

На правах рукописи



ЯМНИКОВА Ольга Александровна

**ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ
НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ**

Специальность **05.03.01** - "Технологии и оборудование
механической и физико-технической
обработки"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Тула - 2005

Работа выполнена на кафедре "Автоматизированные станочные системы" ГОУ ВПО «Тульский государственный университет».

Научный консультант доктор технических наук, профессор
Иноземцев Александр Николаевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Гречишников Владимир Андреевич
доктор технических наук, профессор
Васильев Александр Сергеевич
доктор технических наук, профессор
Кузнецов Анатолий Михайлович

Ведущее предприятие - ФГУП ГНПП "Сплав" (г. Тула)

Защита диссертации состоится "4" апреля 2005 г. в 14 часов в 9 учебном корпусе, ауд. 101 на заседании специализированного совета Д212.271.01 при ГОУ ВПО «Тульский государственный университет» (300600, г. Тула, пр. Ленина, 92).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Тульский государственный университет».

Автореферат разослан « 22 » февраля 2005 г.

Ученый секретарь
специализированного совета



Орлов А.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Возрастающие требования к качеству изделий машиностроения неразрывно связаны с точностью изготовления деталей. Функциональное назначение отдельных деталей, а также стремление к снижению металлоемкости механизмов и машин обусловили необходимость применения класса так называемых нежестких деталей высокой точности, отличающихся непропорциональностью габаритных размеров, малой жесткостью в определенных сечениях и направлениях. Процесс лезвийной обработки нежестких деталей типа вал сопровождается вибрациями (механическими колебаниями), которые оказывают существенное влияние на шероховатость поверхности, размерную точность, стойкость инструмента и долговечность станка. Наряду с этим неуправляемые механические колебания со сравнительно большой амплитудой являются ограничивающим фактором при увеличении производительности. Появление вибраций обусловлено наличием и взаимным влиянием технологических условий резания, внешних возмущающих сил и характеристик упругой системы станок-приспособление-инструмент-заготовка, далее называемой механической системой резания.

При лезвийной обработке нежестких валов виброустойчивость процесса связана, прежде всего, с колебаниями заготовки в зоне резания, которые влияют на изменения геометрических параметров срезаемого слоя во времени, и, как следствие, на микрогеометрию обработанной поверхности. Для повышения виброустойчивости процесса применяют различные способы и устройства, например снижение режимов резания, повышение жесткости механической системы резания и ее демпфирующей способности, введение управляемых колебаний подачи или скорости резания (виброрезание). Для их использования требуется достоверная и полная информация о динамическом состоянии механической системы резания. Известны работы по определению виброустойчивости механической системы резания, которые отвечают на вопрос: будет ли система устойчива или нет. В данных работах заготовку рассматривали как сосредоточенную массу на невесомых пружинах. Для определения виброустойчивости лезвийной обработки нежестких валов и численной оценки динамических параметров механической системы требуется учитывать физико-механические свойства заготовки, а также инструмента и узлов крепления. Это возможно только при рассмотрении заготовки как упругого тела, чьи массовые и деформационные характеристики распределены непрерывным образом по всему объему.

Разработка этих теоретических положений позволяет априорно определять требования к основным параметрам известных способов достижения виброустойчивости механической системы резания за счет расчета мгновенных значений упругих колебаний и параметров режима резания.

В этой связи совершенствование теории виброустойчивости процесса лезвийной обработки нежестких валов на основе предлагаемых теоретических положений является **актуальной** научной проблемой.

Научно-исследовательские работы по теме связаны с тематическим планом госбюджетных НИР ТулГУ и выполнялись в соответствии с грантами № 96-15-98241 и № 00-15-99064 Президента РФ на поддержку ведущих научных школ по теме: "Прогрессивные технологические процессы формообразования сложных поверхностей и сборки высокоточных изделий", грантом № НШ-1920.2003.8 Президента РФ на поддержку ведущих научных школ по теме: "Прогрессивная технология механической обработки и сборки в машиностроении" и грантом МО РФ на проведение молодыми учеными научных исследований в ведущих научно-педагогических коллективах № 10 - 10.

Цель работы. Совершенствование технологического обслуживания станков, используемых на операциях лезвийной обработки нежестких валов на основе повышения достоверности и полноты численного прогнозирования динамического состояния механической системы резания для обеспечения виброустойчивости процесса обработки.

Поставленная цель определила **основные задачи работы:**

1) Выполнить аналитическое описание динамического состояния технологической системы на базе токарного станка при лезвийной обработке нежестких валов с использованием классических уравнений теории упругости.

2) Найти зависимости составляющих силы резания от мгновенных значений параметров срезаемого слоя и режимов резания.

3) Найти взаимосвязь квазистатических параметров технологической системы в исходном состоянии, заданных параметров режимов резания, исходных параметров заготовки и схемы ее закрепления с мгновенными значениями отклонений системы от номинального состояния (с параметрами колебаний заготовки относительно инструмента).

4) Разработать критерий виброустойчивости процесса лезвийной обработки нежестких валов.

5) Составить алгоритм и программное обеспечение определения устойчивости технологической системы при лезвийной обработке.

6) Осуществить выбор оптимального способа определения жесткости узлов технологической системы из известных ранее, а также коэффициента затухания.

7) Доказать адекватность математической модели упругих колебаний технологической системы для процесса точения с помощью экспериментальных исследований.

8) Разработать обобщенный подход к априорному определению необходимых параметров способов или устройств для гашения вибраций.

9) Разработать схему аттестации рабочего места, предназначенного для обработки нежестких валов лезвийным инструментом с учетом виброустойчивости процесса резания.

Методы исследования. В основу работы положены разделы теории технологии машиностроения о точности механической обработки и качестве получаемой поверхности; теория резания материалов и теория координатных связей при вибрационных процессах в механических системах. Работа включает в себя комплекс аналитических исследований в области теории упругости, который положен в основу математической модели и алгоритмов расчета параметров динамики процесса резания. Для получения решения совокупности дифференциальных уравнений в частных производных был применен конечно-разностный численный метод. Экспериментально определялись жесткость элементов процесса лезвийной обработки и коэффициенты затухания, а также подтверждена адекватность теоретических результатов.

Автор защищает:

1) Аналитическое описание динамического состояния механической системы резания на базе токарного станка при лезвийной обработке (точении цилиндрических и резьбовых поверхностей и фрезеровании резьб охватываемыми головками) нежестких валов, учитывающее взаимное влияние поперечных и крутильно-продольных колебаний элементов системы и режима резания.

2) Зависимости составляющих силы резания от мгновенных значений параметров срезаемого слоя и режимов резания, в том числе зависимости мгновенных значений номинальных параметров срезаемого слоя от режима резания и времени для процесса резьбообразования охватываемым фрезерованием или точением.

3) Взаимосвязь квазистатических параметров процесса лезвийной обработки в исходном состоянии, заданных параметров режима резания, исходных параметров заготовки и схемы ее закрепления с параметрами колебаний механической системы резания.

4) Разработка критерия виброустойчивости процесса лезвийной обработки нежестких валов.

5) Алгоритм определения виброустойчивости процесса лезвийной обработки на основе расчета упругих перемещений элементов механической системы и мгновенных значений модулей составляющих силы резания.

6) Выбор оптимального способа определения жесткости узлов технологической системы из известных ранее, обеспечивающий возможность определения коэффициента затухания.

7) Результаты экспериментального подтверждения адекватности полученных функциональных зависимостей упругих колебаний механической системы от времени.

8) Обобщенный подход к априорному определению необходимых параметров способов или устройств для гашения вибраций, в частности рекомендации по применению электромеханической адаптивной системы стабилизации силы резания при резании.

9) Схему аттестации рабочего места, предназначенного для обработки нежестких валов лезвийным инструментом с учетом виброустойчивости процесса резания.

Научная новизна. Получено аналитическое описание динамического состояния механической системы резания на базе токарного станка при лезвийной обработке нежестких валов, учитывающее взаимное влияние поперечных и крутильно-продольных колебаний элементов системы и толщины срезаемого слоя, скорости, а также глубины резания, при этом заготовка рассматривается как упругое тело, чьи массовые и деформационные характеристики распределены непрерывным образом, и выведены зависимости составляющих силы резания, учитывающие мгновенные изменения режима резания, для трех видов лезвийной обработки нежестких валов: точения, вихревого резьбофрезерования и нарезания резьбы резцом.

Теоретическая ценность работы заключается в том, что полученные результаты расширяют и дополняют теорию колебаний технологических систем, теорию проектирования и методику применения адаптивных технологических систем, теорию эксплуатационного обслуживания технологического оборудования.

Практическая ценность. Применение численного метода конечных разностей позволило впервые получить функциональные зависимости упругих колебаний технологической системы от времени, которые легли в основу алгоритма моделирования упругих колебаний механической системы и определения устойчивости процесса лезвийной обработки нежестких валов. Разработанный алгоритм позволяет заранее, без проведения физического эксперимента, выбрать оптимальный режим резания, учитывая требуемое качество поверхности и заданные параметры заготовки. Созданная теория определения виброустойчивости процесса лезвийной обработки нежестких валов обеспечивает возможность выбора оптимальных способов виброгашения и их параметров, так как априорно задает характеристики вибрационного процесса (амплитуду, частоту вибраций, мгновенные значения силы резания и параметры срезаемого слоя). Разработана методика аттестации рабочего места, предназначенного для обработки нежестких валов резанием, с учетом определения виброустойчивости процесса лезвийной обработки.

Реализация результатов работы заключается в проведении лабораторных технологических испытаний и в разработке рекомендаций по аналитическому определению безвибрационных режимов обработки при различных схемах установки заготовки для трех видов обработки: точения вала, вихревого резьбонарезания и нарезания резьбы резцом.

Рекомендации приняты к внедрению на ГУП ГНПП "Сплав" (г. Тула), ОАО "Тульский оружейный завод", ОАО "Тяжпромарматура".

Кроме этого математическая модель и программное обеспечение используется в учебно-исследовательской работе студентов старших курсов и магистрантов, а также при изучении курса «Точность металлорежущих станков».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были представлены на ежегодных НТК ТулГУ в 1995-2004 годах, а также на международных конгрессах "Конструкторско-технологическая информатика" - КТИ-96, КТИ - 2000 (на секции, руководимой д.т.н. А.В. Пушем и д.т.н. Кудиновым В.А.) (май 1996 года и 2000 год, Москва, МГТУ "Станкин"), юбилейной МНТК "Вопросы совершенствования технологических процессов механической обработки и сборки изделий машиностроения" (сентябрь 1996 года, Тула, ТулГУ), МНТК "Прогрессивные методы проектирования технологических процессов, металлорежущих станков и инструментов" (1997 г., Тула, ТулГУ), МНТК "Современные проблемы проектирования и производства зубчатых передач" (Тула, ТулГУ, 2000 г.), МНТК "Проблемы теории и практики технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки", (22 - 26 мая 2000 г., Харьков, ХНПК "ФЭД"), МНТК "АИМ 2000" (Тула, ТулГУ, 2000 г.) МНТК "Technology-2000. Transactions collection of International Scientific-technical Conference in Oryol" (сентябрь 28-30, 2000 г. Орел, ОрелГТУ), 4-й МНТК "Качество машин" (10-11 мая 2001г., Брянск, БГТУ), Всероссийской НТК "Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении" (Н. Новгород - Арзамас, НГТУ - АГПИ, 2001), 4-й, 7-й МНТК "Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве" (23-24 октября 2001 г, 27-28 мая 2003 г., Харьков, ХНПК "ФЭД"), Всероссийской НТК "Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии", посвященной 40-летию кафедры ТМС ЛГТУ (25-26 апреля 2002 г., Липецк, ЛГТУ), международной конференции "Нетрадиционные методы обработки" (Воронеж, Вор. гос. ун-т, 2002), МНТК "Технологические системы в машиностроении", посвященной памяти выдающихся ученых Коганова И.А. и Лашнева С.И. (16-19 октября 2002 г., Тула, ТулГУ), международной конференции "Автоматизация: проблемы, идеи, решения" (2002, ТулГУ, Тула), серии международных электронных НТК "Технологическая системотехника" (2002, 2003, 2004, ТулГУ, Тула), МНТК "Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения - Технология-2003" (Орел, 25-27 сентября, 2003 г.), VII МНТК по динамике технологических систем «ДТС-2004» (4-9 октября, 2003 г., Саратов), международной научно-технической электронной интернет-конференции "Технология машиностроения 2004" [Электронный ресурс].

Устройство стабилизации силы резания (свидетельство на полезную модель № 28643) демонстрировалось на Всемирном Салоне инноваций "Брюссель-Эврика 2002" (12-17 ноября 2002 г.) и было отмечено бронзовой медалью Салона.

Публикации. По теме диссертации сделано 66 публикаций, в том числе в центральной печати - 9, в рецензируемых сборниках, входящих в Перечень ВАК РФ или Украины для докторских диссертаций, - 28, в материалах МНТК -- 27, в материалах Всероссийских НТК - 2; получены свидетельство на полезную модель и патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 254 страницах машинописного текста, иллюстрированного 100 рисунками, содержит 6 таблиц, библиографический список, состоящий из 116 наименований, и 3 приложений. Общий объем работы составляет 356 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе описывается состояние исследуемого вопроса. Здесь рассмотрен механизм вибрации при резании, особенности процесса резания при динамической неустойчивости и теории устойчивости такого процесса, в том числе при многорезцовой обработке.

Возникновение вибраций при обработке резанием характеризуется возмущающими силами и свойствами упругой системы; соотношение между этими параметрами определяет как возможность возникновения вибраций, так и их интенсивность, то есть амплитуду и частоту.

При точении в динамических условиях возможны следующие разновидности вибраций:

1. Вибрации державки резца: а) в вертикальной плоскости; б) в горизонтальной плоскости.
2. Вибрации резцедержателя или суппорта в вертикальной плоскости: а) параллельно направлению подачи; б) перпендикулярно направлению подачи.
3. Вибрация заготовки между центрами: а) в вертикальной плоскости; б) в горизонтальной плоскости.
4. Крутильные колебания заготовки вокруг своей оси.
5. Продольные колебания заготовки вдоль своей оси.
6. Крутильные колебания шпинделя.
7. Вибрации станины токарного станка: а) в вертикальной плоскости; б) в горизонтальной плоскости.
8. Вибрации передней или задней бабки: а) в вертикальной плоскости; б) в горизонтальной плоскости.

Таким образом, заготовка может перемещаться почти в любом направлении относительно резца. При вибрации могут быть отклонения: 1) скорости резания (т. е. окружной скорости заготовки относительно резца); 2) подачи; 3) радиальной глубины срезаемого слоя; 4) наклона граней резца к поверхности заготовки (т. е. отклонения передних и задних углов и углов наклона режущей кромки).

Из теории процесса резания в состоянии установившегося режима ясно, что любое из этих отклонений может способствовать изменению сил, действующих на вершину резца В зависимости от направления и фазы отклонений, действующие силы могут либо гасить, либо возбуждать вибрацию

Система, выведенная импульсом силы из равновесия, обычно вибрирует с затуханием колебаний Однако если изменения сил резания значительны и противостоят демпфирующему эффекту, то они могут вызывать рост амплитуды вибрации, устанавливается равновесие демпфирующих и возбуждающих сил

Значительный интерес представляет изучение физических явлений, которые могут влиять на смещение силы по фазе при резании

Шоу и Холкен объясняют отставание силы изменением направления схода стружки относительно резца Н И Ташлицкий, Шоу и Холкен представили доказательства, подкрепляющие утверждение С Дои и П Като, что отставание силы по фазе является неотъемлемой чертой процесса резания Это объяснение основывается на допущении С А Тобиаса и В Фишвика, что динамическая сила резания представляет собой функцию подачи и толщины стружки

Также на автоколебательный характер вибраций при резании металлов было указано Н А Дроздовым, А И Кашириным, А П Соколовским В работе А П Соколовского, так же как и в работе А И Каширина, рассматривается колебательная система с одной степенью свободы Идея неоднозначности силы резания положена в основу объяснения возбуждения автоколебаний и в работе И И Ильницкого

Глубокие экспериментальные исследования, проведенные М Е Эльясбергом, Л К Кучмой, Н И Ташлицким, а также С Дои и П Като, позволили вскрыть закономерности, которые дают основание утверждать, что изменение силы резания в зависимости от толщины срезаемого слоя при обработке волнистой поверхности или при неустойчивом резании имеет тенденцию запаздывания Основываясь на этом положении, М Е Эльясберг развил теорию возбуждения автоколебаний при резании металлов

Для определения пределов виброустойчивости механической системы резания необходимо выявить силовые зависимости процесса резания от упругих перемещений, сопровождающих процесс лезвийной обработки Уравнения движения не могут быть решены прямым путем, но их анализ значительно упрощается изучением предельных условий Одинаковый подход к решению проблемы был предложен В А Кудиновым, И Глустым, а также С А Тобиасом В работах I С Лазарева изложена структурная теория автоколебаний, которая является дальнейшим развитием "теории координатной связи" ГС Лазарев сформулировал структурный критерий устойчивости для механической системы резания с двумя степенями свободы Однако заготовка рассматривалась как приведенная подпружиненная масса Чтобы учесть геометрические параметры и физико-механические свойства заготовку следует рассматривать как упругое тело, чьи массовые и деформационные характеристики распределены непрерывным образом Когда тело рассматривается как упругая система, подразуме-

вается, что оно состоит из бесконечного числа частиц. Для того чтобы указать положение каждой точки тела, требуется ввести бесконечное число координат перемещений, поэтому говорят, что система обладает бесконечным числом степеней свободы.

Для получения адекватного аналитического описания виброустойчивости процесса лезвийной обработки нежесткого вала следует учитывать взаимное влияние поперечных и крутильно-продольных колебаний элементов механической системы и параметров режима резания.

Для достижения поставленной цели необходим расчет мгновенных значений упругих колебаний механической системы, таких как продольные, крутильные и поперечные в вертикальной и горизонтальной плоскостях, которые, в свою очередь, влекут изменения геометрических параметров срезаемого слоя и скорости резания. При этом следует иметь виду, что любые упругие перемещения заготовки относительно инструмента приводят к изменению мгновенного значения составляющих силы резания. Чтобы учесть взаимное влияние факторов был использован следующий путь. Пусть в начальный момент времени все упругие перемещения равны нулю, а все составляющие силы резания равны номиналу. На рисунке 1 представлена схема расчета, позволяющая определить характеристики вибрационного процесса при резании.

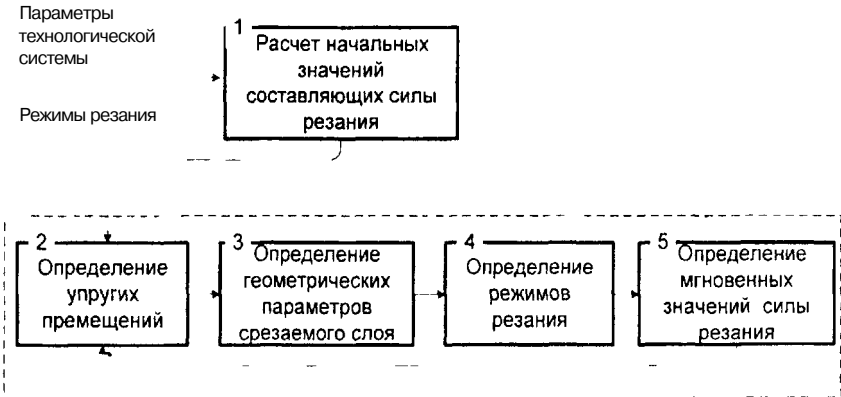


Рисунок 1 - Схема определения характеристик вибрационного процесса при резании

Расчет в блоках со 2 по 5 повторяется для каждого расчетного времени τ . $0 < \tau < T$, где T - время обработки.

В связи с тем, что предлагаемая схема требует численных значений упругих перемещений, мы можем получить не только ответ на вопрос о виброустойчивости процесса, но и определить погрешность обработки поверхности, например, шероховатость или волнистость.

Из схемы следует, что изменение геометрических параметров срезаемого слоя, влияющих на мгновенные значения скорости резания и подачи, происходит вследствие изменения составляющих силы резания. Иначе, если сила резания постоянна, то вибрации в технологической системе отсутствуют.

Критерий виброустойчивости процесса лезвийной обработки включает два условия

необходимый - значения скорости резания в каждый момент времени обработки должны быть положительные. Так как в противном случае передняя и задняя поверхности режущего клина меняются функциями: резать начинает задняя поверхность, и вершина инструмента скальвается;

достаточный - модуль мгновенной силы резания находится в заданном интервале с допустимым разбросом от номинального значения силы резания.

Интервал допустимых значений модуля силы резания зависит от допуска шероховатости

В работе предложено использовать способ достижения виброустойчивости процесса резания за счет стабилизации любой из составляющих силы резания при неизменных режимах обработки и, оценив амплитуду колебаний мгновенных значений силы резания с помощью предложенного математического аппарата, выбрать требуемые параметры электромеханической адаптивной системы стабилизации силы резания.

Также в главе обосновывается актуальность проблемы, и конкретизируются задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

Вторая глава посвящена математическому моделированию упругих колебаний механической (упругой) системы "заготовка - инструмент - станок - приспособление" в процессе лезвийной обработки нежестких валов. Рассмотрены три типовых процесса: точение гладкого нежесткого вала; нарезание резьбы резцом; фрезерование резьбы охватывающими головками.

Для каждого случая были разработаны три части математической модели:

- вывод расчетных зависимостей геометрических параметров срезаемого слоя с учетом упругих деформаций элементов механической системы резания;

- численное представление зависимостей мгновенных значений всех составляющих силы резания от текущих значений параметров срезаемого слоя и режима резания, учитывающее их взаимозависимость,

- постановка краевых задач о поперечных и продольно-крутильных колебаниях заготовки с учетом схемы ее закрепления и нагружения, геометрических и физико-механических параметров, а также динамических характеристик механической системы резания; интегральные зависимости поперечных колебаний суппортной группы от колебаний силы резания.

Для процесса точения геометрические параметры срезаемого слоя соответствуют режимам резания: глубине и подаче.

на участке DE - как расстояние между окружностью радиуса R_3 с центром O_3 и следом резания с центром $O_{н1}$. При решении задачи нахождения величины a , использована система координат, в которой прямая $O_{н1}O_3$ - ось Oy а точка O_3 - начало координат.

Величина a , зависит от угла поворота радиуса R_u . Считаем, что в некоторый момент времени τ вектор радиуса R_u , проведенного из центра O_u , повернут на угол $\alpha_i = \alpha_0 + i \cdot \Delta\alpha$ относительно оси Oy , где α_0 - острый угол между прямыми $CO_{н0}$ и $O_{н1}O_3$, $\Delta\alpha$ - шаг дискретизации угла поворота; i - номер узла, где в данный момент находится резец: $i = 1, 2, \dots, n$; n - количество разбиений дуги реза CE . Тогда величина a , на отрезке дуги CD рассчитывается по формуле:

$$a_{i,CD} = 2R_M \cdot \sin\left(\alpha_i + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \sqrt{R_u^2 - 4R_M^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\left(\alpha_i + \frac{\Delta\varphi}{2}\right)} - R_u. \quad (1)$$

Аналогично рассчитывается величина a , на отрезке дуги DE .

$$a_{i,DE} = R_u \cdot \cos\alpha_i + \sqrt{R_3^2 - R_u^2 \cdot \sin^2\alpha_i} - R_u \quad (2)$$

Геометрические параметры определяются четырьмя величинами: a , - величиной заглупления вершины режущей кромки, B_v - шириной вершины режущей кромки; m , - высотой следа предыдущего реза, $h_{н1}$, $h_{л1}$ - величинами глубин срезаемого слоя для боковых кромок - правой и левой соответственно, внутренним углом профиля γ_i :

$$m_i = R_u \cdot \cos\alpha_i + \sqrt{R_3^2 - R_u^2 \cdot \cos^2(\alpha_i)} - R_u - a_i, \quad (3)$$

$$\gamma_i = \arctg \left(\operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{R_u + a_i - R_u \cdot \cos\alpha_i}{\sqrt{(R_u + a_i)^2 + R_M^2 - 2R_M \cdot (R_u + a_i) \cdot \cos\alpha_i}} \right). \quad (4)$$

При определении параметров боковых срезаемых слоев металла на отрезке CD учтено осевое смещение нового реза относительно предыдущего на величину $\delta_{осц} = \frac{S_z \cdot P_h}{2\pi \cdot R_3}$, где S_z - подача на один зуб фрезы [мм/зуб]; P_h - ход нарезаемого винта [мм].

В результате

$$h_{н1} = \frac{2a_i \cdot \operatorname{tg} \gamma - 2\delta_{осц} + m_i \cdot (\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \gamma_i)}{2 \left(\frac{1}{\cos^2 \gamma} + \frac{1}{\cos^2 \gamma_i} \right) - \left(\operatorname{tg} \gamma_i - \operatorname{tg} \gamma - \frac{\delta_{осц}}{m_i} \right)^2}, \quad (5)$$

$$h_{л1} = \frac{2a_i \cdot \operatorname{tg} \gamma + 2\delta_{осц} + m_i \cdot (\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \gamma_i)}{2 \left(\frac{1}{\cos^2 \gamma} + \frac{1}{\cos^2 \gamma_i} \right) - \left(\operatorname{tg} \gamma_i - \operatorname{tg} \gamma + \frac{\delta_{осц}}{m_i} \right)^2}. \quad (6)$$

На отрезке дуги DE профиль реза представляет собой сплошную равнобедренную трапецию высотой a .

$$h_{n_i} = h_{n_i} = \frac{a_i \cdot \sin \gamma}{2 \cos^2 \gamma} \quad (7)$$

Зная значение величины a , в любой момент времени, рассчитываем геометрические параметры срезаемого слоя.

На рисунке 3 представлена геометрия срезаемого слоя при нарезании резьбы. Здесь B - ширина срезаемого слоя вершиной резца; i - номер прохода: $i = 1, 2, \dots, n$, где n - количество проходов; s - подача на i -том проходе; t_i - глубина врезания на i -том проходе: $t_i = \sum_{j=1}^{i-1} s_j$; γ_n, γ_n - левый и правый углы наклона резьбы; h_{li}, h_{ri} - толщина слоя, срезаемого левой и правой режущими кромками инструмента: $h_{li} = s_i \cdot \sin \gamma_{ln}$, $h_{ri} = s_i \cdot \sin \gamma_{rn}$. Величина s , зависит от схемы резания. При равнопроходной схеме подача берется постоянной ($s_i = \text{const}$), тогда $s_i = \frac{t}{n}$, где t - глубина впадины резьбы.

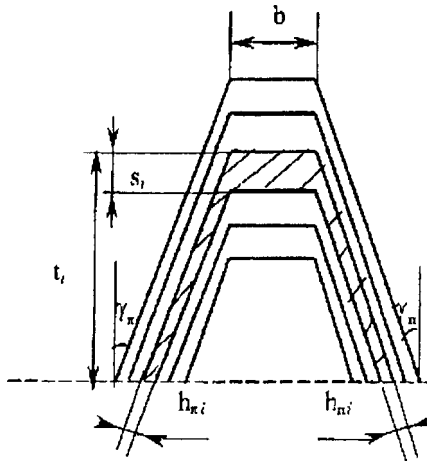


Рисунок 3 - Геометрические параметры срезаемого слоя при нарезании метрической резьбы резцами методом последовательных проходов

В результате зависимость глубины резания на i -ом проходе при равнопроходной схеме нарезания резьбы от номера прохода принимает вид" $t_i = \frac{t}{n} \cdot i$

При равносилковой схеме главное условие - равная площадь срезаемого слоя на каждом проходе.

$$s_i = -\frac{b + t_i (\sin \gamma_n + \sin \gamma_n)}{2} + \sqrt{(b + t_i (\sin \gamma_n + \sin \gamma_n))^2 - 4F (tg \gamma_n + tg \gamma_n - \sin \gamma_n - \sin \gamma_n)} \quad (8)$$

В результате получена рекуррентная зависимость для расчета глубины резания на i -ом проходе при равносиловой схеме нарезания резьбы

$$t_i = \sum_{j=1}^{i-1} \left(-\frac{b + t_j (\sin \gamma_n + \sin \gamma_n)}{2} + \sqrt{(b + t_j (\sin \gamma_n + \sin \gamma_n))^2 - 4F (tg \gamma_n + tg \gamma_n - \sin \gamma_n - \sin \gamma_n)} \right) \quad (9)$$

где

$$F = s (b + s (tg \gamma_n + tg \gamma_n) - (t - s) (\sin \gamma_n + \sin \gamma_n))$$

При этом значение t_i задается как глубина первого прохода

Далее разработана математическая модель силы резания для данного процесса на основе известной эмпирической степенной зависимости. При этом учитывались упругие колебания подсистемы "инструмент - заготовка" и эксцентриситет заготовки

Для процесса точения -

$$P(\tau) = C_p (t_0 - u_z(x, \tau) - q_z(\tau) + e \cos(\omega \tau))^m (s_0 - w(x, \tau) - q_x(\tau))^p \times \\ \times \left(v_0 - \frac{\partial u_z(x, \tau)}{\partial \tau} - R \frac{\partial \varphi(x, \tau)}{\partial \tau} \right)^n K, \quad (10)$$

$$P_v(\tau) = k, P(\tau) \quad P_y(\tau) = k, P(\tau)$$

где C_p - коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств обрабатываемого материала, t - глубина резания, s - подача, v - скорость резания, m, p, n - табулированные показатели степени, K - общий поправочный коэффициент, учитывающий изменение условий резания по отношению к табличным, R - радиус заготовки, v_0 - скорость резания, t_0 - глубина резания, v_f - подача, $w(x, \tau)$ - продольные колебания заготовки, $q_z(\tau)$ - колебания подсистемы "суппорт - инструмент" вдоль оси заготовки, $u_z(x, \tau)$ - поперечные колебания заготовки вдоль оси OY , $q_x(\tau)$ - колебания подсистемы "суппорт - инструмент" в направлении оси OY , e - эксцентриситет заготовки, ω - круговая скорость вращения шпинделя, $u(x, \tau)$ - поперечные колебания заготовки вдоль оси O_z , $\varphi(x, \tau)$ - крутильные колебания заготовки k_x, k_y - линейные табулированные коэффициенты

Интервал для задания условия виброустойчивости процесса токарной обработки определяется следующим образом

$$P_{\min} = C_p \left(t_0 - \frac{R}{2} \right)^m s_0^p v_0^n K,$$

$$P_{z \max} = C_p \cdot \left(t_0 + \frac{R_z}{2} \right)^m \cdot s_0^p \cdot v_0^n \cdot K.$$

Для процесса вихревого резбонарезания суммарные составляющие силы резания по осям Oz и Oy рассчитывались по формулам:

$$\begin{aligned} P_{z\Sigma i} &= (1 + k_R) \cdot \sum_{i_p=1}^{K_p(i)} P_{\tau_{j_p}(i_p)} \cdot \sin(\alpha_{j_p}(i_p)) \\ P_{y\Sigma i} &= (1 - k_R) \cdot \sum_{i_p=1}^{K_p(i)} P_{\tau_{j_p}(i_p)} \cdot \cos(\alpha_{j_p}(i_p)) \end{aligned} \quad (11)$$

где k_R - линейный табулированный коэффициент пересчета радиальной составляющей силы резания через тангенциальную $P_{\tau_{j_p}}$:

$$P_{\tau_{j_p}} = C_p \cdot \left(b_{\theta} \cdot a_{j_p}^q + \frac{m_i}{\cos \gamma} \cdot \left(h_{i_{j_p}}^q + h_{ii_{j_p}}^q \right) \right), \quad (12)$$

q - табулированное значение, зависящее от параметров резания и материала заготовки, i - номер узла, где расположен первый работающий резец; K_p - количество резцов, участвующих в работе одновременно:

$$K_p(i) = \begin{cases} \left[\begin{array}{c} \Psi \\ \alpha_K \end{array} \right] + 1, \text{ при } i + \left[\begin{array}{c} \alpha_K \\ \Delta\alpha \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \Psi \\ \alpha_K \end{array} \right] \leq n, \\ \left[\begin{array}{c} \Psi \\ \alpha_K \end{array} \right], \text{ при } i + \left[\begin{array}{c} \alpha_K \\ \Delta\alpha \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \Psi \\ \alpha_K \end{array} \right] > n, \end{cases}$$

ψ - угол $CO_{ii}E$ в радианах (рисунок 1); α_K - утл между соседними резцами в охватывающей головке: $\alpha_K = \frac{2\pi}{K}$; K - общее количество резцов в головке; j_p - номер узла, где расположен i_p -ый работающий резец; $i_p - 1, 2, \dots, K_p(i)$.

Интервал для задания условия виброустойчивости процесса вихревого резбонарезания определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{z \min} &= (1 + k_R) \cdot \sum_{i_p=1}^{K_p(i)} P_{\tau \min_{j_p}(i_p)} \cdot \sin(\alpha_{j_p}(i_p)) \\ P_{z \max} &= (1 + k_R) \cdot \sum_{i_p=1}^{K_p(i)} P_{\tau \max_{j_p}(i_p)} \cdot \sin(\alpha_{j_p}(i_p)) \end{aligned}$$

где

$$P_{\tau \min_{j_p}} = C_p \cdot \left(h_{\theta} \cdot \left(a_{i_p} - \frac{R_z}{2} \right)^q + \frac{m_i}{\cos \gamma} \cdot \left(\left(h_{i_{j_p}} - \frac{R_z}{2} \right)^q + \left(h_{ii_{j_p}} - \frac{R_z}{2} \right)^q \right) \right);$$

$$P_{\tau \max i_p} = C_p \cdot \left(h_n \cdot \left(a_{i_p} + \frac{R_z}{2} \right)^q + \frac{m_i}{\cos \gamma} \cdot \left(\left(h_{\tau, i_p} + \frac{R_z}{2} \right)^q + \left(h_{n, i_p} + \frac{R_z}{2} \right)^q \right) \right)$$

Суммарное значение силы резания по оси Ox рассчитано по зависимости:

$$P_{x \Sigma i} = \sum_{i_p=1}^{K_p(i)} P_{x j_p}(i_p), \quad (13)$$

где P_{xi} - осевая составляющая силы резания для резца, расположенного в i -ом узле:

$$P_{xi} = k_x \cdot C_p \cdot \frac{m_i}{\cos \gamma} \cdot \left(h_{\lambda_i}^q - h_{n_i}^q \right), \quad (14)$$

k_x - линейный табулированный коэффициент.

По аналогии с процессом течения рассмотрено влияние поперечных, продольных и крутильных колебаний заготовки с учетом подвижного люнета.

Пусть ΔR - отклонение, направленное по радиусу к центру инструмента, Δx - отклонение, направленное вдоль оси заготовки. Они влияют на глубину резания и на ширину срезаемого слоя.

ΔR зависит от поперечных колебаний заготовки $u_y(x, \tau)$ и $u_z(x, \tau)$ по осям координат Oy и Oz соответственно:

$$\Delta R(\tau) = u_z(x_{pe3}, \tau) \cdot \sin(\alpha_1) - u_y(x_{pe3}, \tau) \cdot \cos(\alpha_1) \quad (15)$$

На Δx влияют продольные $w(x_{pe3}, \tau)$ и крутильные $\varphi(x_{pe3}, \tau)$ колебания и вид фрезерования.

Рассмотрены два вида фрезерования встречное и попутное фрезерование правой резьбы.

В первом случае динамическая составляющая силы P_{xi} , действующая на резец, направлена на шпиндель. В результате резец дополнительно отжимается вдоль оси винта к шпинделю, то есть на правой стороне увеличивается глубина резания на величину $w(x_{pe3}, \tau)$, на левой - уменьшается $w(x_{pe3}, \tau)$. Момент от силы резания P_{xi} скручивает винт таким образом, что обрабатываемая поверхность уходит от резца в сторону от шпинделя. После окончания резания она возвращается в номинальное положение. Следовательно, погрешности от действия P_{vi} и P_{zi} складываются:

$$\Delta x(\tau) = w(x_{pe3}, \tau) + \varphi(x_{pe3}, \tau) \cdot R_{cp}, \quad (16)$$

$$\text{где } R_{cp} = \frac{2R_i - t_c}{2}$$

Во время попутного фрезерования при повороте винта на $\varphi(x_{pe3}, \tau)$ увеличивается толщина срезаемого слоя на правой стороне резца. Следовательно, резец отжимается к шпинделю станка. Однако перемещения, связанные с закруткой вала под действием крутящего момента от сил резания также приближают обрабатываемую поверхность к шпинделю, а после снятия нагрузки - от

шпинделя. Поэтому при попутном фрезеровании вычитают упругие деформации от сил P_x из величины погрешности от действия момента'

$$\Delta x(\tau) = w(x_{pez}, \tau) - \varphi(x_{pez}, \tau) \cdot R_{cp} \quad (17)$$

По осям Oy и Oz деформации не зависят от направления фрезерования

В результате глубина врезания на вершине реза изменяется следующим образом: $a_i(\tau) = a_i - \Delta R(\tau)$; на боковых кромках: $m_i(\tau) = m_i - \Delta R(\tau)$. Ширина срезаемого слоя на боковых кромках учитывает отклонения следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} h_{ni}(\tau) &= h_{ni} + \Delta R \cdot \sin \gamma - \Delta x \cdot \cos \gamma, \\ h_{ni}(\tau) &= h_{ni} + \Delta R \cdot \sin \gamma + \Delta x \cdot \cos \gamma \end{aligned} \right\}$$

На вершине реза ширина срезаемого слоя не зависит от динамических отклонений. Модули составляющих силы резания рассчитываются по формулам (12) и (14). При этом геометрические параметры срезаемого слоя учитывают динамические погрешности (16) - (18).

Для процесса нарезания резьбы резцом модули составляющих силы резания рассчитываются аналогично процессу фрезерования. Пусть $w_i(x, \tau)$ - продольные перемещения винта во времени, $\varphi_i(x, \tau)$ - крутильные колебания, $u_{yi}(x, \tau)$ - поперечные в плоскости XOY колебания заготовки, тогда мы рассчитываем следующие погрешности, оказывающие влияние на геометрические параметры срезаемого слоя. Для вершинной кромки реза характерно влияние только поперечных колебаний заготовки в зоне резания на величину заглупления: $\Delta s_i(\tau) = u_{yi}(x_{pez}, \tau)$; для боковых кромок учтено и влияние продольно-крутильных колебаний:

$$\Delta h_{iv}(\tau) = -w_i(x_{pez}, \tau) \cdot \cos(\gamma_n) - R_{cpi} \cdot \varphi_i(x_{pez}, \tau) \cdot \cos(\gamma_n) + u_{yi}(x_{pez}, \tau) \cdot \sin(\gamma_n);$$

$$\Delta h_{in}(\tau) = w_i(x_{pez}, \tau) \cdot \cos(\gamma_n) + R_{cpi} \cdot \varphi_i(x_{pez}, \tau) \cdot \cos(\gamma_n) - u_{yi}(x_{pez}, \tau) \cdot \sin(\gamma_n).$$

Здесь x_{pez} - координата зоны резания; R_{cpi} - средний радиус резьбы

$$R_{cpi} = \frac{2R_s - t_i}{2}.$$

Тогда расчетные формулы для составляющих сил резания принимают вид:

$$P_{zi}(\tau) = C_p \cdot \left\{ b \cdot (s_i - \Delta s_i(\tau))^q + (t_i - s_i + \Delta s_i(\tau)) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{(h_{ni} + \Delta h_{ni}(\tau))^q}{\cos(\gamma_n)} + \frac{(h_{ni} + \Delta h_{ni}(\tau))^q}{\cos(\gamma_n)} \right) \right\}; \quad (18)$$

$$P_{ji}(\tau) = k_x \cdot C_p \cdot \left\{ b \cdot (s_i - \Delta s_i(\tau))^q + (t_i - s_i + \Delta s_i(\tau)) \times \right. \\ \left. \times \left(t g(\gamma_i) \cdot (h_{ni} + \Delta h_{ni}(\tau))^q + t g(\gamma_n) \cdot (h_{ni} + \Delta h_{ni}(\tau))^q \right) \right\}$$

$$P_{xi}(\tau) = k_x \cdot C_p \cdot (t_i - s_i + \Delta s_i(\tau)) \cdot \left\{ (h_{ni} + \Delta h_{ni}(\tau))^q - (h_{ni} + \Delta h_{ni}(\tau))^q \right\}.$$

Интервал для задания условия виброустойчивости процесса нарезания резьбы резцом определяется следующим образом:

$$P_{z1 \min} = C_p \cdot \left[b \cdot s_i^q + \left(t_i - \frac{R_z}{2} \right) \cdot \left(\frac{\left(h_{ni} - \frac{R_z}{2} \right)^q}{\cos(\gamma_n)} + \frac{\left(h_{ni} - \frac{R_z}{2} \right)^q}{\cos(\gamma_n)} \right) \right];$$

$$P_{z1 \max} = C_p \cdot \left[b \cdot s_i^q + \left(t_i + \frac{R_z}{2} \right) \cdot \left(\frac{\left(h_{ni} + \frac{R_z}{2} \right)^q}{\cos(\gamma_n)} + \frac{\left(h_{ni} + \frac{R_z}{2} \right)^q}{\cos(\gamma_n)} \right) \right].$$

Для расчета упругих колебаний процесса лезвийной обработки поставлена краевая задача с учетом их влияния в зоне резания на мгновенные значения параметров срезаемого слоя, а, следовательно, на модули составляющих силы резания.

Исходными данными являются параметры резания (скорость резания, подача, глубина резания), геометрические параметры заготовки и схема закрепления вала (с учетом люнетов), а также жесткость элементов процесса лезвийной обработки.

В работе рассмотрены упругие тела, чьи массовые и деформационные характеристики распределены непрерывным образом. Когда тело рассматривается как упругая среда, подразумевается, что оно состоит из бесконечного числа частиц. При этом говорят, что система обладает бесконечным числом степеней свободы. Благодаря распределению массы упругое тело имеет бесконечное число собственных форм колебаний, поэтому его динамические перемещения рассмотрены как сумма перемещений по каждой из нормальных форм колебаний. Рассматривая колебания упругих тел, предполагаем, что материал этих тел однороден, изотропен и подчиняется закону Гука

Рассмотрена общая постановка краевой задачи о крутильно-продольных и поперечных колебаний вала при резании. При этом схема обработки включает закрепление заготовки в трехкулачковом патроне и заднем центре с применением неподвижного и подвижного люнетов.

Задача решена в трехмерном декартовом пространстве. В начальный момент времени $\tau = 0$ $P_1(\tau)$, $P_2(\tau)$, $P_z(\tau)$ - модули составляющих силы резания по осям координат. В процессе обработки заготовка совершает вынужденные упругие колебания, вызванные силой резания. При моделировании исходными данными являются следующие характеристики заготовки: R - радиус заготовки, ρ - плотность материала, l - длина заготовки, l_1 - расстояние от задней бабки до неподвижного люнета, l_2 - расстояние от задней бабки до подвижного люнета, $x_{рез}$ - координата зоны резания.

На рисунке 4 представлена расчетная схема крутильно-продольных колебаний заготовки. В этом случае считаем заделку вала в трехкулачковом патроне

абсолютно жесткой, а задний центр принимаем за опору и считаем вал при $x=l$ свободно опертым.

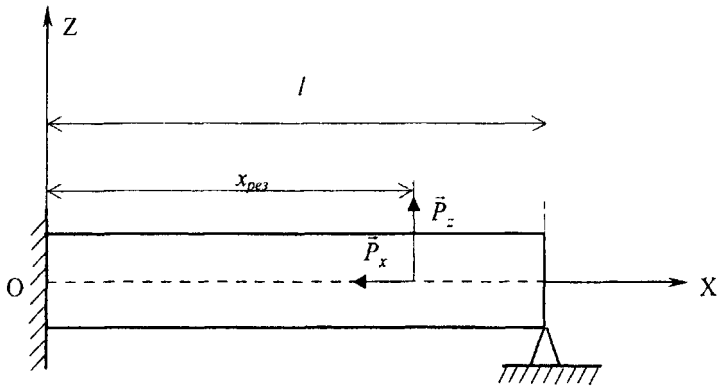


Рисунок 4 - Расчетная схема крутильно-продольных колебаний заготовки при точении

Система дифференциальных уравнений в частных производных (19) описывает крутильно-продольные колебания вала при точении.

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} + \frac{\eta_x}{m} \cdot \frac{\partial w}{\partial \tau} - a^2 \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - a^2 \cdot \frac{R^2(\tau)}{2} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0, \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \tau^2} + \frac{\eta_\varphi}{m} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} - b^2 \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0. \end{cases} \quad (19)$$

где η_x , η_φ - коэффициенты затухания продольных и крутильных колебаний, $a = \sqrt{E/\rho}$ - скорость распространения продольных колебаний, которая в свою очередь зависит от E - модуля упругости первого рода, $b = \sqrt{G/\rho}$ - скорость распространения крутильных колебаний, которая зависит от G - модуля упругости второго рода.

Граничные условия зависят от вида крепления заготовки. В нашем случае при $x = 0$ обе функции и их первые производные по перемещению равны нулю

$$w(0, \tau) = 0; \quad (20)$$

$$\varphi(0, \tau) = 0, \quad (21)$$

При $x = l$ граничные условия принимают вид:

$$\left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_{x=l} = 0; \quad (24)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=l} = 0 \quad (23)$$

В зоне резания значения функций рассчитаны с учетом непрерывности функций:

$$\left. \begin{aligned} w(x_{pes} - 0, \tau) &= w(x_{pes} + 0, \tau); \\ \pi \cdot (R - t)^2 \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=x_{pes}-0} &= \pi \cdot R^2 \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=x_{pes}+0} - \frac{P_x(\tau)}{E} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi(x_{pes} - 0, \tau) &= \varphi(x_{pes} + 0, \tau); \\ I_{xx}(x_{pes} - 0) \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=x_{pes}-0} &= I_{xx}(x_{pes} + 0) \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=x_{pes}+0} - \frac{2R \cdot P_z(\tau)}{G} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где $I_{xx}(x)$ - момент инерции вала вдоль оси Ox в точке с координатой x .

Начальные условия следуют из того предположения, что в момент времени $\tau = 0$ вал неподвижен и не подвергается нагрузке:

$$w(x, 0) = 0; \quad \frac{\partial w}{\partial \tau} \Big|_{\tau=0} = 0; \quad (26)$$

$$\varphi(x, 0) = 0; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} \Big|_{\tau=0} = 0. \quad (27)$$

В результате система уравнений (19) с граничными (20) - (25) и начальными (26) - (27) условиями представляет собой краевую задачу о крутильно-продольных колебаниях вала при резании.

Вынужденные поперечные колебания заготовки рассмотрены как в плоскости XOY (рисунок 5), так и в плоскости XOZ (рисунок 6). В этом случае крепление вала в патроне и заднем центре аппроксимировано балкой круглого сечения, опертой на пружины с массами: C_{n_1} , C_{n_2} - жесткости передней бабки вдоль осей Oy и Oz , m_n - приведенная масса передней бабки; C_{j_1} , C_{j_2} - жесткости задней бабки вдоль осей Oy и Oz , m_j - приведенная масса задней бабки. Также учтено использование люнетов как дополнительных опор с заданной массой и жесткостью: m_{n1} , C_{n1y} (C_{n1z}) - соответственно масса и жесткость по осям Oy и Oz неподвижного люнета и m_{n2} , C_{n2y} (C_{n2z}) - соответственно масса и жесткость по осям Oy и Oz подвижного люнета.

Рассмотрено уравнение поперечных колебаний в плоскости XOY . В плоскости XOZ построение краевой задачи о поперечных колебаниях заготовки будет аналогично.

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial \tau^2} + \frac{\eta_y}{m} \cdot \frac{\partial u_y}{\partial \tau} + c^2 \cdot \frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} = I_{xy} \cdot \frac{\partial^4 u_y}{\partial x^2 \partial \tau^2} + \omega^2 \cdot u_y, \quad (28)$$

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial \tau^2} + \frac{\eta_z}{m} \cdot \frac{\partial u_z}{\partial \tau} + c^2 \cdot \frac{\partial^4 u_z}{\partial x^4} = I_{xz} \cdot \frac{\partial^4 u_z}{\partial x^2 \partial \tau^2} + \omega^2 \cdot u_z, \quad (29)$$

где $c = \sqrt{\frac{E \cdot R^2}{4\rho}}$ - скорость распространения поперечных колебаний заготовки,

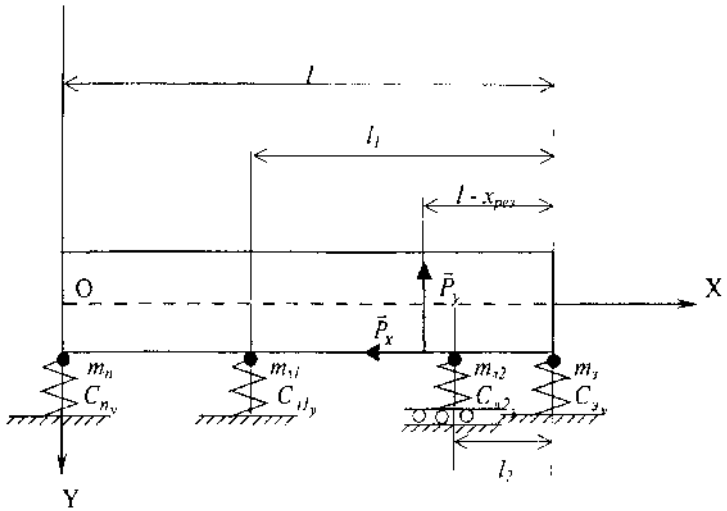


Рисунок 5 - Расчетная схема поперечных колебаний заготовки в плоскости XOY при точении

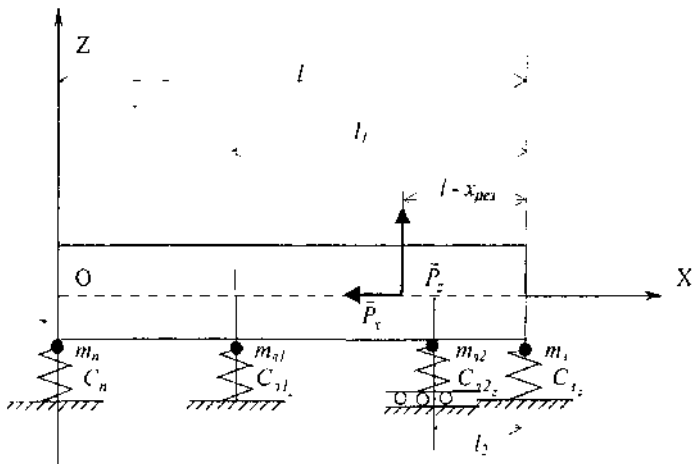


Рисунок 6 - Расчетная схема поперечных колебаний заготовки в плоскости XOZ при точении

η_1, η_2 - коэффициенты затухания поперечных колебаний, соответственно, в плоскостях XOY и XOZ.

В этом случае начальные и граничные условия имеют вид.
при $\tau = 0$

$$u_y(x, 0) = 0, \quad \left. \frac{\partial u_y}{\partial \tau} \right|_{\tau=0} = 0, \quad (30)$$

$$u_z(x, 0) = 0; \quad \left. \frac{\partial u_z}{\partial \tau} \right|_{\tau=0} = 0, \quad (31)$$

граничные условия при $x = 0$

$$\left. \frac{\partial u_y}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad -\frac{\pi \cdot R^2 \cdot E}{4} \cdot \left. \frac{\partial^3 u_y}{\partial x^3} \right|_{x=0} = m_{n1} \cdot \left. \frac{\partial^2 u_y}{\partial \tau^2} \right|_{x=0} + C_{n1} \cdot u_y(0, \tau), \quad (32)$$

$$\left. \frac{\partial u_z}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad -\frac{\pi \cdot R^2 \cdot E}{4} \cdot \left. \frac{\partial^3 u_z}{\partial x^3} \right|_{x=0} = m_{n1} \cdot \left. \frac{\partial^2 u_z}{\partial \tau^2} \right|_{x=0} + C_{n1} \cdot u_z(0, \tau), \quad (33)$$

при $x = l$.

$$\left. \frac{\partial u_y}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \quad -\frac{\pi \cdot R^2 \cdot E}{4} \cdot \left. \frac{\partial^3 u_y}{\partial x^3} \right|_{x=l} = m_{n2} \cdot \left. \frac{\partial^2 u_y}{\partial \tau^2} \right|_{x=l} + C_{n2} \cdot u_y(l, \tau), \quad (34)$$

$$\left. \frac{\partial u_z}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \quad -\frac{\pi \cdot R^2 \cdot E}{4} \cdot \left. \frac{\partial^3 u_z}{\partial x^3} \right|_{x=l} = m_{n2} \cdot \left. \frac{\partial^2 u_z}{\partial \tau^2} \right|_{x=l} + C_{n2} \cdot u_z(l, \tau), \quad (35)$$

в зоне люнетов: неподвижного -

$$\left. \frac{\partial u_y}{\partial x} \right|_{x=x_1} = 0; \quad -\frac{\pi \cdot R^2 \cdot E}{4} \cdot \left. \frac{\partial^3 u_y}{\partial x^3} \right|_{x=x_1} = m_{n1} \cdot \left. \frac{\partial^2 u_y}{\partial \tau^2} \right|_{x=x_1} + C_{n1} \cdot u_y(x_1, \tau); \quad (36)$$

$$\left. \frac{\partial u_z}{\partial x} \right|_{x=x_1} = 0, \quad -\frac{\pi \cdot R^2 \cdot E}{4} \cdot \left. \frac{\partial^3 u_z}{\partial x^3} \right|_{x=x_1} = m_{n1} \cdot \left. \frac{\partial^2 u_z}{\partial \tau^2} \right|_{x=x_1} + C_{n1} \cdot u_z(x_1, \tau); \quad (37)$$

$$\left. \frac{\partial u_y}{\partial x} \right|_{x=x_2} = 0; \quad -\frac{\pi \cdot R^2 \cdot E}{4} \cdot \left. \frac{\partial^3 u_y}{\partial x^3} \right|_{x=x_2} = m_{n2} \cdot \left. \frac{\partial^2 u_y}{\partial \tau^2} \right|_{x=x_2} + C_{n2} \cdot u_y(x_2, \tau); \quad (38)$$

$$\left. \frac{\partial u_z}{\partial x} \right|_{x=x_2} = 0, \quad -\frac{\pi \cdot R^2 \cdot E}{4} \cdot \left. \frac{\partial^3 u_z}{\partial x^3} \right|_{x=x_2} = m_{n2} \cdot \left. \frac{\partial^2 u_z}{\partial \tau^2} \right|_{x=x_2} + C_{n2} \cdot u_z(x_2, \tau); \quad (39)$$

в зоне резания $x = x_{рез}$:

$$\left. \begin{aligned}
 &u_v(x_{pez}-0, \tau)=0; \\
 &u_v(x_{pez}+0, \tau)=0; \\
 &I_{xy}(x) \cdot \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \Big|_{x=x_{pez}-0} = I_{xy}(x) \cdot \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \Big|_{x=x_{pez}+0}; \\
 &I_{vy}(x) \cdot \frac{\partial^3 u_y}{\partial x^3} \Big|_{x=x_{pez}-0} = I_{vy}(x) \cdot \frac{\partial^3 u_y}{\partial x^3} \Big|_{x=x_{pez}+0} - \frac{P_v(\tau)}{E}; \\
 &u_z(x_{pez}-0, \tau)=0; \\
 &u_z(x_{pez}+0, \tau)=0; \\
 &I_{xz}(x) \cdot \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} \Big|_{x=x_{pez}-0} = I_{xz}(x) \cdot \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} \Big|_{x=x_{pez}+0}; \\
 &I_{zx}(x) \cdot \frac{\partial^3 u_z}{\partial x^3} \Big|_{x=x_{pez}-0} = I_{zx}(x) \cdot \frac{\partial^3 u_z}{\partial x^3} \Big|_{x=x_{pez}+0} - \frac{P_z(\tau)}{E}
 \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Здесь $I_{xy}(x) = I_{xy}(x)$ - моменты инерции заготовки в плоскостях XOY и

XOZ соответственно в точке на оси заготовки с координатой x .

В результате дифференциальное уравнение (28) и условия (30), (32), (34), (36), (38), (40) представляют собой краевую задачу о поперечных колебаниях вала при точении в плоскости XOY , а дифференциальное уравнение (29) и условия (31), (33), (35), (37), (39), (41) представляют собой краевую задачу о поперечных колебаниях вала при точении в плоскости XOZ .

При описании уравнений упругих колебаний подсистемы "инструмент - суппорт" аппроксимируем данный элемент процесса лезвийной обработки сосредоточенной подпружиненной массой, которая колеблется под воздействием только двух динамических составляющих силы резания ΔP_v и ΔP_z , как как вдоль оси Oz подсистема имеет жесткость, близкую к бесконечной.

На рисунке 7 показаны схемы расчета колебаний подсистемы "суппорт - инструмент" по осям Ox и Oy .

Упругие колебания в этом случае будут рассчитываться по формулам:

$$q_x(\tau) = \frac{e^{-\frac{\eta_x \tau}{2m_u}}}{\sqrt{C_{ux} \cdot m_u - \eta_x^2}} \int_0^\tau P_x(\vartheta) \cdot e^{\frac{\eta_x \tau}{2m_u}} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{C_{ux} \cdot m_u - \eta_x^2}}{m_u} \cdot (\tau - \vartheta) \right) d\vartheta, \quad (42)$$

$$q_y(\tau) = \frac{e^{-\frac{\eta_y \tau}{2m_u}}}{\sqrt{C_{uy} \cdot m_u - \eta_y^2}} \int_0^\tau P_y(\vartheta) \cdot e^{\frac{\eta_y \tau}{2m_u}} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{C_{uy} \cdot m_u - \eta_y^2}}{m_u} \cdot (\tau - \vartheta) \right) d\vartheta, \quad (43)$$

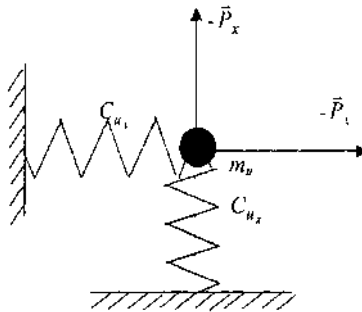


Рисунок 7 - Схема упругой подсистемы "суппорт - инструмент"

где η_{u_1} , η_{u_x} - коэффициенты затухания колебаний суппортной группы по осям Ox и Oy .

Зависимости (42) - (43) являются функциями упругих колебаний вершины реза в зоне резания в интегральной форме. Получить явный вид зависимостей невозможно из-за сложного вида функций модулей силы резания. Поэтому при расчете использовано численное интегрирование.

На основе полученных частных моделей определён общий подход к определению виброустойчивости процесса обработки лезвийным инструментом, поясняемый схемой, представленной на рисунке 8.

Предложенная математическая модель может быть использована для численного расчета погрешностей, в частности, шероховатости или волнистости обработанной поверхности. Поставленные задачи решены с использованием численного моделирования приведенных выше краевых задач.

В третьей главе была разработана структура программного обеспечения, которое позволяет моделировать динамику процесса резания с учетом упругих колебаний процесса лезвийной обработки. При этом рассмотрено три процесса: точение гладкого вала, вихревое резьбонарезание и нарезание резьбы резцом.

На основе разработанных в главе 2 математических моделей создана численная модель динамики процесса обработки резанием.

На рисунке 9 представлена укрупненная блок-схема расчета, базирующаяся на предложенной ранее схеме.

Алгоритм расчета делится на две части:

- определение начальных значений;
- цикл по времени обработки ($0 < TAU < T$) с шагом DT .

Первая часть включает два блока. Блок 1 представляет собой вызов процедуры *VVOD*, которая вводит исходные данные для решения поставленной задачи. Результаты работы процедуры содержатся в следующих переменных:

GPZ - массив геометрических параметров заготовки;
GPI - массив геометрических параметров инструмента;
RR0 - массив режимов резания;

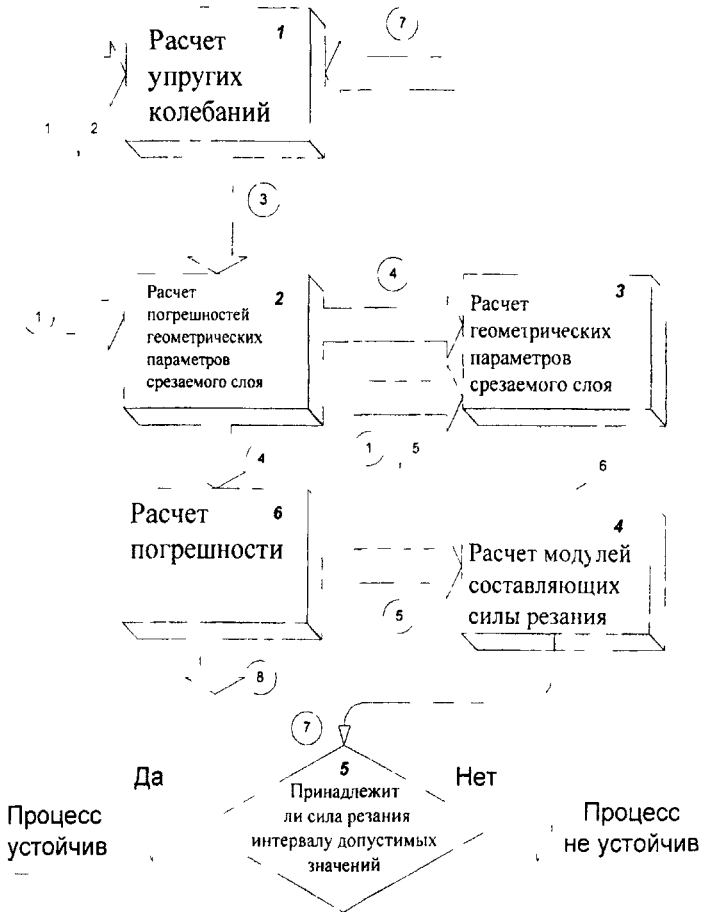


Рисунок 8 - Схема определения виброустойчивости процесса лезвийной обработки при лезвийной обработке нежестких валов Цифры в кружках обозначают входные и выходные параметры 1 - геометрические параметры элементов процесса лезвийной обработки (заготовки, инструмента, узлов крепления, люнетов), жесткости элементов крепления и физико-механические свойства материала заготовки (для точения - также инструмента), 2 - начальные значения модулей составляющих силы резания, 3 - расчетные значения упругих колебаний процесса лезвийной обработки, 4 - погрешности геометрических параметров срезаемого слоя, 5 - режимы резания, 6 - геометрические параметры срезаемого слоя, 7 - модули составляющих силы резания, 8 - шероховатость в зоне резания.

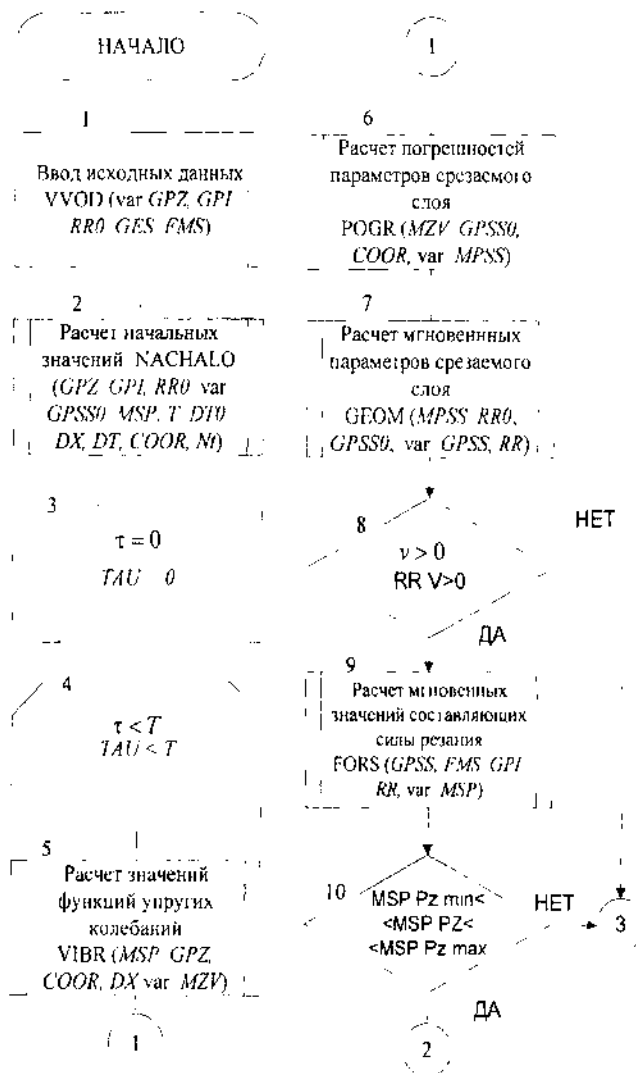


Рисунок 9 - Укрупненная блок-схема расчета виброустойчивости процесса лезвийной обработки (начало)

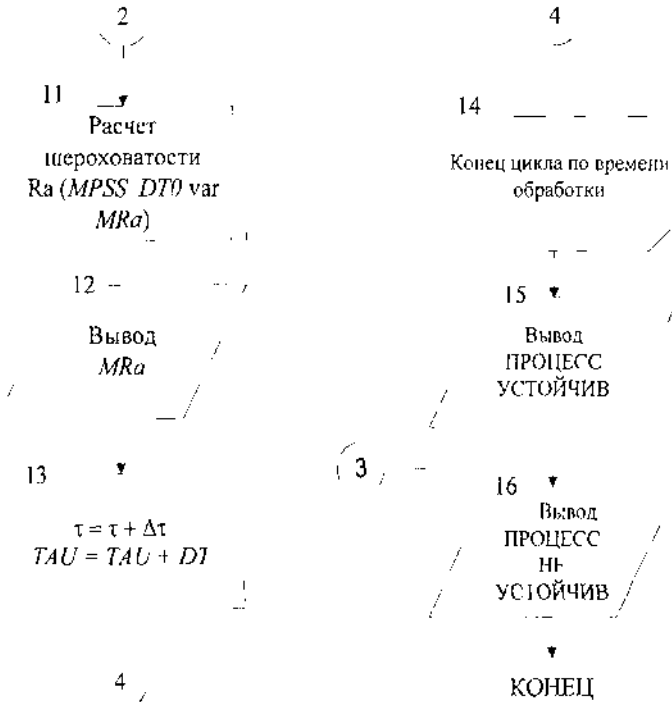


Рисунок 9 - (Окончание)

GFS - массив лестокоостей элементов процесса лезвийной обработки,

FMS - массив физико-механических свойств заготовки

В блоке 2 на основе исходных данных (массивы *GPZ GPI, RRO*) рассчитываются начальные значения геометрических параметров срезаемого споя (массив *GPSS0*), модулей составляющих сил резания (массив *MSP*) и общего времени обработки *T*. Также здесь определяются интервал времени для расчета продольной шероховатости *DTO*, координаты зоны резания и люнетов (массив *COOR*), шаги дискретизации по длине *DX* и времени *DT*, количество точек расчета по времени *Nt*. В блоке 3 задается начальное значение времени обработки $TAU = 0$. Блок 4 - блок начала цикла, который выполняется до тех пор, пока текущее время *TAU* меньше расчетного времени обработки *T*. В блоке 5 выполняется процедура *VIBR* - процедура расчета значений функций упругих колебаний ($\varphi(x, \tau)$, $w(x, \tau)$, $u_y(x, \tau)$, $u(x, \tau)$) в данный момент времени *TAU*. Здесь входной информацией являются массивы *MSP GFS FMS GPZ* и *COOR*, ре-

зультатом - массив значений функций упругих колебаний *MZV*. Далее в блоке 6 вызывается процедура *POGR*, которая рассчитывает геометрические параметры срезаемого слоя на данный момент времени *TAU* (массив *MPSS*), используя полученные ранее значения массивов *MZV*, *GPSS* и текущие значения *COOR*. Представленная в блоке 7 процедура *GEOM* служит для определения мгновенных значений геометрических параметров срезаемого слоя и режимов резания (массивы *GPSS* и *RR*) с учетом начальных значений *GPSS0* и *RR0*. Блок 8 служит для оценки знака мгновенной скорости резания, если величина отрицательна, то расчет прекращается и процесс считается неустойчивым (блок 16). В блоке 9 с помощью процедуры *FORS* рассчитываются составляющие силы резания (массив *MSP*) с учетом значений массивов *GPSS*, *FMS* и *GPI*. Далее в блоке 10 проверяется второе условие виброустойчивости: модуль силы резания должен находиться в нормированном интервале мгновенных значений [*Pz min*, *Pz max*]. Блок 11 представляет собой процедуру *Ra*, которая оценивает продольную шероховатость в зоне резания на данный момент времени *TAU*, используя при этом значения массива *MPSS* за период времени *DT0*, а также мгновенное значение силы резания и глубина резания. Результат сохраняется в массиве *MRA*. В блоке 12 значения массива *MRA* выводятся в результирующий файл. Блок 13 служит для пересчета текущего времени: *TAV* -- *TAU* + *DT*. Блоки 14 и 15 - конец описания действий в цикле и вывода сообщения об оценке виброустойчивости процесса лезвийной обработки.

Полученный алгоритм можно использовать как базовый для всех рассмотренных выше процессов, но для каждого из них входная информация и сами расчеты определяются частным образом. Логика алгоритма не привязана к определенному типу программирования, поэтому, с учетом модульности структуры, можно по аналогии разрабатывать алгоритмы для других видов обработки резанием длинных нежестких валов.

Четвертая глава посвящена определению одного из важнейших параметров технологических систем - жесткости. Это обычно выполняют несколькими альтернативными способами: статическим, производственным и динамическим.

Статический способ требует достаточно трудоемких экспериментов с применением универсальных измерительных средств для создания линейной нагрузки и контроля упругих перемещений звеньев процесса лезвийной обработки и рекомендуется для научных исследований процессов и систем.

Наиболее перспективным способом определения жесткости следует признать динамический, основанный на математическом анализе кривой переходного процесса упругих перемещений в стыке элементов процесса лезвийной обработки от ступенчатого силового воздействия (в частности для определения приведенной жесткости - в стыке заготовка-инструмент).

Основное преимущество способа - возможность получения комплекса важнейших параметров, характеризующих явление затухания колебаний.

В главе приведены экспериментальная конструкция прибора для снятия динамических параметров и математический аппарат для обработки получаемого электрического сигнала с тензодатчиков прибора.

Анализ и обобщение экспериментальных данных о жесткости процесса лезвийной обработки (токарного станка) позволяет сделать вывод о сложном влиянии этого параметра на динамические процессы при резании материалов.

При решении экспериментальных задач в машиностроении нередко требуется оперативное определение основных характеристик процесса лезвийной обработки с достаточной точностью $\pm 10\%$. Такую возможность предоставляет использование аналитического метода с применением стандартных программ математической обработки данных, например, MathCAD.

Сущность метода заключается в визуализации переходного процесса по данным, записанным в файл с помощью АЦП исследовательского комплекса, и вычислении основных параметров по задаваемым границам данных, определенным по графику переходного процесса. Для уменьшения погрешности вычислений выделяем только основной участок графика переходного процесса до начала установившегося режима.

В пятой главе дана оценка адекватности разработанной математической модели динамики процесса точения. При этом ошибка расчетов не превысила 10% от реального значения параметра (считалась шероховатость R_z). Было выявлено, что рассматриваемый параметр (шероховатость) не отслеживает увеличение амплитуды колебаний, тогда как расчетные значения модуля силы резания определенно реагируют на изменение динамики процесса.

Также в главе проведено исследование возможностей снижения уровня вибраций за счет использования адаптивных устройств. Как частный случай, было рассмотрено устройство для токарной обработки нежестких деталей. Оно было учтено в предлагаемой модели определения виброустойчивости процесса лезвийной обработки. Для этого введено условие при расчете модуля силы резания: если мгновенная сила резания вышла за пределы допустимых значений, то, с учетом запаздывания, она принимает номинальное значение. На рисунке 10 представлена схема определения виброустойчивости процесса лезвийной обработки с учетом применения адаптивного устройства стабилизации силы резания.

При математическом моделировании адаптивное устройство учитывалось пересчетом мгновенных значений силы резания, которые возвращались к номинальным значениям через интервал времени, равный Δt секунд. Здесь L_t - время реакции адаптивного устройства. Для экспериментального экземпляра эта величина составила 0,004 секунды.

На рисунке 11 представлены результаты моделирования временной зависимости главной составляющей силы резания для процесса точения при заданных режимах резания без применения адаптивного устройства (график а) и с применением (график б). Для примера рассматривалось точение длинного нежесткого вала, закрепленного с эксцентриситетом.



Рисунок 10 - Схема определения виброустойчивости технологической системы с учетом устройства стабилизации силы резания

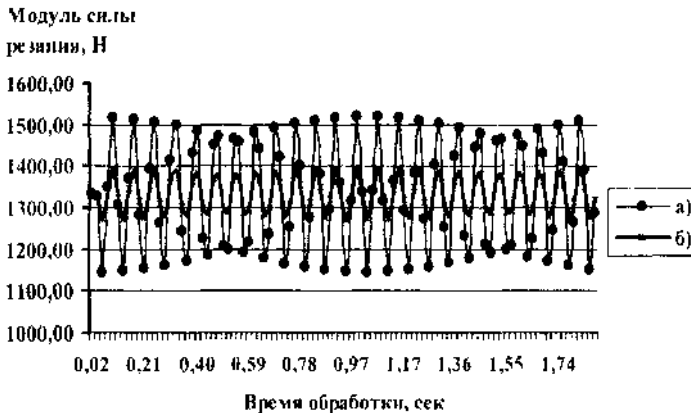


Рисунок 11 - Результаты моделирования мгновенных значений силы резания при точении а) без применения адаптивного устройства, б) с применением адаптивного устройства

Из графиков видно, что при использовании адаптивного устройства отклонение мгновенных значений силы резания уменьшилось в 3 раза, соответственно, уменьшилось амплитуда колебаний глубины резания, что улучшило качество микрогеометрии обработанной поверхности

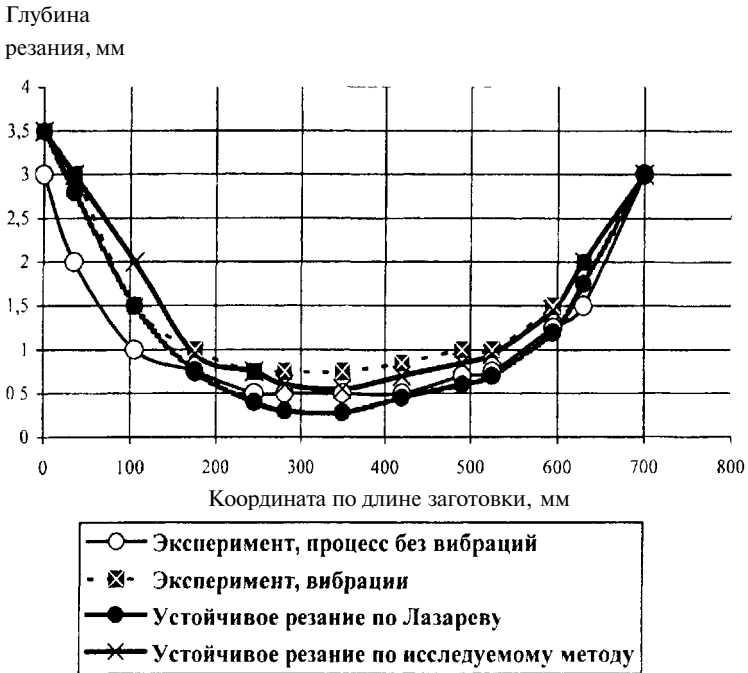


Рисунок 12 - График предельной безвибрационной глубины резания по длине детали, установленной в центрах станка

Для оценки эффективности разработанной теории было проведено сравнение предельно безвибрационной глубины резания, полученной расчетами по методике Лазарева Г.С., экспериментальными данными и расчетами по предлагаемой методике. Из результатов, приведенных на рисунке 12, видно, что расчет по методике Лазарева Г.С. дает погрешность по величине допустимой глубины резания в два раза (в критической точке он допускает $t=0,35$ мм, а фактически - $t_{\text{вibr}}=0,6$ мм) по нашему методу $t_{\text{вibr}}=0,55$ мм, что значительно ближе к эксперименту. То есть погрешность вычисления снижается с 71% до 12%.

Разработанная методика определения виброустойчивости процесса лезвийной обработки для заданной механической системы резания может быть использована для аттестации рабочего места, предназначенного для обработки нежестких валов, схема которой представлена на рисунке 13

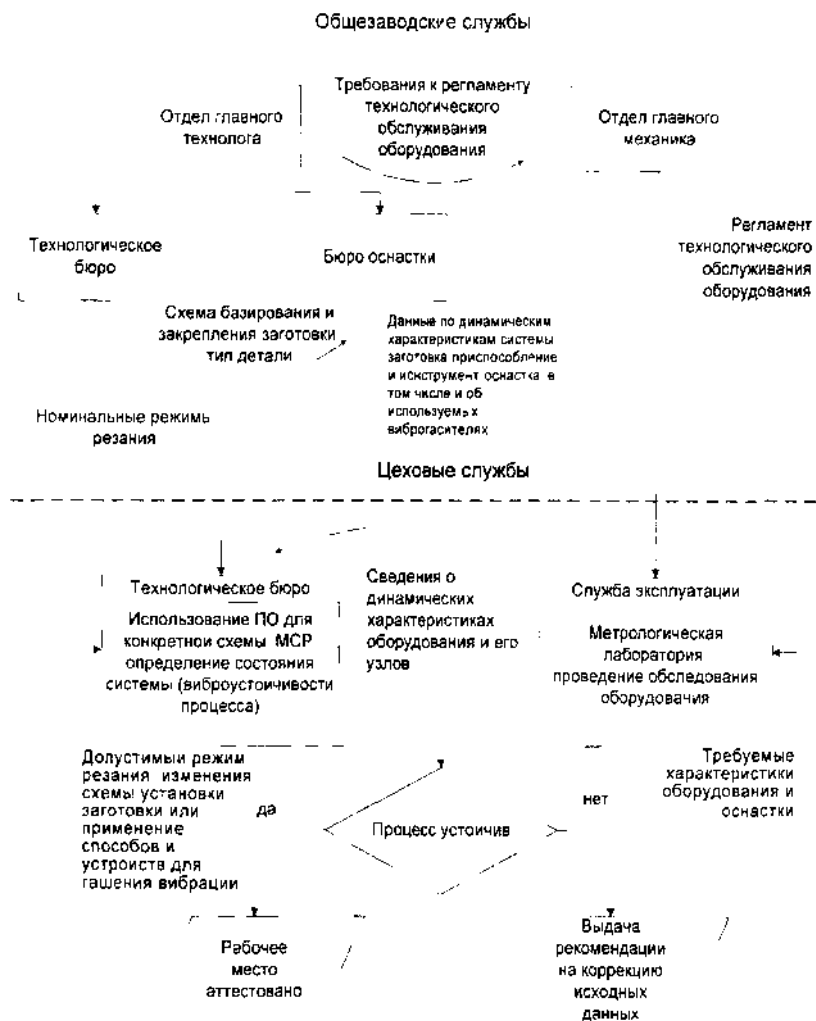


Рисунок 13 - Схема аттестации рабочего места, предназначенного для обработки нежестких валов

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Разработаны теоретические положения, определяющие виброустойчивость процесса лезвийной обработки нежестких валов, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в области механической обработки резанием. Данные положения включают аналитическое описание вибраций механической системы при лезвийной обработке нежестких валов как временных функций, связывающих следующие параметры: геометрические характеристики заготовки, физико-механические свойства процесса лезвийной обработки и режим резания. Это подтверждено следующими результатами проведенной работы:

1) Показано, что многие из известных способов и технических средств повышения виброустойчивости процесса лезвийной обработки валов имеют существенные ограничения их применения в промышленности из-за отсутствия возможности априорного получения динамической картины вибраций, сопровождающих обработку и оценки эффективности виброгашения путем моделирования процесса.

2) Впервые получено аналитическое описание динамического состояния процесса лезвийной обработки на базе токарного станка при лезвийной обработке (точении цилиндрических и резьбовых поверхностей и фрезеровании резьб охватываемыми головками) нежестких валов с учетом взаимного влияния поперечных и продольно-крутильных колебаний. Данное описание включает три компонента:

- временные зависимости геометрических параметров срезаемого слоя с учетом упругих деформаций элементов механической системы резания;
- численное представление зависимостей мгновенных значений всех составляющих силы резания от текущих значений параметров срезаемого слоя и режима резания, учитывающее их взаимозависимость;
- постановку краевых задач о поперечных и продольно-крутильных колебаниях заготовки с учетом схемы ее закрепления и нагружения, геометрических и физико-механических параметров, а также динамических характеристик механической системы резания; интегральные зависимости поперечных колебаний суппортной группы от колебаний силы резания.

3) На основе полученных временных зависимостей силы резания и краевых задач об упругих колебаниях нежесткого вала созданы алгоритм и программное обеспечение расчета виброустойчивости процесса лезвийной обработки, позволяющие рассчитать временные зависимости упругих перемещений, силы резания, а также оценить виброустойчивость процесса. При этом модульность структуры позволяет по аналогии разрабатывать алгоритмы для других видов обработки резанием длинных нежестких валов.

4) Предложенное численное решение аналитического описания динамического состояния процесса лезвийной обработки использовано для расчета погрешностей, в частности, шероховатости или волнистости обработанной поверхности с учетом влияния вибраций, сопровождающих процесс обработки,

способов и устройств, применяемых для виброгашения. Этим достигается возможность установления диапазона допустимых значений амплитуды колебаний в зависимости от заданных техническими условиями параметров точности обрабатываемой поверхности.

5) Показано, что оценка технического состояния станков, используемых для обработки нежестких валов, должна предусматривать проведение испытаний на жесткость и определение параметров, характеризующих явление затухания колебаний. Установлено, что наиболее перспективным способом определения жесткости среди рассмотренных является динамический, основанный на математическом анализе кривой переходного процесса упругих перемещений в стыке элементов механической системы от ступенчатого силового воздействия (в частности для определения приведенной жесткости - в стыке заготовка-инструмент), также позволяющий определить такую характеристику колебательного процесса, как коэффициент затухания. Для его реализации разработана, изготовлена и испытана экспериментальная конструкция прибора для снятия динамических параметров и разработан математический аппарат для обработки электрического сигнала, получаемого с тензометрических датчиков прибора.

6) Экспериментально подтвержден высокий уровень адекватности полученных функциональных зависимостей упругих колебаний, сопровождающих процесс лезвийной обработки, от времени при гонении.

7) Система устойчива при выполнении двух условий необходимого (скорость резания имеет положительные значения) и достаточного (сила резания принадлежит интервалу в пределах нормированных мгновенных значений). Показано, что микрорельеф обработанной поверхности не отслеживает увеличение амплитуды колебаний механической системы низкой частоты, тогда как расчетные значения модуля силы резания определенно реагируют на изменение динамики процесса. Поэтому в основу кршера виброустойчивости процесса лезвийной обработки нежестких валов лег допустимый интервал мгновенных значений силы резания, нормированные пределы которого определяются как функции от номинальной глубины резания за вычетом или прибавлением половины регламентированной высоты микронеровностей R ,

8) Показано, что результаты численного моделирования вибраций, сопровождающих процесс лезвийной обработки валов, позволяют установить параметры процессов и устройств, обеспечивающих виброгашение за счет стабилизации составляющих силы резания. При моделировании процесса резания исходные данные к алгоритму расчета должны включать специфические параметры способа или устройства для повышения виброустойчивости (закон изменения скорости резания или подачи, требуемую жесткость или демпфирующую способность механической системы резания, ограничения в колебании силы резания или время запаздывания ее стабилизации). На примере применения запатентованной электромеханической адаптивной системы стабилизации

силы резания доказано, что этот способ снижает влияние вибраций в процессе резания и улучшает микрогеометрию обрабатываемой поверхности

9) Сравнительный анализ показал, что погрешность оценки допустимой глубины резания по предложенной методике по сравнению с принятыми ранее сокращен с 71% до 12%, то есть методика определения виброустойчивости более адекватно отражает физическую сущность процесса обработки лезвийным инструментом валов в механической системе резания

10) Предложена схема аттестации рабочего места, реализующая информационные и организационные связи, необходимые для достижения виброустойчивости процесса обработки нежестких валов в производственных условиях Эта схема позволяет контролировать технологическое состояние станочного парка (оборудования) цеха и выдавать рекомендации о проведении технического обслуживания, ремонта, модернизации или замены средств технологического оснащения, используемых для обработки нежестких валов лезвийным инструментом

Основные положения работы отражены в следующих публикациях

1 Васин Л А Ямникова О А Точение с постоянной силой резания // Технология механической обработки и сборки, Тула, ТулГУ, 1994, с 70-73

2 Васин Л А , Ямникова О А Исследование связанности крутильных и продольных колебаний валов при точении // Технология механической обработки и сборки, Тула, ТулГУ, 1995, с 110-116

3 Васин Л А , Ямникова О А Определение продольно-крутильных колебаний при точении нежестких валов // Режущие инструменты и метрологические аспекты их производства, Тула, ТулГУ, 1995, с 33-39

4 Ямникова О А Динамическая модель колебания заготовки при точении // Проектирование технологических машин Выпуск 2, М 1996, МГТУ "Станкин", с 55-60

5 Федин Е И , Васин Л А , Ямникова О А Адаптивное управление силами резания при точении // Техночогия механической обработки и сборки Тула, ТулГУ, 1996, с 118-121

6 Васин Л А , Федин Е И, Ямникова О А Математическая модель силы резания с учетом колебания заготовки при точении Ч Труды 3-го международного конгресса "Конструкторско-технологическая информатика" - КТИ-96, Москва - 1996, МГТУ "Станкин", с 39-40

7 Ямникова О А Технологические возможности устройства стабилизации силы резания // Прогрессивные методы проектирования технологических процессов, металлорежущих станков и инструментов Сб трудов МНТК Тула, ТулГУ, 1997, с 41

8 Федин Е И Ямникова О А Рациональные способы применения устройства стабилизации силы резания //Изв ТулГУ Сер Машиностроение Вып 1 Тула, 1997, с 125-127

9. Васин Л.А., Федин Е.И., Ямникова О.А. Математическая модель силы резания с учетом колебания подсистемы "инструмент - заготовка". // СТИН, 1998, № 8, с. 8- П.

10. Ямникова О.А. Математическая модель силы резания при нарезании метрической резьбы. // Вісник Інженерної академії України. - Київ, 2000. - С. 193 - 196.

11. Ямникова О.А., Ульд Хадрами С.А. Определение геометрических параметров срезаемого слоя при вихревом резьбонарезании. // Известия ТулГУ, сер. "Машиностроение", вып. 5, Тула, 2000, С. 68 - 76.

12. Ямникова О.А., Ульд Хадрами С.А. Кинетостатические погрешности при вихревом резьбонарезании. //Известия ТулГУ, сер. "Машиностроение", вып. 5, Тула, 2000, С. 77-81.

13. Ямникова О.А., Ульд Хадрами С.А., Дорохин Н.Б. Динамика резания при вихревом резьбонарезании. //Известия ТулГУ, сер. "Машиностроение", вып. 5, Тула, 2000, С. 81-85.

14. Ямникова О.А. Снижение вибрации при точении валов за счет стабилизации силы резания. // Сборник научных трудов ведущих ученых технологического факультета.- Тула, 2000. - С. 52 - 55.

15. Ямникова О.А. Влияние колебаний нежесткого вала на величину силы резания при точении. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов.- Донецк: ДонГТУ, 2000. выи. 14 - с. 139 - 142.

16. Ямникова О.А., Ульд Хадрами С.А. Форма и размеры срезаемого слоя при нарезании червяков охватывающей фрезой. // Материалы МНТК "Современные проблемы проектирования и производства зубчатых передач". Тула, ТулГУ, 2000, с. 293 - 296.

17. Ямникова О.А. Кинетостатические погрешности при фрезеровании впадин червяков охватывающими фрезами. // Материалы НТК "Современные проблемы проектирования и производства зубчатых передач". Тула, ТулГУ, 2000, с. 297 - 300.

18. Ямникова О.А., Дорохин Н.Б. Динамика фрезерования впадин червяков охватывающими фрезами. // Материалы МНТК "Современные проблемы проектирования и производства зубчатых передач". Тула, ТулГУ, 2000, с. 300 - 303.

19. Ямникова О.А. Математическая модель силы резания при обработке нежестких валов и винтов. // Материалы МНТК "АИМ 2000", Тула: ТулГУ, 2000. - С. 256 - 258.

20. Ямникова О.А. Влияние вибраций заготовки на точность обработки при вихревом резьбонарезании. // Technology-2000. Transactions collection of International Scientific-technical Conference in Oryol, September 28-30, 2000. - Oryol: OryolSTU, 2000. - С 275 - 278.

21. Ямникова О.А. Влияние направления подачи на кинетостатические погрешности при вихревом резьбонарезании. // Technology-2000. Transactions collection of International Scientific-technical Conference in Oryol, September 28-30, 2000. - Oryol: OryolSTU, 2000. - С 279-282.

22 Ямникова О А Моделирование продольно-крутильных колебаний обрабатываемого винта при охватывающем резьбофрезеровании с учетом затупления инструмента // КТИ-2000 Труды конгресса В 2-х т т 2 - М Изд-во "Станкин", 2000 - С 287-288

23 Ямникова О А Определение значений силы при вихревом резьбонарезании // Избранные труды первой МНТК "АИМ 2000", Тула ТулГУ, 2000 - С 49-57

24 Ямникова О А Повышение качества обрабатываемой поверхности в процессе точения // Качество машин Сб тр 4-й междунар науч - техн конф , 10-11 мая 2001 г В 2т / Под общ ред А Г Сулова - Брянск БГТУ, 2001 -Т 2 С 248-250

25 Ямникова О А Численное решение краевой задачи о продольно-крутильных колебаниях заготовки при нарезании метрической резьбы // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении Сборник статей по материалам Всероссийской НТК - Н Новгород - Арзамас НГТУ - АГПИ, 2001 -С 120-126

26 Ямникова О А Математическое моделирование продольно-крутильных колебаний при нарезании метрической резьбы // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве Труды 4-й МНТК, 23-24 октября 2001 г - Харьков ХНПК "ФЭД", 2001 г - С 46-49

27 Васин Л А , Васин С А , Федин Е И , Ямникова О А Технические характеристики устройства стабилизации силы резания при точении // Вісник інженерної академії України -Київ 2001 №3 (Частина 1) - С 138-142

28 Ямникова О А , Серегин Р Н Математическое моделирование динамики процесса нарезания трапецеидальной резьбы // Изв ТулГУ Сер Машиностроение Выпуск 6 -Тула, 2001 -С 223-228

29 Ямникова О А Особенности процесса нарезания резьб охватывающими фрезами // Технология машиностроения, М 2002, №6, С 13-17

30 Ямникова О А Управление шероховатостью за счет устройства стабилизации силы резания при точении // Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии Сборник материалов Всероссийской НТК, посвященной 40-летию кафедры ТМС ЛГТУ Часть 1 25-26 апреля 2002 г - Липецк ЛГТУ, 2002 г С 90-95

31 Ямникова О А Нетрадиционное применение адаптивного устройства// Нетрадиционные методы обработки Сборник научных трудов междуна родной конференции Часть 1 Воронеж Вор гос унив 2002 - С 173 - 177

32 Ямникова О А Математическое моделирование силы резания при нарезании метрической резьбы по равносиловой схеме резания // Технологические системы в машиностроении Труды МНТК, посвященной памяти выдающихся ученых Коганова И А и Лашнева С И 16 19 октября 2002 г -Тула Гут ГУ, 2002 -С 106-109

33 Ямникова О А Автоматическое регулирование силы резания при точении // Автоматизация проблемы, идеи, решения Сб трудов международной конференции / Под ред Ю Л Маткина, А С Горелова, ТулГУ, - Тула, Гриф и К, 2002 - С 93-95

34. Ямникова О.А. Математическое моделирование динамики процесса нарезания метрической резьбы // Технологическая системотехника. Сборник трудов первой международной электронной НТК. Тула: Гриф и К⁰, 2002. - С. 27 - 29.

35. Ямникова О.А. Построение математической модели колебаний нежесткого вала при обработке резанием // СТИН, М.: 2003, № 1, С. 18-21

36. Федин Е.И., Ямникова О.А. Экспериментальное определение динамических характеристик технологических систем // СТИН, М.: 2003, № 3, С. 7 - 9

37. Свидетельство на полезную модель № 28643. Устройство для токарной обработки нежестких деталей. Авторы: Васин С.А., Васин Л.А., Ямникова О.А., Федин Е.И. Зарегистрировано 10.04.2003 г.

38. Ямникова О.А. Математическая модель упругой технологической системы // Известия ТулГУ, сер. "Технологическая системотехника", вып. 1, Тула, 2003, С. 181-184.

39. Ямникова О.А. Общая концепция построения математической модели упругих колебаний заготовки при обработке резанием // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. / Труды 7-й МНТК, 27-28 мая 2003 г., Харьков, ХНПК "ФЭД", 2003. - С. 100 - 103

40. Ямникова О.А. Динамические характеристики технологических систем // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения - Технология-2003. Материалы МНТК, Орел, 25-27 сентября, 2003. - С. 445-447.

41. Ямникова О.А. Критерий устойчивости упругой технологической системы // Известия ТулГУ, сер. "Технология машиностроения", вып. 1, Тула, 2004, С. 56-60.

42. Кузнецов В.П., Ямникова О.А. Устойчивость процесса лезвийной обработки при нарезании резьбы многолезбовыми головками // СТИН, М.: 2004, №2, С. 12-14

43. Патент на изобретение №2226140 / Устройство для токарной обработки нежестких деталей / Васин С.А., Васин Л.А., Ямникова О.А., Федин Е.И. Зарегистрировано в Госреестре изобретений РФ 27 марта 2004 г. 9 с.

44. Ямникова О.А. Моделирование упругих колебаний валов при лезвийной обработке. - Тула: издательство ТулГУ, 2004. - 187 с.

45. Васин С.А., Ямникова О.А. Методология оценки устойчивости процесса резания с учетом упругих колебаний технологической системы // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. / Труды 9-й МНТК, 3 июня 2004 г., Харьков, ХНПК "ФЭД", 2004. - С. 56-60.

46. Васин С.А., Ямникова О.А. Моделирование вибрационной составляющей шероховатости при точении. Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. / Труды 10-й МНТК, 28-30 сентября 2004 г., Харьков, ХНПК "ФЭД", 2004. - С. 73-76.

47. Ямникова О.А. Общая концепция построения математической модели упругих колебаний подсистемы «суппорт - инструмент - заготовка» при обработке резанием. / Труды VII МНТК по динамике технологических систем «ДТС-2004». Саратов, с. 371.

48 Федин Г И, Ямникова О А Методика определения составляющих силы резания при матричном моделировании процессов резания многозубыми инструментами // Известия ТулГУ Серия Инструментальные и метрологические системы, вып 1 Труды юбилейной МНТК «Наука о резании материалов в современных условиях» Тула, Изд во ТулГУ, 2004, с 114 116

49 Иноземцев А Н, Ямникова О А Экспериментальное исследование быстродействия адаптивной системы стабилизации силы резания при точении / Известия ТулГУ Серия Технология машиностроения, вып 2 Изл-во ТулГУ, 2004, с 93-97

50 Иноземцев А Н, Ямникова О А Определение упругих колебаний технологической системы при нарезании резьбы резцом / Известия ТулГУ Серия Технологическая системотехника, вып 3 Труды второй электронной МНТК «Технологическая системотехника» 2003 Изд-во ТулГУ, 2004 с 217 221

51 Иноземцев А Н, Ямникова О А Устойчивость технологической системы при обработке нежестких деталей Известия ТулГУ Серия Технологическая системотехника, вып 3 Труды второй электронной МНТК «Технологическая системотехника» 2003, Изд-во ТулГУ, 2004, с 225 226

52 Международная научно-техническая Электронная интернет-конференция "Технология машиностроения 2004" [Электронный ресурс] Труды) электронных интернет конференций по технологии машиностроения/ Тульский гос унт - Электр журн - Тула ТулГУ 2004 - Режим доступа: <http://www.nauka.tula.ru>, свободный - Загл с экрана - № гос регистрации 0220409933

Перспективы практического использования адаптивного устройства стабилизации силы резания / Иноземцев А Н, Ямникова О А // Международная научно-техническая электронная интернет-конференция "Технология машиностроения 2004" [Электронный ресурс] -2004 -Вып 1

53 Международная научно-техническая электронная интернет-конференция "Технология машиностроения 2004" [Электронный ресурс] Труды электронных интернет-конференций по технологии машиностроения/ Тульский гос ун-т - Электр журн - Тула ТулГУ, 2004 - Режим доступа <http://www.nauka.tula.ru>, свободный - Загл с экрана - № гос регистрации 0220409933

Структурный критерий устойчивости технологической системы Иноземцев А Н, Ямникова О А // Международная научно-техническая электронная интернет-конференция "Технология машиностроения 2004" [Электронный ресурс] - 2004 - Вып 1

Подписано в печать 18.02.05 Формат бумаги 60×84 1/16 Бумага офсетная

Усл. печ. л. 23 Уч. изд. л. 20 Тираж 100 экз. Заказ 11

Тулский государственный университет 300600 Тула, просп. Ленина 92

Издательство ТлГУ 300600 Тула, ул. Бойдина 151

668

