green Technology and Sustainable Development (GTSD) (г. Хо Ши Мин, Вьетнам, 2018 г.), «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники» (г. Брянск, 2020 г.), на Всероссийских и национальных научно-практических конференциях «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (г. Тула, 2019 г.), научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий» (г. Ростов-на-Дону, 2020 г.), Региональной студенческой конференции «Современные технологии в машиностроении» (г. Тула, 2018, 2019, 2020 гг.), а также на научной конференции профессорско-преподавательского состава ТулГУ (г. Тула, 2017–2020 гг.).

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 9 научных работ (2 единолично, остальные – в соавторстве), в том числе 3 статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 статья в издании, индексируемом в информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и Scopus.

Диссертационная работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-38-00849 «Исследование влияния износа режущего инструмента на вибрацию системы "станок – приспособление – инструмент – заготовка"».

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 104 страницы машинописного текста, 10 таблиц, 64 рисунка, список литературы из 163 наименований и приложения на 1 странице. Общий объём диссертации – 140 страниц.

1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

1.1 Влияние вибрации технологической системы на стойкость режущего инструмента, производительность обработки и качество обработанной поверхности

Научные исследования вибрации в процессе обработки металлов резанием, несмотря на их значительное количество, до настоящего времени не потеряли актуальность. Актуальность изучения вибрации в процессе обработки резанием на протяжении многих лет объясняется двумя основными факторами:

1. Технологическая система операции содержит большое количество элементов, которые составляют динамическую систему и определяют ее поведение: режущий инструмент, хвостовик режущего инструмента, материал заготовки, кинематика станка, режимы резания и т. д. Причины возникновения вибрации до сих пор являются предметом многих исследований, хотя регенеративный эффект, как основная причина появления вибрации, был выявлен и изучен достаточно давно. Кроме того, проблема вибрации возникает в различных процессах механической обработки металлов, имеющих свою специфику: фрезерование, точение, сверление, растачивание, протягивание, шлифование.

2. Возникновение вибрации имеет много негативных последствий: плохое качество обработанной поверхности, низкая точность деталей, сокращение периода стойкости режущего инструмента, повреждение станка, снижение производительности обработки и т. д.

В технологической системе (ТС) «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) есть два основных источника вибрации (рисунок 1.1): автоко-

лебания и вынужденные колебания (изнашивание режущего инструмента, прерывистый характер процесса резания, дисбаланс вращающихся частей заготовки, режущего инструмента и т. д.). Для точного изучения негативного влияния вибрации на процесс обработки металла было проведено много исследований, которые позволили ответить на основные вопросы: влияние вибрации на стойкость режущего инструмента, производительность обработки и качество обработанной поверхности. Изучение таких вопросов отражается в работах В.Н. Подураева [84], А.И. Исеева, В.С. Анохина [50], А.И. Маркова [69], Н.И. Резникова [91], М.С. Нерубая [76], Г.Н. Зайцева, В.К. Федюкина, С.А. Любомудрова [46], М.Я. Израйловича, А.Н. Обухова [47], Ю.И. Городецкого, С.Н. Стребуляева, Ю.Е. Майорова [34], Г.Т. Авдониной, А.В. Алексеева [1], В.Д. Мартынова, И.Ф. Олышанского, В.Л. Заковоротного [88], А.С. Ямникова [105], О.А. Ямниковой [106], Л.А. Васина [25], С.А. Васина [26, 27], М.П. Козочкина [60] и многих других авторов.

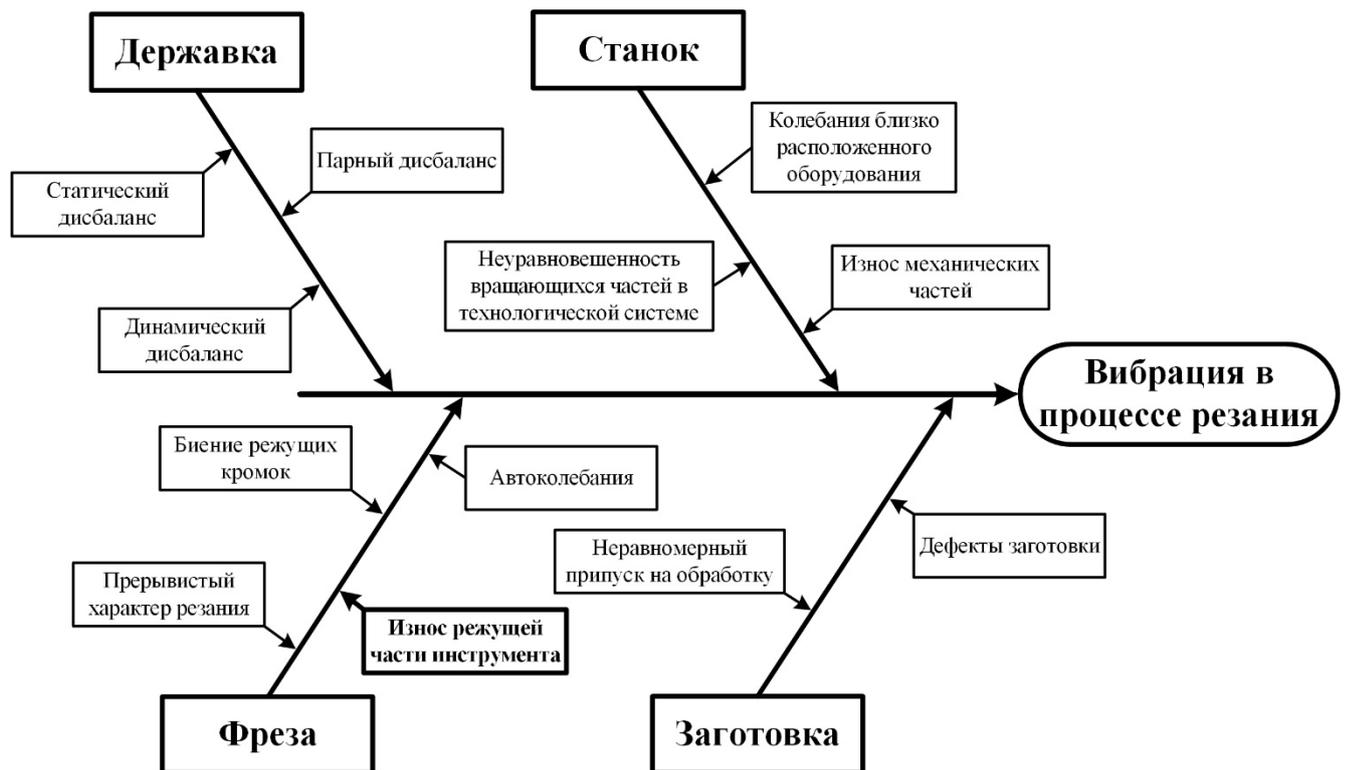


Рисунок 1.1 – Источники вибрации в технологических системах и причины ее появления

Как отмечали Т. Канеко, Г. Кинтана, Х. Сато, И. Тани, М. О-Хори, Ж. Сиурана [145, 150], регенеративная вибрация вследствие автоколебаний вызывается

волнистостью поверхности заготовки. При этом инструмент вибрирует за счет сил резания, создаваемых в процессе съема материала и оставляет волнистую поверхность на заготовке. Следующий проход по этой волнистой поверхности создает новую волнистую поверхность. Из-за разности фаз между двумя последовательными волнами толщина стружки и силы резания могут значительно отличаться. Когда осевая глубина резания превышает определенный уровень, то эффект становится доминирующим и регенеративная вибрация возрастает.

В работах [48, 49] проведены исследования вибрации в металлорежущих станках и основных путей ее предотвращения. В результате ряда экспериментов было предложено объяснение механизма формирования волнистости обрабатываемой поверхности и влияния волнистости на процесс обработки за счет периодического изменения кинематических геометрических параметров режущих инструментов (рисунок 1.2), приводящего к соответствующим колебаниям величины силы резания.

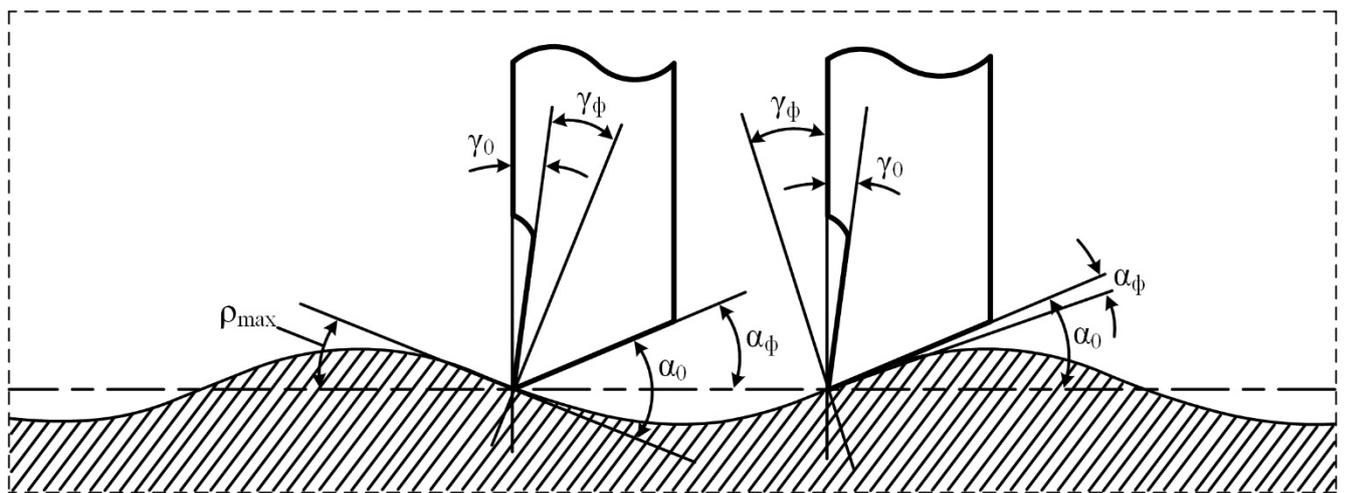


Рисунок 1.2 – Трансформация кинематической геометрии инструмента вследствие волнистости обрабатываемой поверхности во время обработки; углы с индексом

0 – углы заточки инструмента, углы с индексом φ – фактические углы при резании; угол ρ_{\max} – наибольшая крутизна поверхностных волн; $\gamma_{\phi} = \gamma_0 \pm \rho$;

$$\alpha_{\phi} = \alpha_0 \pm \rho$$

Регенеративная вибрация является наиболее распространенной формой самовозбуждающейся вибрации. В процессе фрезерования следующие слишком тонкие

срезы воздействуют на волнистую поверхность и создают новую волнистую поверхность. Толщина стружки и, следовательно, сила на режущем инструменте изменяются из-за разности фаз между волнами, оставленными предыдущими зубьями [108, 109, 159].

Износ режущей части инструмента, в отличие от остальных причин появления вибрации, меняется в процессе обработки и должен быть учтен при назначении рациональных режимов резания (см. рисунок 1.1).

1.2 Факторы, влияющие на вибрацию в процессе фрезерования

1.2.1 Зависимость вибрации от режимов резания

Определение оптимальных режимов обработки и контроль вибрации при высокоскоростном фрезеровании является важной технико-экономической задачей. Анализ влияния различных параметров на результат процесса резания показывает, что наиболее информативными параметрами, характеризующими условия резания, являются колебания скорости резания и толщины среза, которые оказывают значительное влияние на величину изменения колебаний силы резания.

А.И. Кашириным [53] рассматривалась нелинейность зависимости силы трения стружки о переднюю поверхность инструмента от скорости резания, связанная с зоной наростообразования и тепловыми процессами и приводящая к появлению автоколебаний.

Авторы работ [1, 52] изучали зависимость вибрации от величины подачи, а в работе [22] исследовалось влияние глубины резания на развитие в технологической системе операции устойчивой вибрации. В работе [128] предложен способ определения критерия виброустойчивости процесса резания в зависимости от ширины среза и скорости резания.

И.С. Штейнберг, В.М. Свинин [94, 103] отметили, что причиной появления вибрации является периодический срыв нароста. По этой причине существенным средством снижения вибрации, по их мнению, является выход величины скорости

резания из диапазона скоростей резания, вызывающих наростообразование.

Основные пути для выбора рациональных условий при токарной и фрезерной обработках были исследованы А.И. Исаевым, Н.Н. Зоревым, Л.К. Кучмой и С.Г. Кондрашовым [51, 62].

Использование процесса резания с переменной скоростью для устранения вибрации является перспективным подходом, и поэтому опубликованные работы по этому вопросу требуют отдельного изучения. Большая часть исследований [125, 129, 151, 155], затронувших данное понятие, выполнена для процесса резания с использованием однолезвийных инструментов. В процессе торцевого фрезерования Н. Дж. Фу [122] показал, что автоколебания, возникающие при резании с постоянной скоростью, могут подавляться с помощью непрерывно меняющейся частоты вращения шпинделя в течение одного оборота инструмента. В работе [154] исследована возможность обеспечения переменной частоты вращения с точки зрения управления двигателем с помощью компьютерного моделирования. Результаты показали, что для управления вибрацией в процессе торцевого фрезерования целесообразно использовать резание с переменной скоростью.

Аналогичные результаты получил С.К. Лин [137]. В его работе был представлен подход с переменной скоростью резания для управления вибрацией в процессе торцевого фрезерования. Установлено, что интенсивная вибрация появляется во время резания на постоянной скорости и может быть устранена непрерывным изменением частоты вращения шпинделя. Изменение скорости резания по простой синусоидальной траектории повышает устойчивость технологической системы к самовозбуждающимся колебаниям в широком диапазоне номинальной частоты вращения шпинделя и динамики технологической системы.

1.2.2 Зависимость вибрации от геометрии инструмента

Сила резания, и, соответственно, амплитуда вибрации снижается по мере увеличения переднего угла γ . Уменьшение заднего угла α приводит к уменьше-

нию амплитуды низкочастотных радиальных колебаний [90, 92]. Указанный эффект можно достигнуть путем нанесения на задней грани резца специальной виброгасящей фаски (рисунок 1.3).

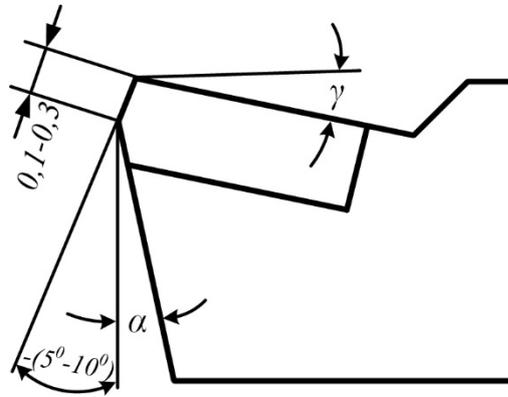


Рисунок 1.3 – Геометрия резца с виброгасящей фаской

Ю.Т. Межевой [72] отрицал видимое влияние изменений рабочих углов инструмента во время резания на интенсивность вибрации.

В своих работах И.И. Ильницкий [48], А.И. Каширин [53] и Л.Ц. Маркович [70] связывали вибрацию в процессе резания в том числе с колебаниями силы резания из-за изменения кинематических углов резания, например, изменение заднего угла вызывает переменную силу трения.

1.2.3 Зависимость вибрации от силы резания

Взаимосвязь парциальных систем в замкнутой упругой системе СПИЗ выполняется через зону резания и заменяема действием сил резания. Модель механической обработки с неустойчивым процессом резания была рассмотрена в работах [29, 34, 35, 60]. Изменения силы резания и, соответственно, частота вибрации при неустойчивом процессе резания будет зависеть от скорости резания, а толщина срезаемого слоя и жесткость станка – определять амплитуду вибрации.

Процесс резания вызывает вынужденную вибрацию вследствие изменений силы резания на переходном участке, особенно в случае прерывистого резания. Частота вынужденной вибрации при фрезеровании зависит от частоты вращения ин-

струмента/шпинделя и числа зубьев инструмента, таким образом, вынужденная частота легко изменяется путем регулирования частоты вращения шпинделя или изменения числа зубьев инструмента.

Для случая концевой фрезерования в работе [115] предлагается принципиальная схема, показанная на рисунке 1.4. В соответствии с предложенной схемой фреза рассматривается в качестве сплошного вала, на который действуют силы упругости, сопротивления и резания.

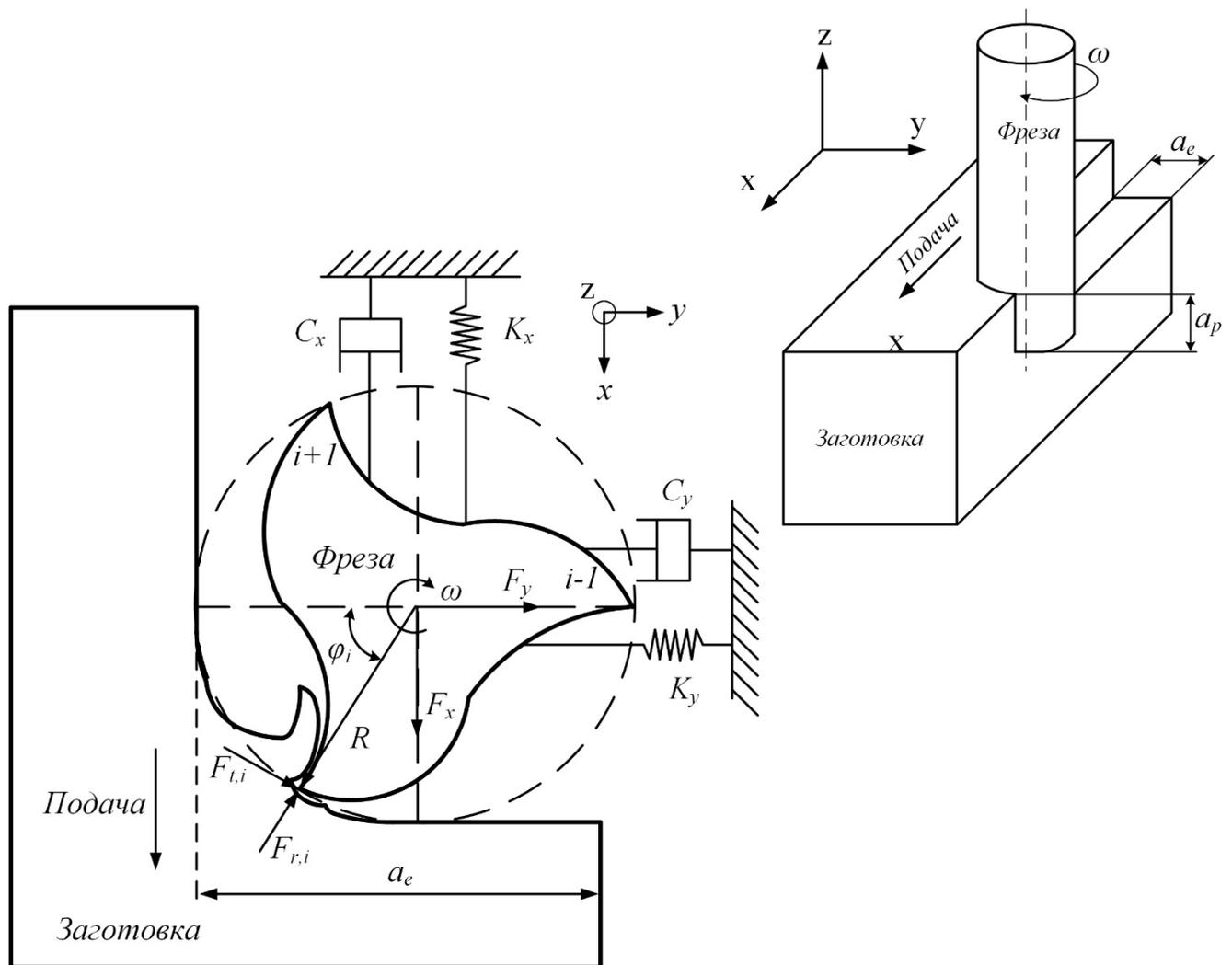


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема доминирующей колебательной системы

При концевой и торцевой обработке колебания вдоль осей X и Y на порядок меньше колебаний вдоль оси Z из-за существенно большей жесткости системы СПИЗ в последнем направлении, а осевая составляющая силы резания, как правило, меньше радиальной и касательной. При этом в процессе фрезерования концевыми

и торцевыми фрезами основная доля колебаний (до 80 %) приходится на режущий инструмент [66].

В работах [65, 78, 157] проведены исследования частоты колебаний режущего инструмента по нормали к обрабатываемой поверхности от частоты изменения толщины среза.

В работах [26, 33, 153] показано, что основной причиной вибрации режущего инструмента являются колебания силы резания, возникающие из-за изменения глубины резания в процессе обработки. Данное колебание продолжает вызывать дополнительные колебания силы резания. Колебания силы резания также создают волны на поверхности обработки и таким образом вызывают колебания глубины резания.

Динамические колебания силы резания и инструмента относительно обрабатываемой детали происходят во время всего процесса обработки, поскольку заготовка и инструмент не являются абсолютно жесткими. Это относительное движение оставляет волнистость на обрабатываемой поверхности с амплитудой y_i . Волнистость поверхности, образованная инструментом, удаляется последующим зубом (при фрезеровании) или инструментом во время следующего оборота заготовки (при токарной обработке), что приводит к дальнейшему колебанию амплитуды y_{i-1} (рисунок 1.5) [153].

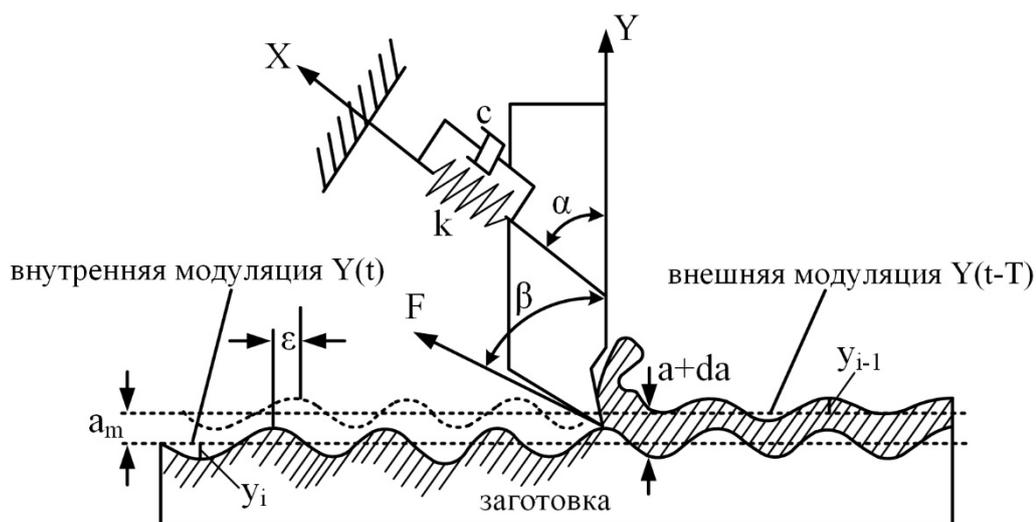


Рисунок 1.5 – Схема регенеративной вибрации при обработке волнистой поверхности

Зуб, обрабатывающий волнистую поверхность, испытывает переменную силу, которая вызывает дополнительную вибрацию инструмента. В ряде случаев фазовой зависимости между силой резания и поверхностными колебаниями происходит увеличение амплитуды колебаний или возникновение регенеративной вибрации [83].

Дж. Тласти предложил простой анализ, предполагающий, что сила резания пропорциональна толщине недеформированной стружки [156]. Вибрация инструмента в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, во время i -го реза

$$y_i = y \cdot \sin \omega t = x_i \cos \omega t \quad (1.1)$$

и среднее изменение толщины стружки

$$a = a_m + da = a_m + y_{i-1} - y_i = a_m + (x_{i-1} - x_i) \cos \alpha, \quad (1.2)$$

где da – переменная составляющая толщины стружки, y_{i-1} – амплитуда волнистости поверхности.

Величина изменения силы резания зависит от относительного движения кромки режущего инструмента и поверхности заготовки и от угла между силой резания и направлением главной вибрации. Сила на любом зубе режущего инструмента пропорциональна толщине стружки. Следовательно, компонент переменной силы или регенеративная сила

$$dF = k_d \cdot a_e \cdot da = k_d \cdot a_e \cdot (y_{i-1} - y_i) = k_d \cdot a_e \cdot (x_{i-1} - x_i) \cos \alpha, \quad (1.3)$$

где k_d – удельная динамическая жесткость резания, которая считается постоянной материала, a_e – ширина реза.

Проведенные специальные опыты, представленные в работах [58, 64, 80, 97, 98], показывают, что главным фактором, влияющим на частое изменение глубины резания в процессе автоколебаний, является изменчивость толщины срезаемого слоя при поперечных относительных перемещениях инструмента и изделия.

С точки зрения Р. П. Х. Фаассена [120], вибрация делится на первичную и вторичную. Первичная вибрация может быть вызвана самим процессом резания

(т. е. трением между инструментом и заготовкой, термомеханическим воздействием на образование стружки или связью между разными типами колебаний). Вторичная вибрация может быть вызвана регенерацией волнистости поверхности заготовки. Данный регенеративный эффект является наиболее важной причиной вибрации.

1.2.4 Зависимость вибрации от износа инструмента

При обработке технологическая система совершает вынужденные колебания под действием сил резания [44] из-за отклонения припуска на обработку в начале обработки и на последующих операциях [23] вследствие технологической наследственности [24], а также из-за изменения геометрии режущего инструмента по мере его изнашивания. При этом, зачастую, режущий инструмент полагают идеальным и при оценке состояния технологической системы не учитывают [5].

Изнашивание режущего инструмента имеет три стадии, влияющие на амплитуду вибрации (кривая линия 1, рисунок 1.6) [14].

Стадия (I) показывает процесс приработки нового инструмента. В этот момент происходит интенсивное изнашивание лезвия режущего инструмента до определенного уровня. Достигнув данного уровня износа в момент времени t_1 , изнашивание режущего инструмента переходит в стадию (II) – стадию нормального изнашивания. В конце срока своей службы в момент времени t_2 изнашивание режущего инструмента переходит в стадию (III) – стадию катастрофического изнашивания.

Вибрация режущего инструмента меняется при прохождении данных стадий следующим образом (кривая линия 2, рисунок 1.6).

Во время приработки режущего инструмента первоначальная амплитуда вибрации снижается до минимального значения в точке t_1 . По мере нормального изнашивания амплитуда вибрации увеличивается с небольшой скоростью. При переходе в стадию катастрофического изнашивания амплитуда вибрации начинает резко возрастать (ветвь а, рисунок 1.6). Также возможен вариант с разрушением

режущей кромки, что приведет к резкому снижению амплитуды вибрации (ветвь б, рисунок 1.6).

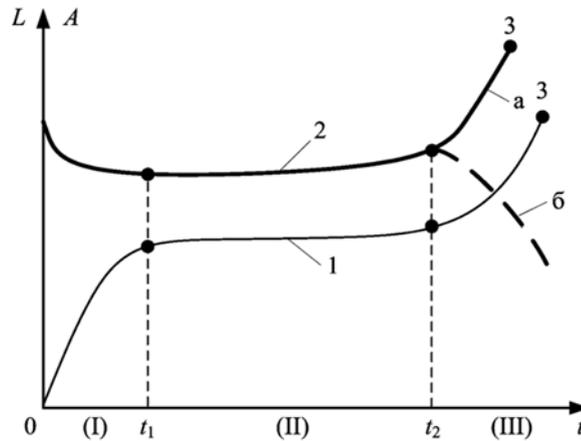


Рисунок 1.6 – Стадии изнашивания режущего инструмента:

1 – износ режущего инструмента, 2 – амплитуда вибрации технологической системы, а – отказ из-за износа инструмента, б – отказ из-за разрушения

Зависимость амплитуды вибрации от износа режущего инструмента позволит разработать системы косвенного контроля состояния режущего инструмента. При этом между вибрацией и износом режущего инструмента существует и обратная зависимость.

И.Г. Жарков [44] представил исследование влияния вибрации на стойкость режущего инструмента, в котором были обнаружены области экстремумов периода стойкости на диаграммах «износ – амплитуда колебаний» (рисунок 1.7) и описана зависимость периода стойкости инструмента от интенсивности автоколебаний с помощью уравнения

$$T = Q \cdot A^m \cdot e^{-nA}, \quad (1.4)$$

где T – период стойкости инструмента; A – амплитуда относительных автоколебаний; Q , m и n – постоянные, зависящие от характеристик инструментального и обрабатываемого материалов и условий резания.

И.Г. Жарковым было отмечено, что наибольшая величина периода стойкости токарных резцов достигается при амплитуде колебаний от 8 до 20 мкм, частоте

автоколебаний – 150–1000 Гц. Такая амплитуда автоколебаний улучшает обрабатываемость и оказывает содействие в увеличении периода стойкости инструмента. На графиках рисунка 1.7 показаны зависимости величины среднего периода стойкости режущих инструментов от амплитуд автоколебаний при точении и фрезеровании труднообрабатываемых материалов. Повышение амплитуд выше этих значений приводит к резкому снижению среднего периода стойкости.

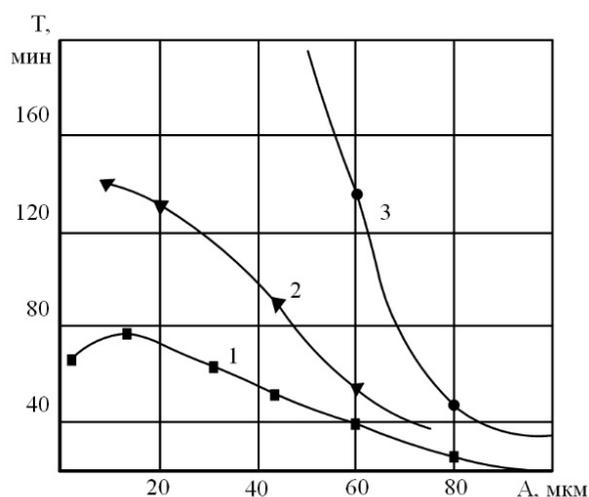


Рисунок 1.7 – Зависимость периода стойкости инструмента T от амплитуды автоколебаний A при обработке точением и фрезерованием:

1 – 1Х18Н9Т. Резец из ВК8: $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$; $V = 60$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об, $t = 3$ мм; 2 – ВТ20. Концевая фреза из ВК8: $D = 40$ мм, $Z = 5$, $S_z = 0,056$ мм, $V = 120$ м/мин, $\gamma = 5^\circ$, $\alpha = 20^\circ$; 3 – ОТ4. Дисковая фреза из ВК8: $D = 70$ мм, $Z = 16$, $t = 3$ мм, $S_z = 0,05$ мм, $V = 82$ м/мин, $\alpha = 15^\circ$

В ряде исследований [18, 19, 21, 27, 33, 44, 55] представлена информация об отрицательном влиянии автоколебаний на период стойкости режущего инструмента из-за усталостного разрушения инструмента. Г.Л. Хаеом [100] в результате проведенных в Краматорском индустриальном институте исследований выявлено, что амплитуда колебаний по сравнению с частотой оказывает на период стойкости наибольшее влияние, а низкочастотные колебания способствуют разрушению режущей части режущего инструмента.

1.3 Методы контроля вибрации при фрезеровании

Одной из важных задач современного машиностроения является повышение эффективности процесса фрезерования, включая рациональное использование стойкостных ресурсов режущих инструментов. В современном машиностроении традиционно при решении задачи оценки периода стойкости режущего инструмента используют стойкостные зависимости, описывающие лишь зависимость среднего периода стойкости режущего инструмента от режимов резания [13]. Однако стойкостные зависимости носят теоретический (идеальный) характер и не учитывают случайную природу процесса резания из-за следующих явлений: упрочнения поверхности деталей, адгезионных явлений, колебаний температуры и вибрации, которые возникают на месте резонансного резания в процессе обработки. Для решения задачи повышения точности прогнозирования периода стойкости режущего инструмента автор диссертации предлагает исследование методов и средств контроля вибрации, которая появляется в процессе фрезерования, путем косвенного контроля состояния режущего инструмента в процессе обработки.

Ряд специальных динамических нагружающих устройств, датчиков и приборов для измерения и анализа результатов рассмотрены в работах [31, 56, 59, 61, 63, 87, 89, 95]. Но многие из них не могут быть использованы для анализа вибрации в процессе резания из-за малых частотных и амплитудных диапазонов измерения колебаний.

Поэтому при изучении процессов вибрации, протекающих в процессе резания, требуется создание специальных устройств, которые должны быть расположены как можно ближе к зоне резания, так как при прохождении стыков упругой системы станка происходит существенное ослабление сигнала. В случае использования токарных станков установка датчиков контроля вибраций не представляет особой сложности, так как инструмент при токарной обработке остается неподвижен [104, 117]. В случае применения, например, фрезерного станка задача разме-

щения датчиков контроля вибрации существенно усложняется. Традиционно датчики для контроля вибрации устанавливаются на шпинделе (Д1, Д2, Д3) или столе станка (Д4, Д5, Д6) (рисунок 1.8) [67].

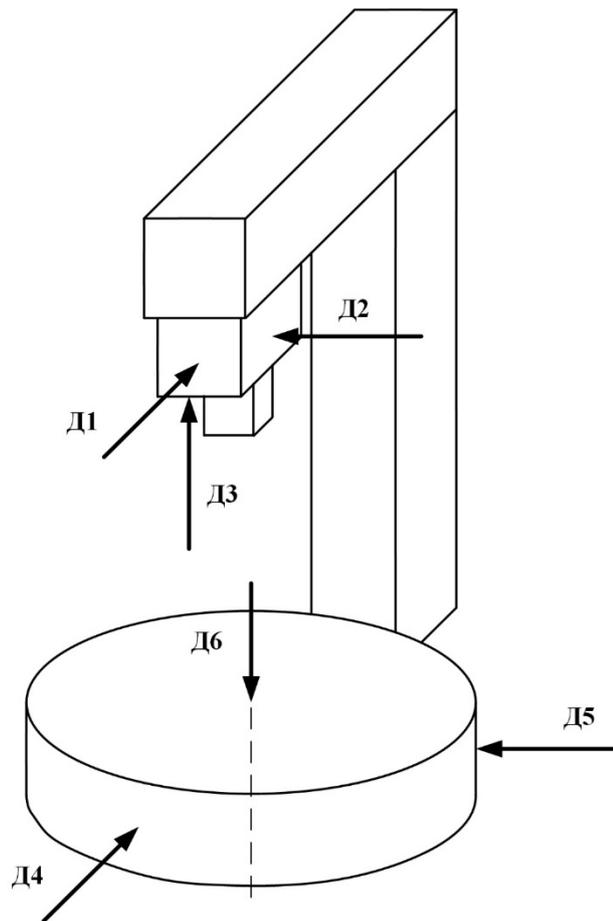


Рисунок 1.8 – Традиционная установка датчиков вибрации на вертикально-фрезерных станках

При таком размещении датчиков необходимо учитывать несколько аспектов. Во-первых, амплитуда вибрации шпинделя будет отличаться от вибрации стола станка из-за различной жесткости этих устройств. Во-вторых, данные области размещения датчиков все еще достаточно удалены от области резания. Таким образом, максимально объективную информацию о вибрации можно получить лишь расположив датчик в непосредственной близости от зоны резания, например, на оправке инструмента [6].

Методы контроля вибрации при фрезеровании делятся на прямые и косвенные. Косвенные методы контроля лишь частично дают возможность решить задачу

контроля вибрации из-за их низкой точности.

Прямые методы контроля обеспечивают непосредственное измерение амплитуды и частоты вибрации шпиндельной группы во время фрезерования при помощи датчиков вибрации. За последнее время все большее количество датчиков вибрации относится к одному из двух типов: оптический виброметр, пьезоэлектрический виброметр.

Оптический метод основан на явлении интерференции. Данный метод подразумевает использование голографического дифференциального интерферометра, учитывающего разность двух параллельных векторов скорости в отдельных точках вращающегося объекта [124, 136]. Оптический датчик, как правило, включает в себя лазерный источник излучения, приёмную оптическую схему и электронную схему обработки (рисунок 1.9) [67]. В процессе отражения излучения из-за неподвижности объекта длина волны принятого луча не будет отличаться от настоящей длины волны лазера. Во время перемещения объекта вдоль оси излучения совершается смещение длины отражаемой волны на определенную величину (эффект Доплера), величина и знак которой несет информацию о направлении движения объекта и его скорости, которая используется в составе приёмного модуля, имеющего интерферометрическую схему. Таким образом можно оценить параметры колебаний, которые модулируют частотный сдвиг.

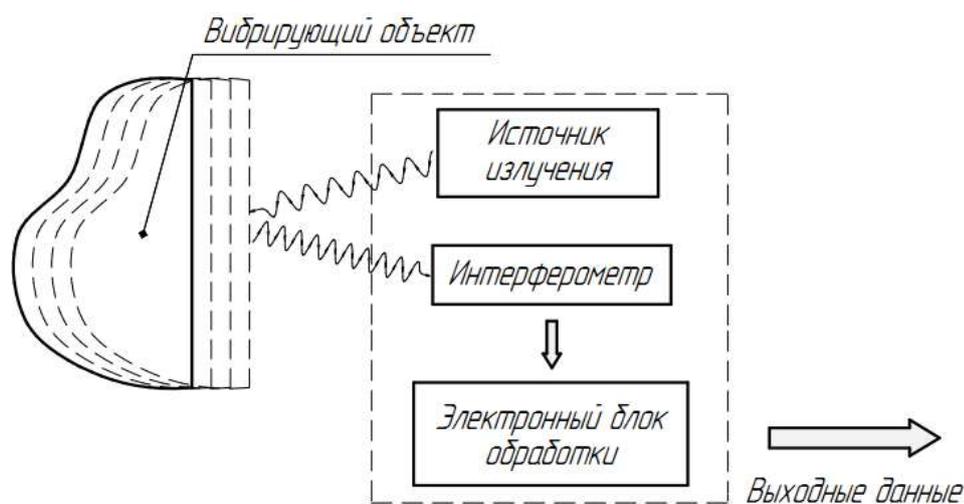


Рисунок 1.9 – Схема оптического виброметра

Преимуществом предоставленной методики является:

- бесконтактность измерений;
- возможность регистрации общей картины поля перемещений и измерения величины и направления перемещения выбранной точки поверхности объекта;
- высокая чувствительность к перемещениям, оцениваемая длиной волны света.

Несмотря на простую конструкцию, данный метод имеет ряд недостатков:

- в связи с прямым гетеродинированием отраженные лучи должны иметь достаточную интенсивность для создания полезного сигнала на выходе интерферометра. Это приводит к необходимости создания светоотражающего покрытия на исследуемой поверхности, которое не подходит для металлообработки;
- прием угловых колебаний возможен только если скорость вращения превышает определенное значение;
- данный метод не обеспечивает определение направления вибрации;
- сложность и высокая стоимость оборудования, жесткие требования к состоянию атмосферы (влажность, отсутствие конденсата и запыленности и т. п.), к качеству и к температуре поверхности исследуемого объекта.

Другим распространенным методом для определения вибрации при обработке на фрезерных станках является использование акселерометров [85]. К достоинствам акселерометров можно отнести их низкую стоимость и относительную простоту конструкции, что обеспечивает прочность и устойчивость к внешним воздействиям.

В работах [74, 75] приведен пример оценки степени критичности динамического поведения технологической системы на основе замера параметров механических колебаний системы СПИЗ с использованием датчиков вибрации. При этом в соответствии с исследованиями [138] текущий износ оценивался по отношению спектров низкочастотных и высокочастотных колебаний, а с целью повышения точности измерений производился контроль амплитуды резонансных колебаний инструмента [44, 74].

В работе [138] идентификацию состояния инструмента предложено произ-

водить по сигналу его вибрации, измеряемому в направлении подачи с использованием датчика, установленного на державке инструмента. Повышение информативности сигнала достигалось на основе использования дискретных вейвлет-преобразований [41, 42] по следующему алгоритму. В начале работы технологической системы определяются и фиксируются исходные параметры сигнала. В i -м текущем состоянии технологической системы исходные параметры сигнала сравниваются с вейвлет-коэффициентами, соответствующими данному текущему состоянию. В работе [127] для повышения точности данного алгоритма предложено использовать анализ распределения сигналов по последовательности вейвлет-разложений с помощью дискретных скрытых марковских моделей. При этом создается матрица распознавания, в которой содержится по 5 образов распознаваемого класса. В результате с точностью до 97 % делается качественный вывод о соответствии текущего состояния режущего инструмента классу «нормальный» или «изношенный». Однако количественная оценка величины износа инструмента отсутствует [74].

Высокой точности классификации размерного износа при обработке алмазным инструментом алюминиевого сплава с помощью сигнала вибрации и нейронных сетей на основе самоорганизующейся карты Корхена удалость достичь авторам работы [149]. Однако их метод характеризуется низким быстродействием и показал хорошие результаты при обработке алюминиевых сплавов алмазным инструментом на стадии нормального изнашивания [74].

Проведенный анализ различных методов контроля вибрации показал, что перспективным направлением для повышения эффективности обработки резанием и периода стойкости инструмента является прямой контроль вибрации во время обработки на основе использования акселерометров.

Собранную информацию о вибрации технических систем с целью хранения истории технического состояния технических систем и их отдельных элементов, а также получения этой информации за необходимый период в ряде работ [73, 86, 96] предлагается записывать в информационный объект – вибропаспорт. В рамках данного диссертационного исследования под вибропаспортом системы СПИЗ понима-

ется информационный объект, содержащий информацию об уровне вибрации системы СПИЗ в процессе обработки за определенный период времени, используемую для сравнения с уровнем вибрации в последующих процессах обработки с целью диагностирования состояния режущего инструмента и назначения рациональных режимов резания при фрезеровании.

1.4 Анализ методов интеллектуального управления режимами резания

Проблема повышения эффективности металлообработки резанием является актуальной и важной задачей в машиностроении. Постоянное техническое развитие в аппаратном и программном обеспечении автоматизированного оборудования обеспечивает высокую производительность и точность обработки на основе методов адаптивного управления [140]. Адаптивное управление позволяет осуществлять интеллектуальный мониторинг процессов обработки, в том числе мониторинг условий резания и состояния режущего инструмента. Результаты данных измерений регистрируются системами мониторинга и добавляются в систему ЧПУ. Собранные статистические данные могут быть использованы для оценки процессов резания и улучшения качества операций обработки [152]. Тенденции развития станков с ЧПУ с адаптивным управлением показаны на рисунке 1.10.

Управляющие контроллеры, как правило, программируются в автономном режиме до начала операции обработки. Традиционно выбор параметров управления основан на неэффективных подходах, которые приводят к производственным потерям. Поэтому многие исследователи занимаются разработкой алгоритмов оптимизации. Такие алгоритмы способствуют развитию интеллектуальных методов контроля процессов. Алгоритмы оптимизации объединяют знания опытных операторов и опытных инженеров для достижения оптимальных настроек управления процессом. Кроме того, алгоритмы оптимизации могут быть использованы для улучшения мониторинга и решения проблем, возникающих при выполнении про-

цессов обработки, таких как чрезмерный износ инструмента, катастрофическое повреждение инструмента, повреждение обработанной поверхности и т. д. Мониторинг таких проблем минимизирует экономические потери и максимизирует производительность [112].



Рисунок 1.10 – Тенденции развития станков с ЧПУ с адаптивным управлением:

▲ – актуальные проблемы адаптивного управления станком с ЧПУ

В работе [141] выделены две категории методов интеллектуального управления режимами резания. Первая категория объединяет методы моделирования систем механической обработки и включает в себя методы регрессионного анализа, искусственных нейронных сетей (ИНС), теории нечеткой логики, а также комбинацию данных методов. Методы моделирования разрабатываются и применяются для установления взаимосвязи между входными и выходными параметрами систем. Причем для моделирования параметров процесса наиболее часто используются ИНС [139].

Вторая категория включает методы оптимизации. Входные параметры системы оптимизируются для достижения требуемых выходных параметров. Эта категория делится на традиционные и нетрадиционные методы. Традиционные ме-

тоды включают в себя методы планирования эксперимента и методы математического итерационного поиска. К нетрадиционным методам относятся поисковые метаэвристические алгоритмы и алгоритмы эвристического решения конкретных проблем. Из категории методов оптимизации наиболее часто используют генетические алгоритмы (ГА), метод роя частиц (МРЧ) и дифференциальную эволюцию (ДЭВ). Как правило, ГА имитируют естественную эволюцию и основываются на методе создания случайного решения [131]. Согласно работе [161], МРЧ – это метод, находящий оптимальное решение из движущихся частиц, составляющих рой. ДЭВ использует метод сравнения векторов для поиска оптимального векторного решения. Основными операторами ДЭВ являются мутация, пересечение и селекция, эти операторы используются для поиска оптимального решения [160].

В работе [163] представлен адаптивный нечеткий контроллер, который был интегрирован с системой ЧПУ. Контроллер позволяет адаптироваться к переменным скоростям подачи при сохранении требуемой скорости резания, а также обнаруживать повреждения инструмента. В результате практического применения адаптивного нечеткого контроллера производительность обработки возросла на 27 %.

П.Б. Хуанг [126] предложил интеллектуальную систему мониторинга во время операций фрезерования. Разработанная модель представляет собой нейро-нечёткую модель, объединяющую преимущества нейронных сетей и нечёткой логики. Модель была разработана для мониторинга и анализа шероховатости поверхности и силы резания для достижения высокой точности при обработке.

В работе [123] изучено влияние угла подвода инструмента, подачи и скорости резания на износ инструмента, шероховатость поверхности, силу и температуру резания. Материал заготовки – титановый сплав, эксперименты проводили в условиях минимальной смазки на основе нанотекучей среды. Для анализа статистического воздействия параметров обработки на выходные параметры использовался дисперсионный анализ (ДА). После этого для оптимизации параметров обработки был применен алгоритм оптимизации на основе МРЧ. Полученные резуль-

таты показали, что во время операции обработки скорость резания имела самое высокое влияние, далее следовали подача и условия охлаждения.

В работе [118] для снижения шероховатости поверхности при точении титанового сплава использованы два метода оптимизации (МРЧ и алгоритм светлячков) и метаэвристический алгоритм летучих мышей. Минимизация шероховатости поверхности достигалась путем изменения величины подачи, скорости резания, глубины резания и износа/вибрации боковой поверхности инструмента. Авторы пришли к выводу, что применение алгоритма летучих мышей привело к лучшим результатам по сравнению с двумя другими методами.

В работе [143] использован известный алгоритм многокритериальной оптимизации Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) с методологией поверхности отклика. Целью оптимизации была минимизация износа инструмента, максимизация качества обработанной поверхности и минимизация энергопотребления во время процесса обработки сплава Ti-6Al-4V. Оптимизированные параметры обработки включали в себя скорость резания и величину подачи.

М. Радованович провел оптимизацию параметров токарной обработки стали AISI 1064 твердосплавным режущим инструментом для случаев многопроходной черновой обработки и однопроходной чистовой обработки [146]. Целью оптимизации было увеличение скорости удаления материала и снижение стоимости обработки. При этом оптимизировались скорость резания, величина подачи и глубина резания. В случае однопроходной чистовой обработки в анализируемые параметры обработки дополнительно включали радиус при вершине режущей пластины. Проводилось сравнение трех методов оптимизации: итеративный метод поиска, многоцелевой генетический алгоритм (Multi-Objective Genetic Algorithm – MOGA) и генетический алгоритм. В результате автор пришел к выводу, что итеративный метод поиска показал лучший результат по сравнению с двумя другими методами.

В работе [142] исследовали оптимизацию скорости подачи при концевом фрезеровании алюминиевых сплавов. Значения скорости подачи получали от системы ЧПУ. Целью оптимизации было уменьшение несогласованности мощности шпинделя и повышение эффективности операции торцевого фрезерования. Была

предложена и экспериментально проверена модель прогнозирования мощности шпинделя.

Таким образом, из анализа результатов текущих исследований трудно определить, какой из перечисленных выше передовых алгоритмов адаптивного управления является лучшим, так как каждый алгоритм имеет свои преимущества и недостатки. Однако для решения задачи оптимизации режима фрезерования на основе мониторинга вибрации был выбран МРЧ в сочетании с методом Парето для балансировки веса целевых функций.

1.5 Выводы

1 Проведенный анализ литературных источников показал, что изучение вибрации в процессе резания является весьма актуальной задачей. Причем перспективным направлением для повышения эффективности обработки резанием и периода стойкости инструмента является прямой контроль вибрации во время обработки на основе использования акселерометров и выполнение программного регулирования режимов обработки путем интеллектуального управления.

2 В технологической системе «станок – приспособление – инструмент – заготовка» появление вибрации на режущих инструментах является, как правило, нежелательным. Данное явление представляет собой основную причину повышенного изнашивания режущего инструмента и снижения его срока службы, низкой точности получаемых размеров детали и качества обработанной поверхности, снижения производительности металлообрабатывающего оборудования.

3 Определение уровня износа режущего инструмента по амплитуде вибрации в процессе фрезерования является сложной задачей, требующей разработки конструкции специального устройства и алгоритма обработки полученной информации для контроля вибрации во время обработки.

4 В результате проведенного анализа методов интеллектуального управления режимами резания для оптимизации режима фрезерования на основе мониторинга вибрации был выбран МРЧ в сочетании с методом Парето для определения

весов целевых функций.

5 На основании вышеизложенного определена цель работы: повышение эффективности концевое и торцевого фрезерования на основе назначения рациональных режимов резания с учетом уровня вибрации и косвенного контроля состояния режущего инструмента.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- анализ методов повышения эффективности фрезерования на машиностроительных предприятиях;
- установление взаимосвязи вибрации режущего инструмента в процессе концевое и торцевого фрезерования от величины его износа;
- разработка устройства и методики контроля износа фрез по уровню вибрации в процессе концевое и торцевого фрезерования;
- разработка методики назначения рациональных режимов резания при концевом и торцевом фрезеровании с учетом уровня вибрации и реализующего ее программного обеспечения;
- практическая реализация результатов научных исследований на машиностроительном предприятии.

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ ВИБРАЦИИ ОТ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Нагрузки, которые действуют на технологическую систему операции, содержат постоянную и переменную составляющие. Постоянная составляющая определяется силой резания, а переменная, как было отмечено раньше, вызывается колебаниями припуска, износом инструмента и т. д.

Для того чтобы исследовать динамику технологической системы операции, в первую очередь необходимо её разомкнуть в точках контакта режущего инструмента с обрабатываемой поверхностью детали путем учета в точке контакта силы резания в процессе обработки.

Сила резания оставляет вибрационный след на обработанной поверхности детали с радиусом $r_{\text{д}}$. Указанный след выступает как отпечаток режущей части инструмента, который характеризуется радиусом вершины лезвия (в том числе зуба фрезы) $r_{\text{в}}$ (рисунок 2.1, а) и определяет шероховатость поверхности (поперечную, винтовую, рисунок 2.1, б), которая стандартизирована под так называемый «профиль шероховатости инструмента» (рисунок 2.2) [28].

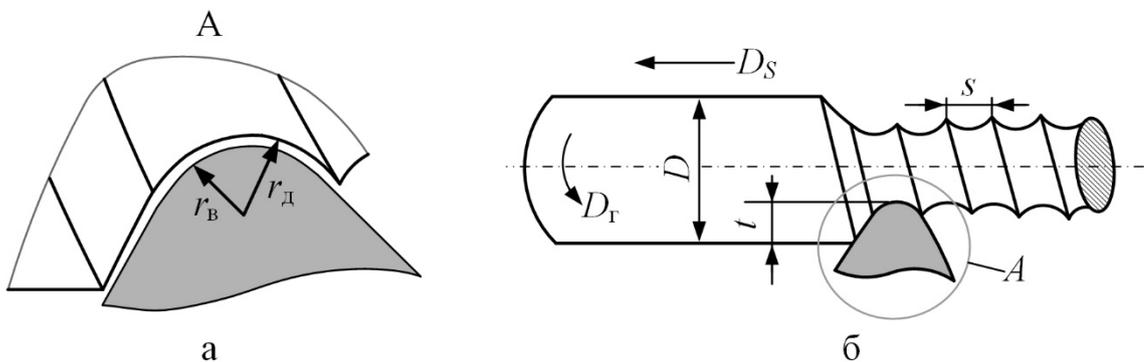


Рисунок 2.1 – Вибрационный след на обработанной поверхности детали

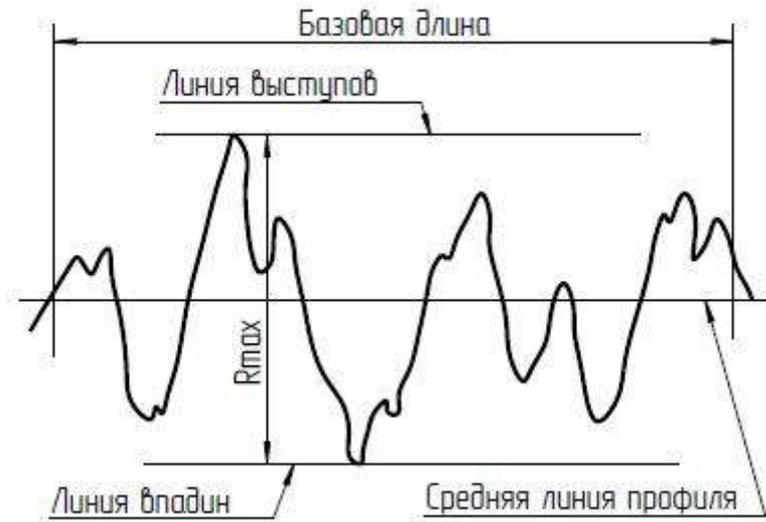


Рисунок 2.2 – Профиль шероховатости

При этом шероховатость R_a и радиус вершины лезвия r_B взаимосвязаны друг с другом (рисунок 2.3) следующим выражением [68].

$$R_a = 31,25 \frac{S^2}{r_B}, \text{ мкм}, \quad (2.1)$$

где S – подача, мм/об.

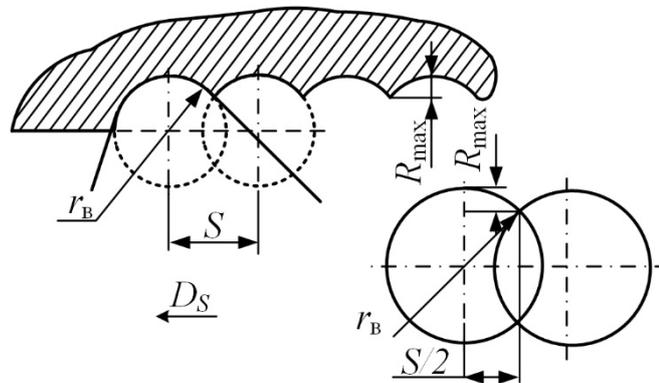


Рисунок 2.3 – Схема образования шероховатости

Радиус вершины лезвия r_B в процессе изнашивания инструмента меняется, соответственно с этим меняются шероховатость обработанной поверхности и силы резания, что должно быть учтено при назначении режимов резания и периода стойкости.

2.1 Зависимость между амплитудой вибрации и износом режущего инструмента

Разработка зависимости между амплитудой вибрации и износом режущего инструмента основана на следующих положениях:

1) вибрация режущего инструмента рассматривается как гармонические колебания [80, 84]. Моделирование динамики фрезерования имеет следующий вид:

$$\begin{cases} x = A_x \cdot \sin(\omega_{n,x}t + \alpha_0) \\ y = A_y \cdot \cos(\omega_{n,y}t + \alpha_0) \\ z = A_z \cdot e^{-\xi_z \omega_{0,z}t} \cdot \cos \omega_{n,z}t \end{cases}, \quad (2.2)$$

где x , y и z – перемещения режущего инструмента по соответствующим осям в системе координат XYZ; A_x , A_y , $A_z > 0$ – амплитуды вибрации по соответствующим осям; $\omega_{n,x}$, $\omega_{n,y}$, $\omega_{n,z}$ – частота колебаний по соответствующим осям, $\omega_n = \sqrt{\omega_0^2 - n^2}$, $n = \xi \cdot \omega_0$; t – время; α_0 – начальная фаза колебаний, т. е. в момент времени $t = 0$; ξ_z – относительный коэффициент демпфирования по оси Z, $\omega_{0,z}$ – собственная частота системы по оси Z;

2) изменение главной составляющей силы резания P_z во время процесса резания является основной причиной вибрации;

3) под действием силы резания в процессе резания фреза совершает колебания, которые могут быть описаны следующей системой дифференциальных уравнений [8]:

$$\begin{cases} \frac{d^2x(t)}{dt^2} + 2 \cdot \xi_x \cdot \omega_{0,x} \cdot \frac{dx(t)}{dt} + \omega_{0,x}^2 \cdot x(t) = \frac{1}{m_x} \cdot F_x(t); \\ \frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2 \cdot \xi_y \cdot \omega_{0,y} \cdot \frac{dy(t)}{dt} + \omega_{0,y}^2 \cdot y(t) = \frac{1}{m_y} \cdot F_y(t); \\ \frac{d^2z(t)}{dt^2} + 2 \cdot \xi_z \cdot \omega_{0,z} \cdot \frac{dz(t)}{dt} + \omega_{0,z}^2 \cdot z(t) = \frac{1}{m_z} \cdot F_z(t). \end{cases} \quad (2.3)$$

В системе уравнений (2.3) ξ_x , ξ_y и ξ_z – относительные коэффициенты демпфирования; $\omega_{0,x}$, $\omega_{0,y}$ и $\omega_{0,z}$ – собственные частоты системы; m_x , m_y и m_z – приведенные массы системы; F_x , F_y и F_z – возмущающие силы, направленные по соответствующим осям.

Соответствие направления составляющих сил резания ортогональным силам F_x , F_y и F_z при угле поворота фрезы, когда радиальная составляющая силы резания совпадает с осью X, касательная – с осью Y, представлено на рисунке 2.4.

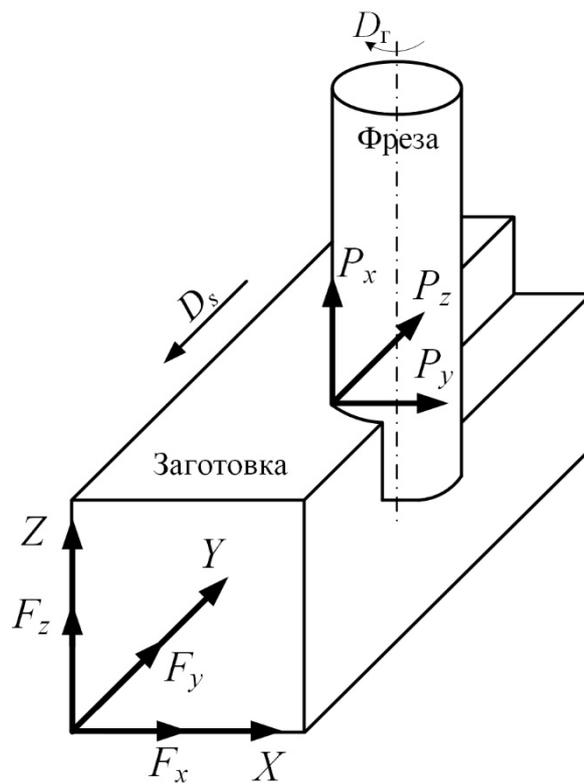


Рисунок 2.4 – Пример соответствия направления составляющих сил резания ортогональным силам F_x , F_y и F_z

4) в процессе фрезерования одновременно несколько зубьев фрезы (активные зубья) могут находиться в контакте с заготовкой. В этом случае составляющие силы резания для каждого активного зуба суммируются с учетом угла поворота фрезы α вокруг ее оси. В случае попутного фрезерования (рисунок 2.5)

$$F_x(t) = \sum_{j=1}^{z_c} [P_{zj}(t) \cdot \cos \alpha_j + P_{yj}(t) \cdot \sin \alpha_j];$$

$$F_y(t) = \sum_{j=1}^{z_c} [P_{zj}(t) \cdot \sin \alpha_j - P_{yj}(t) \cdot \cos \alpha_j];$$

$$F_z(t) = \sum_{j=1}^{z_c} P_{xj}(t),$$

где z_c – активное число зубьев; P_{zj} , P_{yj} и P_{xj} – составляющие силы резания на j -й режущей кромке фрезы; α_j – угол поворота j -й режущей кромки фрезы вокруг ее оси.

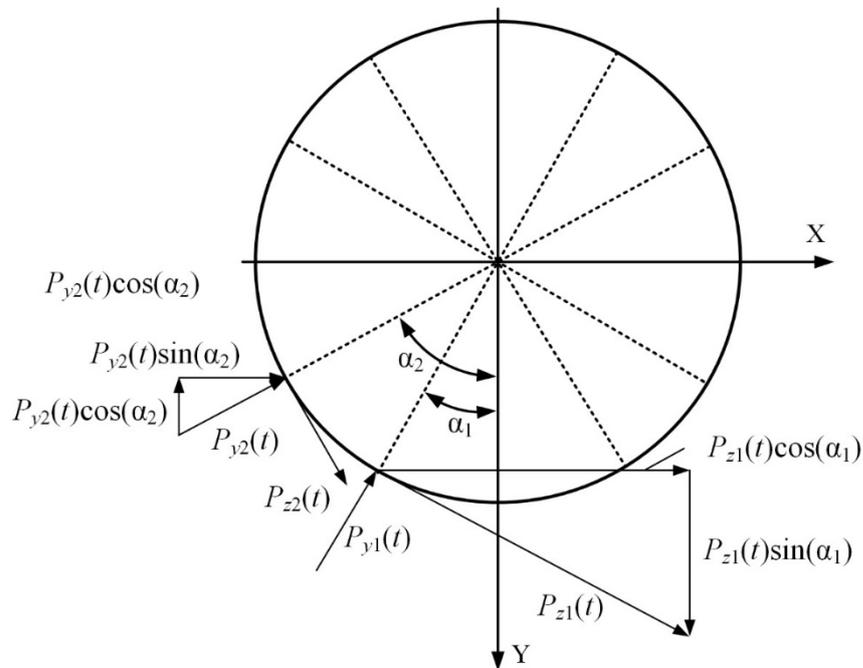


Рисунок 2.5 – Касательная и радиальная составляющие силы резания

Для встречного фрезерования:

$$F_x(t) = \sum_{j=1}^{z_c} [P_{zj}(t) \cdot \cos \alpha_j - P_{yj}(t) \cdot \sin \alpha_j];$$

$$F_y(t) = \sum_{j=1}^{z_c} [P_{zj}(t) \cdot \sin \alpha_j + P_{yj}(t) \cdot \cos \alpha_j];$$

$$F_z(t) = \sum_{j=1}^{z_c} P_{xj}(t).$$

Таким образом, учет износа фрезы при оценке сил резания позволяет прогнозировать изменение уровня вибрации в процессе обработки.

2.2 Определение силы резания при фрезеровании

Различными исследователями предложены модели зависимости силы резания и ее составляющих при фрезерной обработке от соответствующих параметров, например, от геометрии фрезы [45], покрытий фрезы [43], смещения фрезы относительно заготовки [81, 82], длины фрезерования [102], регрессионные статистические зависимости [79] и т. д. Однако указанные модели не учитывают изменения силы резания по мере изнашивания режущего инструмента.

Для учета изменения силы резания по мере изнашивания режущего инструмента главная составляющая силы резания P_z должна включать помимо касательной составляющей силы резания F_k силу трения на фаске износа по задней поверхности фрезы $F_{ти}$ [39]. Изменение F_k является причиной автоколебаний, а изменение $F_{ти}$ является причиной вынужденной вибрации.

$$P_z = F_k + F_{ти}. \quad (2.4)$$

Сила трения на фаске износа по задней поверхности фрезы $F_{ти}$ пропорциональна твердости материала HB (твердость по Бринеллю), ширине фаски износа режущей кромки фрезы по задней поверхности h_3 (рисунок 2.6), коэффициенту трения скольжения между заготовкой и инструментом μ и участвующей в процессе обработки длине фаски износа s , пропорциональной ширине резания B , и, соответственно, определяется следующим отношением [113, 148, 158]:

$$F_{ти} = 9,81HB \cdot \mu \cdot h_3 \cdot s. \quad (2.5)$$

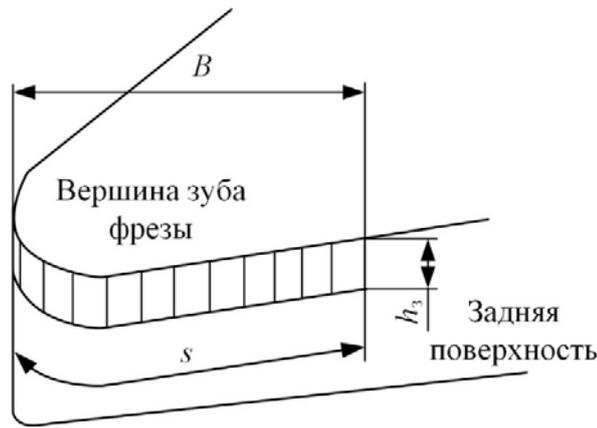


Рисунок 2.6 – Износ режущего инструмента по задней поверхности

Расчет остальных составляющих силы резания зависит от вида фрезы.

2.2.1 Определение силы резания при торцевом фрезеровании

При фрезеровании торцевой фрезой резание осуществляется режущими кромками пластин/зубьев, установленных в корпусе фрезы. В этом случае при анализе силы резания необходимо использовать две системы координат: инструментальную систему координат пластины ABC и систему координат фрезы XYZ. Оси этих двух систем координат отклонены друг от друга на углы: γ_A , γ_L , γ_R (рисунок 2.7).

Методика расчета мгновенной статической силы как результирующей всех сил, действующих на отдельные режущие кромки, производящие резание в определенный момент времени, без учета их износа, рассмотрена в работах [113, 122, 148, 158]. Касательная составляющая силы резания F_k в этом случае выражается как произведение площади срезаемого слоя f и удельного давления резания K_T :

$$F_k = f \cdot K_T. \quad (2.6)$$

В работе [134] показано, что K_T зависит от толщины стружки:

$$K_T = C_k \cdot \bar{a}^{-q}, \quad (2.7)$$

где \bar{a} – средняя толщина стружки, мм; C_k , q – константы, зависящие от режущего инструмента и материала заготовки.

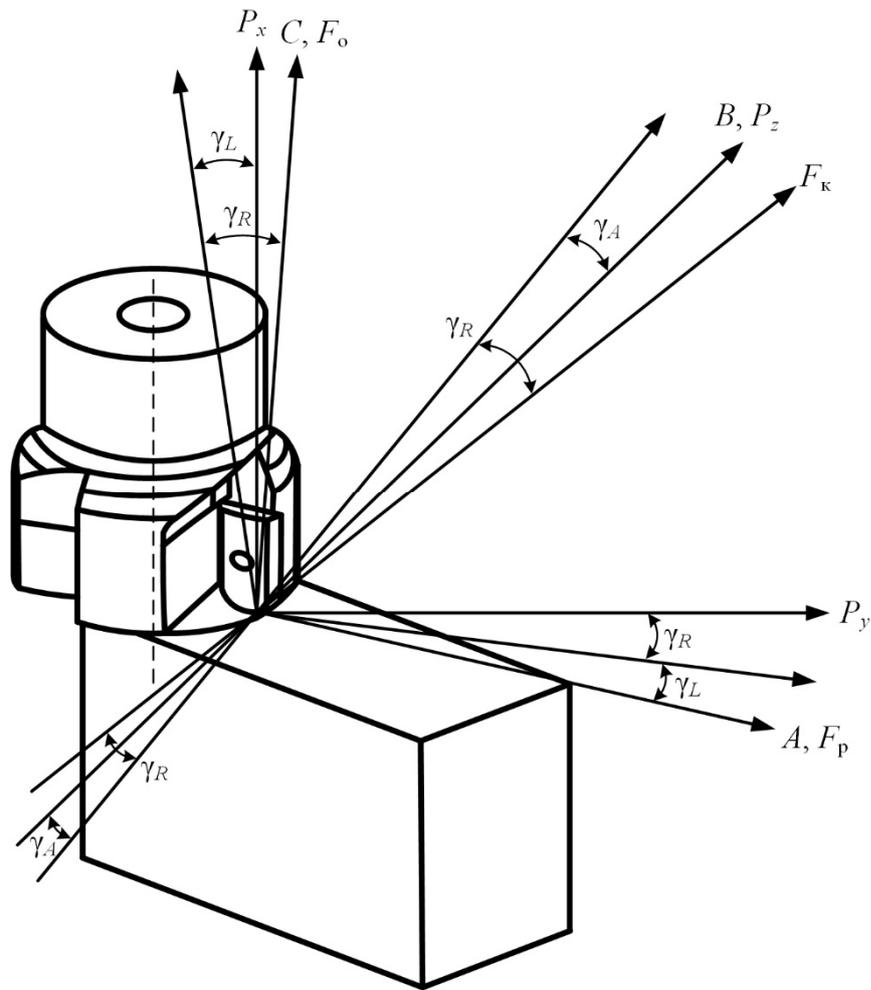


Рисунок 2.7 – Сила резания при торцевом фрезеровании

Для торцевой фрезы, в соответствии с рисунком 2.8, площадь срезаемого слоя определяется по следующей формуле:

$$f = t \cdot a(\alpha_i) = t \cdot S_z \cdot \sin \alpha_i, \quad (2.8)$$

где t – глубина резания, мм; $a(\alpha_i)$ – толщина среза в зависимости от угла поворота фрезы α_i , мм; S_z – подача на зуб, мм/зуб.

Радиальная F_p и осевая F_o составляющие силы резания пропорциональны касательной составляющей силы резания F_k [133]:

$$F_o = K_A \cdot F_k;$$

$$F_p = K_R \cdot F_k,$$

где K_A и K_R – эмпирические константы.

На основе результатов экспериментов для составляющих силы резания (в

зависимости от типов материалов и условий) имеют место следующие соотношения:

- а) для торцевой фрезы: $K_R = 0,3..0,4$, ; $K_A = 0,4..0,45$;
- б) для концевой фрезы:
- при встречном фрезеровании: $K_R = 0,4..0,45$; $K_A = 0,2..0,3$;
 - при попутном фрезеровании: $K_R = 0,4..0,45$; $K_A = 0,75..0,8$.

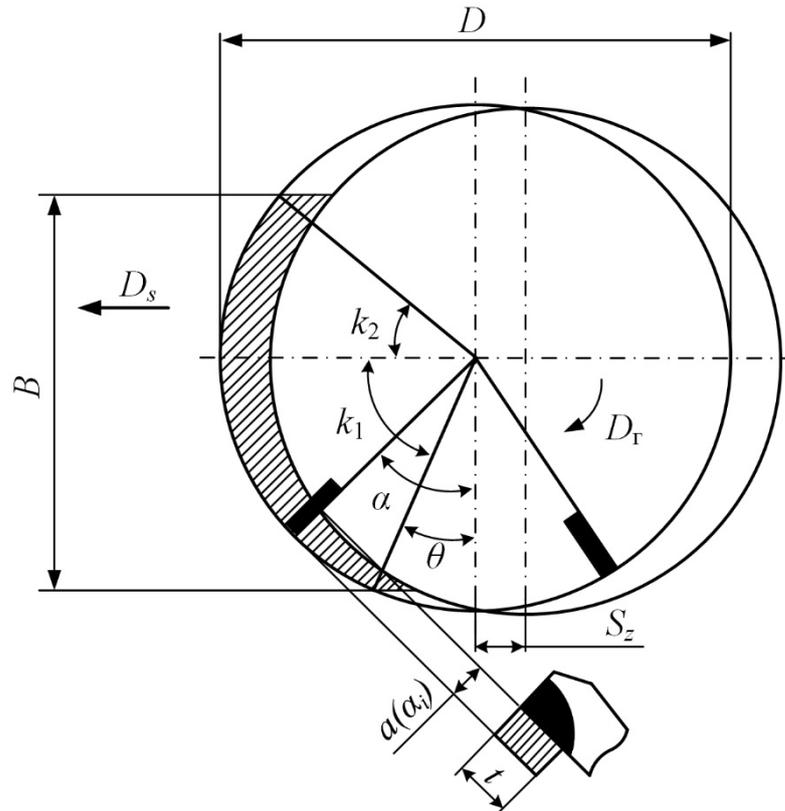


Рисунок 2.8 – Определение площади срезаемого слоя при торцевом фрезеровании

Составляющие силы резания P_x , P_y и P_z в системе координат XYZ могут быть получены суммированием компонент силы резания P_x , P_y и P_z в системе координат ABC [8, 36]:

$$\begin{aligned}
 P_x &= -(F_K + F_{ТН}) \sin \gamma_A + F_p \sin \gamma_A + F_o \cos \gamma_L \cos \gamma_A; \\
 P_y &= -(F_K + F_{ТН}) \cos \gamma_A \sin \gamma_R + F_p \cos \gamma_L \cos \gamma_R - F_o \sin \gamma_A \cos \gamma_R; \\
 P_z &= (F_K + F_{ТН}) \cos \gamma_A \cos \gamma_R + F_p \cos \gamma_L \sin \gamma_R + F_o \cos \gamma_L \sin \gamma_A.
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

2.2.2 Определение силы резания при концевом фрезеровании

При фрезеровании концевой фрезой резание осуществляется режущими кромками зубьев фрезы. В этом случае при анализе силы резания также необходимо использовать две системы координат: систему координат фрезы XYZ и систему координат режущей кромки – xyz , так как режущая кромка имеет форму спирали и отклоняется от системы координат XYZ на угол φ_r в радиальном направлении и на угол φ к плоскости XOY . Для определения составляющих силы резания P_x , P_y и P_z во время процесса фрезерования концевой фрезой лезвие фрезы представляет собой набор сегментов режущей кромки, на каждый из которых действуют касательная, радиальная и осевая составляющие силы резания (dF_k , dF_p и dF_o соответственно). Для описания режущей кромки концевой фрезы произвольной формы используется обобщенная геометрическая модель концевых фрез (рисунок 2.9), предложенная в работе [119].

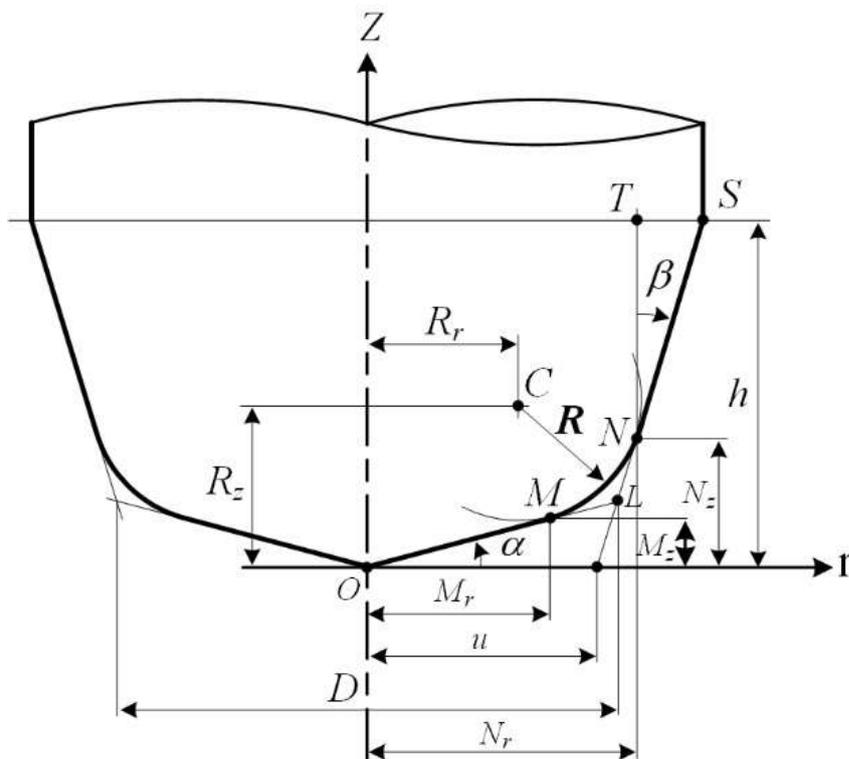


Рисунок 2.9 – Обобщенная геометрия концевой фрезы

С помощью обобщенной геометрии концевой фрезы можно описать геометрию режущей кромки концевой фрезы любого вида (рисунок 2.10).

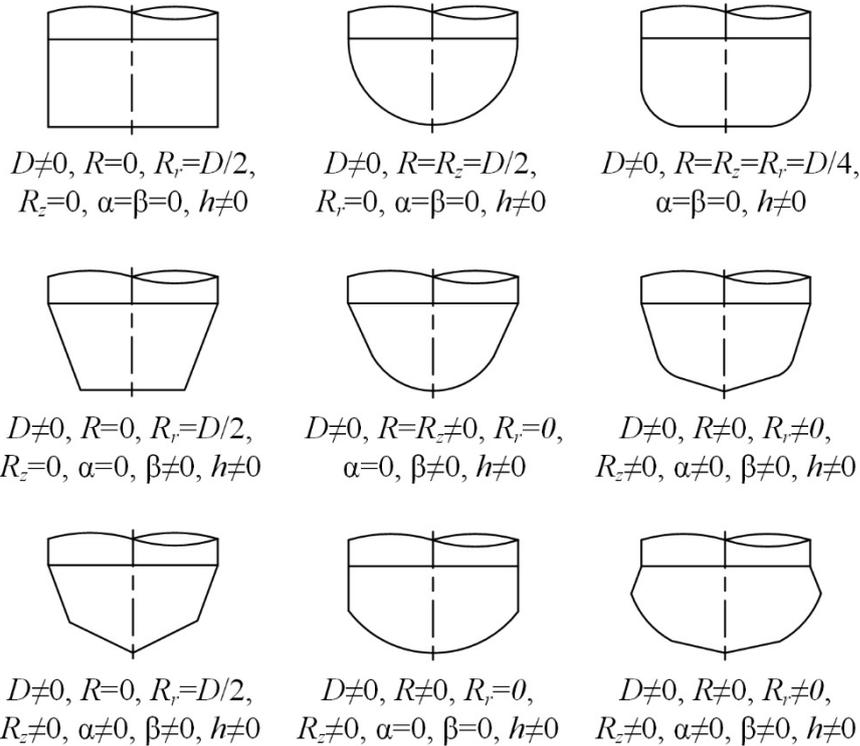


Рисунок 2.10 – Форма различных видов концевых фрез

Для оценки составляющих силы резания в случае концевой фрезерования на примере фрезерования концевой цельной фрезой со сферическим концом была использована модель, предложенная Ли и Алтинтасом [135], в которой для оценки результирующей силы, действующей на i -й бесконечно малый сегмент режущей кромки, используется набор криволинейных координатных систем, расположенных нормально к сферической поверхности. На рисунках 2.11, а и б, изображены касательная, радиальная и осевая составляющие силы резания, действующие на режущую кромку.

Методика оценки компонентов силы резания dF_k , dF_p и dF_o , действующих на отдельные сегменты режущей кромки, описана в работе [135]. В соответствии с указанной методикой компоненты силы резания пропорциональны длине криволинейного сегмента режущей кромки, проекции длины сегмента режущей

кромки в направлении скорости резания и толщине стружки по нормали к режущей кромке $t_n(\psi, \theta, \varphi_r)$ (рисунок 2.11, в и г).

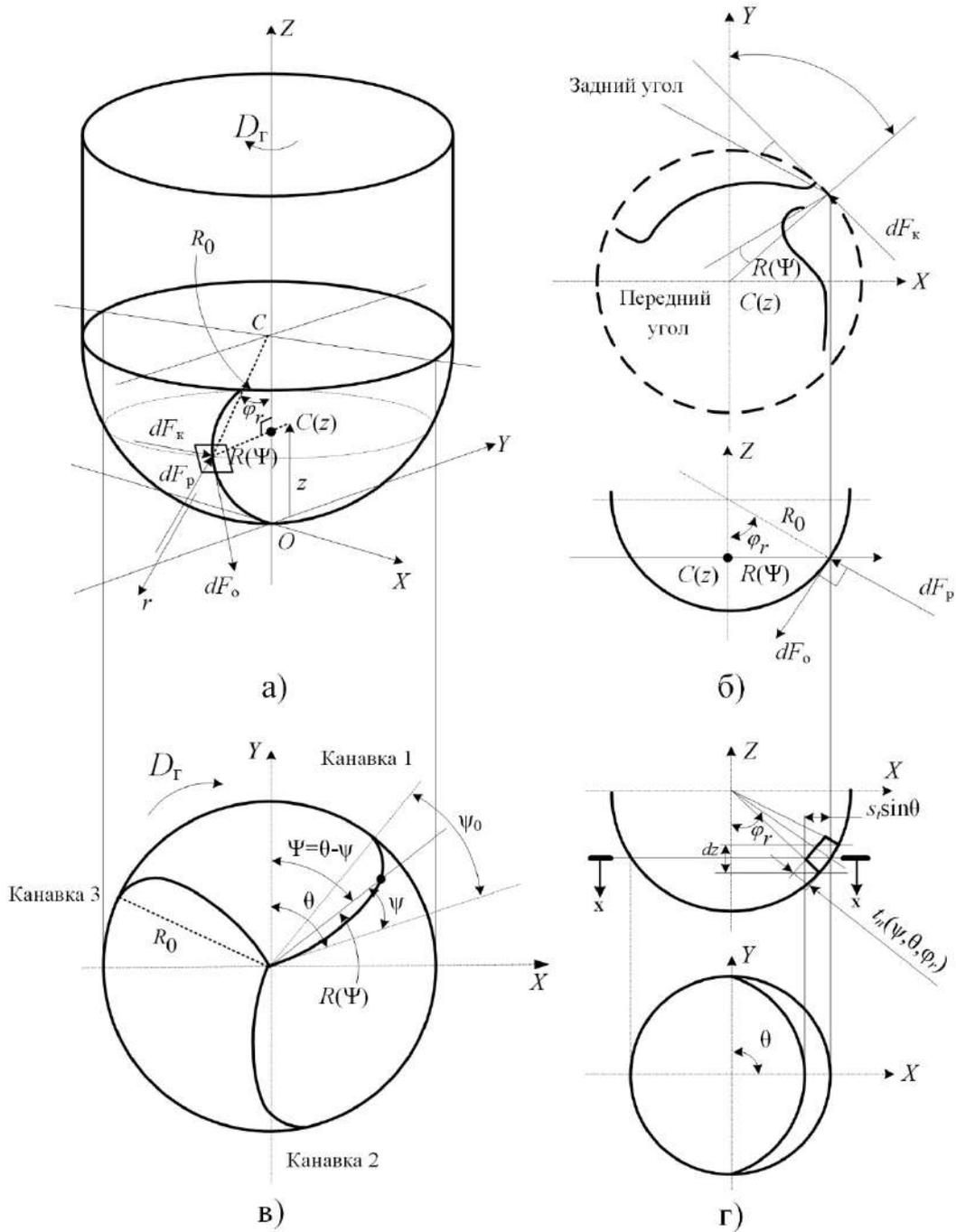


Рисунок 2.11 – Составляющие силы резания, геометрия и координаты концевой цельной фрезы со сферическим концом

Из рисунка 2.11 можно выразить мгновенные составляющие силы резания на j -й режущей кромке в системе координат XYZ [8]:

$$P_x = \int_0^z (dF_p \cdot \cos \varphi_r - dF_o \cdot \sin \varphi_r) dz;$$

$$P_y = \int_0^z (-dF_p \cdot \sin \varphi_r \cdot \sin \varphi - (dF_k + dF_{\text{ти}}) \cdot \cos \varphi - dF_o \cdot \cos \varphi_r \cdot \sin \varphi) dz;$$

$$P_z = \int_0^z (-dF_p \cdot \sin \varphi_r \cdot \cos \varphi + (dF_k + dF_{\text{ти}}) \cdot \sin \varphi - dF_o \cdot \cos \varphi_r \cdot \cos \varphi) dz.$$
(2.10)

2.3 Проверка предложенной модели

2.3.1 Моделирование касательной составляющей силы резания

Для проверки модели оценки составляющих силы резания, приведенной в подразделе 2.2, было проведено ее сравнение с регрессионной зависимостью силы резания, представленной в работе [79] и широко применяемой в промышленном производстве, в частности для расчетов при проектировании технологических процессов для фрезерных станков с ЧПУ. Регрессионная зависимость касательной составляющей силы резания для торцевой фрезы имеет следующий вид:

$$P_{zT} = C_{p2} \cdot D^{n_{p4}} \cdot t^{n_{p5}} \cdot S_z^{n_{p6}}, \quad (2.11)$$

где P_{zT} – касательная составляющая силы резания; C_{p2} , n_{p4} , n_{p5} , n_{p6} – эмпирические константы; D – диаметр фрезы; t – глубина фрезерования; S_z – подача на зуб.

Для сравнения касательных составляющих силы резания P_z и P_{zT} , рассчитанных по формулам (2.9) и (2.11) соответственно, были использованы экспериментальные данные корейской компании YG-1 Co., Ltd по торцевому фрезерованию нержавеющей стали X2CrNi19-11 с использованием сменных пластин АРКТ 1003PDTR-L в корпусе FHM90 E90A-D20-3-C20 (рисунок 2.12), приведенные в работе [99] (рисунок 2.13). При моделировании использовались следующие исходные данные: глубина резания $t = 8$ мм, $C_k = 1580,2$ Н/м, $q = 0,23$, подача

$S_z = 0,08$ мм/зуб, $z = 3$, диаметр фрезы $D = 20$ мм, $\mu = 0,2$, $HB = 180$,
 $C_{p2} = 634,2$, $n_{p4} = 0,459$, $n_{p5} = 0,957$, $n_{p6} = 0,784$, $\gamma_A = 8^\circ$, $\gamma_L = 20^\circ$, $\gamma_R = 14^\circ$.

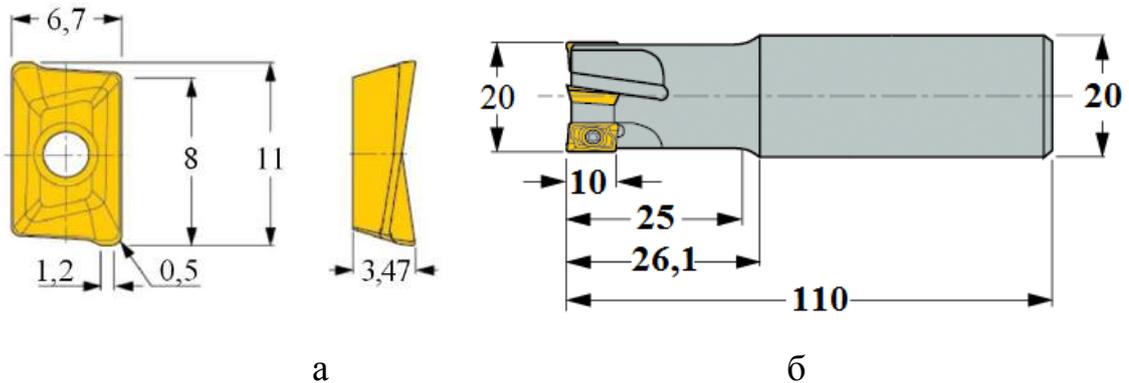


Рисунок 2.12 – Сменная твердосплавная пластина АРКТ 1003PDTR-L (а)
и корпус FHM90 E90A-D20-3-C20 (б)

АРКТ 1003PDTR

Режим испытания

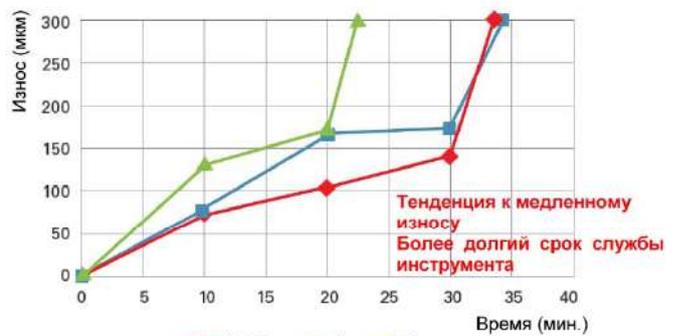
| | |
|---|--|
| Материал заготовки (нержавеющая сталь) | DIN: X2CrNi19-11 AISI: 304 JIS: SUS304 |
| Твердость заготовки | 170 ~ 180 |
| Размер заготовки | 300 x 80 x 150 |
| Скорость резания, V_c (м/мин) | 180 |
| Подача, f_z (мм/зуб) | 0.08 |
| ар/ае (глубина/ ширина) (мм) | 8 / 3 |
| Применение СОЖ | Нет |



Испытываемые образцы

| Обозначение | Сплав | Диаметр резца |
|---------------|-------|------------------|
| АРКТ 1003PDTR | YG602 | Ø20 |
| АРКТ 1003PDTR | L | |
| АРКТ 1003PDER | I | |

Результат испытания



※ Величина износа по окончании теста: 300 мкм
(износ по задней поверхности)

Результаты сравнения срока службы инструментов

- Сплав YG602 имеет самый долгий срок службы по сравнению с другими сплавами.
- Сплав YG602 показал тенденцию к медленному износу по сравнению с другими сплавами.

Рисунок 2.13 – Результаты эксперимента по торцевому фрезерованию с использованием пластины АРКТ 1003PDTR-L

На основе указанных исходных данных и результатов стойкостных экспериментов получены значения касательной составляющей силы резания по мере увеличения времени резания, приведенные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчета значений касательной составляющей силы резания по мере изнашивания инструмента

| | Время резания, мин | Износ инстру- мента, мм | P_{zT} , Н | P_z , Н |
|----|-----------------------|----------------------------|--------------|-----------|
| 1 | 2 | 0,017 | 2533 | 841 |
| 2 | 4 | 0,031 | 2533 | 1054 |
| 3 | 6 | 0,048 | 2533 | 1314 |
| 4 | 8 | 0,065 | 2533 | 1573 |
| 5 | 10 | 0,080 | 2533 | 1802 |
| 6 | 12 | 0,100 | 2533 | 2107 |
| 7 | 14 | 0,120 | 2533 | 2412 |
| 8 | 16 | 0,135 | 2533 | 2641 |
| 9 | 18 | 0,154 | 2533 | 2931 |
| 10 | 20 | 0,168 | 2533 | 3144 |
| 11 | 22 | 0,170 | 2533 | 3175 |
| 12 | 24 | 0,172 | 2533 | 3205 |
| 13 | 26 | 0,174 | 2533 | 3236 |
| 14 | 28 | 0,176 | 2533 | 3266 |
| 15 | 30 | 0,178 | 2533 | 3297 |
| 16 | 32 | 0,220 | 2533 | 3938 |
| 17 | 34 | 0,260 | 2533 | 4548 |
| 18 | 36 | 0,300 | 2533 | 5158 |

Результаты расчета касательных составляющих силы резания в графическом виде представлены на рисунке 2.14.

На основании полученных результатов видно, что регрессионная зависимость касательной составляющей силы резания (2.11) не учитывает величину износа фрезы. Расчет касательной составляющей силы резания с учетом значения износа фрезы даст результаты, более точно описывающие процесс обработки: касательная составляющая силы резания увеличивается по мере изнашивания режущего инструмента [17]. Применение такой зависимости для расчета силы реза-

ния позволяет назначать рациональные режимы фрезерования с учетом изнашивания режущего инструмента.

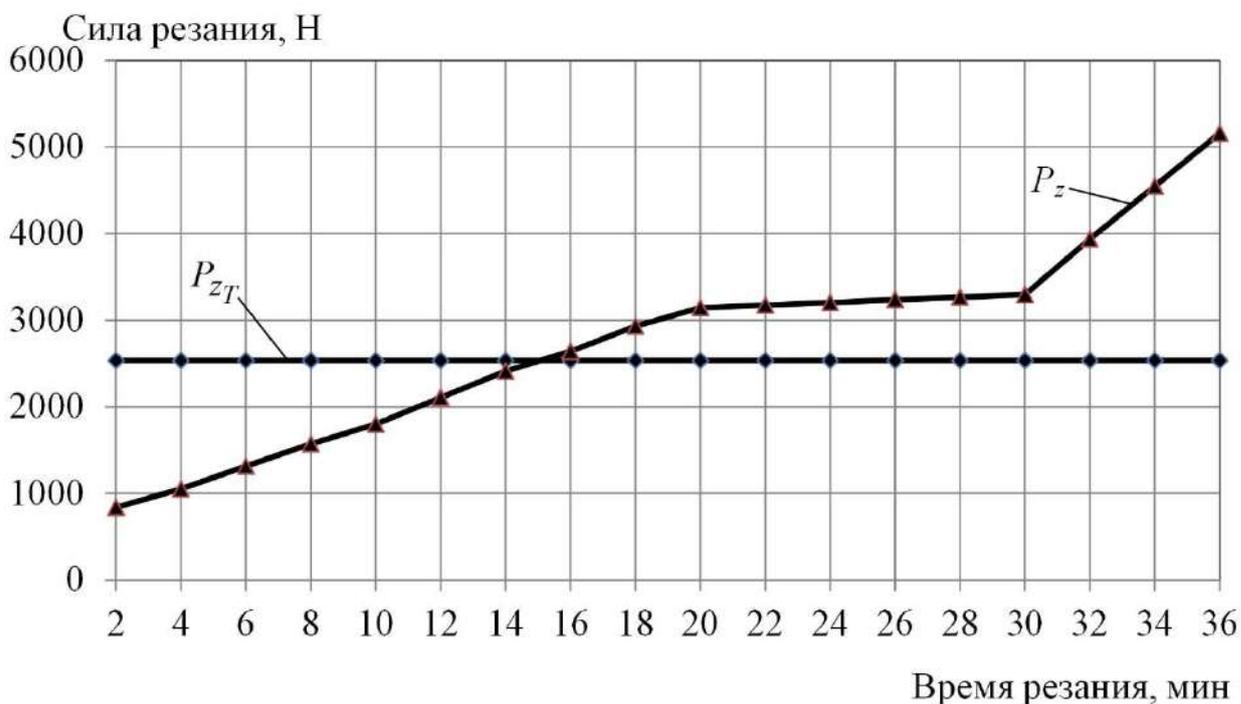


Рисунок 2.14 – Значения касательной составляющей силы резания пластиной АРКТ 1003PDTR-L с учетом и без учета износа по задней поверхности

2.3.2 Моделирование амплитуды вибрации

Для проверки зависимости между амплитудой вибрации и износом режущего инструмента в случае торцевого фрезерования была использована система моделирования динамических систем MatLab Simulink. С помощью MatLab Simulink была проверена связь между амплитудой вибрации режущего инструмента и износом инструмента [130]. Структурная схема модели представлена на рисунке 2.15.

В качестве входных параметров модели были использованы следующие значения: диаметр фрезы $D = 100$ мм, число зубьев $z = 5$, подача $S_z = 0,5$ мм/зуб, глубина резания $t = 2$ мм, ширина резания $B = 60$ мм, собственные частоты системы $\omega_{n,x} = \omega_{n,y} = 998$ рад/с и $\omega_{n,z} = 1020$ рад/с, $m_x = m_y = 0,019$ кг,

$m_z = 0,021$ кг, $C_k = 1580,2$ Н/м, $q = 0,23$, $k_x = k_y = 8481764$ Н/м,
 $k_z = 10172940$ Н/м, $\mu = 0,4$, $HB = 180$, $\gamma_A = 8^\circ$, $\gamma_L = 20^\circ$, $\gamma_R = 14^\circ$.

На рисунках 2.16–2.18 показана взаимосвязь между амплитудой вибрации режущего инструмента и износом инструмента в соответствии с тремя направлениями по осям X (направление подачи), Y и Z (направление вдоль оси фрезы) для случаев попутного и встречного фрезерования.

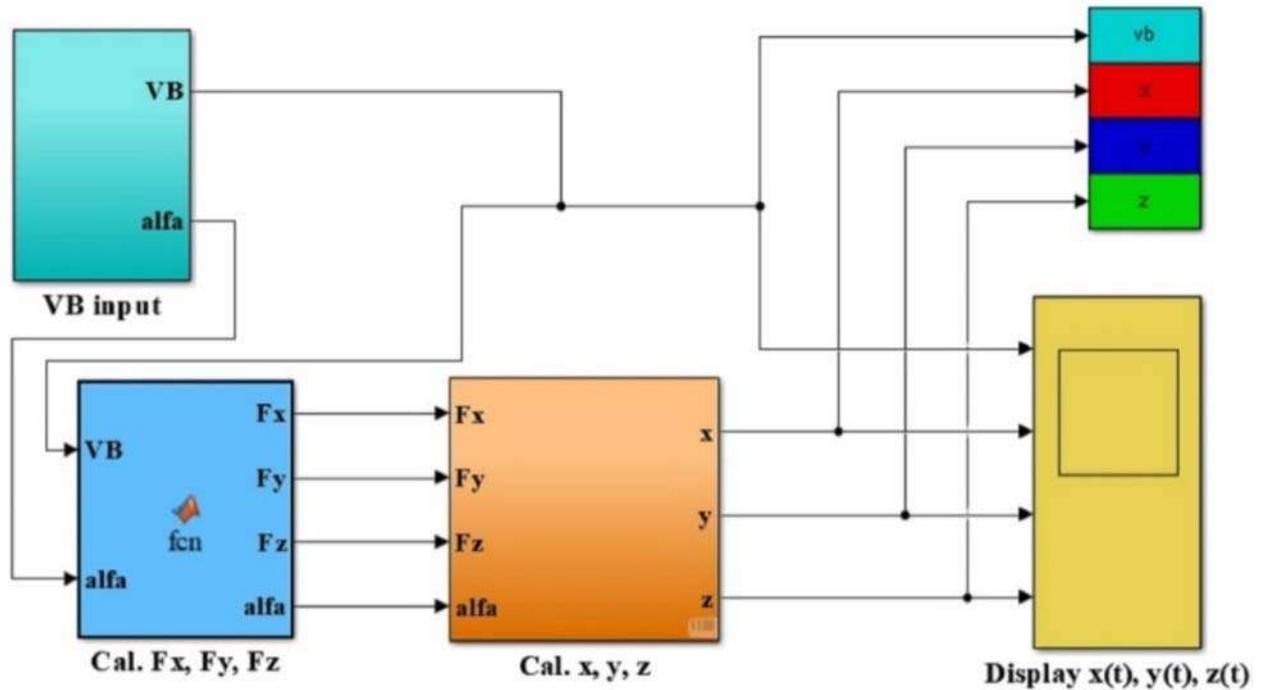


Рисунок 2.15 – Схема модели в программном обеспечении
 Matlab-Simulink

Изменение амплитуды вибрации по мере увеличения износа по задней поверхности h_3 по осям X и Z можно рассматривать как линейный процесс (рисунки 2.16 и 2.17).

Влияние износа по задней поверхности h_3 на амплитуду вибрации режущего инструмента по оси Y имеет более сложный характер, соответствующий кривой изнашивания режущего инструмента.

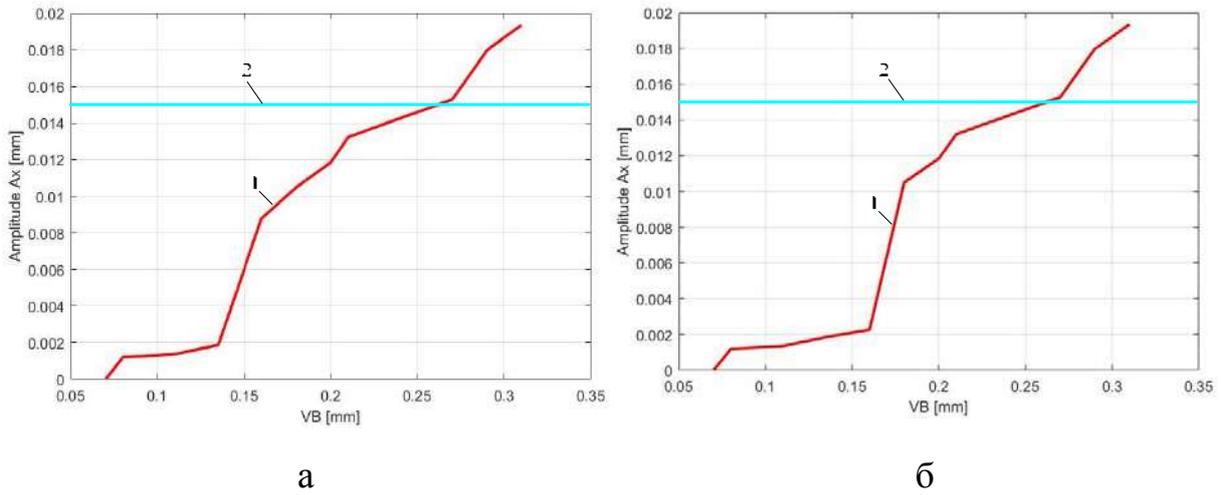


Рисунок 2.16 – Взаимосвязь между амплитудой вибрации режущего инструмента и износом по задней поверхности h_3 по оси X:

1 – амплитуда вибрации, вызванная P_z (2.9);

2 – амплитуда вибрации, вызванная P_{zT} (2.11);

а – попутное фрезерование; б – встречное фрезерование

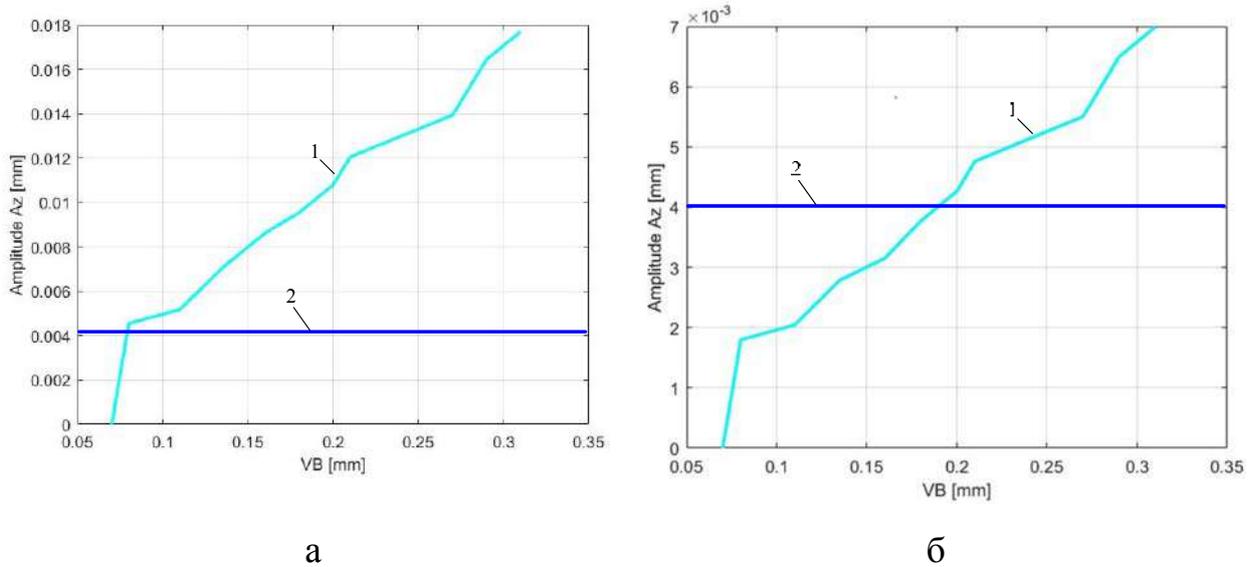
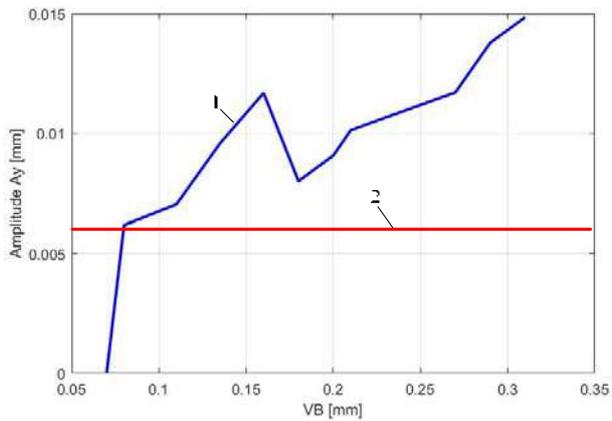


Рисунок 2.17 – Взаимосвязь между амплитудой вибрации режущего инструмента и износом по задней поверхности h_3 по оси Z:

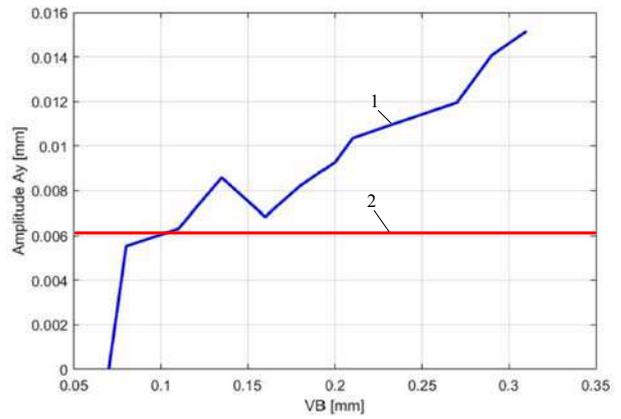
1 – амплитуда вибрации, вызванная P_z (2.9);

2 – амплитуда вибрации, вызванная P_{zT} (2.11);

а – попутное фрезерование; б – встречное фрезерование



а



б

Рисунок 2.18 – Взаимосвязь между амплитудой вибрации режущего инструмента и износом по задней поверхности h_3 по оси Y:

1 – амплитуда вибрации, вызванная P_z (2.9);

2 – амплитуда вибрации, вызванная P_{zT} (2.11);

а – попутное фрезерование; б – встречное фрезерование

Из результатов моделирования видно, что уровень вибрации в процессе попутного фрезерования выше, но износ режущего инструмента происходит медленнее, чем в процессе встречного фрезерования. Для попутного фрезерования толщина резания сменяется от a_{\max} до a_{\min} , поэтому не происходит проскальзывания режущего инструмента и износ режущего инструмента меньше. Так, во время обработки для выполнения операций чистового фрезерования рекомендуется попутное фрезерование, а для черновой обработки – встречного фрезерования.

2.4 Выводы

1 Разработана математическая модель, раскрывающая взаимосвязи между вибрацией, основными параметрами процесса фрезерования и износом режущего инструмента, основанная на следующих предположениях: вибрация режущего инструмента может рассматриваться как гармонические колебания; изменение главной составляющей силы резания P_z является основной причиной изменения вибрации; для учета изменения главной составляющей силы резания по мере из-

нашивания режущего инструмента она должна включать помимо касательной составляющей силы резания F_k силу трения на фаске износа по задней поверхности фрезы $F_{ти}$, пропорциональную твердости материала, ширине и длине фаски износа режущей кромки фрезы по задней поверхности и коэффициенту трения скольжения между заготовкой.

2 Расчет касательной составляющей силы резания с учетом значения износа фрезы более точно описывает процесс фрезерования. Применение такой зависимости для расчета силы резания и амплитуды вибрации позволяет назначать рациональные режимы фрезерования, учитывающие изнашивание режущего инструмента.

3 КОНТРОЛЬ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ ПО УРОВНЮ ВИБРАЦИИ

3.1 Устройство контроля вибрации режущего инструмента при фрезеровании

Анализ, проведенный в подразделе 1.3 диссертации, показал, что для изучения процессов вибрации при фрезеровании необходимо создать специальное устройство и разработать алгоритм обработки полученной информации для контроля вибрации в процессе фрезеровании [16]. Данное устройство должно отвечать следующим требованиям [17, 101]:

- 1) датчик устройства должен быть расположен максимально близко к зоне резания;
- 2) части устройства не должны препятствовать работе системы смены инструмента и системы охлаждения станка в процессе обработки;
- 3) конструкция устройства должна обеспечивать оперативное измерение уровня вибрации;
- 4) устройство должно иметь возможность встраивания в металлообрабатывающие станки многих типов, широко применяемых в машиностроении.

Разработанное устройство состоит из двух основных частей: механической системы и системы обработки сигналов [37].

Механическая система предназначена для измерения амплитуды и частоты вибрации державки с помощью трехосевого датчика ускорения (акселерометра). Разработаны три варианта механической системы контроля вибрации, удовлетворяющие указанным выше требованиям.

Устройство с механической системой первого варианта (МСВ1) фиксируется на фрезерном шпинделе станка в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.1 [17].

Устройство работает следующим образом: вибрация от вращающегося с вибрацией шпинделя через подшипник качения 1 передается на фланец 2, к которому крепится трехмерный датчик. При этом вибрация в горизонтальной плоскости на трехмерный датчик передается через манжету 3, а в вертикальной плоскости – через линейные подшипники 4, установленные на шпильках 5.

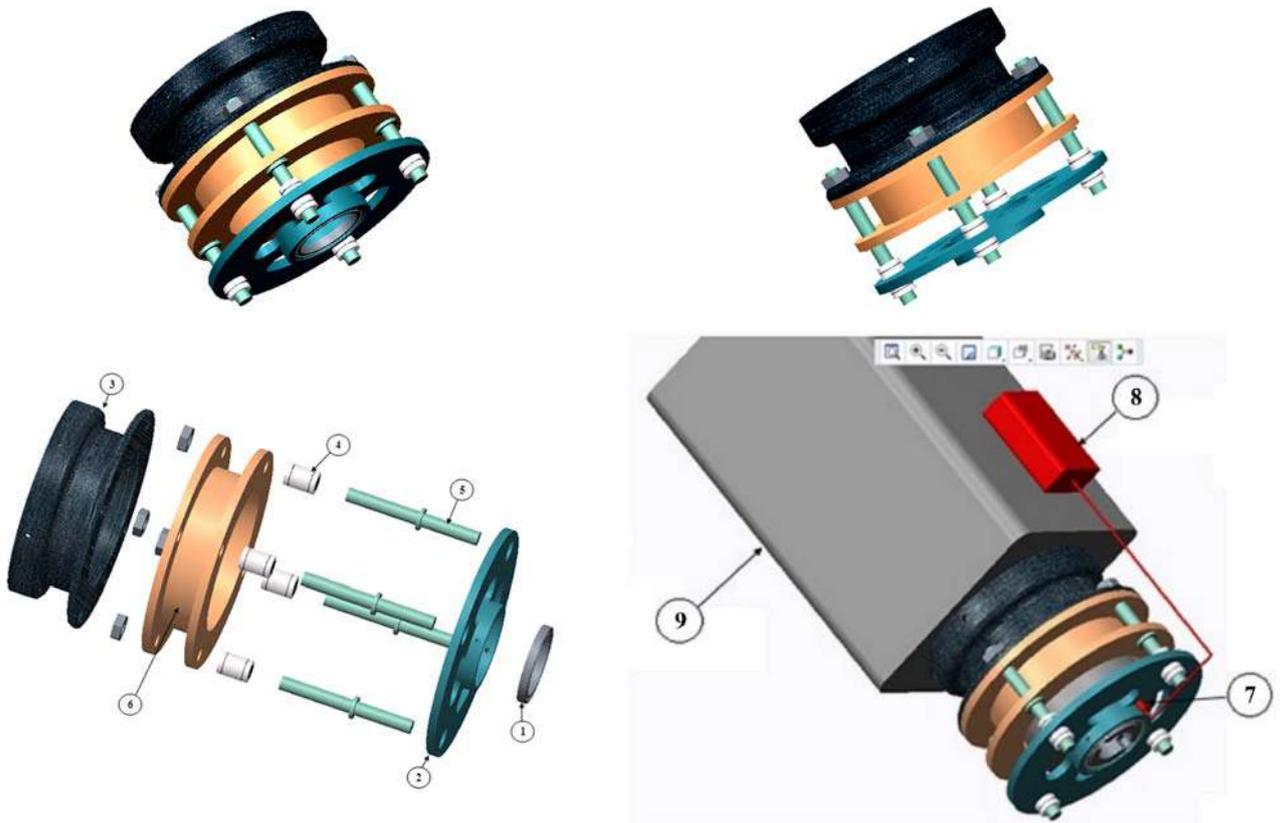


Рисунок 3.1 – Трехмерная модель МСВ1 для измерения вибрации шпинделя фрезерного станка: 1 – подшипник качения, 2 – фланец, 3 – манжета, 4 – линейный подшипник, 5 – шпилька, 6 – неподвижная часть шпинделя, 7 – трехосевой акселерометр, 8 – усилитель сигнала, 9 – кожух шпинделя

Достоинством данного варианта механической системы является непрерывный контроль вибрации и отсутствие препятствий работе систем станка. Однако данная структура имеет ряд недостатков: измерения вибрации на металлообрабатывающих станках разных типов невозможна, так как форма шпинделя каждого станка отличается от других.

Механическая структура в виде руки-робота с тремя степенями свободы представляет собой второй вариант механической системы контроля вибрации (МСВ2) (рисунок 3.2). Данная рука-робот не мешает замене режущего инструмента [17].

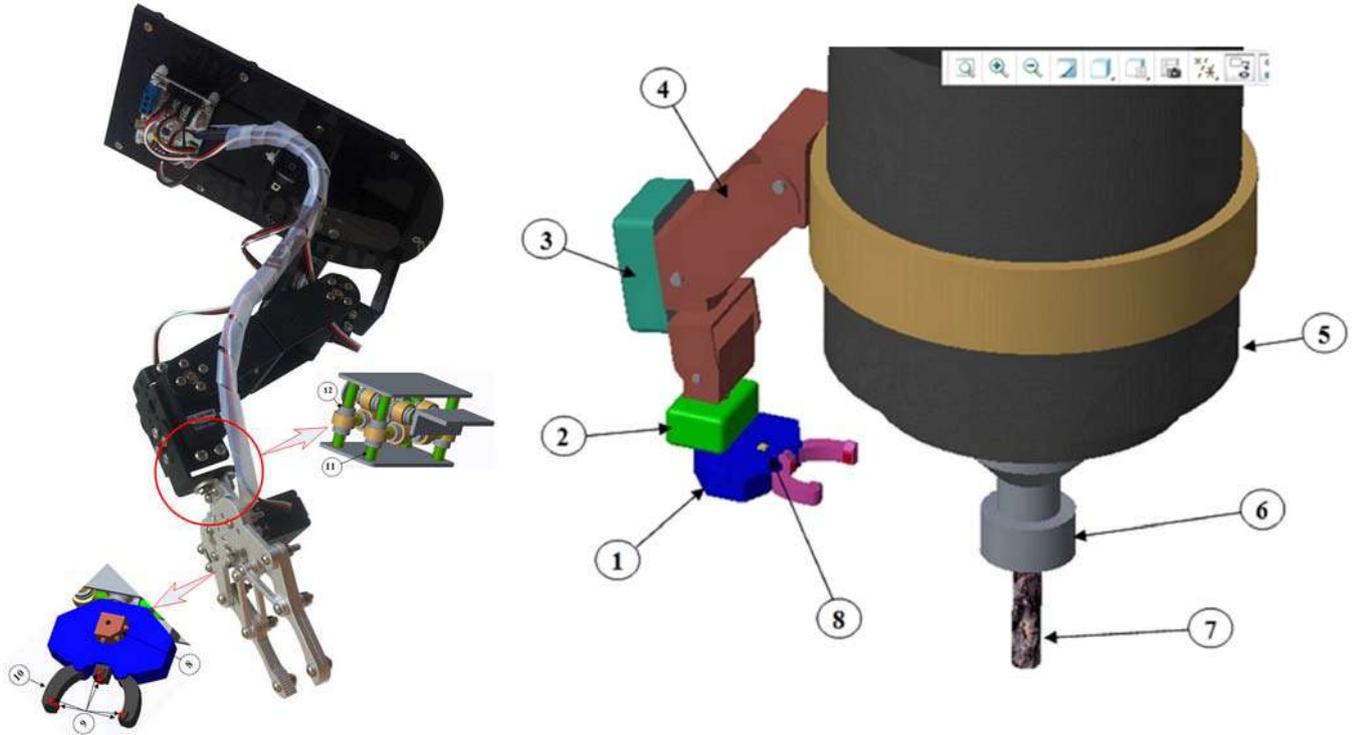


Рисунок 3.2 – Трехмерная модель МСВ2 для измерения вибрации шпинделя фрезерного станка: 1 – захват, 2 – звено с тремя степенями свободы, 3 – усилитель сигнала, 4 – рука с тремя степенями свободы, 5 – кожух шпинделя фрезерного станка, 6 – державка, 7 – режущий инструмент, 8 – трехосевой акселерометр

Звено механизма с тремя степенями свободы 2, отдельно представленное на рисунке 3.4, обеспечивает перемещение захвата 1, отдельно представленного на рисунке 3.3, вдоль трех осей: Ox , Oy , Oz системы координат $OXYZ$. Кроме того, механизм с тремя степенями свободы помогает муфте соединять руку-робота с захватом, не прерывая соединения под воздействием вибрации шпинделя. Однако этот вариант конструкции имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что при частоте вращения шпинделя более 1500 об/мин сила трения между роликами и державкой очень быстро увеличивается, что вызывает сильную вибрацию руки-робота.

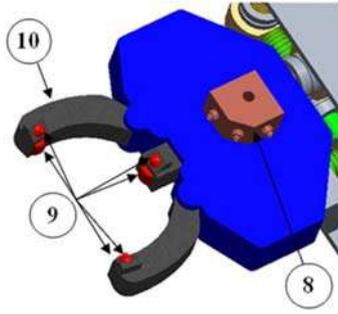


Рисунок 3.3 – Захват:
8 – трехосевой акселерометр,
9 – ролик, 10 – губка

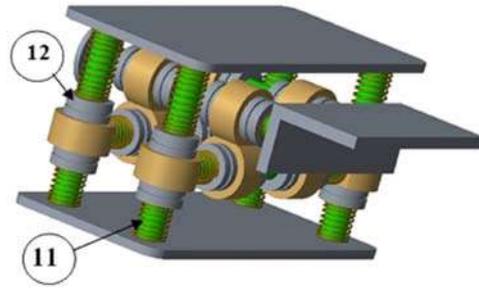


Рисунок 3.4 – Структура звена с тремя
степенями свободы:
11 – пружина, 12 – линейный
подшипник

Устройство работает следующим образом: вибрация от шпинделя через державку инструмента передается на ролики 9 и далее на захват 1, к которому крепится трехосевой акселерометр 8. С помощью трехосевого акселерометра происходит измерение сигнала вибрации по трем осям.

Разработанная система обработки сигналов для представленных выше двух вариантов механической системы включает следующие компоненты: трехосевой акселерометр, модуль усилителя сигнала, радио-модуль, аналого-цифровой преобразователь, персональный компьютер (рисунок 3.5) [17].

Трехосевой акселерометр получает сигналы вибрации шпинделя опосредованно с помощью захвата. Данные с датчиков усиливаются с помощью усилителя сигнала. Полученная информация с помощью беспроводной связи передается на аналого-цифровой преобразователь, который оцифровывает сигналы вибрации и передает информацию на персональный компьютер с установленным программным обеспечением для ее анализа.

Устройство контроля вибрации на державке (рисунок 3.6) представляет собой третий вариант механической системы контроля вибрации. Данное устройство отвечает изложенным выше требованиям и имеет преимущество перед предыдущими вариантами, связанное с удобством эксплуатации [15, 38].

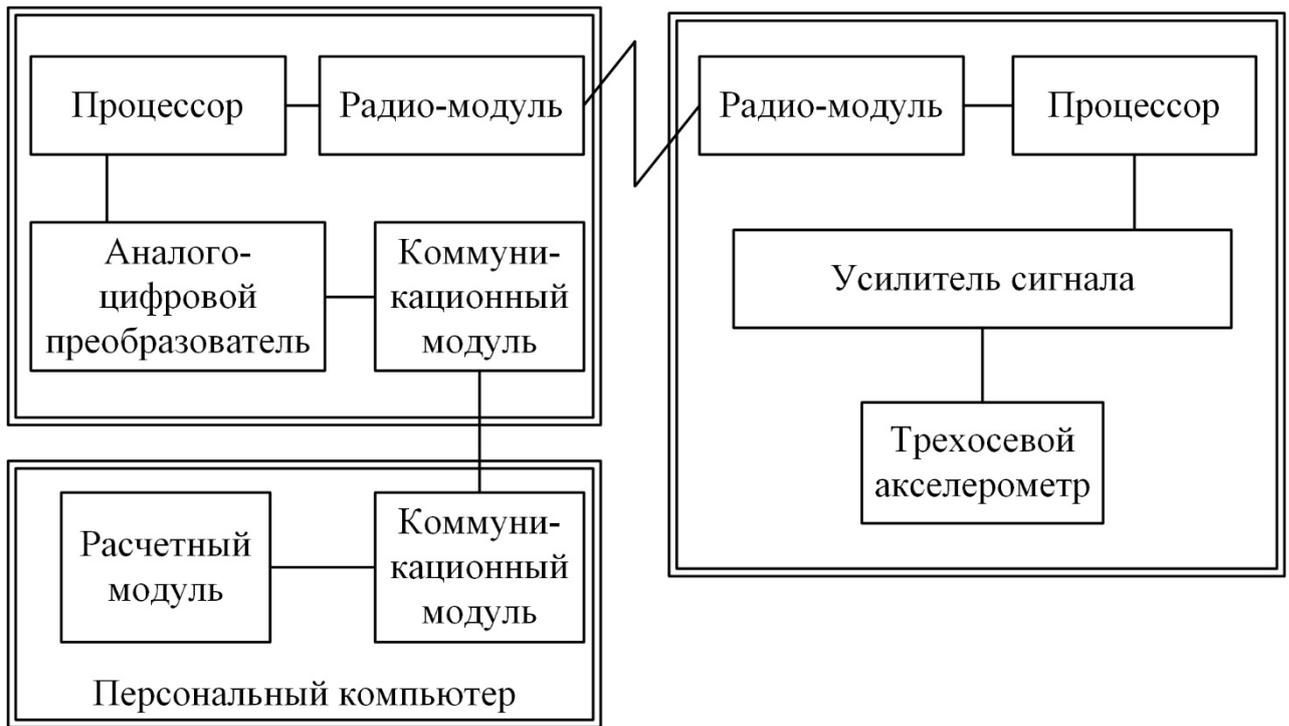


Рисунок 3.5 – Схема системы обработки сигналов

Отличительной особенностью этого устройства является то, что оно регистрирует вибрацию непосредственно на державке инструмента для минимизации погрешности измерения. Устройство состоит из ротационного датчика вибрации, представляющего собой комплект из акселерометра ADXL377 и микроконтроллера ATmega 328P-AU. Датчик соединен с компьютером по беспроводной технологии Bluetooth (рисунок 3.7). Его компоновка выполнена в отдельном корпусе, обеспечивающем крепление устройства к державке и его автономную работу от аккумулятора (рисунок 3.8).

Полученные от датчика сигналы должны пройти ряд преобразований для представления их в удобном для анализа виде. Для снижения уровня шума в исходном сигнале применяется фильтр Калмана [38]. Далее полученный сигнал интегрируется для перехода от ускорения к амплитуде вибрации. Вейвлет-анализ позволяет точно определить частотные характеристики полученного сигнала во времени и их изменения, а также выявить нестационарности в работе технологической системы. При этом надо учесть, что вибрация системы СПИЗ изменяется в широком диапазоне и несет обобщенную информацию о процессе резания, по-

этому необходимо извлечь из сигналов вибрации ту информацию, которая отражает процесс изнашивания режущего инструмента [117].

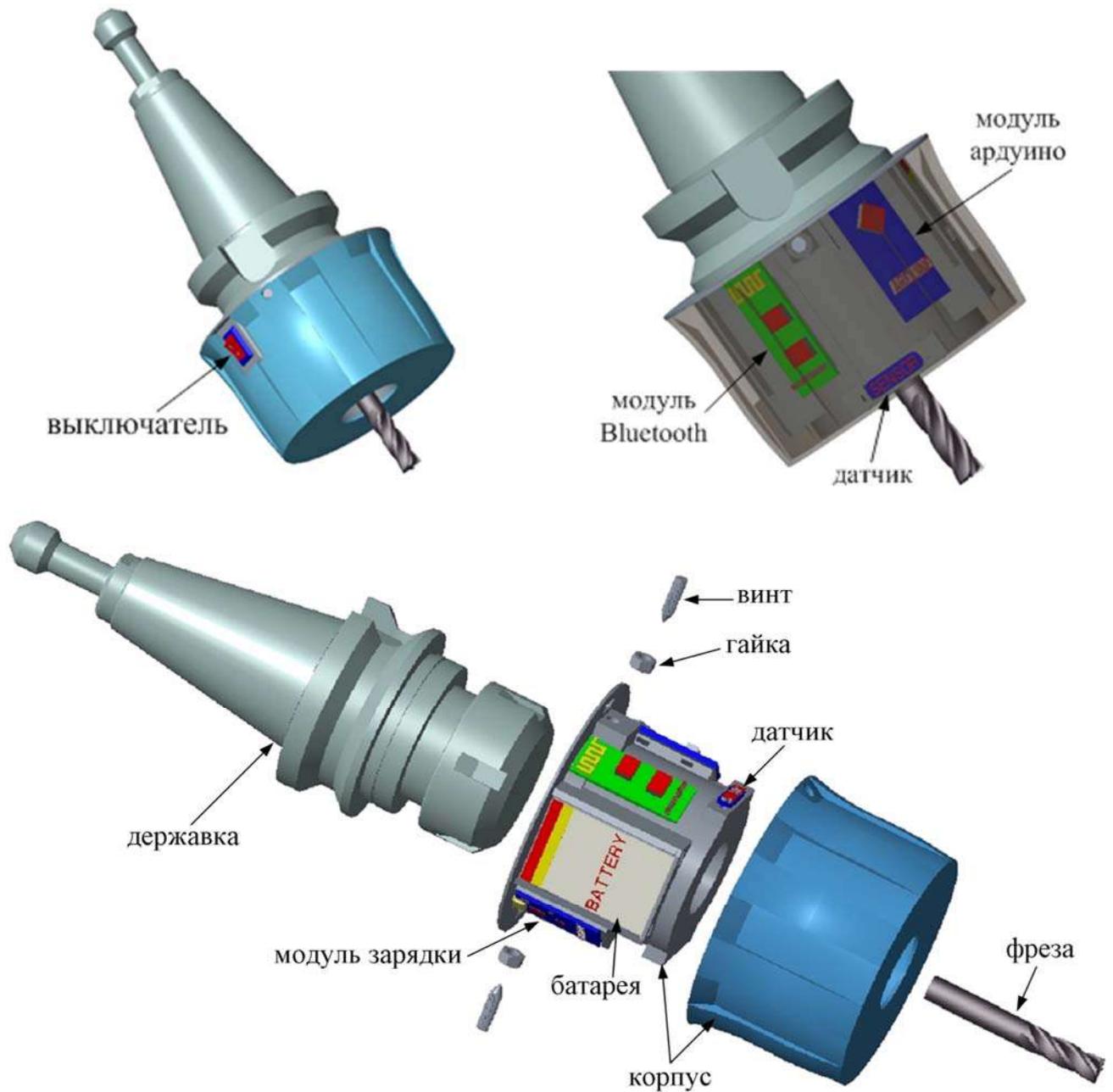


Рисунок 3.6 – Трехмерная модель устройства контроля вибрации на державке

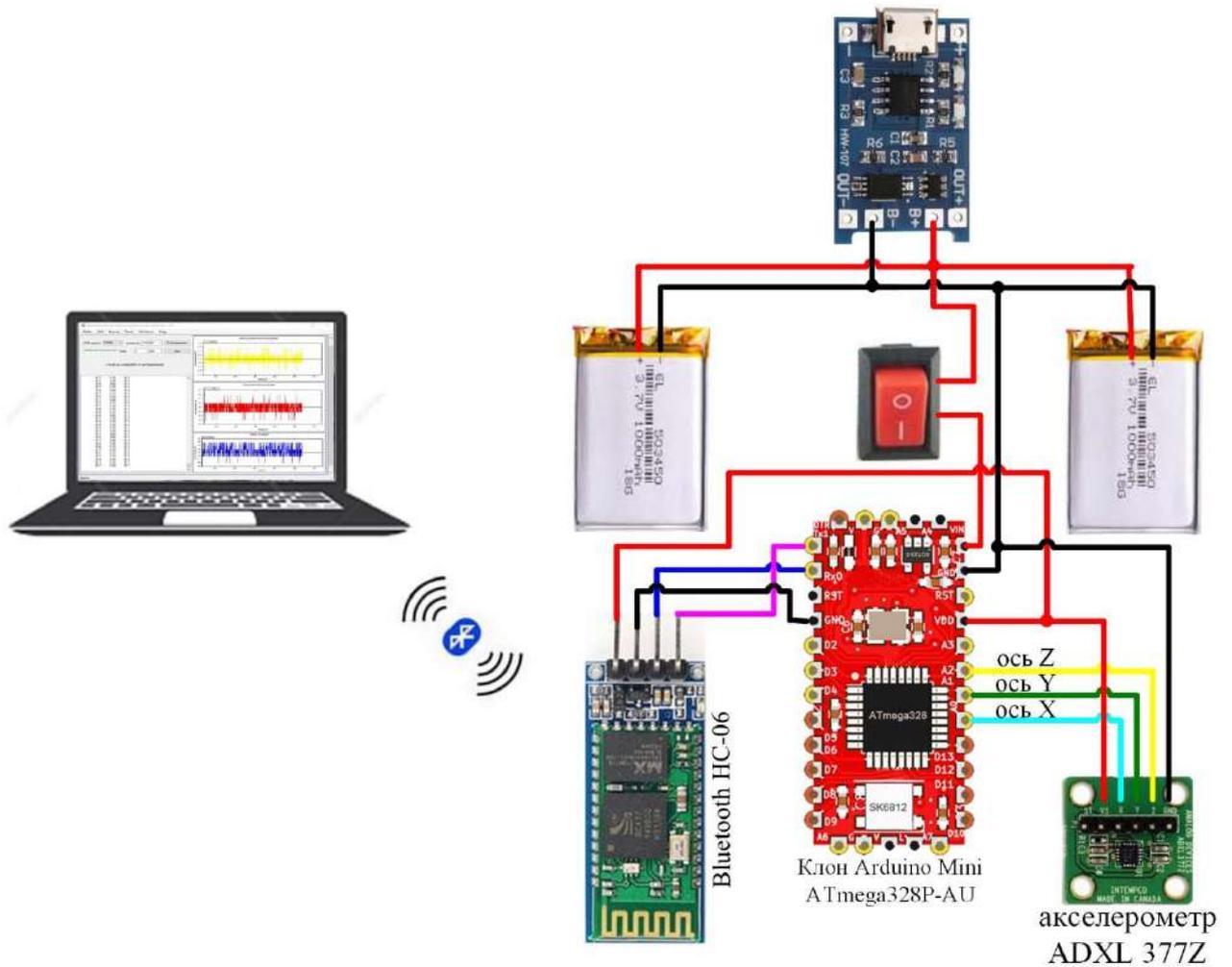


Рисунок 3.7 – Схема подключения компонентов устройства



Рисунок 3.8 – Устройство контроля вибрации

С использованием разработанного устройства контроля вибрации на державке проведены эксперименты для изучения влияния вибрации на качество обработки фрезерованием.

3.2 Экспериментальная проверка устройства контроля вибрации режущего инструмента при фрезеровании

Экспериментальное исследование влияния вибрации на качество обработки фрезерованием проводилось на фрезерном станке с ЧПУ TOPPER TMV720AD (рисунок 3.9) с основными характеристиками: диапазон изменения частоты вращения шпинделя – $20\text{--}10000\text{ мин}^{-1}$, мощность привода главного движения – 11 кВт, диапазон изменения подачи – $1\text{--}30000\text{ }^{\circ}/\text{мин}$, максимальный момент – 140 Н·м.

При проведении эксперимента заготовки обрабатывались шестью концевыми фрезами диаметром 8 мм с четырьмя режущими лезвиями из сплава Guhring DK460UF без покрытия (рисунок 3.10). В процессе фрезерования СОЖ не применялась.



Рисунок 3.9 – Фрезерный станок с ЧПУ TOPPER TMV720AD



Рисунок 3.10 – Концевые фрезы

В ходе эксперимента проводилась обработка заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т размером 14x150x500 мм (рисунок 3.11). 12Х18Н10Т является высокоуглеродистой стойкой к коррозии, немагнитной, титаносодержащей сталью группы аустенитов. В настоящее время она является наиболее часто используемой и распространенной сталью среди всех марок нержавеющей сталей. Главные достоинства стали 12Х18Н10Т – высокая прочность, твердость, ударная вязкость и пластичность.

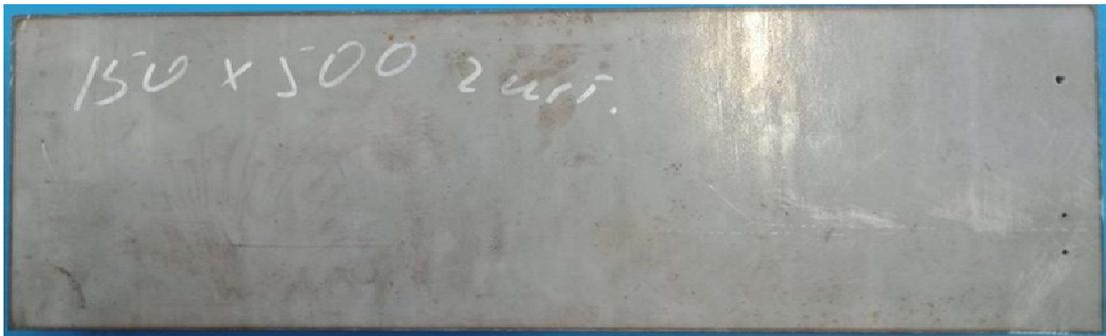


Рисунок 3.11 – Заготовка из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с размером 14x150x500

Для определения величины износа фрез во время эксперимента использовался измерительный микроскоп MV300 Manual Vision System (рисунок 3.12).

После обработки величина шероховатости поверхности заготовки измерялась с помощью мобильного профилометра Hommel Tester T500 (рисунок 3.13).

Экспериментальная установка для измерения вибрации на фрезерном станке с ЧПУ включает в себя 2 персональных компьютера, собирающих информацию о процессе обработки с помощью подключенных к ним трех блоков (рисунок 3.14).



Рисунок 3.12 – Измерительный микроскоп MV300 Manual Vision System



Рисунок 3.13 – Мобильный профилометр Hommel Tester T500

Измерительная установка контроля вибрации состоит из трех блоков.

Первый блок включает разработанное устройство контроля вибрации на державке.

Второй блок состоит из трех трехосевых акселерометров GY-521, расположенных на шпинделе, заготовке и столе станка. Показания с акселерометров передаются по шине данных I2C в одноплатный компьютер Raspberry Pi 3 Model B+ и далее в персональный компьютер в разработанный программный комплекс анализа вибрации.

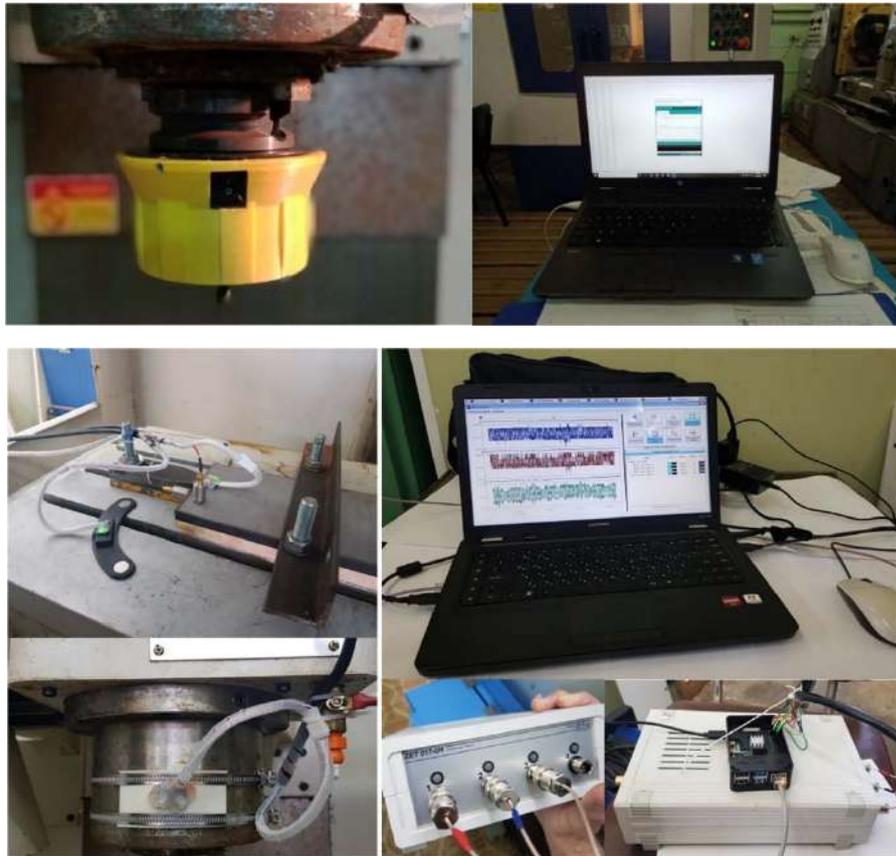
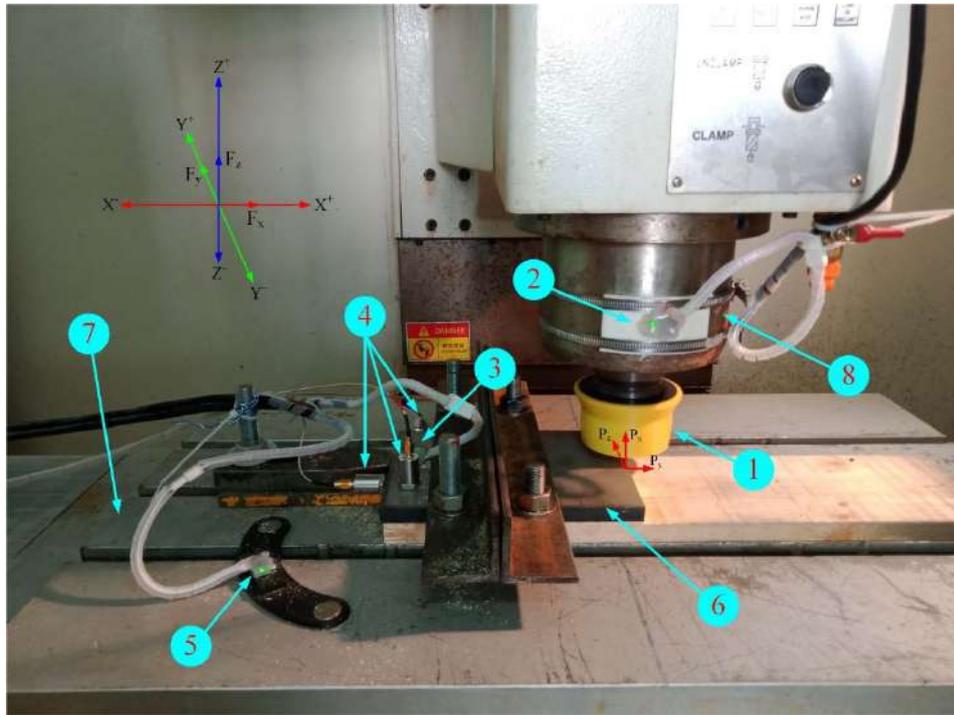


Рисунок 3.14 – Измерительная установка контроля вибрации на фрезерном станке с ЧПУ: 1 – устройство контроля вибрации на державке; 2 – датчик GY 521 на шпинделе; 3 – датчик GY 521 на заготовке; 4 – датчики BC110 фирмы Zetlab; 5 – датчик GY 521 на столе; 6 – заготовка; 7 – стол; 8 – шпиндель

Третий блок построен на базе аппаратно-программного комплекса Zetlab и включает в себя установленные на заготовке датчики вибрации BC110, осциллограф Zet 017-U4, а также соответствующее программное обеспечение.

3.3 Методы обработки сигналов вибрации при контроле состояния режущего инструмента при фрезеровании

Шумопонижение – процесс устранения шумов из полезного сигнала с целью повышения его субъективного качества – является важной задачей обработки сигналов датчиков устройства контроля вибрации режущего инструмента при фрезеровании. Данные, получаемые с помощью датчиков вибрации от механической системы станка, часто используются для проверки состояния оборудования и диагностики неисправностей [147]. Например, сигналы вибрации от дефектных подшипников качения из-за характера вращения обычно наблюдаются как периодические переходные импульсы. На основе анализа сигналов вибрации возможно проведение диагностики: состояния режущего инструмента, дисбаланса державки инструмента, шероховатости поверхности, автоколебаний, неисправности станка и т. д. Однако обычно в полученных сигналах вибрации присутствует много фонового шума, который повреждает фиксируемые переходные импульсы и который следует удалять при извлечении полезного сигнала вибрации для обеспечения надежности диагностики.

Устранение шумов в данных может проводиться во временном пространстве, в частотном пространстве или в частотно-временном пространстве. Во временном пространстве типичным методом устранения шумов является метод усреднения, который наиболее подходит для анализа строго периодического сигнала [114]. В частотном пространстве типичным методом является полосовая фильтрация, которая учитывает только узкополосную информацию [111]. Из-за своих переходных свойств вибрационные сигналы, вызванные дефектами, обычно имеют широкую полосу частот. Поскольку два вышеупомянутых подхода не могут учитывать информацию о времени и частоте одновременно, информация о пе-

реходных импульсах часто будет теряться или шум будет не полностью удален. Напротив, частотно-временное представление может объединять информацию о времени и частоте, что может быть полезным для устранения шумов в данных при совместном рассмотрении обоих видов информации [144]. При таком подходе можно ожидать, что шум во всей частотно-временной плоскости будет удален. На этой основе разработан ряд подходов, исключающих шум во временной области. В основном данные подходы основаны на применении вейвлет-преобразования (ВП) и частотно-временного анализа (ЧВА).

3.3.1 Обработка сигнала вибрации во временном пространстве

Постепенное изменение геометрии режущей части инструмента сказывается на процессе обработки заготовок. Количественные параметры процесса обработки изменяются соразмерно стадиям износа, что сопровождается соответствующим изменением параметров вибрации системы. Анализ этих параметров позволит получить объективную картину состояния режущего инструмента [9].

Для контроля изменения уровня вибрации по мере износа режущего инструмента необходим непрерывный мониторинг. Распространенным методом для этой цели является использование акселерометра. Данный метод надежен и устойчив к внешним воздействиям. Сигналы с датчиков оцифровываются на месте с помощью аналого-цифрового преобразователя и предварительно преобразуются [104]. Для обработки полученных данных и создания на этой основе вибропаспорта системы СПИЗ проведен анализ параметров вибрационных сигналов во временном пространстве [7]:

- 1) амплитуда сигнала (maximum), м/с^2 ;
- 2) среднее значение сигнала (mean), м/с^2 ;
- 3) среднее квадратическое (root mean square), м/с^2 ;
- 4) дисперсия (variance), $\text{м}^2/\text{с}^4$;
- 5) среднеквадратичное отклонение (standard deviation), м/с^2 ;
- 6) коэффициент вариации (coefficient of variation);

- 7) коэффициент асимметрии (skewness);
- 8) коэффициент эксцесса (kurtosis);
- 9) размах колебания (peak-to-peak), м/с²;
- 10) пик-коэффициент (crest factor).

Амплитудой сигнала является наибольшее мгновенное значение сигнала на протяжении всего интервала времени наблюдения

$$A = \max(A_i), \quad (3.1)$$

где A_i – значение сигнала.

Среднее значение сигнала рассчитывается по формуле:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i. \quad (3.2)$$

Среднее квадратическое – это число, равное квадратному корню из среднего арифметического квадратов значений сигнала. Для набора показаний количеством n среднеквадратичное значение (RMS) определяется указанным выражением:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2}. \quad (3.3)$$

Среднеквадратичное значение применяется в расчётах, где существует пропорциональная зависимость не самих переменных значений, а их квадратов.

Дисперсия – математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от ее математического ожидания – рассчитывается как

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \mu)^2}{n - 1}. \quad (3.4)$$

Дисперсия – мера разброса значений случайной величины относительно её математического ожидания. Она показывает, насколько в среднем значения сосредоточены, сгруппированы. Если дисперсия маленькая, то значения сравнительно близки друг к другу, если большая – далеки друг от друга.

Среднеквадратичное отклонение определяется как квадратный корень из дисперсии случайной величины:

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \mu)^2}{n-1}}. \quad (3.5)$$

Среднеквадратичное отклонение является наиболее распространённым показателем рассеивания значений случайной величины относительно её математического ожидания.

Коэффициент вариации считается как отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению:

$$K_v = \frac{\sigma}{\mu}. \quad (3.6)$$

Коэффициентом вариации является мера разброса случайной величины. Она показывает, какую долю средний разброс составляет от среднего значения случайной величины.

Коэффициент асимметрии это отношение центрального момента третьего порядка к кубу среднеквадратичного отклонения:

$$K_s = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \mu)^3}{\sigma^3}. \quad (3.7)$$

Данный параметр характеризует асимметрию распределения имеющейся величины.

Коэффициент эксцесса

$$K_k = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (3.8)$$

является мерой остроты пика распределения величины.

Размах колебания рассчитывается как разница между минимальным и максимальными значениями сигнала вибрации:

$$A_{P2P} = \max(A_i) - \min(A_i). \quad (3.9)$$

Пик-коэффициент показывает отношение амплитудного значения к среднеквадратичному:

$$K_c = \frac{A}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2}}. \quad (3.10)$$

Если зависимость этой величины от другой переменной изобразить в виде графика, то коэффициент формы покажет, насколько форма этой линии отличается от горизонтальной прямой.

Контроль вибрации технологической системы при фрезерной обработке проводился на разработанной экспериментальной установке, представленной в подразделе 3.2, при концевом фрезеровании заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Полученные экспериментальные данные вибрационных сигналов обрабатывались по методу устранения шумов во временном пространстве, и на их основе определялись рассмотренные выше параметры вибрационных сигналов. Результаты обработки по мере увеличения износа инструмента представлены на рисунках 3.16–3.20.

Анализ представленных на рисунках 3.16–3.20 результатов обработки экспериментальных данных вибрационных сигналов показывает, что некоторые рассмотренные параметры вибрационных сигналов по осям X, Y, Z согласованы и ведут себя соответственно стадиям изнашивания режущего инструмента, представленным на рисунке 1.6. Стадия приработки инструмента происходит до достижения износом по задней поверхности уровня 0,028 мм, далее до уровня 0,126 мм происходит нормальное изнашивание инструмента, после которого наступает стадия катастрофического изнашивания.

Среднее значение сигнала вибрации из-за его периодичности практически равно нулю (рисунки 3.15, 3.17 и 3.19, в) и диагностической ценности не представляет.

Среднее квадратическое (рисунки 3.15, 3.17 и 3.19, г) практически совпадает с среднеквадратичным отклонением (рисунки 3.16, 3.18 и 3.20, а) и дисперсией (рисунки 3.15, 3.17 и 3.19, д), поэтому для практических расчетов, связанных с построением вибропаспорта системы СПИЗ, целесообразнее использовать среднее квадратическое значение сигнала в связи с меньшей сложностью его расчета.

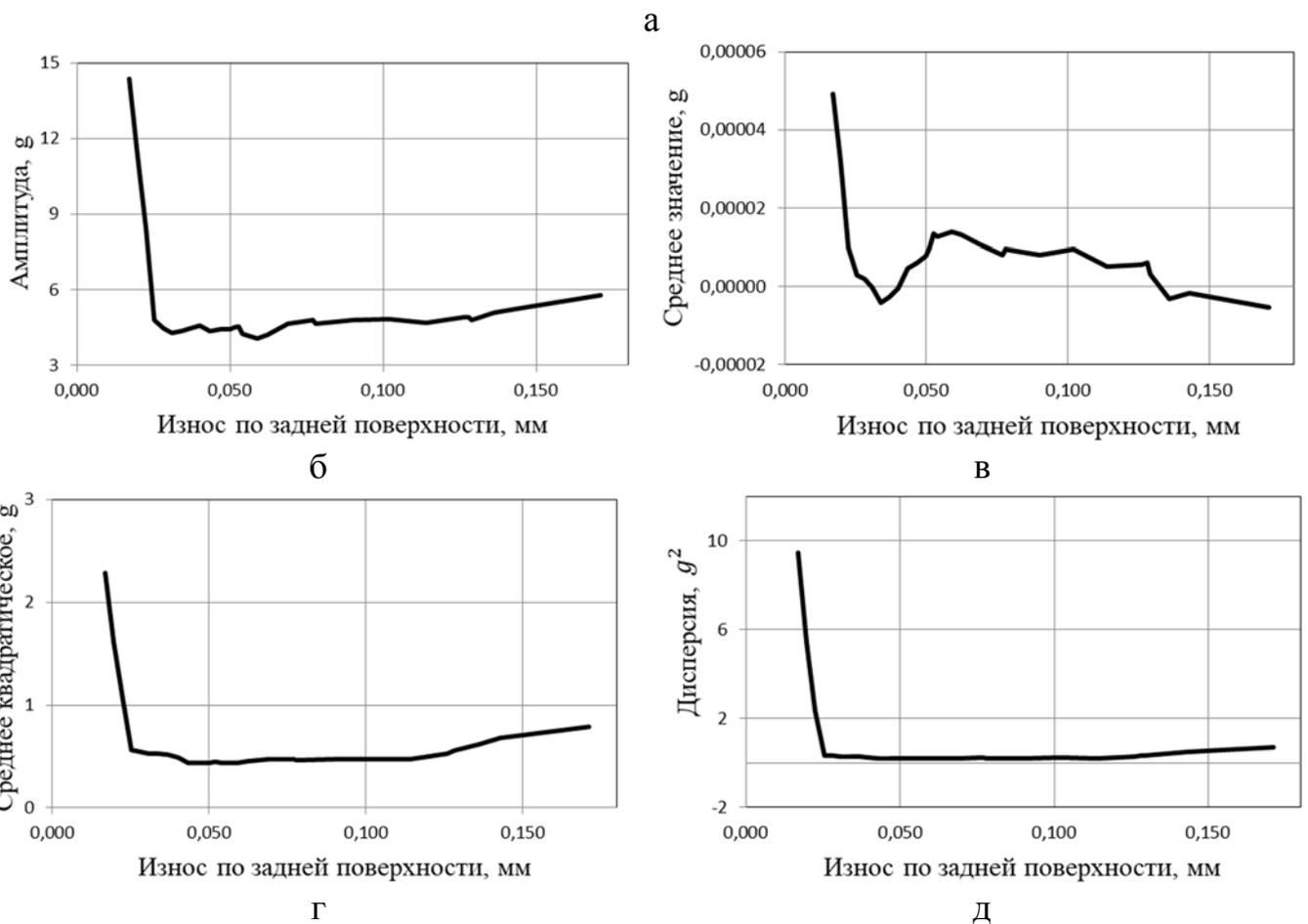
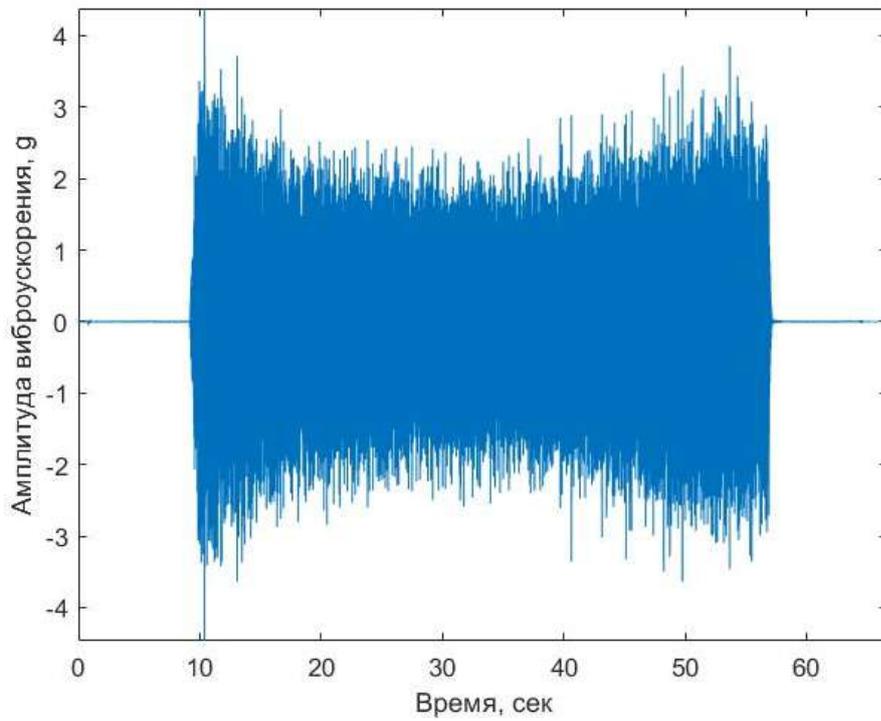


Рисунок 3.15 – Параметры вибрационных сигналов во временном пространстве по оси X: а – виброускорение; б – амплитуда сигнала; в – среднее значение сигнала; г – среднее квадратическое; д – дисперсия

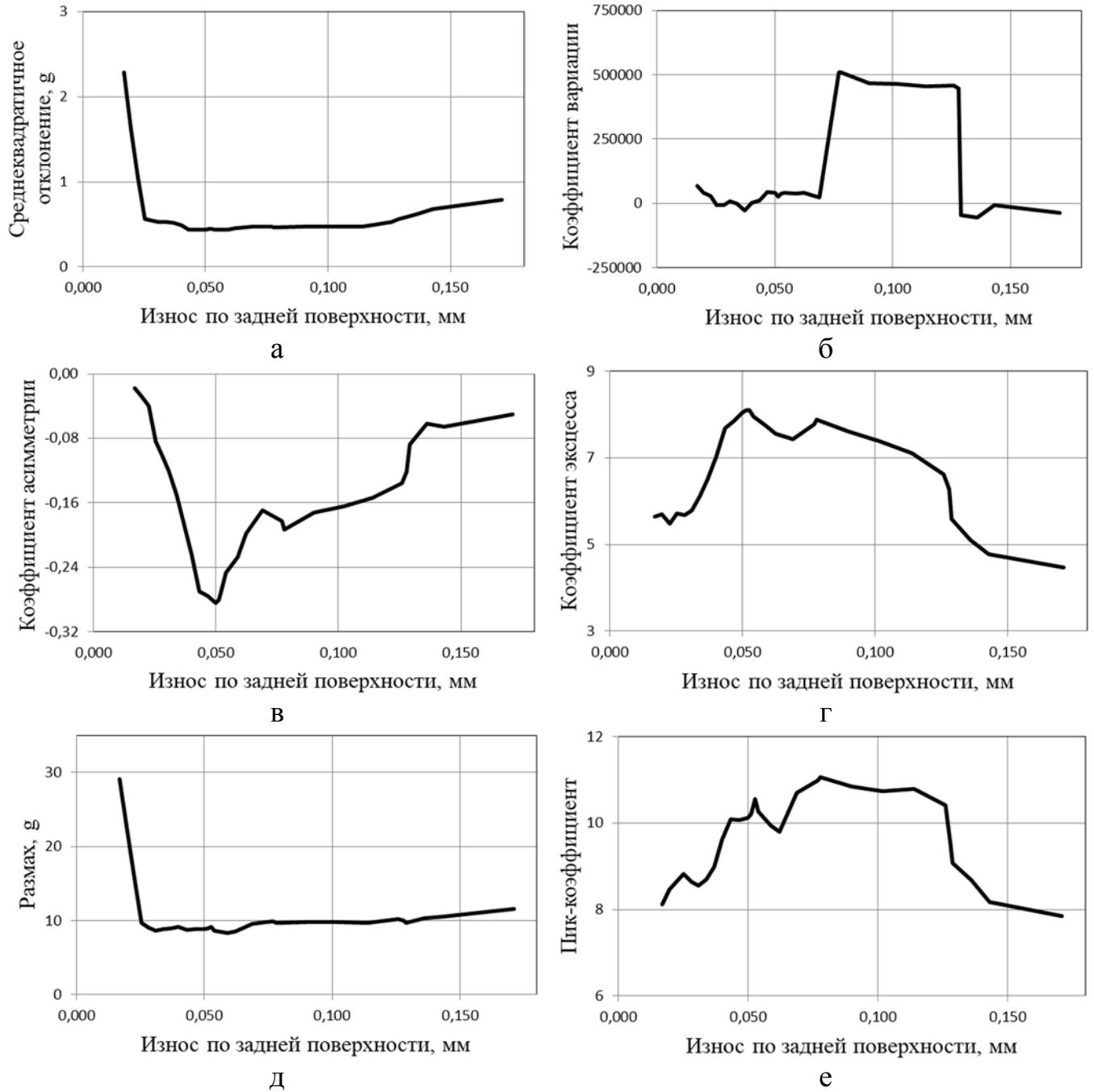
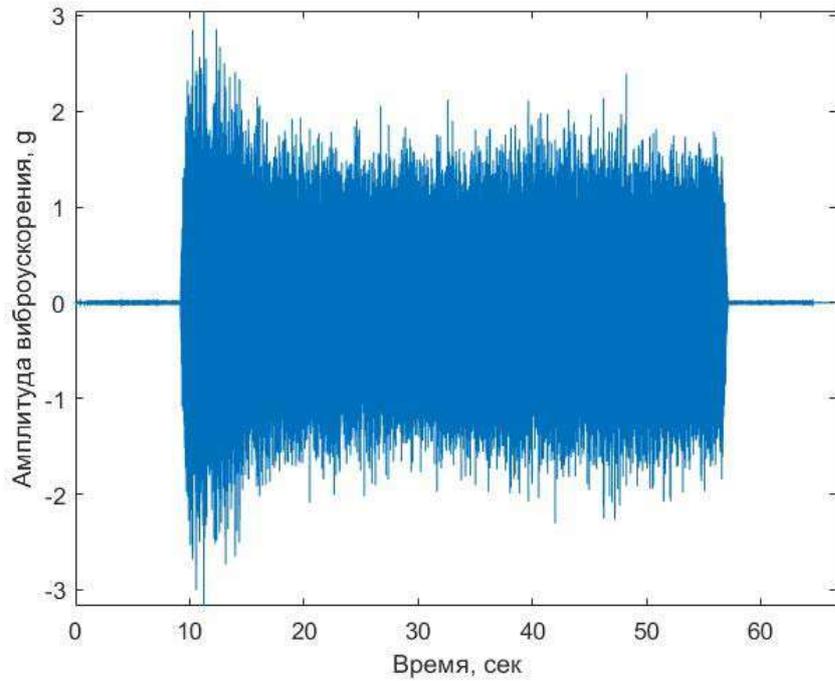
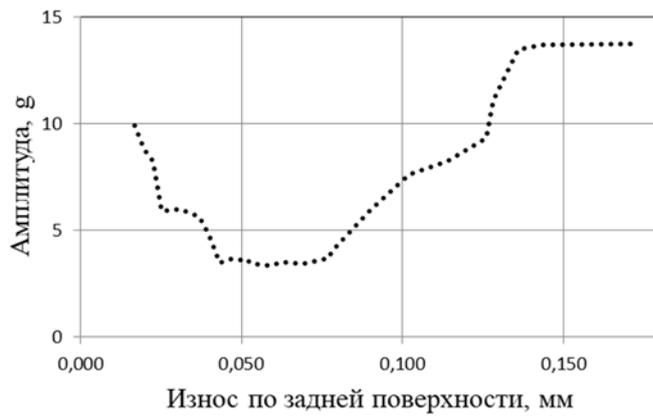


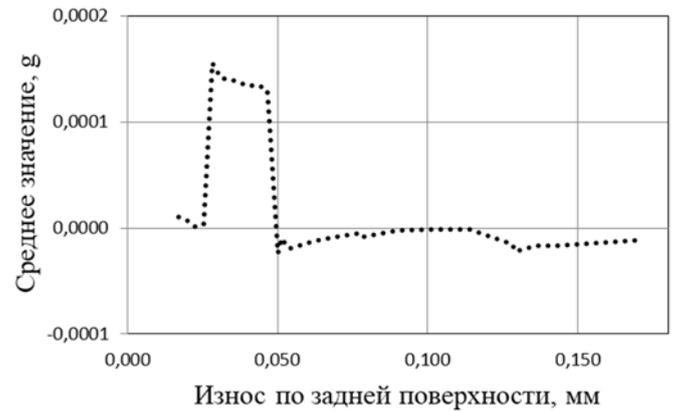
Рисунок 3.16 – Параметры вибрационных сигналов во временном пространстве по оси X: а – среднеквадратичное отклонение; б – коэффициент вариации; в – коэффициент асимметрии; г – коэффициент эксцесса; д – размах колебания; е – пик-коэффициент



а



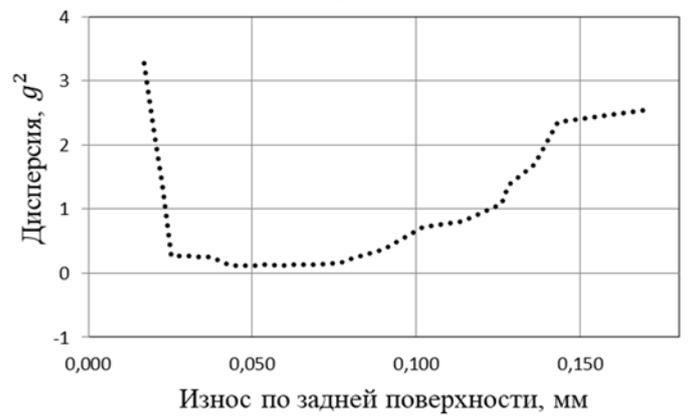
б



в



г



д

Рисунок 3.17 – Параметры вибрационных сигналов во временном пространстве по оси Y: а – амплитуда виброускорения; б – амплитуда сигнала; в – среднее значение сигнала; г – среднее квадратическое; д – дисперсия

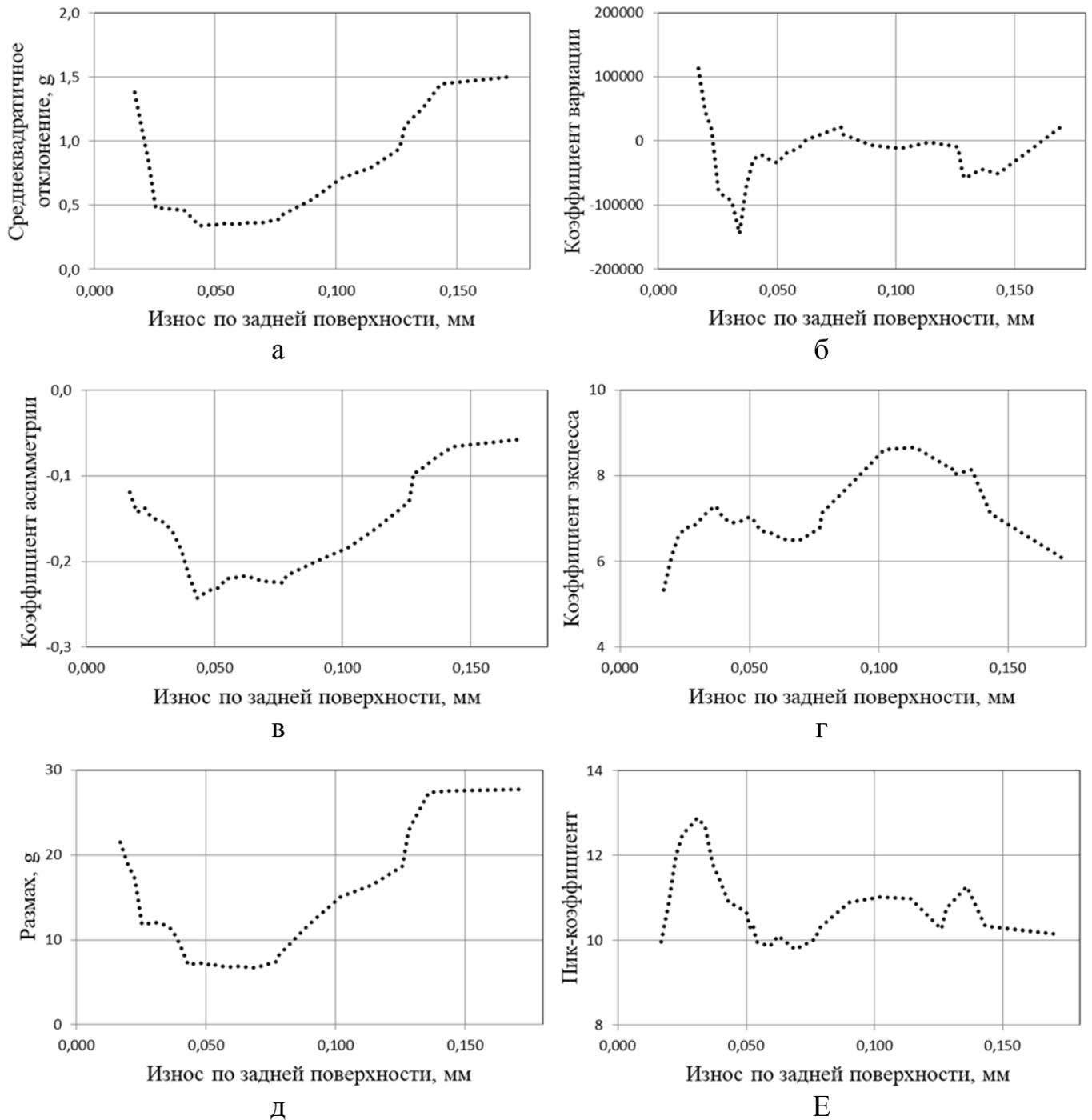


Рисунок 3.18 – Параметры вибрационных сигналов во временном пространстве по оси Y: а – среднеквадратичное отклонение; б – коэффициент вариации; в – коэффициент асимметрии; г – коэффициент эксцесса; д – размах колебания; е – пик-коэффициент

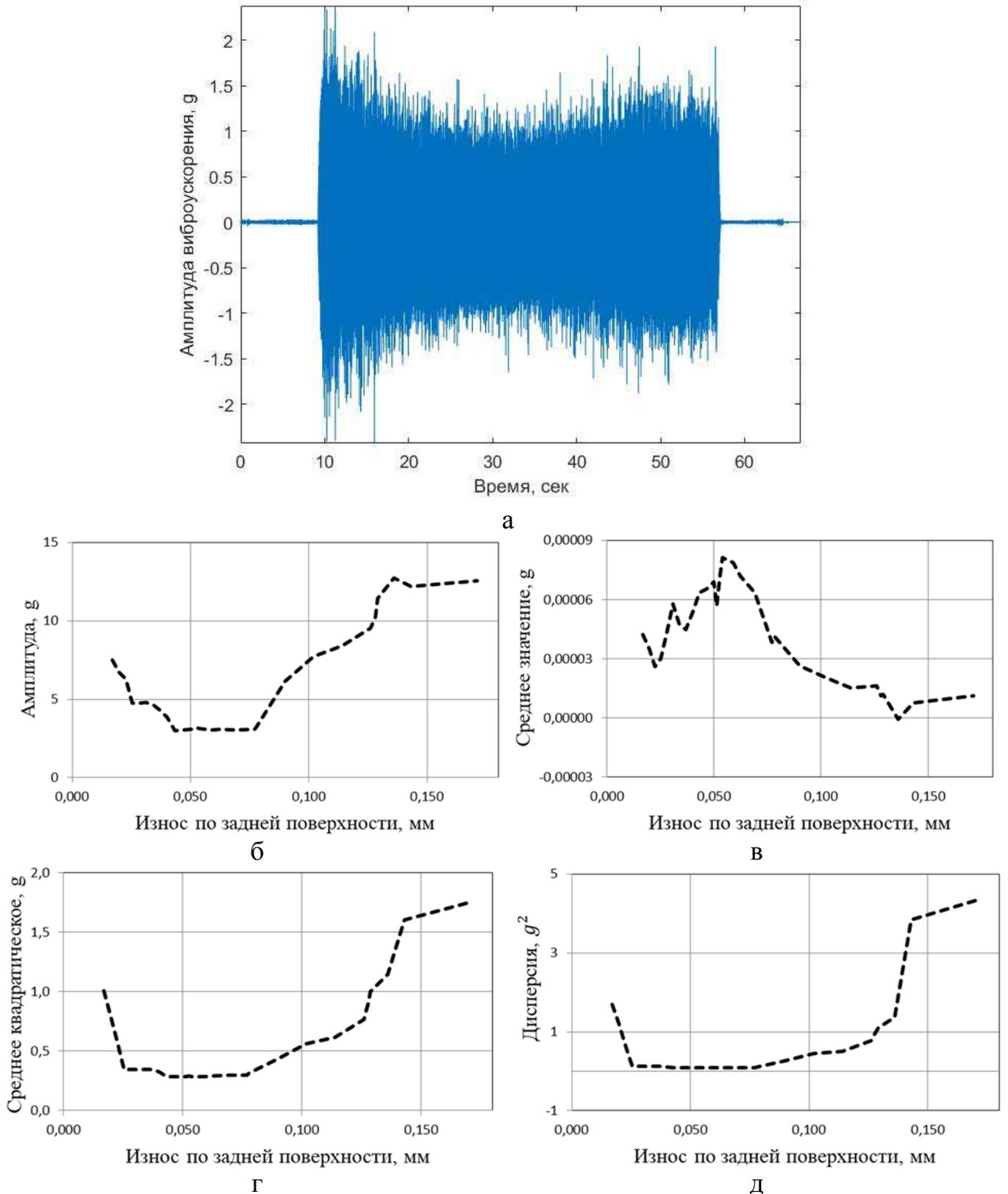


Рисунок 3.19 – Параметры вибрационных сигналов во временном пространстве по оси Z: а – амплитуда виброускорения; б – амплитуда сигнала; в – среднее значение сигнала; г – среднее квадратическое; д – дисперсия

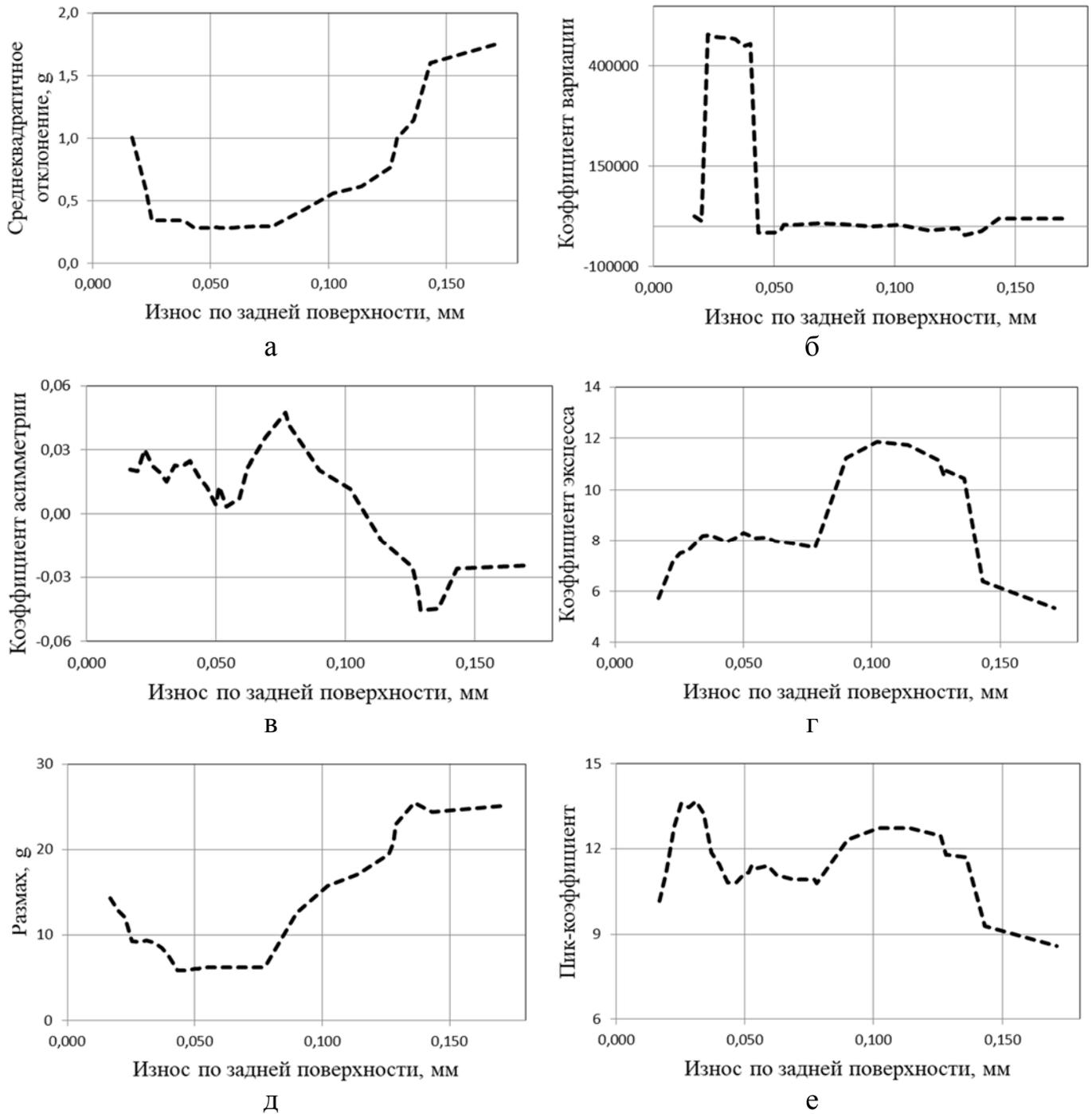


Рисунок 3.20 – Параметры вибрационных сигналов во временном пространстве по оси Z: а – среднеквадратичное отклонение; б – коэффициент вариации; в – коэффициент асимметрии; г – коэффициент эксцесса; д – размах колебания; е – пик-коэффициент

Коэффициент вариации (рисунки 3.16, 3.18 и 3.20, б) из-за близости к нулю среднего значения сигнала принимает очень высокие значения и поэтому большой практической значимости при анализе не представляет.

Коэффициент асимметрии (рисунки 3.16, 3.18 и 3.20, в), коэффициент эксцесса (рисунки 3.16, 3.18 и 3.20, г) и пик-коэффициент (рисунки 3.16, 3.18 и 3.20, е) диагностических ценностей не представляют.

Амплитуда сигнала (рисунки 3.15, 3.17 и 3.19, б) и размах колебания (рисунки 3.16, 3.18 и 3.20, д) характеризуют только максимальное и минимальное значения вибрации, поэтому эти параметры вибрационных сигналов представляют интерес только при проведении экспериментов, а в производственных условиях могут приводить к неточным результатам.

Таким образом, в качестве математической основы методики обработки сигналов вибрации для выделения информации, отображающей процесс изнашивания режущей части инструмента, предлагается из проанализированных параметров вибрационного сигнала использовать среднее квадратическое. По результатам обработки информации о вибрации в процессе резания с помощью данной методики можно получить вибропаспорт системы СПИЗ, позволяющий оценивать флуктуацию ее технологических параметров, хранить информацию, отображающую непосредственно процесс изнашивания режущей части инструмента, и прогнозировать на этой основе остаточный ресурс инструмента. Прогноз остаточного ресурса инструмента может быть использован, например, при назначении режимов резания на чистовых или получистовых операциях обработки дорогих заготовок для принятия решения о своевременной замене инструмента и предотвращения неисправимого брака и, соответственно, повышения эффективности процесса обработки.

3.3.2 Обработка сигнала вибрации в частотном пространстве

Методы, основанные на частотном диапазоне, извлекают информацию о состоянии инструмента из частотного пространства вибрационного сигнала на

основе частотной структуры и гармонических составляющих сигнала. Параметры вибрационного сигнала в частотном пространстве отражают распределение амплитуды сигнала в рассматриваемом диапазоне частот. Получение параметров вибрационного сигнала в частотном пространстве проводится с помощью быстрого преобразования Фурье [77]. Далее на их основе определяются такие параметры, как спектр мощности, амплитуда от пика до пика и частота зубьев [116].

Вибрационный сигнал в частотном пространстве оценивается следующими параметрами: максимальная мощность спектра (*maximum*), суммарная мощность спектра (*sum*), среднее значение мощности спектра (*mean*), дисперсия мощности спектра (*variance*), коэффициент асимметрии мощности спектра (*skewness*), коэффициент эксцесса мощности спектра (*kurtosis*) и относительный максимум мощности спектра (*relative spectral peak*) [10].

Максимальная мощность спектра – это максимальное значение на всем интервале плотности спектра, т. е. максимальная мощность, приходящаяся на единственный интервал частоты:

$$S_{MAX} = \max(S(f)_i), \quad (3.11)$$

где $S(f)_i$ – мощность спектра на i -й частоте.

Сумма всех значений мощности спектра на всем интервале плотности спектра называется суммарной мощностью спектра:

$$S_{SUM} = \sum_{i=1}^n S(f)_i, \quad (3.12)$$

где n – число частот в спектре.

Среднее значение мощности спектра определяется по формуле:

$$S_{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S(f)_i. \quad (3.13)$$

Дисперсия мощности спектра

$$S_V = \frac{\sum_{i=1}^n (S(f)_i - S_{\mu})^2}{n - 1} \quad (3.14)$$

характеризует рассеяние мощности спектра по частотам.

Асимметрия мощности спектра оценивается как отношение центрального момента третьего порядка к кубу среднеквадратичного отклонения $S_{\sigma} = \sqrt{S_V}$:

$$S_S = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (S(f)_i - S_V)^3}{S_{\sigma}^3}. \quad (3.15)$$

Коэффициент эксцесса мощности спектра

$$S_K = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (S(f)_i - S_V)^4}{S_{\sigma}^4} \quad (3.16)$$

является мерой остроты пика распределения мощности спектра.

Относительный максимум мощности спектра

$$S_{RSP} = \frac{S_{\max}}{S_{\mu}} \quad (3.17)$$

позволяет сравнивать мощности спектров разных по ширине частотных диапазонов.

Пример спектра сигнала вибрации технологической системы при фрезеровании концевой фрезой заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, полученный с помощью быстрого преобразования Фурье, и результаты обработки спектра сигнала вибрации по мере изнашивания инструмента представлены на рисунках 3.21–3.23.

Анализ представленных на рисунках 3.21–3.23 результатов обработки экспериментальных данных вибрационных сигналов, как и в предыдущем случае, показывает, что все рассмотренные параметры вибрационных сигналов по осям X, Y, Z согласованы и ведут себя соответственно стадиям изнашивания режущего инструмента, представленным на рисунке 1.6. Стадия приработки инструмента происходит до достижения износом по задней поверхности уровня 0,028 мм, далее до уровня 0,126 мм происходит нормальное изнашивание инструмента, после которого наступает стадия катастрофического изнашивания.

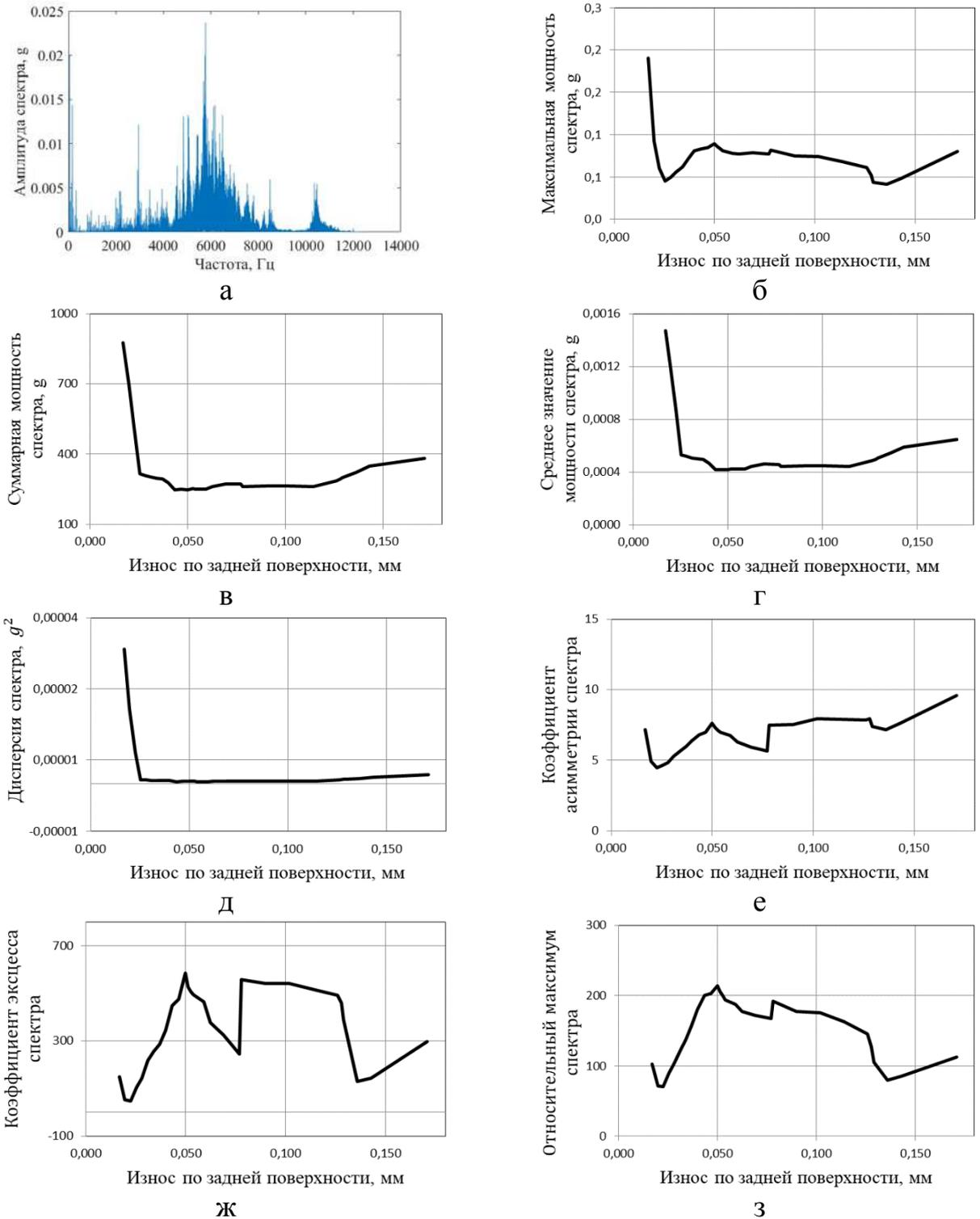


Рисунок 3.21 – Пример спектра сигнала вибрации по оси X и результаты его обработки: а – спектр вибрации при уровне износа пластины по задней поверхности 0,171 мм; б – максимальная мощность спектра; в – суммарная мощность спектра; г – среднее значение мощности спектра; д – дисперсия; е – коэффициент асимметрии; ж – коэффициент эксцесса; з – относительный максимум

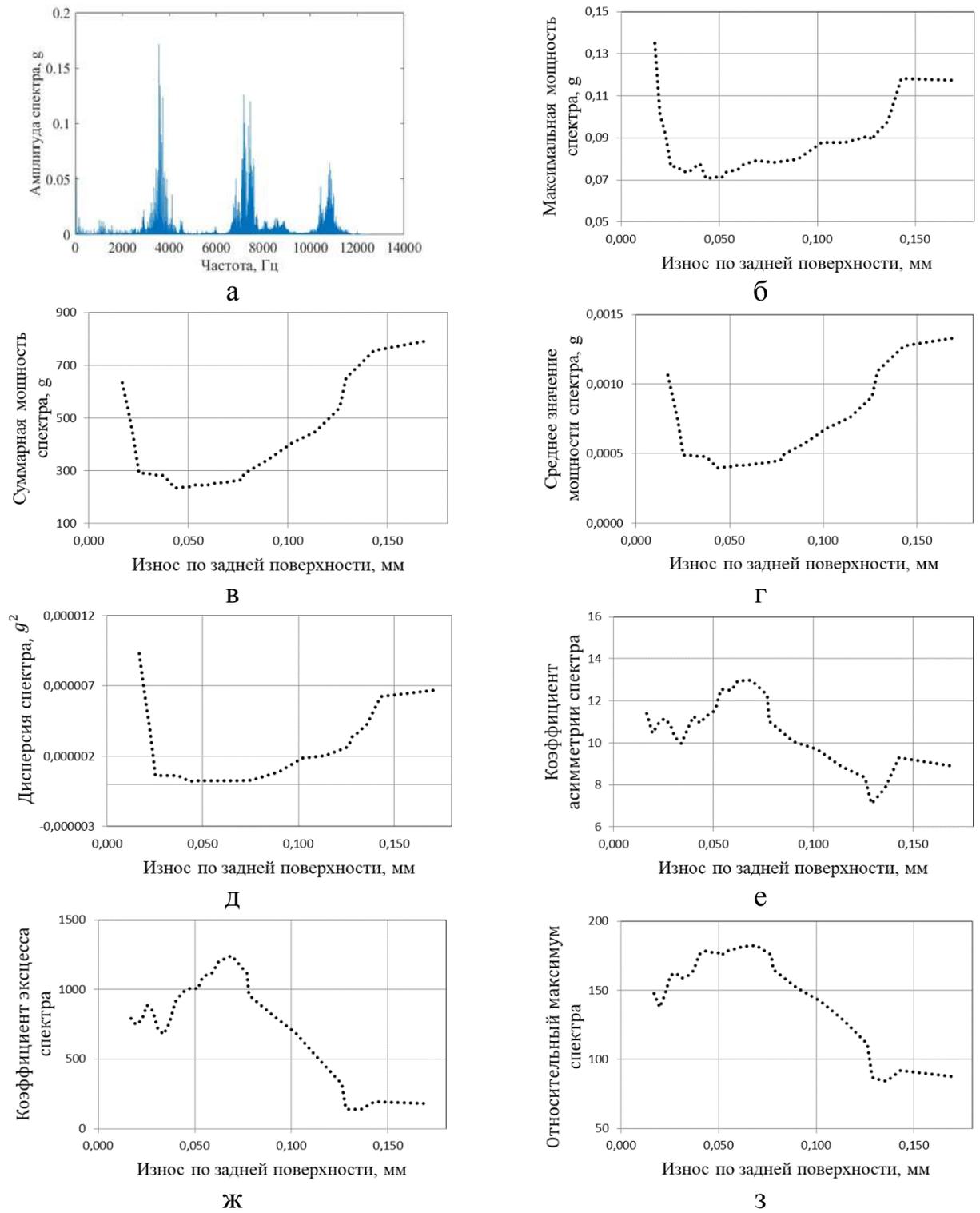


Рисунок 3.22 – Пример спектра сигнала вибрации по оси Y и результаты его обработки: а – спектр вибрации при уровне износа пластины по задней поверхности 0,171 мм; б – максимальная мощность спектра; в – суммарная мощность спектра; г – среднее значение мощности спектра; д – дисперсия; е – коэффициент асимметрии; ж – коэффициент эксцесса; з – относительный максимум

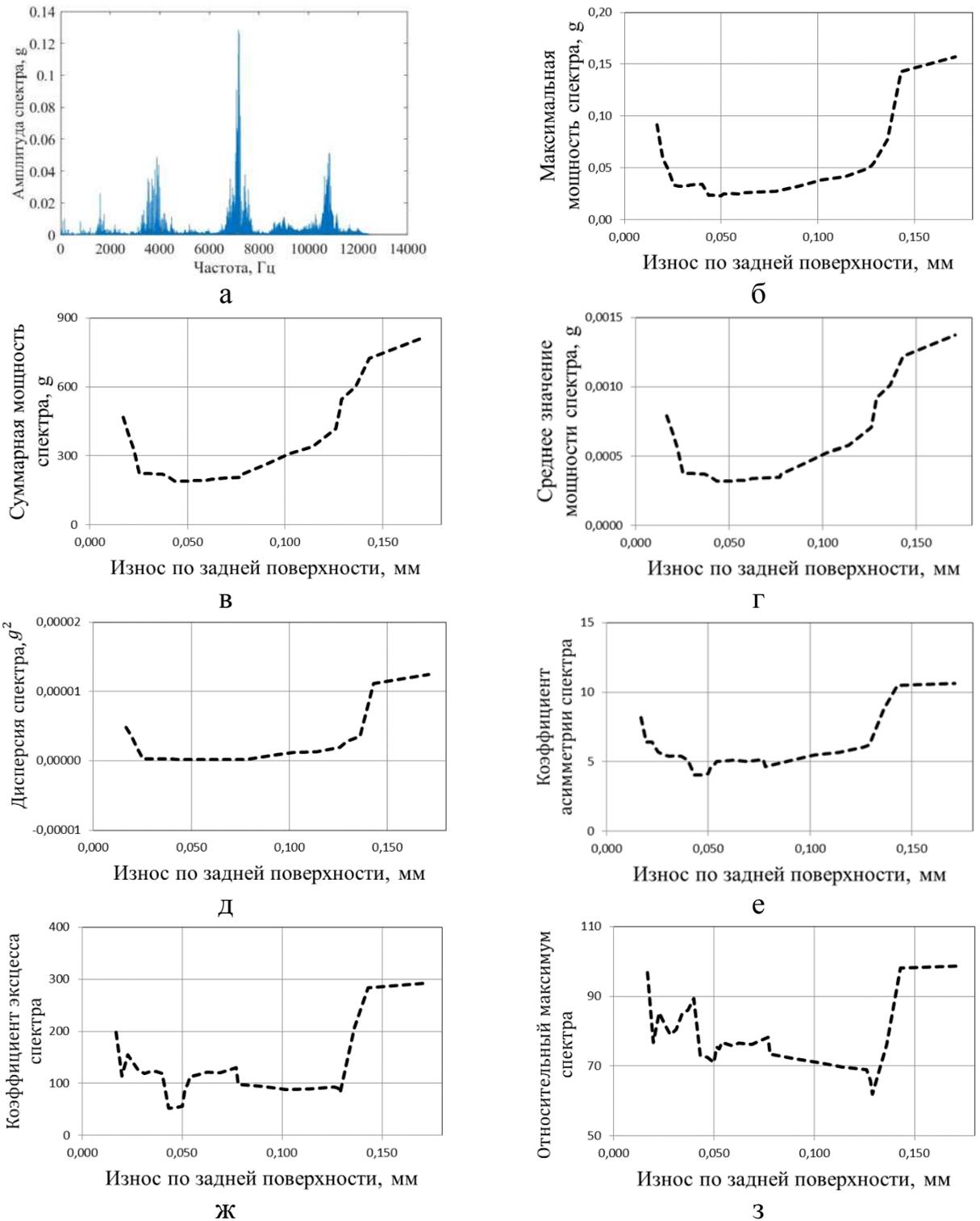


Рисунок 3.23 – Пример спектра сигнала вибрации по оси Z и результаты его обработки: а – спектр вибрации при уровне износа пластины по задней поверхности 0,171 мм; б – максимальная мощность спектра; в – суммарная мощность спектра; г – среднее значение мощности спектра; д – дисперсия; е – коэффициент асимметрии; ж – коэффициент эксцесса; з – относительный максимум

С точки зрения отношения сигнал/шум, удобства практического применения и возможности отображать процесс изнашивания режущей части инструмента, из данных коэффициентов предпочтение следует отдать максимальной мощности спектра, которое может быть использовано в качестве математической основы методики обработки сигналов вибрации для занесения полученной информации в вибропаспорт системы СПИЗ.

Однако спектр вибрационного сигнала отражает только изменение сигнала по частотам и не предоставляет никакой привязки ко времени обработки заготовок. Данное ограничение может быть преодолено с использованием временно-частотного пространства, обеспечивающего привязку спектра вибрационного сигнала ко времени.

3.3.3 Обработка сигнала вибрации на основе метода непрерывного вейвлет-анализа

Для получения частотных характеристик динамических систем широко используют спектральный анализ сигнала вибрации. Наибольшее распространение в качестве методов спектрального анализа получили «Быстрое преобразование Фурье» и «Оконное преобразование Фурье». Однако данные методы не позволяют точно локализовать частотные характеристики системы во времени, поэтому возникают трудности в идентификации колебаний, далеких по форме от косинуса и синуса, и в определении случайных всплесков, характерных для механической обработки [40]. Чтобы преодолеть недостатки методов, основанных на временном и частотном пространствах, в данной работе предлагается для выделения контроля состояния режущего инструмента в процессе фрезерования применять метод непрерывного вейвлет-анализа.

Применительно к диагностике состояния режущего инструмента коэффициенты вейвлет-анализа представляют собой изменения уровня сигнала относительно времени и частоты. В работе [121] методы непрерывного вейвлет-анализа применены для извлечения волнообразных характеристик вибрационного сигнала.

ла. При этом установлено, что свойства и характеристики новых и изношенных инструментов различны. Метод непрерывного вейвлет-анализа признан эффективным инструментом для стационарных и нестационарных сигналов.

Вейвлет-анализ определяется в зависимости от времени t как семейство функций, полученное путем масштабирования и трансляции базисной волнообразной функции $\psi_{b,a}(t)$ как

$$\psi_{b,a}(t) = a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

где $a > 0$ – параметр изменения временного масштаба, который указывает на сжатие, если $a < 1$, или расширение, если $a > 1$; b – параметр сдвига во времени. Множитель $a^{-1/2}$ обеспечивает независимость нормы функций $\psi(t)$ от масштабирующего числа a . Соответственно, метод непрерывного вейвлет-анализа амплитуды сигнала $A(t)$ определяется как:

$$HBA_A(b,a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} A(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \langle A(t), \psi_{b,a}(t) \rangle.$$

Метод непрерывного вейвлет-анализа позволяет точно определить частотные характеристики во времени и их изменения, а также выявить нестационарности в работе. Он преодолевает ограничения методов анализа вибрации во временном и частотном пространстве, указанные ранее. Результаты обработки экспериментальных данных с помощью метода непрерывного вейвлет-анализа в виде скалограммы представлены на рисунке 3.24. На скалограмме видно, что в стадии нормального изнашивания режущего инструмента ($h_3 = 0,028 - 0,126$ мм и $R_a = 0,27 - 0,96$ мкм) компоненты спектра частот сигнала вибрации процесса резания ярко выражены.

Пример применения метода непрерывного вейвлет-анализа к анализу изменения спектра уровня сигнала вибрации технологической системы при фрезеровании концевой фрезой заготовки из нержавеющей стали 12X18H10T в соответствии со стадиями изнашивания инструмента представлен на рисунках 3.25–3.27.

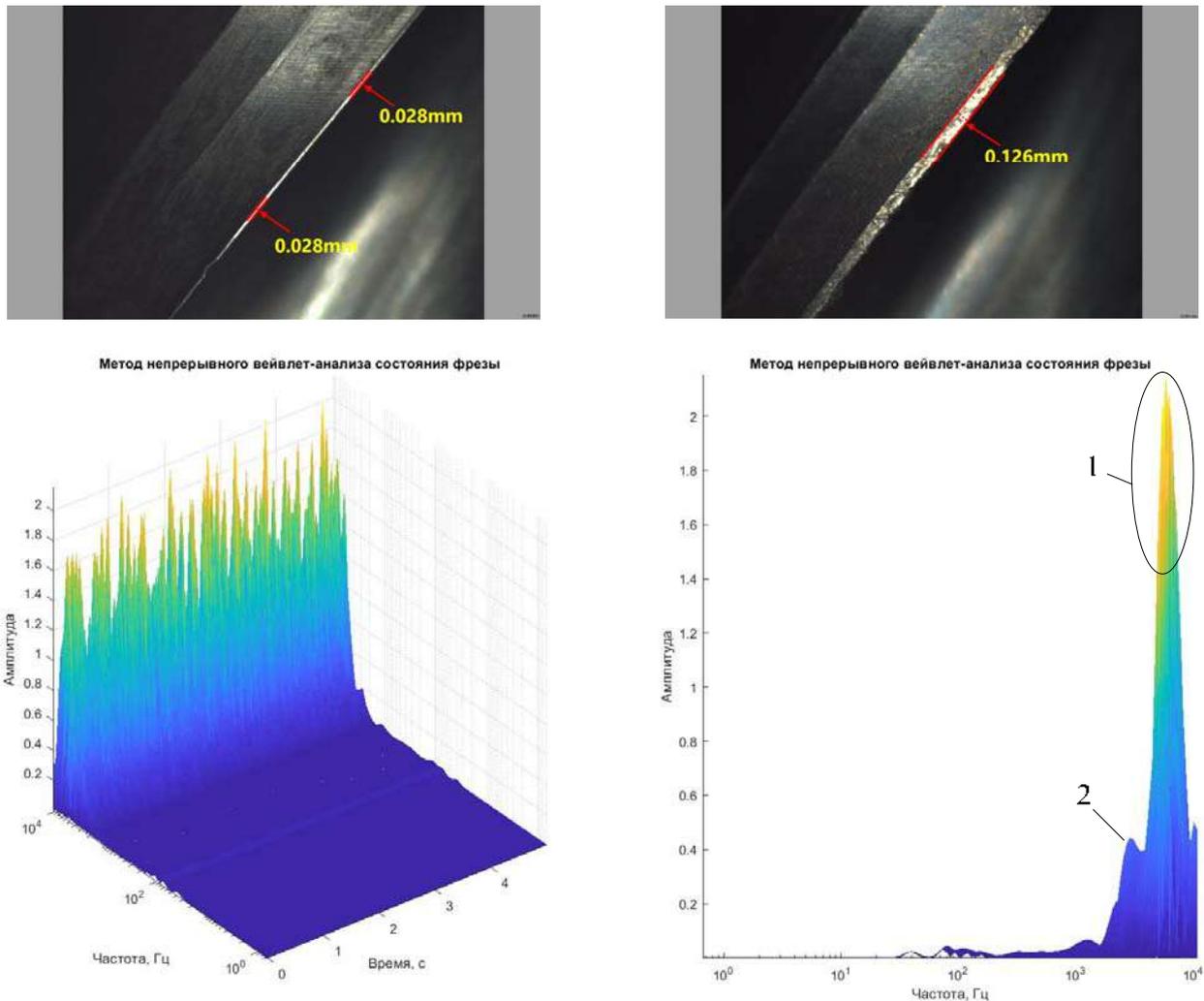


Рисунок 3.24 – Метод непрерывного вейвлет-анализа состояния фрезы в стадии нормального изнашивания ($h_3 = 0,028 - 0,126$ мм и $R_a = 0,27 - 0,96$ мкм):

- 1 – энергетический спектр сигнала вибрации процесса резания;
 2 – энергетический спектр шумовых сигналов вибрации технологической системы

Во время приработки режущего инструмента первоначальный уровень вибрации снижается до определенного значения в конце стадии приработки, при этом скорость изнашивания режущего инструмента большая, спектр уровня сигнала в процессе резания нестабилен, что приводит к большой шероховатости поверхности. Однако эта стадия проходит в течение короткого времени и зависит от режима обработки (рисунок 3.25).

По мере нормального изнашивания уровень вибрации увеличивается с небольшой скоростью (рисунок 3.26). Наличие сильного и стабильного спектра уровня сигнала приводит к высокому качеству обработанной поверхности –

$R_a = 0,27 - 0,96$ мкм.

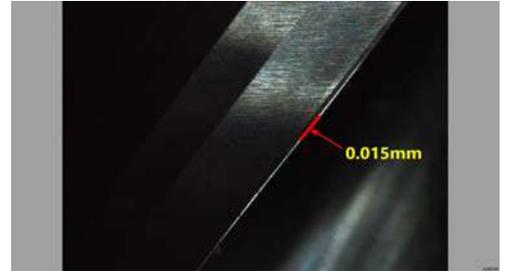
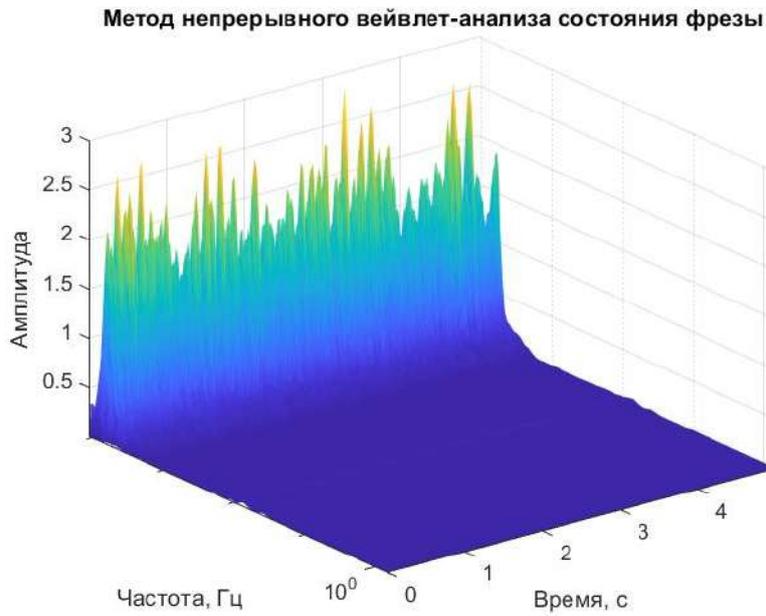


Рисунок 3.25 – Стадия приработки нового инструмента
($h_3 = 0,015$ мм; $R_a = 1,29$ мкм)

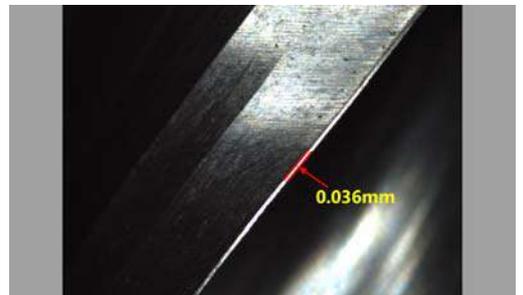
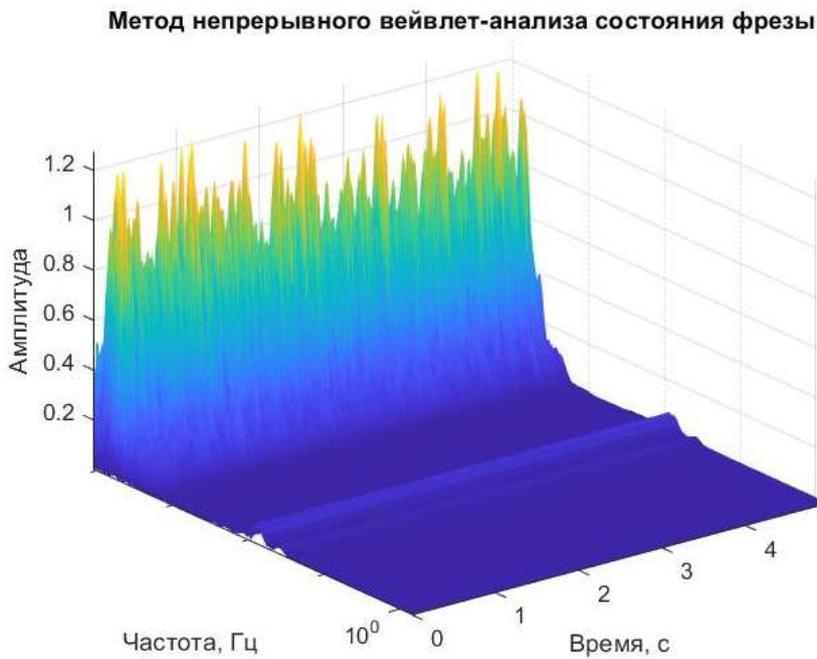


Рисунок 3.26 – Стадия нормального изнашивания фрезы
($h_3 = 0,036$ мм; $R_a = 0,39$ мкм)

В стадии катастрофического изнашивания режущего инструмента уровень сигнала также меняется, при этом основная мощность сигнала приходится на вы-

сокочастотные шумовые компоненты, что свидетельствует об отсутствии процесса резания как такового, а поступающая от фрезы энергия затрачивается на поверхностное упрочнение заготовки и нагрев [40] (рисунок 3.27).

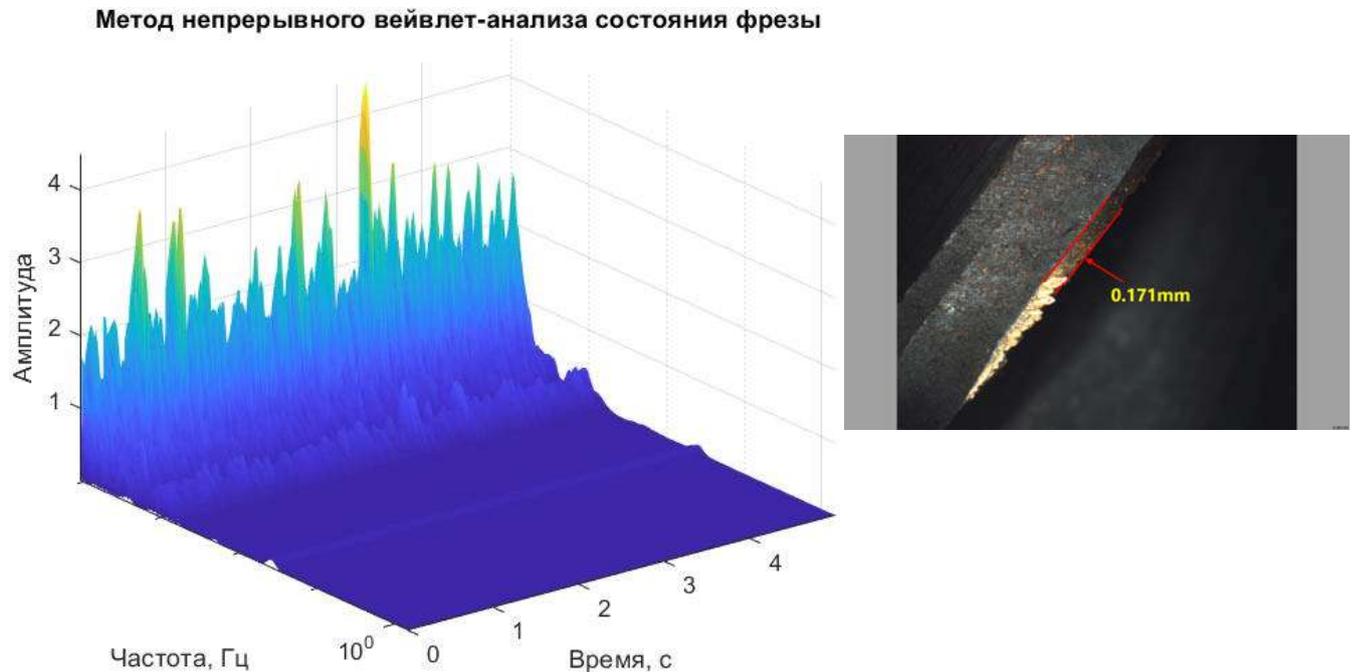


Рисунок 3.27 – Стадия катастрофического изнашивания фрезы
($h_3 = 0,171$ мм; $R_a = 1,45$ мкм)

Таким образом, метод непрерывного вейвлет-анализа позволяет напрямую диагностировать состояние режущего инструмента, а также оценивать его оставшийся срок службы. Исходя из преимуществ метода непрерывного вейвлет-анализа, особенно способности распознавать аномалии состояния режущего инструмента, этот метод идеально подходит для онлайн-мониторинга состояния режущего инструмента в области механической обработки на станках с ЧПУ.

3.4 Методика определения стадии изнашивания фрезы с использованием вибропаспорта системы СПИЗ

Амплитуда вибрации в процессе резания не остается в среднем постоянной, а растет пропорционально уровню износа режущего инструмента на этапах нормального и катастрофического изнашивания. Для математического описания

такой зависимости амплитуды вибрации воспользуемся моделью Кэптейна [32].

Пусть уровень вибрации характеризуется величиной амплитуды $A(t)$. Изменение $A(t)$ за время от t_i до t_{i+1} пропорционально достигнутой амплитуде вибрации:

$$A(t_{i+1}) - A(t_i) = \varepsilon_i A(t_i),$$

где коэффициент пропорциональности ε_i является случайной величиной, независимой от остальных ε_j и от величин $A(t_j)$. Тогда

$$\sum_{i=0}^N \varepsilon_i = \sum_{i=0}^N \frac{A(t_{i+1}) - A(t_i)}{A(t_i)}$$

и

$$\sum_{i=0}^N \frac{A(t_{i+1}) - A(t_i)}{A(t_i)} \approx \int_{t_0}^{t_{N+1}} \frac{dA}{A},$$

если значения t_i взяты близко одно от другого. Положив $t = t_{N+1}$, получается, что

$$\log A(t) = \sum_{i=0}^N \varepsilon_i + \log A(t_0).$$

При большом N и надлежащих предположениях относительно ε_i логарифм амплитуды вибрации $A(t)$ имеет почти нормальное распределение и, значит, сама амплитуда вибрации $A(t)$ распределена асимптотически логарифмически нормально и плотность распределения амплитуды вибрации A после наработки t , измеряемой в минутах резания или, что чаще более удобно с практической точки зрения, в n обработанных деталей или в n рабочих ходах:

$$f_n(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi n \delta A}} \exp\left[-\frac{(\ln A - \ln \hat{A}(n))^2}{2n\delta^2}\right], \quad (3.18)$$

где $\hat{A}(n) = b \exp(na)$ – среднегеометрическое значение амплитуды вибрации; a , b и δ – параметры распределения, оцениваемые из опыта. Нароботка n отсчитывается после завершения стадии приработки.

Оценим отмеченные параметры по статистическим данным вида «наработка – амплитуда вибрации»

$$(n_i, A_i), \quad i = 1, \dots, N \quad (3.19)$$

методом наибольшего правдоподобия [54].

Максимум функции правдоподобия

$$\Pr(b, a, \delta) = \prod_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi n_i} \delta A_i} \exp\left[-\frac{(\ln A_i - \ln b - n_i a)^2}{2n_i \delta^2}\right] \right\} \quad (3.20)$$

достигается при значениях a , b и δ , сводящих к нулю частные производные от $\ln \Pr(b, a, \delta)$ по a , b и δ соответственно.

Производимое при этом дифференцирование приводит к следующей системе уравнений:

$$\ln b = \frac{\sum_{i=1}^N \ln A_i / n_i - a \cdot N}{\sum_{i=1}^N 1/n_i}, \quad (3.21)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N \ln A_i - N \ln b}{\sum_{i=1}^N n_i}, \quad (3.22)$$

$$\delta^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\ln A_i - \ln b - n_i a)^2}{n_i}. \quad (3.23)$$

Из уравнений (3.21), (3.22) получаем, что

$$\ln b = \frac{\sum_{i=1}^N \ln A_i / n_i \cdot \sum_{i=1}^N n_i - N \cdot \sum_{i=1}^N \ln A_i}{\sum_{i=1}^N 1/n_i \cdot \sum_{i=1}^N n_i - N^2}. \quad (3.24)$$

Таким образом, параметры a , b и δ вычисляются в следующем порядке: по формуле (3.24) вычисляется b , далее по формуле (3.22) вычисляется a , а δ вычисляется по формуле (3.23).

Математическое ожидание и коэффициент вариации уровня вибрации $A(n)$ в зависимости от наработки будут равны соответственно [11]

$$\bar{A}(n) = \int_0^{\infty} f_n(x) \cdot x dx = \hat{A}(n) \cdot \exp(n\delta^2 / 2);$$

$$K_X(n) = \sqrt{\exp(n\delta^2) - 1}.$$

Рассмотрим применение предложенной методики на практическом примере. Изменение среднеквадратичного значения сигнала вибрации в зависимости от числа рабочих ходов при концевом фрезеровании заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (рисунок 3.11) представлено на рисунке 3.28.

Как видно из рисунка 3.28, стадия приработки инструмента завершилась после двух минут резания. До 20-й минуты резания происходила обработка с нормальным изнашиванием режущего инструмента, затем инструмент перешел в стадию катастрофического изнашивания, на 23-й минуте резания произошло разрушение режущего клина, что привело к очень медленному увеличению среднеквадратичного значения сигнала вибрации, поэтому на данной стадии скорость изнашивания можно также рассматривать как постоянную. На основе анализа рисунка 3.28 можно сделать вывод, что допустимый уровень вибрации $[A]$ можно принять равным уровню вибрации фрезы во время ее приработки, что при рассмотренных условиях обработки составляет $[A] = 1,4 \text{ g}$ или $[A] = 13,748 \text{ м/с}^2$.



Рисунок 3.28 – Зависимость среднеквадратичного значения сигнала вибрации от числа рабочих ходов при концевом фрезеровании заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т

В результате расчета параметров a , b и δ для исходных данных, приведенных на рисунке 3.28, и времени резания, измеряемого в минутах, были получены следующие результаты:

$$a = -0,047, b = 0,34, \delta = 0,085.$$

Изменение среднеквадратичного значения сигнала вибрации, представленное на рисунке 3.28, на основе вибропаспорта системы СПИЗ позволяет определить момент начала нормального изнашивания фрезы по наработке n_0 и уровень среднеквадратичного значения сигнала вибрации b_0 при этом. Если операция обработки детали предполагает несколько переходов, то в этом случае мы можем автоматически разделить сигналы вибрации каждого перехода с помощью коэффициента асимметрии сигнала вибрации, выбрать переход с максимальным уровнем вибрации и использовать его для определения вибропаспорта при обработке данной детали и прогнозирования остаточного периода стойкости.

Представленная в работе методика извлечения из сигналов вибрации информации, отображающей процесс изнашивания режущей части инструмента, позволяет не только дополнить вибропаспорт системы СПИЗ информацией для оценки флуктуации его технологических параметров, но и получить информацию, отображающую непосредственно изнашивание режущей части инструмента и позволяющую прогнозировать остаточный период стойкости инструмента. Прогноз остаточного периода стойкости инструмента с использованием предложенного подхода может быть использован при чистовых или получистовых операциях обработки дорогих заготовок для принятия решения о своевременной замене инструмента с целью предотвращения неисправимого брака.

3.5 Выводы

1 Разработано устройство контроля вибрации, отличительной особенностью которого является то, что оно для минимизации погрешности измерения расположено максимально близко к зоне резания и регистрирует вибрацию непосредственно на державке фрезы.

2 Экспериментальная оценка уровня вибрации в процессе фрезерования с помощью разработанного устройства контроля вибрации подтвердила зависимость главной составляющей силы резания и, соответственно, вибрации системы СПИЗ от уровня износа фрезы. При работе новой фрезой возникает интенсивная вибрация. Главная составляющая силы резания и вибрация в ходе приработки фрезы снижаются по мере ее изнашивания по задней поверхности до уровня 0,028 мм. Дальнейшее изнашивание фрезы до уровня 0,126 мм практически не влияет на изменение главной составляющей силы резания и уровня вибрации. В конце периода стойкости фрезы наблюдается резкое увеличение главной составляющей силы резания и уровня вибрации в 2–2,3 раза. Поэтому контроль уровня вибрации может применяться для диагностики состояния фрез в конкретных условиях обработки.

3 Параметр вибрационного сигнала во временном пространстве – среднее квадратическое – следует использовать в качестве математической основы методики извлечения из сигналов вибрации информации, отображающей процесс изнашивания режущей части фрезы.

4 В частотном пространстве с точки зрения отношения сигнал/шум и удобства практического применения предпочтение следует отдать максимальной мощности спектра.

5 Установлено, что метод непрерывного вейвлет-анализа позволяет точно определить частотные характеристики во времени и их изменения, а также выявить нестационарности в работе. Он преодолевает имеющиеся ограничения методов анализа вибрации во временном и частотном пространстве.

6 Представлена методика извлечения из сигналов вибрации информации, отображающей процесс изнашивания режущей части фрезы, позволяющая не только дополнить вибропаспорт системы СПИЗ информацией для оценки флуктуации его технологических параметров, но и получить информацию, отображающую непосредственно изнашивание режущей части фрезы и используемую для прогнозирования ее остаточного периода стойкости.

4 НАЗНАЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ С УЧЕТОМ УРОВНЯ ВИБРАЦИИ

4.1 Разработка методики назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации

4.1.1 Определение целевой функции

При назначении рациональных режимов резания, как правило, используют один из двух подходов:

- обеспечение максимальной производительности обработки;
- обеспечение минимальной себестоимости обработки.

Независимо от выбора подхода к назначению рациональных режимов резания, подачу и глубину резания назначают максимально возможными исходя из технических (мощность привода главного движения и приводов подачи, жесткость металлорежущего станка, геометрия лезвийного инструмента, применяемая технологическая оснастка и т. д.) и технологических (точность обработки, качество обрабатываемой поверхности, величина припуска и т. д.) ограничений [20]. При этом в случае применения первого подхода определяется скорость резания, обеспечивающая максимальную производительность, а во втором – экономическая скорость резания, которая обеспечивает минимум производственных затрат. При этом значение экономической скорости резания меньше, чем значение скорости резания максимальной производительности. Совместно они ограничивают зону высокой эффективности обработки, в рамках которой необходимо выбирать рациональные режимы резания [93].

Для многоцелевой оптимизации в качестве основной целевой функции следует использовать минимальную суммарную себестоимость обработки [12]. Суммарная себестоимость обработки является более объективным критерием

оценки эффективности эксплуатации инструмента. Ее снижение приводит к уменьшению себестоимости изделия. Для расчета суммарной себестоимости обработки в работе [2] предложена зависимость:

$$C = \frac{k \cdot L \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot v \cdot k_{\text{НВ}} \cdot k_t \cdot k_h \cdot z \cdot S_z \cdot T} \left(B_c \cdot T + \frac{\Gamma_{\text{Ф}}}{T_{\text{Ф}}} + \frac{z \cdot \Gamma_{\text{П}}}{n_c} \right), \quad (4.1)$$

где k – количество рабочих ходов; L – длина фрезерования; D – диаметр фрезы; S_z – подача на зуб; z – число зубьев фрезы; v – скорость резания; B_c – полная себестоимость одной минуты работы станка и станочника без затрат на режущий инструмент; $\Gamma_{\text{П}}$ – затраты, обусловленные эксплуатацией режущего инструмента за период его стойкости между переточками; $\Gamma_{\text{Ф}}$ – стоимость корпуса фрезы; $T_{\text{Ф}}$ – ресурс корпуса фрезы; T – период стойкости фрезы; n_c – число режущих кромок пластины; $k_{\text{НВ}}$ – коэффициент зависимости скорости резания от твердости материала; k_h – коэффициент зависимости скорости резания от средней толщины стружки; k_t – поправочный коэффициент на действительное время контакта.

При этом период стойкости режущих инструментов (наработка на отказ по терминологии теории надежности) является случайной величиной, зависящей от множества факторов [13]: режима резания, режущих свойств инструмента, вида обработки, твердости обрабатываемых деталей, величины припуска на обработку, предварительного напряженно-деформированного состояния, вибрации, геометрических погрешностей станка и др. [3, 4, 57, 30]. Период стойкости режущего инструмента, как случайная величина, характеризуется существенным разбросом – от 15 до 35 % [71]. Это обстоятельство оказывает негативное влияние на эффективность процесса резания и усложняет задачу назначения рациональных режимов резания, которую можно решить с использованием известных зависимостей скорости резания от частоты вращения шпинделя и периода стойкости и расчёта времени обработки, например, [2]:

$$T = \frac{C^v \cdot D^q}{v^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z^p} k_v, \quad (4.2)$$

где C^v – коэффициент влияния материалов заготовки и фрезы; q, m, x, y, u, p – показатели степени; D – диаметр фрезы; v – скорость резания; S_z – подача на зуб; t, B – глубина и ширина фрезерования; L – длина фрезерования; z – число зубьев фрезы; k_v – поправочный коэффициент на изменённые условия обработки.

Уравнение (4.2) может быть преобразовано в линейный полином следующим образом:

$$T(v, t, S_z, B) = \exp[a_0 + a_1 \ln D - a_2 \ln v - a_3 \ln t - a_4 \ln S_z - a_5 \ln B], \quad (4.3)$$

где a_0, \dots, a_5 – коэффициенты стойкостной зависимости, оцениваемые по статистическим данным.

Целью назначения рациональных режимов фрезерования является обеспечение минимальной себестоимости обработки и заданного качества поверхности. Поэтому качество обработанной поверхности является вторым критерием при построении модели назначения рациональных режимов фрезерования. Шероховатость поверхности обработки зависит от режима резания (v, S_z, t) и амплитуды вибрации (A) следующим образом:

$$R_a = C_{R_a} v^{b_1} S_z^{b_2} t^{b_3} A^{b_4}. \quad (4.4)$$

Уравнение (4.4) может быть преобразовано в линейный полином следующим образом:

$$R_a(v, S_z, t, A) = \exp[b_0 + b_1 \ln v + b_2 \ln S_z + b_3 \ln t + b_4 \ln A], \quad (4.5)$$

где b_0, \dots, b_4 – коэффициенты зависимости шероховатости поверхности, оцениваемые по статистическим данным с использованием вибропаспорта системы СПИЗ.

Таким образом, при построении целевой функции методики назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации используются два критерия рациональности режима обработки (4.1) и (4.4).

В [107] предложен метод многокритериальной оптимизации методом взвешенной суммы, основанный на использовании формулы:

$$\text{Min}_{x \in X} f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)]; \quad (4.6)$$

$$\text{при условии } X = \{x \in R_n : g(x) \leq 0, h(x) = 0\},$$

где X – граничные условия, x – граничная область, $g(x)$, $h(x)$ – ограничения.

Целевая функция для многокритериальной оптимизации с использованием метода взвешенной суммы представляется следующим образом:

$$\phi(x, w) = \sum_{i=1}^p w_i f_i(x), \quad (4.7)$$

где p – количество критериев, w_i – вес для оценки влияния функции $f_i(x)$ на це-

левую функцию, $\sum_{i=1}^p w_i = 1$, $w_i > 0$, $i = 1, \dots, p$.

Решение задачи построения целевой функции для фрезерной обработки предполагает достижение наименьшей себестоимости (C_{\min}) и наилучшего качества поверхности ($R_{a \min}$). Тогда целевая функция для назначения рационального режима резания примет вид:

$$G = w_1 \frac{C}{C_0} + w_2 \frac{R_a}{R_{a0}} \Rightarrow \min, \quad (4.8)$$

где $w_1 + w_2 = 1$; C_0, R_{a0} – допустимые максимальные значения себестоимости и шероховатости.

Для оценки весовых коэффициентов w_1 и w_2 можно использовать метод балансировки веса на основе оптимизации Парето, предложенный в работе [162].

Суть метода заключается в следующем. Предположим, что w_1 имеет значение w^* и x^* является оптимальным решением для целевой функции при значе-

нии веса w^* . Далее w_1 увеличивается до w^{**} ($w^* < w^{**}$) и вычисляется значение целевой функции x^{**} с весом w^{**} . Тогда x^* и x^{**} – значения для оптимизации Парето (метод балансировки веса от w^* до w^{**}):

$$\frac{\Delta C}{\Delta R_a} = \frac{C(x^{**}) - C(x^*)}{R_a(x^{**}) - R_a(x^*)}. \quad (4.9)$$

4.1.2 Определение граничных условий модели

Граничные условия модели назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации дают аналитическое описание отношений между условиями обработки и технологическими параметрами, которые необходимо рационализировать. Это предельные условия для каждой конкретной задачи, с конкретной технологической системой и конкретными условиями обработки. Особенно это актуально для высокоскоростного фрезерования, имеющего ограниченную ширину диапазона рациональных скорости резания и подачи. В связи с этим в данной работе предложены следующие граничные условия модели многокритериальной оптимизации: мощность станка, уровень вибрации, деформация фрезы и обрабатываемые возможности фрезерного станка с ЧПУ.

1 Ограничение по мощности станка N_T :

$$N_T = C_N \cdot D^{n_{N1}} \cdot S_z^{n_{N2}} \cdot t^{n_{N3}} \leq [N_0], \quad (4.10)$$

где $[N_0]$ – мощность двигателя; $C_N, n_{N1}, n_{N2}, n_{N3}$ – коэффициенты, оцениваемые по статистическим данным [79].

2 Ограничение по уровню вибрации A .

Данное ограничение направлено на обеспечение выполнения требований по качеству обрабатываемой поверхности, которое зависит от вибрации машинной части технологической системы. При формулировании ограничения по вибрации следует учитывать, что уровень вибрации изменяется по мере изнашивания

режущего инструмента. Во время приработки режущего инструмента первоначальный уровень вибрации снижается до минимального значения, характеризующего момент начала стадии нормального изнашивания инструмента. В стадии нормального изнашивания режущего инструмента уровень вибрации увеличивается с небольшой скоростью. При переходе в стадию катастрофического изнашивания уровень вибрации начинает резко возрастать [17]. Для оценки уровня вибрации используется разработанное устройство контроля вибрации [38], которое для минимизации погрешности измерения регистрирует вибрацию непосредственно на державке инструмента. На основе анализа вибрационного сигнала, полученного с данного устройства, ограничение по уровню вибрации формулируется следующим образом:

$$A(v, S_z, t, B) = C_A \cdot v^{d_1} \cdot S_z^{d_2} \cdot t^{d_3} \cdot B^{d_4} \leq [A], \quad (4.11)$$

где $[A]$ – определяется экспериментально; d_0, \dots, d_4 – коэффициенты зависимости вибрации режущего инструмента, оцениваемые по статистическим данным с использованием вибропаспорта системы СПИЗ.

Уравнение (4.11) преобразуется в линейный полином следующим образом:

$$\begin{aligned} A(v, S_z, t) &= \exp[\ln C_A + d_1 \ln v + d_2 \ln S_z + d_3 \ln t + d_4 \ln B] = \\ &= \exp[d_0 + d_1 \ln v + d_2 \ln S_z + d_3 \ln t + d_4 \ln B] \leq [A]. \end{aligned} \quad (4.12)$$

3 Ограничение по величине деформации фрезы (рисунок 4.1) [110]:

$$y_{\max} \leq C_y \frac{P_y}{E} \left[\frac{L_1^3}{D_1^4} + \frac{L_2^3 - L_1^3}{D_2^4} \right]^m \leq [\delta]; \quad (4.13)$$

$$y = 0,993 \frac{P_y}{E} \leq [\delta]; \quad (4.14)$$

$$P_y = C_p \cdot D^{n_{p1}} \cdot \left(\frac{t}{D} \right)^{n_{p2}} \cdot S_z^{n_3}, \quad (4.15)$$

где L_1 – длина режущей части; L_2 – длина хвостовика фрезы; E – модуль упругости; P_y – радиальная составляющая силы резания; y – прогиб режущего инструмента; $[\delta]$ – допустимый прогиб режущего инструмента; $C_{y,m}$ – коэффициенты, оцениваемые по статистическим данным.



Рисунок 4.1 – Метод определения прогиба режущего инструмента

4 Ограничения по технологическим возможностям фрезерного станка с ЧПУ:

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max}; \quad (4.16)$$

$$t_{\min} \leq t \leq t_{\max}; \quad (4.17)$$

$$S_{z \min} \leq S_z = \frac{S_M}{z \cdot n} \leq S_{z \max}, \quad (4.18)$$

где S_M – минутная подача.

4.1.3 Разработка алгоритма назначения рациональных режимов резания при фрезеровании на основе метода роя частиц

Алгоритм назначения рациональных режимов резания (рисунок 4.2) работает следующим образом.

На основе анализа исходных данных (свойства обрабатываемого и инструментального материалов, размеры детали и рабочего пространства станка, геометрия инструмента) происходит поиск аналогичных условий обработки в вибропаспорте системы СПИЗ. Если аналогичные условия обработки найдены, то из

вибропаспорта выбираются хранящиеся там рациональные режимы резания и происходит обработка детали. При необходимости можно контролировать вибрацию в процессе резания с последующим сохранением ее в вибропаспорте для реализации функции самообучения системы.

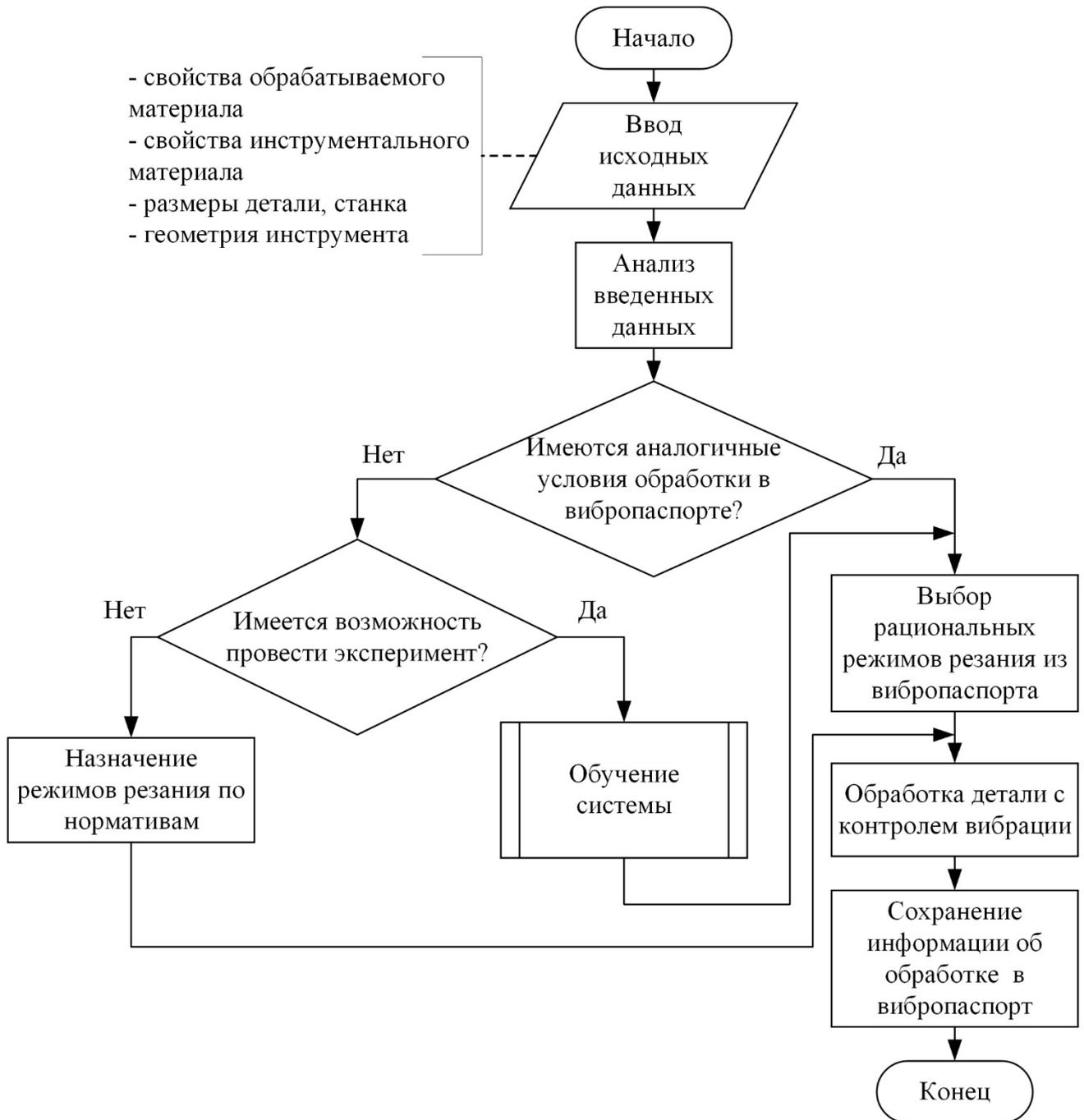


Рисунок 4.2 – Алгоритм назначения рациональных режимов резания при фрезеровании

Если аналогичные условия обработки в вибропаспорте отсутствуют, то возможны два варианта. В случае если нет возможности провести эксперимент по контролю вибрации в процессе обработки (например, в условиях штучного производства), то режимы резания назначаются в соответствии с принятыми на предприятии нормативами и производится обработка детали с контролем вибрации и сохранением информации в вибропаспорте системы СПИЗ. По мере накопления таких разрозненных данных для различных условий обработки возможно обучение системы назначения рациональных режимов резания при фрезеровании и формирование регрессионных зависимостей для вибропаспорта системы СПИЗ.

Если есть возможность проведения эксперимента по контролю вибрации в процессе обработки, то начинается процедура обучения системы назначения рациональных режимов резания при фрезеровании (рисунок 4.3).

Процедура обучения системы работает следующим образом. Сначала разрабатывается план дробнофакторного эксперимента, варьирующего параметры режимов резания. В соответствии с разработанным планом проводится обработка деталей на разных режимах резания с сохранением собранных данных в вибропаспорте системы СПИЗ. После окончания эксперимента на основе собранных данных происходит формирование регрессионных зависимостей для модели назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации. Затем вводятся ограничения модели и начинается перебор возможных режимов резания с помощью алгоритма роя частиц.

Алгоритм роя частиц был предложен в 1995 году Джеймсом Кеннеди и Расселом Еберхартом [132]. Данный алгоритм базируется на моделировании поведения набора частиц в пространстве параметров задачи оптимизации. Этот алгоритм, как и все алгоритмы, принадлежащие к семейству эволюционных алгоритмов, привлекателен простотой реализации и тем, что в процессе вычисления не требуется вычисление градиента, что позволяет использовать МРЧ в случаях, где вычисление градиента невозможно либо имеет высокую вычислительную сложность.

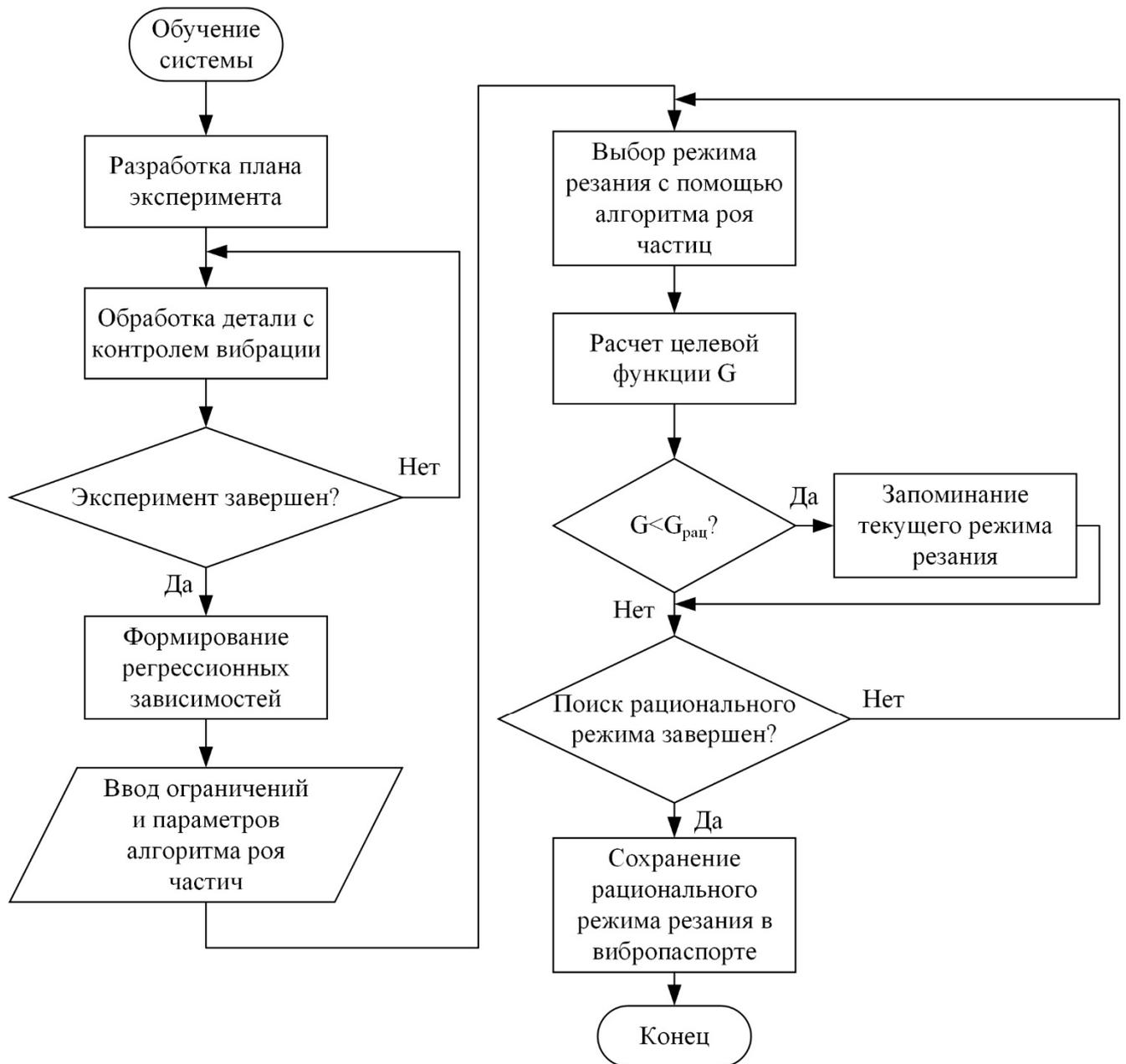


Рисунок 4.3 – Алгоритм обучения системы назначения рациональных режимов резания при фрезеровании

Алгоритм МРЧ использует для решения рой частиц, где каждая частица представляет собой возможное решение задачи оптимизации. Пусть n – количество элементов в рое. Каждая i -я частица может быть представлена как объект с рядом параметров, при этом

x_i^t – вектор положения частицы i в многомерном пространстве поиска на шаге по времени t ;

v_i^t – скорость перемещения частицы i , с которой она в процессе оптимиза-

ции перемещается в пространстве поиска для поиска наилучшего положения в этом пространстве, которое постоянно изменяется при нахождении частицей более выгодного положения;

f – функция, которую необходимо минимизировать $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, затем положение каждой частицы обновляется в пространстве поиска:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}, x_i^0 = U(x_{\min}, x_{\max}), \quad (4.19)$$

где $U(x_{\min}, x_{\max})$ – равномерное распределение с его минимальным и максимальным значением соответственно.

Существуют две версии базового алгоритма МРЧ, называемые g_{best} (global best – лучшая ценность частицы во всем рое) и p_{best} (personal best – лучшая ценность каждой частицы).

В этом алгоритме каждая отдельная частица $i \in [1, 2, 3, \dots, n]$, где $n > 1$, имеет текущую позицию в пространстве поиска x_i , текущую скорость v_i и личную лучшую позицию в пространстве поиска p_{best} . Личная лучшая позиция p_{best} соответствует позиции в пространстве поиска, где частица i имела наименьшее значение, как определено целевой функцией f , учитывая задачу минимизации. Кроме того, позиция, дающая наименьшее значение среди всех личных лучших p_{best} , называется глобальной лучшей позицией, которая обозначается g_{best} . Следующие уравнения (4.20) и (4.21) определяют, как обновляются личные и глобальные лучшие значения соответственно.

Учитывая проблемы минимизации, лучшая личная позиция p_{best} на следующем временном шаге $t+1$ рассчитывается как:

$$p_{best,i}^{t+1} = \begin{cases} p_{best,i}^t, & \text{если } f(x_i^{t+1}) > p_{best,i}^t \\ x_i^{t+1}, & \text{если } f(x_i^{t+1}) \leq p_{best,i}^t \end{cases}. \quad (4.20)$$

Глобальная лучшая позиция g_{best} на временном шаге t рассчитывается

как:

$$g_{best} = \min\{p_{best,i}^t\} \text{ где } i \in [1,2,3,\dots,n] \text{ и } n > 1. \quad (4.21)$$

Поэтому важно отметить, что лучший личный $p_{best,i}$ – это лучшая позиция, которую отдельная частица заняла с i -го временного шага. С другой стороны, глобальная лучшая позиция g_{best} – это лучшая позиция, обнаруженная любой из частиц во всем рое.

Скорость частицы i рассчитывается по зависимости:

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^t + c_1 r_{1j}^t [p_{best,i}^t - x_{ij}^t] + c_2 r_{2j}^t [g_{best,i} - x_{ij}^t], \quad (4.22)$$

где v_{ij}^t – вектор скорости частицы i в измерении j в момент времени t ; x_{ij}^t – вектор положения частицы i в измерении j в момент времени t ; $p_{best,i}^t$ – личная лучшая позиция частицы i в измерении j , найденная при инициализации через время t ; $g_{best,i}$ – это лучшая позиция во всем рое частицы i в измерении j , найденная при инициализации через время t ; c_1, c_2 – положительные константы ускорения, которые используются для выравнивания вклада когнитивного и социального компонентов соответственно; r_{1j}^t, r_{2j}^t – случайные числа из равномерного распределения $U(0,1)$ в момент времени t .

Для выбранных вариантов режима резания рассчитывается целевая функция G . Лучшие варианты режимов резания запоминаются, и когда поиск рациональных режимов завершается, то рациональный режим резания с минимальным значением целевой функции сохраняется в вибропаспорте системы СПИЗ.

4.2 Оценка параметров модели назначения рациональных режимов резания при фрезеровании

С целью экспериментальной проверки разработанного устройства и про-

граммного обеспечения методики назначения рациональных режимов резания при фрезеровании и методики извлечения из сигналов вибрации информации, отображающей процесс изнашивания режущей части инструмента, на основе результатов теоретических исследований процесса резания и анализа основных факторов, влияющих на процесс фрезерования, разработан план эксперимента, варьируемые параметры и уровни варьирования которых представлены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 – Значение варьирования параметров в экспериментальной области

| Фактор | X ₁ Скорость резания, м/мин | X ₂ Подача, мм/зуб | X ₃ Глубина резания, мм |
|----------------------|--|-------------------------------------|--|
| Высокий уровень (+1) | 45 | 0,02 | 0,4 |
| Нижний уровень (-1) | 75 | 0,05 | 0,2 |
| Базовый уровень (0) | 60 | 0,035 | 0,3 |
| Переменный интервал | 15 | 0,015 | 0,1 |

Таблица 4.2 – Уровни варьирования факторов и значения выходных параметров при фрезеровании концевой фрезой заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т

| Номер опыта | Входные факторы | | | | | |
|----------------|-------------------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------|---------------------------|
| | Переменные закодированы | | | Скорость резания, м/мин | Подача, мм/зуб | Глубина резания, мм |
| | X ₁ | X ₂ | X ₃ | | | |
| 1 | - | - | - | 45 | 0,02 | 0,2 |
| 2 | + | - | - | 75 | 0,02 | 0,2 |
| 3 | - | + | - | 45 | 0,05 | 0,2 |
| 4 | + | + | - | 75 | 0,05 | 0,2 |
| 5 | - | - | + | 45 | 0,02 | 0,4 |
| 6 | + | - | + | 75 | 0,02 | 0,4 |
| 7 | - | + | + | 45 | 0,05 | 0,4 |
| 8 | + | + | + | 75 | 0,05 | 0,4 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 60 | 0,035 | 0,3 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 60 | 0,035 | 0,3 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 60 | 0,035 | 0,3 |

Экспериментальные исследования одновременного влияния скорости резания v , подачи S_z и глубины резания t проведены в соответствии с математическими моделями (4.3), (4.5) и (4.12).

4.2.1 Построение зависимости шероховатости обработанной поверхности от режимов резания

При построении экспериментальной зависимости шероховатости обработанной поверхности от режимов резания математическая модель (4.5) записывается следующим образом:

$$R_a(v, S_z, t, A) = \exp[b_0 + b_1 \ln v + b_2 \ln S_z + b_3 \ln t + b_4 \ln A]. \quad (4.23)$$

Пусть: $\hat{y} = \ln(R_a(v, S_z, t, A))$, $x_1 = \ln(v)$, $x_2 = \ln(S_z)$, $x_3 = \ln(t)$, $x_4 = \ln(A)$.

Тогда уравнение (4.23) в виде линейного полинома запишется следующим образом:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4. \quad (4.24)$$

Для определения коэффициентов этой математической модели были проведены эксперименты, результаты которых показаны в таблице 4.3.

Данные таблицы 4.3 обработаны методом регрессионного и дисперсионного анализа ANOVA в MS Excel (таблицы 4.4, 4.5).

В результате обработки с помощью пакета ANOVA в MS Excel математическая модель (4.23) определяется следующим образом:

$$R_a(v, S_z, t) = 10,346 \cdot v^{-1,951} \cdot S_z^{0,55} \cdot t^{-0,167} \cdot A^{0,504}. \quad (4.25)$$

Таблица 4.3 – Значения выходных параметров и результаты измерения шероховатости поверхности обработки

| Номер опыта | v (М/МИН) | S_z (ММ/ЗУБ) | t (ММ) | A (ММ) | R_a (МКМ) | $\ln v$ | $\ln S_z$ | $\ln t$ | $\ln A$ | $\ln R_a$ |
|-------------|----------------|-------------------|-------------|-------------|----------------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
| 1 | 45 | 0,02 | 0,2 | 0,0084 | 0,23 | 3,81 | -3,91 | -1,61 | -4,77 | -1,47 |
| 2 | 75 | 0,02 | 0,2 | 0,0637 | 0,28 | 4,32 | -3,91 | -1,61 | -2,75 | -1,27 |
| 3 | 45 | 0,05 | 0,2 | 0,0203 | 0,58 | 3,81 | -2,99 | -1,61 | -3,90 | -0,54 |
| 4 | 75 | 0,05 | 0,2 | 0,0486 | 0,36 | 4,32 | -2,99 | -1,61 | -3,02 | -1,02 |
| 5 | 45 | 0,02 | 0,4 | 0,0268 | 0,43 | 3,81 | -3,91 | -0,92 | -3,62 | -0,84 |
| 6 | 75 | 0,02 | 0,4 | 0,0464 | 0,16 | 4,32 | -3,91 | -0,92 | -3,07 | -1,83 |
| 7 | 45 | 0,05 | 0,4 | 0,0148 | 0,48 | 3,81 | -2,99 | -0,92 | -4,21 | -0,73 |
| 8 | 75 | 0,05 | 0,4 | 0,1037 | 0,45 | 4,32 | -2,99 | -0,92 | -2,27 | -0,80 |
| 9 | 60 | 0,035 | 0,3 | 0,0281 | 0,42 | 4,10 | -1,05 | -1,20 | -3,57 | -0,87 |
| 10 | 60 | 0,035 | 0,3 | 0,0268 | 0,42 | 4,10 | -1,05 | -1,20 | -3,62 | -0,87 |
| 11 | 60 | 0,035 | 0,3 | 0,0397 | 0,41 | 4,10 | -1,05 | -1,20 | -3,23 | -0,89 |

Таблица 4.4 – Основные параметры регрессионного и дисперсионного анализа ANOVA

| Источник вариации | Между группами | Внутри групп | Итого |
|---|--|--|---|
| Число степеней свободы (df) | 4 | $n - 5$ | $n - 1$ |
| Сумма квадратов отклонений (SS) | $SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ | $SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ | $SSTO = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ |
| Дисперсия (MS) | $MSR = \frac{SSR}{4}$ | $MSE = \frac{SSE}{n - 5}$ | |
| Фактическое значение отношения Фишера (F) | $F = \frac{MSR}{MSE}$ | | |

Таблица 4.5 – Влияние параметров режима фрезерования на шероховатость обработанной поверхности

| Коэффициенты | | Значения коэффициентов | | |
|-------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------|---|
| b_0 | | 10,346 | | |
| b_1 | | -1,951 | | |
| b_2 | | 0,55 | | |
| b_3 | | -0,167 | | |
| b_4 | | 0,504 | | |
| Источник вариации | Число степеней свободы (df) | Сумма квадратов отклонений (SS) | Дисперсия (MS) | Фактическое значение отношения Фишера (F) |
| Между группами | 4 | 1,1830 | 0,2958 | 9,1623 |
| Внутри групп | 6 | 0,1937 | 0,0323 | |
| Итого | 10 | 1,3767 | | |

С уровнем значимости $\alpha = 0,05$, число степеней свободы – 4 и 6, из таблицы значений F-критерия Фишера мы можем определить критическое значение критерия Фишера $F_{0,05;4;6} = 4,53$.

На основании результатов статистического анализа, представленных в таблице 4.5, можно сделать вывод, что так как фактическое значение критерия Фишера больше критического $F = 9,1623 > F_{0,05;4;6} = 4,53$, то параметры режима резания существенно влияют на изменение шероховатости поверхности обработки и шероховатость поверхности обработки зависит от режимов резания с вероятностью 95 %. Таким образом, опытная функция регрессии (4.25) является адекватной.

4.2.2 Построение зависимости периода стойкости режущего инструмента от режима резания

При построении экспериментальной зависимости периода стойкости режущего инструмента от режимов резания математическая модель (4.3) записывается следующим образом:

$$T(v, S_z, t) = \exp[a_0 + a_1 \ln v + a_2 \ln S_z + a_3 \ln t], \quad (4.26)$$

где ширина фрезерования B и диаметр фрезы D в уравнении (4.3) в этом экспериментальном случае постоянны.

Пусть: $\hat{y} = \ln(T(v, S_z, t))$, $x_1 = \ln(v)$, $x_2 = \ln(S_z)$, $x_3 = \ln(t)$.

Тогда уравнение (4.26) в виде линейного полинома запишется следующим образом:

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3. \quad (4.27)$$

Для определения коэффициентов этой математической модели были проведены эксперименты, результаты которых показаны в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Значения выходных параметров и результаты измерения периода стойкости фрезы

| Номер опыта | v (м/мин) | S_z (мм/зуб) | t (мм) | T (мин) | $\ln v$ | $\ln S_z$ | $\ln t$ | $\ln T$ |
|-------------|----------------|-------------------|-------------|--------------|---------|-----------|---------|---------|
| 1 | 45 | 0,02 | 0,2 | 39,12 | 3,807 | -3,912 | -1,609 | 3,667 |
| 2 | 75 | 0,02 | 0,2 | 26,55 | 4,317 | -3,912 | -1,609 | 3,279 |
| 3 | 45 | 0,05 | 0,2 | 18,60 | 3,807 | -2,996 | -1,609 | 2,923 |
| 4 | 75 | 0,05 | 0,2 | 15,43 | 4,317 | -2,996 | -1,609 | 2,736 |
| 5 | 45 | 0,02 | 0,4 | 33,55 | 3,807 | -3,912 | -0,916 | 3,513 |
| 6 | 75 | 0,02 | 0,4 | 22,17 | 4,317 | -3,912 | -0,916 | 3,099 |
| 7 | 45 | 0,05 | 0,4 | 11,86 | 3,807 | -2,996 | -0,916 | 2,473 |
| 8 | 75 | 0,05 | 0,4 | 15,43 | 4,317 | -2,996 | -0,916 | 2,736 |
| 9 | 60 | 0,035 | 0,3 | 19,47 | 4,094 | -1,050 | -1,204 | 2,969 |
| 10 | 60 | 0,035 | 0,3 | 17,05 | 4,094 | -1,050 | -1,204 | 2,836 |
| 11 | 60 | 0,035 | 0,3 | 16,25 | 4,094 | -1,050 | -1,204 | 2,788 |

Данные таблицы 4.6 обработаны методом регрессионного и дисперсионного анализа ANOVA в MS Excel (таблица 4.7). В результате обработки с помощью пакета ANOVA в MS Excel математическая модель (4.26) определяется следующим образом:

$$T(v, S_z, t) = 1,576 \cdot v^{-0,366} \cdot S_z^{-0,745} \cdot t^{-0,294} . \quad (4.28)$$

С уровнем значимости $\alpha = 0,05$, число степеней свободы – 3 и 7, из таблицы значений F-критерия Фишера мы можем определить критическое значение критерия Фишера $F_{0,05;3;7} = 4,35$.

На основании результатов статистического анализа, представленных в таблице 4.7, можно сделать вывод, что так как фактическое значение критерия Фишера больше критического $F = 8,4757 > F_{0,05;3;7} = 4,35$, то параметры режима резания существенно влияют на изменение периода стойкости фрезы и период стойкости фрезы зависит от режимов резания с вероятностью 95 %. Таким образом, опытная функция регрессии (4.28) является адекватной.

Таблица 4.7 – Влияние параметров режима фрезерования на период стойкости инструмента

| Коэффициенты | | Значения коэффициентов | | |
|-------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------|---|
| a_0 | | 1,576 | | |
| a_1 | | -0,366 | | |
| a_2 | | -0,745 | | |
| a_3 | | -0,294 | | |
| Источник вариации | Число степеней свободы (df) | Сумма квадратов отклонений (SS) | Дисперсия (MS) | Фактическое значение отношения Фишера (F) |
| Между группами | 3 | 1,1081 | 0,3694 | 14,183 |
| Внутри групп | 7 | 0,1823 | 0,0260 | |
| Итого | 10 | 1,2904 | | |

4.2.3 Построение зависимости уровня вибрации фрезы от режима резания

При построении экспериментальной зависимости уровня вибрации фрезы от режимов резания математическая модель (4.12) записывается следующим образом:

$$A(v, S_z, t) = \exp[d_0 + d_1 \ln v + d_2 \ln S_z + d_3 \ln t], \quad (4.29)$$

где ширина фрезерования B в уравнении (4.12) в этом экспериментальном случае постоянна.

Пусть: $\hat{y} = \ln(A(v, S_z, t))$, $x_1 = \ln(v)$, $x_2 = \ln(S_z)$, $x_3 = \ln(t)$.

Тогда уравнение (4.29) в виде линейного полинома запишется следующим образом:

$$\hat{y} = d_0 + d_1 x_1 + d_2 x_2 + d_3 x_3. \quad (4.30)$$

Для определения коэффициентов этой математической модели были проведены эксперименты, результаты которых показаны в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Значения выходных параметров и результаты измерения вибрации фрезы

| Номер опыта | v (м/мин) | S_z (мм/зуб) | t (мм) | A (мм) | $\ln v$ | $\ln S_z$ | $\ln t$ | $\ln A$ |
|-------------|----------------|-------------------|-------------|-------------|---------|-----------|---------|---------|
| 1 | 45 | 0,02 | 0,2 | 0,00849 | 3,807 | -3,912 | -1,609 | -4,769 |
| 2 | 75 | 0,02 | 0,2 | 0,06375 | 4,317 | -3,912 | -1,609 | -2,753 |
| 3 | 45 | 0,05 | 0,2 | 0,02030 | 3,807 | -2,996 | -1,609 | -3,897 |
| 4 | 75 | 0,05 | 0,2 | 0,04860 | 4,317 | -2,996 | -1,609 | -3,024 |
| 5 | 45 | 0,02 | 0,4 | 0,02683 | 3,807 | -3,912 | -0,916 | -3,618 |
| 6 | 75 | 0,02 | 0,4 | 0,04648 | 4,317 | -3,912 | -0,916 | -3,069 |
| 7 | 45 | 0,05 | 0,4 | 0,01483 | 3,807 | -2,996 | -0,916 | -4,211 |
| 8 | 75 | 0,05 | 0,4 | 0,10376 | 4,317 | -2,996 | -0,916 | -2,266 |
| 9 | 60 | 0,035 | 0,3 | 0,02815 | 4,094 | -1,050 | -1,204 | -3,570 |
| 10 | 60 | 0,035 | 0,3 | 0,02684 | 4,094 | -1,050 | -1,204 | -3,618 |
| 11 | 60 | 0,035 | 0,3 | 0,03970 | 4,094 | -1,050 | -1,204 | -3,226 |

Данные таблицы 4.8 обработаны методом регрессионного и дисперсионного анализа ANOVA в MS Excel (таблица 4.9). В результате обработки с помощью пакета ANOVA в MS Excel математическая модель (4.29) определяется следующим образом:

$$A(v, S_z, t) = -12,86 \cdot v^{2,6} \cdot S_z^{0,2} \cdot t^{0,44}. \quad (4.31)$$

С уровнем значимости $\alpha = 0,05$, число степеней свободы – 3 и 7, из таблицы значений F-критерия Фишера мы можем определить критическое значение критерия Фишера $F_{0,05;3;7} = 4,35$.

Таблица 4.9 – Влияние параметров режима фрезерования на уровень вибрации фрезы

| Коэффициенты | | Значения коэффициентов | | |
|-------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------|---|
| d_0 | | -12,86 | | |
| d_1 | | 2,6 | | |
| d_2 | | 0,2 | | |
| d_3 | | 0,44 | | |
| Источник вариации | Число степеней свободы (df) | Сумма квадратов отклонений (SS) | Дисперсия (MS) | Фактическое значение отношения Фишера (F) |
| Между группами | 3 | 3,8597 | 1,2866 | 9,0531 |
| Внутри групп | 7 | 0,9948 | 0,1421 | |
| Итого | 10 | 4,8545 | | |

На основании результатов статистического анализа, представленных в таблице 4.9, можно сделать вывод, что так как фактическое значение критерия Фишера больше критического $F = 9,0531 > F_{0,05;3;7} = 4,35$, то параметры режима резания существенно влияют на изменение уровня вибрации фрезы и уровень виб-

рации фрезы зависит от режимов резания с вероятностью 95 %. Таким образом, опытная функция регрессии (4.31) является адекватной.

4.3 Система назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации

Система назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации реализует предложенный алгоритм назначения рациональных режимов резания при фрезеровании на основе метода роя частиц и может применяться в производственном процессе изготовления машиностроительных деталей. Интерфейс пользователя системы назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации представлен на рисунке 4.4.

The screenshot shows a software window titled "Система назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уров...". The interface is divided into several sections:

- Параметры алгоритма МРЧ (MPCC algorithm parameters):** Includes input fields for "Численность населения" (Population size), "Количество циклов" (Number of cycles), and "Точность" (Accuracy), with a yellow circle '1' next to the accuracy field.
- Граничные условия (Boundary conditions):** A list of input fields labeled G1 through G12. A yellow circle '2' is next to the G5 field.
- Граничные условия и Веса (Boundary conditions and Weights):** Includes input fields for G13, G14, w1, and w2. A yellow circle '4' is next to the w1 field.
- Результат оптимизации (Optimization result):** Includes input fields for v, Sz, t, and B. A yellow circle '5' is next to the Sz field. A red error message "Граничные условия не выполнены" (Boundary conditions not met) is displayed. A yellow circle '6' is next to the error message.
- Buttons:** A button labeled "НАЧАТЬ ОПТИМИЗАЦИЮ" (START OPTIMIZATION) with a yellow circle '7' next to it.
- Параметры (Parameters):** A section with tabs for "Параметры 1" through "Параметры 5". Under "Параметры 3", there are input fields for a0, a1, a2, a3, a4, and a5. A yellow circle '8' is next to the a3 field.

A large yellow circle '3' is also present in the central area of the interface.

Рисунок 4.4 – Интерфейс пользователя системы назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации

Пример работы системы представлен на рисунке 4.5.

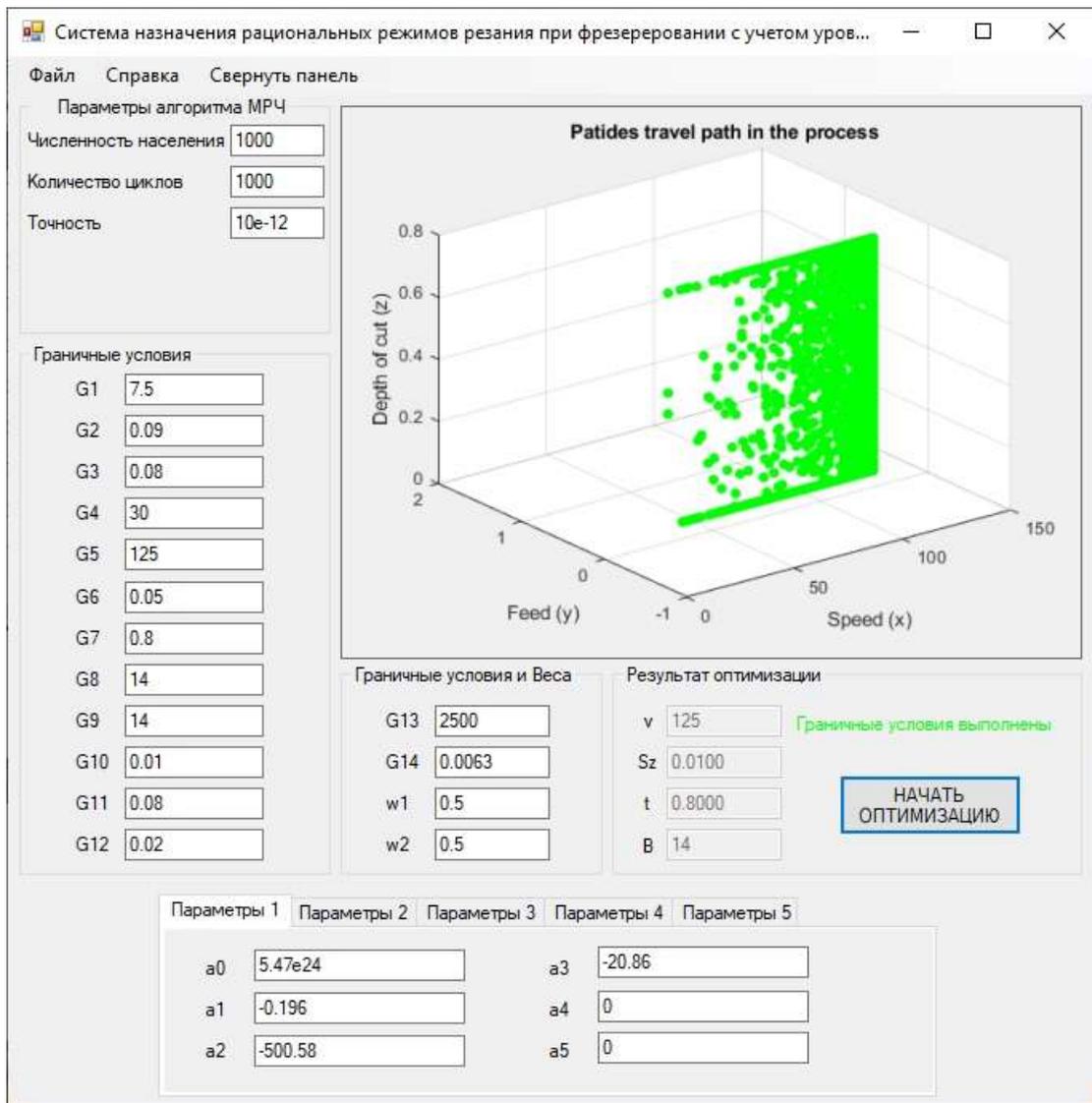


Рисунок 4.5 – Результаты работы системы назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации

Программное обеспечение системы написано на языках Matlab и C#. Интерфейс программного обеспечения включает в себя следующие области: область 1 – задание размерности пространства поиска и количества циклов; области 2 и 4 – установление весов и ограничений модели рационализации режимов резания; область 3 – описание пространства поиска; область 5 – входные параметры рационального режима фрезерования; область 6 – отображение удовлетворения граничных условий модели рационализации режимов резания, если условия не выполняются, то режущий инструмент заменяется; область 7 – кнопка для запуска

программы рационализации; область 8 – задание входных параметров многокритериальной модели рационализации режимов резания, в том числе коэффициенты, оцениваемые по статистическим данным (Параметры 1 – a_0, \dots, a_5 ; Параметры 2 – b_0, \dots, b_5 ; Параметры 3 – d_0, \dots, d_4 ; Параметры 4 – $C_N, n_{N1}, n_{N2}, n_{N3}$; Параметры 5 – L, D, z).

Представленная система назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации была применена для назначения рациональных режимов фрезерования с ограничениями по техническому состоянию станка, по обеспечению минимальной себестоимости обработки и по обеспечению максимального качества шероховатости поверхности. Входные параметры и граничные условия рациональной модели определялись следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_T = 0,12 \cdot D^{0,65} \cdot t^{0,64} S_z^{0,51} \leq [N_0] = G_1 = 7,5 \text{ (кВт)} \\ h_{3\max} = G_2 = \text{const} = 0,09 \text{ (мм)} \\ A(v, S_z, t) = 0,915346 \cdot v^{0,0016} \cdot S_z^{0,3495} \cdot t^{0,06345} = G_3 = 0,08 \text{ (мм)} \\ v_{\min} \leq v = G_4 = 30 \text{ (м/мин)} \\ v_{\max} \geq v = G_5 = 250 \text{ (м/мин)} \\ t_{\min} \leq t = G_6 = 0,05 \text{ (мм)} \\ t_{\max} \geq t = G_7 = 2 \text{ (мм)} \\ B_{\min} \leq B = G_8 = \text{const} = 14 \text{ (мм)} \\ B_{\max} \geq B = G_9 = \text{const} = 14 \text{ (мм)} \\ S_{z\min} \leq S_z = G_{10} = 0,01 \text{ (мм)} \\ S_{z\max} \geq S_z = G_{11} = 1 \text{ (мм)} \\ y = 0,993 \frac{P_y}{E} \leq [y_{\max}] = G_{12} = 0,02 \text{ (мм)} \\ P_y = 6724,7 \cdot D^{0,153} \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^{0,654} \cdot S_z^{0,829} \\ C = \frac{k \cdot L \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot v \cdot k_{HB} \cdot k_t \cdot k_h \cdot z \cdot S_z \cdot T} \left(B_c \cdot T + \frac{\Gamma \phi}{T_\Phi} + \frac{z \cdot \Gamma \Pi}{n_c} \right) \leq [C] = G_{13} \\ T(v, S_z, t) = 5,47 \cdot 10^{24} \cdot v^{-0,196} \cdot S_z^{-500,58} \cdot t^{-20,86} \\ R_a(v, S_z, t, A) = 0,96286 \cdot v^{-0,0039} \cdot S_z^{4,938} \cdot t^{1,173} \cdot A^{6,138} \leq [R_a] = G_{14} = 0,0063 \text{ (мм)} \end{array} \right.$$

Результаты работы системы назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации с использованием алгоритма МРЧ показывают надежность и сходимость по сравнению с экспериментальными результатами (рисунок 4.5). Прогноз периода стойкости режущего инструмента был установлен на основе анализа вибрации режущего инструмента с помощью устройства контроля вибрации.

4.4 Практическая реализация результатов диссертационного исследования

Практическая реализация результатов диссертационного исследования выполнялась в ЗАО «ХИМПРИБОР-1» при назначении рациональных режимов фрезерования деталей выпускаемой предприятием трубопроводной арматуры.

Например, предложенная система назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации была применена для назначения рациональных режимов резания при фрезерной обработке паза детали «Пробка» (рисунок 4.6) на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ FADAL VMC 6030 (рисунок 4.7).

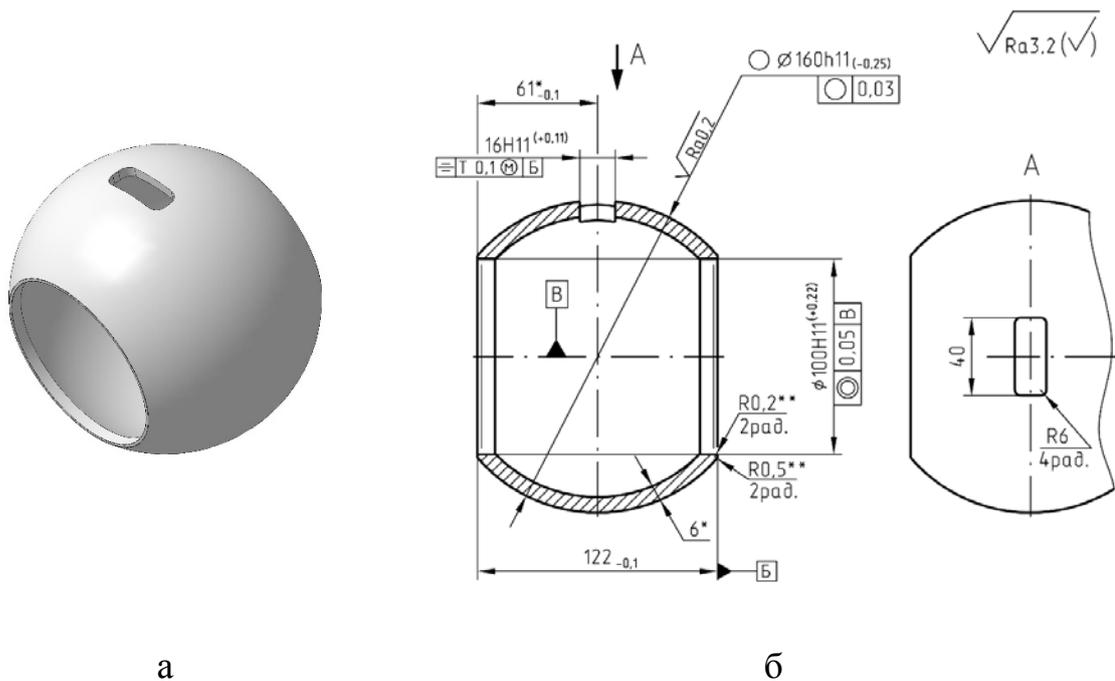


Рисунок 4.6 – Деталь «Пробка»

а – 3D-модель детали; б – эскиз детали

Исходной заготовкой детали «Пробка» является труба 159x8 по ГОСТ 9941-81 из нержавеющей стали 12X18Н10Т по ГОСТ 5632-72. В процессе обработки происходит фрезерование паза 16x40 мм глубиной 6 мм концевой твердосплавной фрезой 20 3009 НРС/ТРС VHM диаметром 12 мм фирмы Hoffmann (рисунок 4.8).



Рисунок 4.7 – Процесс обработки паза детали «Пробка» на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ FADAL VMC 6030



Рисунок 4.8 – Концевая твердосплавная фреза 20 3009 НРС/ТРС VHM диаметром 12 мм фирмы Hoffmann

Режимы резания до оптимизации: скорость резания – 90 м/мин, подача на зуб – $S_z = 0,05$ мм, глубина резания – 0,2 мм. По результатам применения системы был назначен рациональный режим: скорость резания – 110 м/мин, подача на зуб – $S_z = 0,04$ мм, глубина резания – 0,3 мм. В результате применения рацио-

нального режима скорость съема металла увеличилась с $0,57 \text{ см}^3/\text{мин}$ до $0,84 \text{ см}^3/\text{мин}$, или на $46,7 \%$, а за счет снижения амплитуды вибрации с $0,292 \text{ мкм}$ до $0,277 \text{ мкм}$, или на $5,1 \%$, шероховатость обработанной поверхности снизилась с $Ra 2,83 \text{ мкм}$ до $Ra 1,1 \text{ мкм}$, или на $61,1 \%$, при сравнимой наработке до отказа примерно 100 шт. обработанных деталей.

4.5 Выводы

1 Разработана многокритериальная оптимизационная модель назначения рациональных режимов резания при фрезеровании, в качестве целевых функций в которой используются минимальная суммарная себестоимость обработки и качество обработанной поверхности.

2 Разработан алгоритм назначения рациональных режимов резания при фрезеровании на основе метода роя частиц на основе информации, полученной в ходе проведения специальных экспериментов и фрезерной обработки поверхностей деталей на машиностроительных предприятиях.

3 Предложены зависимости для формирования следующих ограничений многокритериальной модели рационализации режимов резания: мощность станка, износ режущего инструмента, вибрация, деформация фрезы и обрабатываемые возможности фрезерного станка с ЧПУ. Математические модели граничных условий построены на основе экспериментальных результатов.

4 Разработана методика назначения рациональных режимов резания при фрезеровании с учетом уровня вибрации на основе предложенных в работе многокритериальной модели и алгоритма назначения рациональных режимов резания при фрезеровании на основе метода роя частиц, а также реализующее ее программное обеспечение. Программное обеспечение было экспериментально проверено при назначении рациональных режимов фрезерования с ограничениями по техническому состоянию станка, по обеспечению минимальной себестоимости обработки и по обеспечению требуемой шероховатости поверхности. Результаты работы программного обеспечения показали надежность и сходимость по сравне-

нию с экспериментальными результатами.

5 С помощью разработанного программного обеспечения в ЗАО «ХИМПРИБОР-1» с учетом уровня вибрации были назначены рациональные режимы фрезерной обработки деталей выпускаемой предприятием трубопроводной арматуры, что позволило при сравнимой наработке до отказа увеличить на 46,7 % скорость съема металла и снизить на 5,1 % амплитуду вибрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная научная задача определения рациональных режимов резания при концевом и торцевом фрезеровании и разработки средств вибродиагностики в зоне резания, имеющая важное значение для развития машиностроения.

Итоги выполненного исследования

1 На основании проведенного анализа взаимосвязи между вибрацией и основными параметрами процесса резания при концевом и торцевом фрезеровании подтверждено, что уровень вибрации меняется по мере изнашивания режущего инструмента. Поэтому перспективным направлением повышения эффективности фрезерной обработки и периода стойкости инструмента является прямой контроль вибрации во время обработки на основе использования акселерометров и назначение на этой основе рациональных режимов фрезерования. Определение уровня износа режущего инструмента по уровню вибрации в процессе фрезерования требует разработки специального устройства и алгоритма обработки полученной информации для контроля вибрации во время обработки.

2 Разработана математическая модель, раскрывающая взаимосвязи между вибрацией, основными параметрами процесса концевой и торцевой фрезерования и износом режущего инструмента, основанная на следующих предположениях: вибрация режущего инструмента может рассматриваться как гармонические колебания; изменение главной составляющей силы резания P_z является основной причиной изменения вибрации; для учета изменения главной составляющей силы резания по мере изнашивания режущего инструмента она должна включать помимо касательной составляющей силы резания F_K силу трения на фаске износа по задней поверхности фрезы $F_{ти}$, пропорциональную твердости материала,

ширине и длине фаски износа режущей кромки фрезы по задней поверхности и коэффициенту трения скольжения между заготовкой.

3 Разработано устройство контроля вибрации, отличительной особенностью которого является то, что оно для минимизации погрешности измерения расположено максимально близко к зоне резания и регистрирует вибрацию непосредственно на державке фрезы.

4 Экспериментальная оценка уровня вибрации в процессе концевой фрезерования с помощью разработанного устройства контроля вибрации подтвердила зависимость главной составляющей силы резания и, соответственно, вибрации системы СПИЗ от уровня износа фрезы. При работе новой фрезой возникает интенсивная вибрация. Главная составляющая силы резания и вибрация в ходе приработки фрезы снижаются по мере ее изнашивания по задней поверхности до уровня 0,028 мм. Дальнейшее изнашивание фрезы до уровня 0,126 мм практически не влияет на изменение главной составляющей силы резания и уровня вибрации. В конце периода стойкости фрезы наблюдается резкое увеличение главной составляющей силы резания и уровня вибрации в 2–2,3 раза. Поэтому контроль уровня вибрации может применяться для диагностики состояния фрез в конкретных условиях обработки.

5 Установлено, что параметр вибрационного сигнала во временном пространстве – среднее квадратическое – следует использовать в качестве математической основы методики извлечения из сигналов вибрации информации, отображающей процесс изнашивания режущей части фрезы; в частотном пространстве с точки зрения отношения сигнал/шум и удобства практического применения предпочтение следует отдать максимальной мощности спектра; метод непрерывного вейвлет-анализа позволяет точно определить частотные характеристики во времени и их изменения, а также выявить нестационарности в работе, поэтому он преодолевает имеющиеся ограничения методов анализа вибрации во временном и частотном пространстве.

6 Представлена методика извлечения из сигналов вибрации информации, отображающей процесс изнашивания режущей части фрезы, позволяющая не

только дополнить вибропаспорт системы СПИЗ информацией для оценки флуктуации его технологических параметров, но и получить информацию, отображающую непосредственно изнашивание режущей части фрезы и используемую для прогнозирования ее остаточного периода стойкости.

7 Разработана методика назначения рациональных режимов резания при концевом и торцевом фрезеровании с учетом уровня вибрации на основе предложенных в работе многокритериальной модели и алгоритма назначения рациональных режимов резания при фрезеровании на основе метода роя частиц, а также реализующее ее программное обеспечение. Программное обеспечение было экспериментально проверено при назначении рациональных режимов фрезерования с ограничениями по техническому состоянию станка, по обеспечению минимальной себестоимости обработки и по обеспечению требуемой шероховатости поверхности. Результаты работы программного обеспечения показали надежность и сходимость по сравнению с экспериментальными результатами.

8 С помощью разработанного программного обеспечения в ЗАО «ХИМПРИБОР-1» с учетом уровня вибрации были назначены рациональные режимы фрезерной обработки деталей выпускаемой предприятием трубопроводной арматуры, что позволило при сравнимой наработке до отказа увеличить на 46,7 % скорость съема металла и снизить на 5,1 % амплитуду вибрации.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Основные научные и практические результаты работы рекомендуется применять на машиностроительных предприятиях для повышения эффективности фрезерования, а также в учебном процессе подготовки бакалавров, магистров и аспирантов машиностроительных специальностей и направлений подготовки и при повышении квалификации инженерно-технических работников.

Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является применение разработанного в рамках диссертационного исследования подхода для режущих инструментов других видов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Авдонин, Г. Т. Влияние колебаний технологической системы на эксплуатационные характеристики обрабатываемых деталей / Г. Т. Авдонин, А. В. Алексеев. – Текст : непосредственный // Технология машиностроения. – 2001. – № 3. – С. 12–13.

2 Аверченков, А. В. Автоматизированный выбор металлорежущего инструмента для механической обработки заготовок деталей машин / А. В. Аверченков. – Текст : непосредственный // Научные технологии в машиностроении. – 2012. – № 9. – С. 27–31.

3 Анискина, О. В. Построение моделей схемно-параметрической надежности металлорежущих станков / О. В. Анискина, А. Г. Ивахненко, В. Е. Пузанов. – Текст : непосредственный // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2013. – № 5 (50). – С. 148–155.

4 Анискина, О. В. Прогнозирование параметрической надежности прецизионного технологического оборудования / О. В. Анискина, А. Г. Ивахненко, В. В. Куц. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 2 (298). – С. 159–164.

5 Анискина, О. В. Синтез допусков параметров геометрической точности металлорежущих станков / О. В. Анискина. – Текст : непосредственный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – № 6. – С. 95–103.

6 Анцев, А. В. Автоматизированная система контроля износа режущего инструмента по уровню вибрации / А. В. Анцев, Х. Ч. Данг, А. В. Жаднов. – Текст : непосредственный // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. научных трудов междунар. заочной научно-техн. конф. «АПИР-22», 9–10 ноября 2017 года; под ред. В.В. Прейса, Д.А. Провоторова. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 182–186.

7 Анцев, А. В. Анализ параметров вибрационных сигналов во временном

пространстве / А. В. Анцев, Е. С. Янов, В. Ю. Губин. – Текст : непосредственный // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. научных трудов национальной научно-техн. конф. с международным участием: «АПИР-24», 12–13 ноября 2019 года / под ред. В.В. Прейса. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – С 188–192.

8 Анцев, А. В. Зависимость вынужденных колебаний машинной части технологической системы в процессе резания от износа режущего инструмента / А. В. Анцев, Е. С. Янов, Х. Ч. Данг – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – Вып. 6. – С. 263–272.

9 Анцев, А. В. Измерительный стенд оценки уровня износа резца по уровню вибрации при токарной обработке / А. В. Анцев, Х. Ч. Данг, В. Ю. Губин – Текст : непосредственный // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: тезисы. – Санкт-Петербург : ГУАП, 2019. – С. 11–13.

10 Анцев, А. В. Контроль состояния режущего инструмента на основе анализа параметров вибрационных сигналов в частотном пространстве / А. В. Анцев, Е. С. Янов, Х. Ч. Данг, В. Ю. Губин – Текст : непосредственный // Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники: материалы международной научно-технической конференции. – Брянск: БГТУ, 2020. – С. 308–312.

11 Анцев, А. В. Методика обработки вибрационных сигналов для оценки состояния режущего инструмента / А. В. Анцев, Н. И. Пасько, Е. С. Янов, Х. Ч. Данг – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. 4. – С. 291–296.

12 Анцев, А. В. Оптимизации режимов резания с учетом уровня вибрации на основе применения методов искусственного интеллекта / А. В. Анцев, Е. С. Янов, Х. Ч. Данг – Текст : непосредственный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т 16. – № 3. – С. 101–109.

13 Анцев, А. В., Особенности оптимизации режимов резания с учетом фактора случайности / А. В. Анцев, Н. И. Пасько – Текст : непосредственный // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 9. – С. 15–20.

14 Анцев, А. В. Оценка параметров обобщенной стохастической модели отказов режущего инструмента с помощью непрерывного косвенного контроля процесса резания / А. В. Анцев, Х. Ч. Данг, Е. С. Янов – Текст : непосредственный // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 10–16 сентября 2018 г. в 2 томах. Т. 1. – Донецк : ДонНТУ, 2018. – С. 17–20.

15 Анцев, А. В. Оценка состояния режущего инструмента по уровню вибрации при фрезерной обработке / А. В. Анцев, Х. Ч. Данг // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий : сборник трудов научного симпозиума технологов-машиностроителей / под ред. В.А. Лебедева ; Донской гос. техн. ун-т. – Текст : электронный. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2020. – С. 131–138. – URL: <https://ntb.donstu.ru/content/2020229>. – ЭБС ДГТУ. – Загл. с экрана.

16 Анцев, А. В. Оценка уровня износа режущего инструмента в процессе резания по уровню вибрации системы СПИЗ / А. В. Анцев, Е. С. Янов, Х. Ч. Данг – Текст : непосредственный // XI Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России»: сборник докладов. 24–27 сентября 2018 г. / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – С. 3–5.

17 Анцев, А. В. Прогнозирование периода стойкости режущего инструмента на основе контроля вибрации в процессе фрезерования / А. В. Анцев, Х. Ч. Данг. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – Вып. 7. – С. 3–11.

18 Аршинов, В. А. Резание металлов и режущий инструмент / В. А. Аршинов, Г. А. Алексеев. – Изд. 3-е, перераб. и доп. Учебник для машиностроительных техникумов. – Москва : Машиностроение, 1975. – 440 с. – Текст : непосредственный.

19 Бармин, Б. П. Вибрации и режимы резания / Б. П. Бармин. – Москва : Машиностроение, 1972. – 72 с. – Текст : непосредственный.

20 Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва : Машиностроение, 1975. – 344 с. – Текст : непосредственный.

21 Бреев, С. В. Повышение качества обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании на основе исследования напряженно-деформированного состояния зоны стружкообразования : 05.02.07 : дис. ... канд. тех. наук / С. В. Бреев ; Комсомольский-на-Амуре. гос. университет. – Комсомольск-на-Амуре, 2011. – 151 с. – Текст : непосредственный.

22 Быкадор, В.С. Влияние значений технологических режимов процесса точения на возникновение автоколебаний / В.С. Быкадор, Е.С. Шаламов, О.В. Тетенко – Текст : непосредственный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14. – № 1. – С. 147–152.

23 Быкадор, В. С. Возникновение автоколебаний в простейшей системе резания металлов / В. С. Быкадор, Г. Ю. Костенко, Т. С. Бабенко. – Текст : непосредственный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016. – Т. 12. – № 2. – С. 119–123.

24 Васильев, А. С. Технологическая наследственность в машиностроении / А. С. Васильев. – Текст : непосредственный // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии. – 2017. – № 1. – С. 198–202.

25 Васин, Л. А. Комплексная система проектирования безвибрационного процесса токарной обработки на основе динамических характеристик элементов технологической системы : 05.03.01 ; 05.02.08 : дис. ... докт. техн. наук / Л. А. Васин ; Тул. гос. техн. ун-т. – Тула, 1994. – 488 с. – Текст : непосредственный.

26 Васин, С. А. Виброустойчивость резцов переменной жесткости при нестабильных режимах обработки / С. А. Васин, Г. В. Шадский, А. А. Кошелева. – Текст : непосредственный // Технология механической обработки и сборки: сб. науч. тр. – Тула, 1996. – С. 89–97.

27 Васин, С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании / С. А. Васин. – Москва : Машиностроение, 2006. – 384 с. – Текст : непосредственный.

28 Вибрации в технике: справочник в 6 т. / ред. В. Н. Челомей. – Т. 1.

Колебания линейных систем / под ред. В. В. Болотина. – Москва : Машиностроение, 1978. – 352 с. – Текст : непосредственный.

29 Вибрации в технике: справочник в 6 т. / ред. В. Н. Челомей. – Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / под ред. Ф. М. Диментберга, К. С. Колесникова. – Москва : Машиностроение, 1980. – 544 с. – Текст : непосредственный.

30 Влияние механизма контактного взаимодействия на износ передней поверхности инструмента / Ю.Н. Полянчиков, С.М. Пахтусов, В.А. Солодков [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2004. – № 9. – С. 42–44.

31 Волков, Д. И. Разработка модели процесса резания с учетом цикличности формирования стружки / Д. И. Волков, С. Л. Проскуряков. – Текст : непосредственный // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15. – № 3 (43). – С. 72–78.

32 Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – Москва : Наука, 1965. – 524 с. – Текст : непосредственный.

33 Головин, А. А. Динамика механизмов / А. А. Головин, Ю. В. Костиков, А. Б. Красовский ; под ред. А.А. Головина. – Изд. 2-е. – Москва : Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2006. – 160 с. – Текст : непосредственный.

34 Городецкий, Ю. И. Исследование автоколебаний динамической системы фрезерного станка с нелинейным элементом / Ю. И. Городецкий, С. Н. Стребуляев, Ю. Е. Майорова – Текст : непосредственный // Вестник научно-технического развития. Национальная Технологическая Группа. – 2009. – № 9 (25). – С. 91–95.

35 Городецкий, Ю. И. Фундаментальные проблемы нелинейной динамики станков / Ю. И. Городецкий – Текст : непосредственный // Динамика технологических систем: Сб. тр. VII Междунар. н.-т. конф. – Саратов : СГТУ, 2004. – С. 161–165.

36 Данг, Х. Ч. Разработка математической модели для определения взаимосвязи между амплитудой вибрации режущего инструмента и износом

инструмента при торцевом фрезеровании / Х. Ч. Данг – Текст : непосредственный // Молодёжный вестник Политехнического института. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – С. 3–11.

37 Данг, Х. Ч. Устройство для контроля вибрации на фрезерном станке / Х. Ч. Данг – Текст : непосредственный // Молодежный вестник политехнического института. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – С. 82–87.

38 Данг, Х. Ч. Устройство контроля вибрации при фрезеровании / Х. Ч. Данг, А. В. Анцев – Текст : непосредственный // Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении». – Тула : Изд-во ТулГУ, 2019. – С. 29–31.

39 Диагностика автоматизированного производства / С. Н. Григорьев, В. Д. Гурин, М. П. Козочкин [и др.] ; под ред. С.Н. Григорьева. – Москва : Машиностроение, 2011. – 600 с. – Текст : непосредственный.

40 Диагностика износа режущего инструмента на основе фрактального и вейвлет-анализа с использованием искусственного интеллекта в режиме реального времени с возможностью удаленного доступа / Ю. Г. Кабалдин, И. Л. Лаптев, Д. А. Шатагин [и др.]. – Текст : непосредственный // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2013. – № 5(102). – С. 183–189.

41 Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск : НИЦ регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 156 с. – Текст : непосредственный.

42 Дьяконов, В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В. П. Дьяконов. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2004. – 400 с. – Текст : непосредственный.

43 Елкин, М. С. Влияние покрытия режущего инструмента на силу резания при финишном концевом фрезеровании / М. С. Елкин, В. Ф. Безъязычный – Текст : непосредственный // XIII Королёвские чтения Международная молодёжная научная конференция: сборник трудов / Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). – Самара : Изд-во Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. – 2015. – С. 199–200.

44 Жарков, И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом /

И. Г. Жарков. – Ленинград : Машиностроение, 1986. – 184 с. – Текст : непосредственный.

45 Жилияев, А. С. Исследование влияния геометрии концевой фрезы на силу и температуру в зоне резания / А. С. Жилияев. – Текст : непосредственный // Развитие науки и технологий: проблемы и перспективы развития: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург : Изд-во: НОО «Профессиональная наука». – 2017. – С. 206–214.

46 Зайцев, Г. Н. Нормирование точности геометрических параметров машин / Г. Н. Зайцев, В. К. Федюкин, С. А. Любомудров / под ред. В.К. Федюкина – Москва : Академия (Academia). 2008. – 368 с. – Текст : непосредственный.

47 Израилович, М. Я. Параметрическое управление автоколебаниями / М. Я. Израилович, А. Н. Обухов. – Москва: Либроком, 2010. – 160 с. – Текст : непосредственный.

48 Ильницкий, И. И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения / И. И. Ильницкий. – Свердловск: Машгиз, 1958. – 105 с. – Текст : непосредственный.

49 Иремадзе, М. Е. Повышение стабильности процесса торцового фрезерования путем оптимизации технологических параметров обработки : 05.03.01 : дис. ... канд. техн. наук / М. Е. Иремадзе ; Моск. станкоинструм. ин-т. – Москва, 1990. – 142 с. – Текст : непосредственный.

50 Исаев, А. И. Влияние ультразвуковых колебаний на стойкость инструмента при резании металлов / А. И. Исаев, В. С. Анохин – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 1962. – № 8. – С. 45–49.

51 Исаев, А. И. Резание металлов керамическим инструментом / А. И. Исаев, Н. Н. Зорев, Л. К. Кучма. – Москва : Машгиз, 1952. – 92 с. – Текст : непосредственный.

52 Исследование автоколебаний механических систем типа «резец-суппорт металлорежущих станков» / А. Н. Кабельков, Г. В. Воронцов ; Новочеркасский политехнический институт. – Новочеркасск, 1984. – 16 с. – Деп. в НИИмаш 27.04.84, № 143 мш-84 Деп. – Текст : непосредственный.

53 Каширин, А. И. Исследование вибраций при резании металлов / А. И. Каширин. – Москва: Изд-во АН СССР, 1964. – 372 с. – Текст : непосредственный.

54 Кендалл, М. Д. Статистические выводы и связи / М. Д. Кендалл, А. Стьюарт. – Москва : Наука, 1973. – 903 с. – Текст : непосредственный.

55 Кирющенко, Е. В. Технологическое обеспечение точности фрезерной обработки крупногабаритных деталей / Е. В. Кирющенко, А. М. Козлов. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 3. – С. 65–73.

56 Киселёв, М. И. Фазовый метод исследования циклических машин и механизмов на основе хронометрического подхода / М. И. Киселёв, В. И. Пронякин. – Текст : непосредственный // Измерительная техника. – 2001. – № 9. – С. 15–18.

57 Козлов, В. И. Анализ влияния относительных колебаний на износ лезвийного инструмента / В. И. Козлов. – Текст : непосредственный // СТИН. – 2008. – № 1. – С. 9–14.

58 Козловский, Н.А. Жесткость и виброустойчивость тяжелых фрезерных станков / Н. А. Козловский, М. П. Заикин. – Москва : Машиностроение, 1986. – 215 с. – Текст : непосредственный.

59 Козочкин, М. П. Вибродиагностика состояния инструментов при точении металлов / М. П. Козочкин. – Текст : непосредственный // Машиностроитель. – 2013. – № 1. – С. 9–19.

60 Козочкин, М. П. Особенности вибрации при резании материалов / М. П. Козочкин. – Текст : непосредственный // СТИН. – 2009. – № 1. – С. 29–35.

61 Козочкин, М. П. Построение систем виброакустической диагностики состояния режущих инструментов / М. П. Козочкин. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 1992. – № 8–9. – С. 44–46.

62 Кондрашов, С.Г. Гашение вибраций путем взаимной компенсации автоколебаний / С. Г. Кондрашов. – Текст : непосредственный // Резание и инструмент – 1989. – № 42. – С 93–99.

63 Контроль износа вращающегося инструмента при механической обработке в автоматизированном производстве / Ю. Г. Кабалдин, А. М. Шпилев, В.С. Щетинин, А. С. Хвостиков. – Текст : непосредственный // Вестник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – Выпуск 4. Наука на службе технического процесса. – 2004. – С. 9–13.

64 Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – Москва : Машиностроение, 1974. – 360 с. – Текст : непосредственный.

65 Кудинов, В. А. Методика испытания фрезерных станков консольного типа средних размеров общего назначения на виброустойчивость при резании / В. А. Кудинов, Т. С. Воробьева. – Москва : ОНТИ, ЭНИМС, 1961. – 50 с. – Текст : непосредственный.

66 Лужанский, Д. А. Оценка влияния конструктивно-геометрических параметров и вибрационных характеристик концевых дереворежущих фрез на качество обработки материала : 05.12.05 : дис. ... канд. тех. наук / Д. А. Лужанский ; Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова. – Архангельск, 2020. – 120 с. – Текст : непосредственный.

67 Лукьянов, А. В. Исследование пространственной вибрации обрабатываемого центра в режиме фрезерования / А. В. Лукьянов, Д. П. Алейников. – Текст : непосредственный // Системы. Методы. Технологии. – Братск : Братский государственный университет, 2014. – №1. – С. 96–101.

68 Макаров, А. Д. Износ и стойкость режущего инструмента / А. Д. Макаров. – Москва : Машиностроение, 1966. – 264 с. – Текст : непосредственный.

69 Марков, А. И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов / А. И. Марков. – Москва : Машиностроение, 1968. – 367 с. – Текст : непосредственный.

70 Маркович, Л. Ц. Некоторые результаты исследования колебаний в главных приводах консольно-фрезерных станков / Л. Ц. Маркович, С. И. Радомысльский, П. П. Шулус. – Текст : непосредственный // Станкостроение Литвы. – 1971. – № 4. – С. 35–47.

71 Мартинов, Г. М. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки / Г. М. Мартинов, А. С. Григорьев. – Текст : непосредственный // СТИН. – 2012. – № 12. – С. 23–27.

72 Межевой, Ю. Т. Экспериментальное исследование вибраций при точении в зависимости от условий обработки : дис. ... канд. техн. наук / Ю. Т. Межевой ; Моск. ордена Ленина авиац. ин-т им. Серго Орджоникидзе. – Москва, 1954. – 135 с. – Текст : непосредственный.

73 Методы и средства диагностики авиационных приводов при их эксплуатации по техническому состоянию / В. В. Голованов, В. Г. Василенко, А. А. Земсков [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – Том 14. – № 3. – Ч. 1. – С. 213–221.

74 Нагорный, В. В. Контроль динамического поведения металлообрабатывающих технологических систем и метод определения их ресурса : 05.02.09 : дис. ... канд. техн. наук / В. В. Нагорный ; Сумский государственный университет. – Сумы, 2015. – 224 с. – Текст : непосредственный.

75 Нахапетян, Е. Г. Диагностирование оборудования гибкого автоматизированного производства / Е. Г. Нахапетян. – Москва : Наука. – 1985. – 225 с. – Текст : непосредственный.

76 Нерубай, М. С. Исследование эффективности вынужденных ультразвуковых колебаний при обработке резанием жаропрочных и титановых сплавов / М. С. Нерубай. – Текст : непосредственный // Высокопроизводительное резание в машиностроении. – Москва : Наука. – 1966. – С. 88–93.

77 Нуссбаумер, Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток / Г. Нуссбаумер; перевод с англ. Ю. Ф. Касимова, И. П. Пчелинцева; под ред. В. М. Амербаева, Т. Э. Кренкеля. – Москва : Радио и связь, 1985. – 248 с. – Текст : непосредственный.

78 Обработка металлов резанием: справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм, В. Ф. Безъязычный. – Москва : Машиностроение. – 2004.

– 784 с. – Текст : непосредственный.

79 Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением: Часть II. Нормативы режимов резания. – Москва : Экономика, 1990. – 472 с. – Текст : непосредственный.

80 Остафьев, В. А. Расчет динамической прочности режущего инструмента / В. А. Остафьев. – Москва : Машиностроение, 1979. – 168 с. – Текст : непосредственный.

81 Пименов, Д. Ю. Анализ направлений на задней поверхности зуба торцевой фрезы в зависимости от режимов резания / Д. Ю. Пименов, В. И. Гузеев, А. А. Кошин. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 1 (285). – С. 51–58.

82 Пименов, Д. Ю. Влияние величины смещения фрезы относительно заготовки на силу резания при торцевом фрезеровании / Д. Ю. Пименов, В. И. Гузеев, А. А. Кошин – Текст : непосредственный // Технология машиностроения. – 2011. – № 9. – С. 15–18.

83 Погонин, А. А. Выбор параметров управления технологическим процессом при обработке нестационарным станочным модулем / А. А. Погонин, М. С. Чепчуров. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 2. – С. 21–23.

84 Подураев, В. Н. Обработка резанием с вибрациями / В. Н. Подураев. – Москва : Машиностроение, 1970. – 350 с. – Текст : непосредственный.

85 Позняк, Г. Г. Пьезоэлектрические датчики ускорений для исследований высокочастотных колебаний станков и инструментов / Г. Г. Позняк, А. И. Кириллов, А. А. Эль-Амери. – Текст : непосредственный // Сб. науч. работ аспирантов. – Москва : 1972. – Вып. 12. – С. 86–93.

86 Позынич Е. К. Исследование процесса деградации крановых металлоконструкций методом неразрушающего контроля / Е. К. Позынич. – Текст : непосредственный // Механики XXI века. – 2008. – № 7. – С. 341–345.

87 Потапов, К. Г. Реализация измерительной фазохронометрической

системы для диагностики технического состояния токарных станков / К. Г. Потапов, А. Б. Сырицкий. – Текст : непосредственный // Приборы. – 2014. – № 5. – С. 13–18.

88 Применение ультразвуковых колебаний в машиностроении: сб. статей / отв. ред. В. К. Тепинкичиев. – Ростов: Изд-во Рост. н/Д ин-та с.-х. машиностроения, 1966. – 220 с. – Текст : непосредственный.

89 Проблемы технической диагностики станочного оборудования на современном этапе развития / С. Н. Григорьев, М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров, В. А. Синопальников. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – № 4. – С. 27–36.

90 Пуховский, Е. С. Безвибрационное многолезвийное резание / Е. С. Пуховский, Г. Э. Таурит, М. И. Лещенко – Киев : Техніка, 1982. – 117 с. – Текст : непосредственный.

91 Резников, Н. И. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов / Н. И. Резников, Е. В. Бурмистров, И. Г. Жарков. – Москва : Машиностроение, 1972. – 200 с. – Текст : непосредственный.

92 Рыжков, Д. И. Резец с виброгасящей фаской / Д. И. Рыжков. – Москва : Машиностроение, 1954. – 12 с. – Текст : непосредственный.

93 Sandvik Coromant. Руководство по металлообработке. – Стокгольм : АВ Sandvik Coromant, 2006. – 564 с. – Текст : непосредственный.

94 Свинин, В. М. Исследование регенеративных автоколебаний при многолезвийной обработке / В. М. Свинин. – Текст : непосредственный // Обработка металлов. – 2005. – №3 (28). – С. 28–30.

95 Сорокин, В. В. Контроль состояния режущего инструмента в станочных системах / В. В. Сорокин, А. Ф. Дараган. – Текст : непосредственный // Наука и современность. – 2010. – № 5–2. – С. 272–276.

96 Суриков, Д. Г. Разработка методики предупреждения отказов механических трансмиссий мехатронных приводов трубопроводной арматуры / Д. Г. Суриков. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 5–2 (313). – С. 233–241.

97 Глустый, И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Глустый ; пер. с чеш. В. В. Шварца. – Москва : Машгиз, 1956. – 395 с. – Текст : непосредственный.

98 Точность механической обработки и пути ее повышения / под ред. А. П. Соколовского. – Москва, Ленинград : Машгиз [Ленингр. отд-ние], 1951. – 488 с. – Текст : непосредственный.

99 Универсальная серия / Инструмент со сменными пластинами – Текст : электронный // Сайт компании «СтанкоМашСтрой» : [сайт]. – URL: https://16k20.ru/files/Universal_Line_YG-1_2017.pdf (дата обращения: 01.08.2020).

100 Хаэт, Г. Л. Повышение качества инструмента и эффективности обработки деталей на тяжелых станках / Г. Л. Хаэт, В. Н. Левин. – Москва : НИИмаш, 1982. – 48 с. – Текст : непосредственный.

101 Хоанг, В. Ч. Повышение эффективности точения деталей из труднообрабатываемых материалов на основании температурно-силового мониторинга : 05.02.07 : дис. ... канд. техн. наук / В. Ч. Хоанг ; ТулГУ. – Тула, 2016. – 136 с. – Текст : непосредственный.

102 Чемезов, Д. А. Равнодействующая сила резания при цилиндрическом фрезеровании / Д. А. Чемезов, С. И. Тюрина. – Текст : непосредственный // Theoretical & Applied Science. – 2016. – № 6 (38). – С. 78–81.

103 Штейнберг, В. С. Исследование вибраций при токарной обработке металлов / В. С. Штейнберг. – Текст : непосредственный // Вестник металлопромышленности. – 1936. – № 12–13. – С. 83–87.

104 Экспериментальная установка контроля вибрации при обработке на станках с ЧПУ / А. В. Анцев, Х. Ч. Данг, Е. С. Янов, М. В. Полев. – Текст : непосредственный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15. – № 2. – С. 151–158.

105 Ямников, А. С. Определение условий виброустойчивого точения нежестких заготовок многолезцовыми головками / А. С. Ямников, О. А. Ямникова. – Текст : непосредственный // Научные технологии в машиностроении. – 2012. – № 11 (17). – С. 15–21.

106 Ямникова, О. А. Виброустойчивость процесса лезвийной обработки нежестких валов : 05.03.01 : дис. ... докт. техн. наук / О. А. Ямникова ; ТулГУ. – Тула, 2004. – 357 с. – Текст : непосредственный.

107 Abimbola M. Jubril. A nonlinear weights selection in weighted sum for convex multiobjective optimization / M. Jubril Abimbola. – Text : unmediated // Facta Universitatis. Ser. Math. Inform. – 2012. – Vol. 27. – № 3. P. 357–372.

108 Altintas, Y. Manufacturing automation. Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design / Y. Altintas. – Cambridge : Cambridge University Press, 2000. – 286 p. – Text : unmediated.

109 Altintas, Y. Metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design: Manufacturing automation / Altintas, Yusuf. – 2012. – 379 p. – Text : unmediated.

110 Analysis of tool deflection errors in precision CNC end milling of aerospace aluminum 6061-T6 alloy / T.N. Nghiep, Ahmed A.D. Sarhan, Hideki Aoyama. – Text : unmediated // Measurement. – 2018. – Vol. 125. – P. 476–495.

111 Antoni, J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults / J. Antoni. – Text : unmediated // Mech. Syst. Signal Process. – 2007. – Vol. 21. – P. 108–124.

112 Application of acoustic emissions in machining processes: analysis and critical review / H. Kishawy, H. Hegab, U. Umer, A. Mohany. – Text : unmediated // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 98. – P. 1391–1407.

113 Baro, P. K. Modeling of cutting forces in a face-milling operation with self-propelled round insert milling cutter / P. K. Baro, S. S. Joshi, S. G. Kapoor – Text : unmediated // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – Vol. 45. – P. 831–839.

114 Braun, S. The synchronous (time domain) average revisited / S. Braun. – Text : unmediated // Mech. Syst. Signal Process. – 2011. – Vol. 25. – P. 1087–1102.

115 Chen, Y. A study of the cutting forces and vibration characteristics in titanium machining / Y. Chen – School of Mechanical and Manufacturing Engineering The University of New South Wales, 2015. – 201 p. – Text : unmediated.

116 Cuka, B. Fuzzy logic based tool condition monitoring for end-milling / B. Cuka, D. Kim. – Text : unmediated // Robot Comput Integr Manuf. – 2017. – Vol. 47(10). – P. 22–36.

117 Cutting tool wear monitoring using the diagnostic capabilities of modern CNC machines / A. V. Antsev, V. V. Zhmurin, E. S. Yanov, H. T. Dang – Text : unmediated // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1260. – 032003. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/3/032003>.

118 D'mello, G. Optimization studies in high speed turning of Ti-6Al-4V / G. D'mello, P. S. Pai, N. Puneet. – Text : unmediated // Applied Soft Computing. – 2017. – Vol. 51. – P. 105–115.

119 Engin, S. Generalized modeling of milling mechanics and dynamics: Part I – helical end mills / S. Engin, Y. Altintas. – Text : unmediated // American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED. – 1999. – Vol. 10.

120 Faassen, R. P. H. Chatter prediction and control for high-speed milling: modelling and experiments / R. P. H. Faassen. – Technische Universiteit Eindhoven, 2007. – 145 p. – Text : unmediated.

121 FPGA-based reconfigurable system for tool condition monitoring in high-speed machining process / P. Sevilla, J. Robles, J. Jauregui, D. Jimenez. – Text : unmediated // Measurement. – 2015. – Vol. 64. – P. 81–88.

122 Fu, H. J. A dynamic modeling approach to the optimal design of nonuniform chip loading in face milling / H. J. Fu. – University of Illinois at Urbana-Champaign, 1985. – 247 p. – Text : unmediated.

123 Gupta, M. K. Optimization of machining parameters and cutting fluids during nano-fluid based minimum quantity lubrication turning of titanium alloy by using evolutionary techniques / M. K. Gupta, P. Sood, V. S. Sharma. – Text : unmediated // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 135. – P. 1276–1288.

124 Halliwell, N. A. Measurement of oscillatory and vibrational motion / N. A. Halliwell. – European Patent Specification, 1983. – Text : unmediated.

125 Hosi, T. Study for practical application of fluctuating speed cutting for regenerative chatter control / T. Hosi – Text : unmediated // Annals of CIRP. – 1977. –

P. 1085–1093.

126 Huang, P. B. An intelligent neural-fuzzy model for an in-process surface roughness monitoring system in end milling operations / P. B. Huang. – Text : unmediated // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2016. – Vol. 27. – P. 689–700.

127 Huang, X. D. Hidden Markov models for speech recognition / X. D. Huang, Y. Ariki, M. A. Jack. – Edinburgh University Press, 1990. – 275 p. – Text : unmediated.

128 Hufnagl, B. Bezdimezionalne karte stabilnosti samopobudujucin oscilacija alatnih masina / B. Hufnagl. – Text : unmediated // *Strojarstvo*. – 1985. – Vol. 27. – No 3. – P. 133–137.

129 Inamura, T. Stability analysis of cutting under varying spindle speed / T. Inamura, T. Sata. – Text : unmediated // *J. Fac. Eng. Tokyo Univ.* – 1975. – P. 80–85.

130 Influence of vibration amplitude on tool wear during ball end milling of hardened steel / A. V. Antsev, T. N. Dang, H. T. Dang, E. S. Yanov – Text : unmediated // *Proceedings of 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*. – 2018. – P. 232–236. DOI: 10.1109/GTSD.2018.8595567.

131 Kaya, N. Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms / N. Kaya. – Text : unmediated // *Computers in Industry*. – 2006. – Vol. 57. – P. 112–120.

132 Kennedy, J. Particle swarm optimization. / J. Kennedy, R. C. Eberhart. – Text : unmediated // *Proceedings of the International Conference on Neural Networks*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 1995. – Vol. 4. – P. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.

133 Kim, H. S. A cutting force model for face-milling operations / H. S. Kim, K. Ehmann. – Text : unmediated // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1993. – Vol. 33. – P. 651–673.

134 Koenigsberger, F. Cutting Force Pulsations in Milling / F. Koenigsberger, A. J. P. Sabberwal. – Text : unmediated // *Int. J. of Mach. Tool Des. Res.* – 1961. – Vol. 1. – 15 p.

135 Lee P. Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data / P. Lee, Y. Altintas. – Text : unmediated // *International Journal of Machine Tools and*

Manufacture. – 1996. – Vol. 36. – P. 1059–1072.

136 Lewin, A. C. Measurement of rotational vibrations using a novel interferometric technique / A. C. Lewin, V. Roth, G. Siegmund. – Text : unmediated // Measurement. – Vol. 16. – № 2. – 1995. – P. 81–90.

137 Lin, S. C. The effects of variable speed cutting on vibration control in face milling / S. C. Lin, R. E. DeVor, S. G. Kapoor. – Text : unmediated // Journal of Engineering for Industry. – 1990. – Vol. 112(1). – P. 1–11.

138 Litao Wang. Tool wear monitoring in reconfigurable machining systems through Wavelet analysis / Wang Litao, G. Mehrabi. Mostafa, Kannatey-Asibu Jr. Elijah. – Text : unmediated // Engineering Research Center for Reconfigurable Machining Systems University of Michigan, 2001. – Ann Arbor, MI 48109-2125.

139 Markopoulos, A. P. Artificial neural network models for the prediction of surface roughness in electrical discharge machining / A. P. Markopoulos, D. E. Manolakos, N. M. Vaxevanidis. – Text : unmediated // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2008. – Vol. 19. – P. 283–292.

140 Mekid, S. Beyond intelligent manufacturing: a new generation of flexible intelligent NC machines / S. Mekid, P. Pruschek, J. Hernandez. – Text : unmediated // Mechanism and Machine Theory. – 2009. – Vol. 44. – P. 466–476.

141 Mukherjee, I. A review of optimization techniques in metal cutting processes / I. Mukherjee, P. K. Ray. – Text : unmediated // Computers & Industrial Engineering. – 2006. – Vol. 50. – P. 15–34.

142 Multi-objective feedrate optimization method of end milling using the internal data of the CNC system / G. Xu, J. Chen, H. Zhou [etc.]. – Text : unmediated // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 101. – P. 715–731.

143 Multi-objective optimization during machining Ti-6Al-4V using nano-fluids / H. Hegab, W. Abdelfattah, S. Rahnamayan [etc.]. – Text : unmediated // CSME International Congress 2018, Toronto, ON, Canada. – 2018.

144 Papandreou-Suppappola, A. Applications in Time-Frequency Signal Processing / A. Papandreou-Suppappola. – Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2013. –

432 p. – Text : unmediated.

145 Quintana, G. Chatter in machining processes: A review / G. Quintana, J. Ciurana. – Text : unmediated // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2011. – № 51 (5). – P. 363–376.

146 Radovanović, M. Multi-objective optimization of multi-pass turning AISI 1064 steel / M. Radovanović. – Text : unmediated // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 100. – P. 87–100.

147 Randall, R. B. Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications / R. B. Randall. – UK, Chichester : John Wiley & Sons, 2011. – 298 p. – Text : unmediated.

148 Ruzhong, Z. Modelling of Cutting Force Pulsation in Face-Milling / Z. Ruzhong, K. K. Wang. – Text : unmediated // CIRP Ann. Manuf Technol. Merchant E. – 1983. – Vol. 32. – P. 21–26.

149 Scheffer, C. Wear monitoring in turning operations using vibration and strain measurements / C. Scheffer, P. S. Heyns. – Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Pretoria, Pretoria, 0002, South Africa. – 2004. – 210 p. – Text : unmediated.

150 Self-Excited Chatter and its Marks in Turning / T. Kaneko, H. Sato, Y. Tani, M. O-hori. – Text : unmediated // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1984. – № 106 (3). – P. 222–228.

151 Sexton, J. S. An investigation of the transient effects during variable speed cutting / J. S. Sexton, B. J. Stone. – Text : unmediated // J. Mech. Eng. Science. – 1980. – Vol. 22. – № 3. – P. 107–118.

152 Shirase, K. Machine tool automation / K. Shirase, S. Fujii. – Text : unmediated // Handbook of Automation. Springer. – 2009. – P. 837–857.

153 Stephenson, D. A. Metal cutting theory and practice. Third Edition / D. A. Stephenson, J. Agapiou. – New York: CRC Press, 2016. – 956 p. – Text : unmediated.

154 Study of a control system with varying spindle speed in face milling / R. J. Olbrich, H. J. Fu, D. Bray, R. E. DeVor. – Text : unmediated // Proc. of the 13th North American Manufacturing Res. Conf. – 1985. – P. 567–574.

155 Takemura, T. Active suppression of chatter by programmed variation of spindle speed / T. Takemura, T. Kitamura, T. Hosi. – Text : unmediated // *Annals of CIRP*. – 1974. – Vol. 23. – P. 121–122.

156 Tlustý, J. Machine dynamics, Chapter 3. / J. Tlustý. – Text : unmediated // *Handbook of High-Speed Machining Technology*. – New York: Chapman & Hall, 1985. – P. 48–153.

157 Tobias, S. A. Theory of regenerative machine tool chatter / S. A. Tobias, W. Fishwick. – Text : unmediated // *The Engineer*, London. – 1958. – Vol. 205. – P. 199–203.

158 Waldorf, D. J. Automatic recognition of tool wear on a face mill using a mechanistic modeling approach / D. J. Waldorf, S. G. Kapoor, R. E. DeVor. – Text : unmediated // *Wear*. – 1992. – Vol. 157(2). – P. 305–323.

159 Wiercigroch, M. Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting / M. Wiercigroch, E. Budak. – Text : unmediated // *Philosophical Transactions of the Royal Society London*. – 2001. – Vol. 359. – P. 663–693.

160 Yildiz, A. R. A new hybrid differential evolution algorithm for the selection of optimal machining parameters in milling operations / A. R. Yildiz. – Text : unmediated // *Applied Soft Computing*. – 2013. – Vol. 13. – P. 1561–1566.

161 Yusup, N. Overview of PSO for optimizing process parameters of machining / N. Yusup, A. M. Zain, S. Z. M. Hashim. – Text : unmediated // *Procedia Engineering*. – 2012. – Vol. 29. – P. 914–923.

162 Zuo, H. Weights analysis of multi-objective programming problem / Hua Zuo, Guoli Zhang. – Text : unmediated // *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. – Information Processing and Control Institute, North China Electric Power University, Baoding 071003, China. – 2013. – P. 1039–1044.

163 Zuperl, U. Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end milling / U. Zuperl, F. Cus, M. Milfelner. – Text : unmediated // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 164. – P. 1472–1478.

ПРИЛОЖЕНИЕ

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Закрытое Акционерное Общество
«ХИМПРИБОР-1»
 Россия, 300028, г. Тула, ул. Болдина, 94



Closed Joint Stock Company
«HIMPRIBOR-1»
 94, Boldin st., Tula, Russia, 300028

телефон/факс (4872) 22-35-98, 24-70-80
 www.himpribor-1.ru
 e-mail: info@himhribor-1

УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный директор
 ЗАО «ХИМПРИБОР-1», к.т.н.
 Лурье И.Б.
 2020 г.

АКТ

использования результатов диссертационного исследования
 Данг Хыу Чонг

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы Данг Хыу Чонг, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, использованы в производственной деятельности ЗАО «ХИМПРИБОР-1» при обработке на металлорежущих станках с ЧПУ деталей кранов шаровых запорных и затворов дисковых регулирующих.

Разработанные математические модели и методики позволяют назначать рациональные режимы резания при концевом и торцевом фрезеровании и оценивать состояние фрезы в процессе обработки путем контроля вибрации непосредственно в зоне обработки.

В результате использования на предприятии созданного в рамках диссертационного исследования программного обеспечения для назначения рациональных режимов резания при концевом и торцевом фрезеровании с учетом уровня вибрации были назначены рациональные режимы обработки концевыми и торцевыми фрезами деталей трубопроводной арматуры, что позволило при сравнимой наработке до отказа увеличить на 46,7 % скорость съема металла и снизить на 5,1 % амплитуду вибрации.

Директор по производству
 ЗАО «ХИМПРИБОР-1»

Р.Ю. Максимов

Главный технолог

Н.С. Тормышова