

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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование)

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

Технология автоматизированного машиностроения
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Исследование влияния параметров упругой системы станка на динамику
процесса обработки

Обучающийся

Д.Ю. Рягузов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, Д.А. Расторгуев

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

Тольятти 2023

Содержание

Введение.....	3
1 Анализ состояния вопроса	4
1.1 Колебания при механической обработке	4
1.2 Гипотезы появления автоколебаний при резании	14
1.3 Механизм формирования погрешности обработки.....	18
1.4 Обзор вибрационных методов обработки	18
1.5 Гашение вибраций инструмента в процессе расточки.....	19
2 Моделирование процессов при растачивании отверстий.....	24
2.1 Производственные испытания жесткости станков	24
2.2 Статическое исследование жесткости и собственных частот.....	25
2.3 Математическая модель процесса с дополнительными степенями свободы	30
2.4 Моделирование динамики много массовой системы.....	31
3 Моделирование динамических параметров инструмента	37
3.1 Управление динамикой обработки при растачивании.....	37
3.2 Модальный анализ борштанг	44
3.4 Моделирование инструмента с направляющей	50
3.5 Гармонический анализ борштанги с направляющей	57
4 Расчет виброустойчивости аналитическим методом.....	64
4.1 Актуальность аналитических методов	64
4.2 Расчет виброустойчивости аналитически	66
Заключение	76
Список использованных источников	78
Приложение А_ Публикация – начальная страница	83
Приложение Б_ Содержание сборника VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения»	84

Введение

Процесс резания является сложным физико - механическим явлением. Он представляет собой совокупность процессов разрушения, пластического и упругого деформирования, трения, электрических и магнитных явлений, тепловых процессов. Причем все эти физические явления взаимосвязаны между собой.

Возникающие температурно силовые возмущения приводят к сложным пространственным движением элементов технологической системы. Эти перемещения включают статическую и динамическую составляющие. Последняя составляющая является суммой движений от гармонических возмущающих сил, автоколебаний и шумовой составляющей, которая зависит от действия множества случайных факторов. Даже при установившемся или устойчивом, как говорят, резании, колебания в технологической системе все равно возникают. Только их амплитуда и частота находится в заданном или приемлемом диапазоне.

Задача выявления особенностей и управления динамикой технологической системы и самого процесса резания является одной из важнейших и сложнейших для технологической подготовки производства.

Исследование динамики непосредственно на станках является трудоемкой и дорогостоящей областью прикладных технологических исследований. Поэтому моделирование процессов обработки и поведения технологической системы является актуальной областью исследований. Данные процессы реализуют при проектировании новых технологических процессов, методов обработки, оптимизации режимов резания, создании новых станков и элементов оснастки.

В работе приведено описание последних достижений в области диагностики вибраций или колебаний в машиностроительном производстве для повышения эффективности процесса резания.

1 Анализ состояния вопроса

1.1 Колебания при механической обработке

Вибрация рассматривается как явление самовозбуждающихся колебаний или автоколебаний, которые возникают в процессе точения. Возникновение вибраций приводит к ухудшению качества обрабатываемой поверхности и перераспределению энергии колебаний в соответствии с ее частотой. Хотя изучение вибраций при резании продолжается уже много лет, данный процесс имеет много нераскрытых особенностей [7]. Существуют некоторые проблемы, требующие детального изучения, связанные с механизмом появления автоколебаний и их развитием.

Ранние исследования в основном были сосредоточены на прогнозировании устойчивости обработки с помощью динамических моделей, которые формировались на определенных гипотезах, предположениях [8]. Параметры этих моделей могли приниматься с учетом разных ограничений и упрощений.

С развитием современных сенсорных технологий, новых типов датчиков, широко исследовалось обнаружение вибраций при резании в режиме реального времени.

Колебания при резании большой амплитуды являются одним из наиболее важных факторов в процессах механической обработки, приводящих к изменению точности, качества поверхности и износа инструмента [9]. Это, как правило, вредно для резания, приводя к неудовлетворительной шероховатости и волнистости. При пониженной частоте вибраций возможно появление огранки. Вибрации приводят к снижению срока службы инструмента. Это также и повышение температуры при трении, и повышенные динамические нагрузки на режущую часть.

Таким образом, обнаружение вибраций с использованием современных подходов, в том числе машинного обучения, является актуальной областью исследований в течение последнего десятилетия.

В статье [26] рассматривается обнаружение вибраций по регистрируемым сигналам. Данное направление является актуальной областью исследований. Несмотря на некоторые успехи при использовании подходов и алгоритмов машинного обучения для анализа вибраций при резании, их анализ показал, что существующие методы имеют ряд недостатков. Один из них включает необходимость предварительной обработки вибрационных данных экспертом-технологом. Представлен альтернативный подход к обнаружению помех [28], основанный на алгоритме классификации К-ближайшего соседа (*k nearest neighborhood* - KNN) и динамической свертке времени (*digital time wrapping* - DTW) в качестве меры сходства временных рядов, полученных для разных условий обработки. Используемые временные ряды представляют собой сигналы ускорения, полученные от датчика, закрепленного на державке инструмента в серии экспериментов по точению. Результаты показывают, что этот подход обеспечивает точность, которая может превзойти известные методики, и не требует предварительной обработки данных. Сравнение полученных результатов с данными, полученными традиционными методами, основанными на вейвлет-анализе и разложению по гармоникам (частотный анализ), а также с более поздним подходом, основанным на топологическом анализе данных (*topological data analysis* - TDA). В эксперименте по точению подход, основанный на вейвлет-анализе, обеспечивает минимальную погрешность. Обеспечивается максимальная точность классификации видов колебаний, достигая 98%. Объединив алгоритм приближенного и исключаящего поиска (*Approximate and Eliminate Search Algorithm* - AESA) и параллельные вычисления методом вейвлет-анализа, обеспечивается классификация вибрации менее чем за 2 секунды, что делает указанный подход применимым для обнаружения вибрации в режиме реального времени.

Человек обнаруживает вибрацию с помощью простых спектрограмм [29]. При этом, при выборе подходящих методов он сталкивается с разнообразием подходов к обработке сигналов, используемых в литературе. Это затрудняет выбор и приводит к возможному использованию не оптимальных методов диагностики вибраций.

Для решения этой проблемы был использован инструмент для облегчения научного технического анализа - обзор с использованием специальных средств количественного исследования и визуализации. Данные были собраны из различных баз данных с использованием специальных запросов по обнаружению вибрации.

Процесс обнаружения и выявления вибраций можно разделить на четыре этапа [30]. Сначала экспериментальные данные получают с различных датчиков, таких как динамометр, акселерометр или микрофон.

Далее полученные сигналы или сигнал обрабатываются по определенным алгоритмам, основанным на определенных теоретических методах. Это может быть метод анализа сигнала во временной области (развертка сигнала с отсчетами времени по оси x), разложение сигнала на гармоники методами частотного анализа. Можно применить комбинированный метод анализа сигнала в частотно-временной области.

На третьем этапе рассчитываются и выбираются различные характеристики, описывающие текущий процесс резания.

В конце, принимается решение на основе порогового метода или интеллектуального алгоритма распознавания. В первом случае идет сравнение полученного параметра с предельной величиной. Во втором определяется конкретное состояние процесса по каким-либо оценочным критериям (точность, износ инструмента, шероховатость поверхности).

В статье [31] всесторонне рассматривается современное состояние методов обнаружения вибраций при механической обработке.

При применении машинного обучения для обнаружения вибраций в машиностроительной области, в частности при механической обработке, в

целом можно выделить три проблемы: недостаточное понимание универсальности процессов вибраций в различных процессах, необходимость автоматизации извлечения признаков из получаемых сигналов и ограничение данных. Последнее актуально для единичного и мелкосерийного производства для конкретной комбинации заготовка-станок, заготовка-инструмент. Эти три проблемы могут быть решены на основе использования трансферного обучения (transfer learning). Оно заключается в применении модели, обученной на одном наборе данных, к другому набору данных. Необходимо связать данные, полученные в одних условиях (комбинация технологической системы, заготовки, материала, режимов) для анализа и получения информации в новых условиях.

В статье [32] исследуются вопросы автоматического обнаружения вибраций путем оценки полученных данных с использованием системы, обученной на другой выборке. Для этого определяется точность классификации вибрации по интенсивности, используя различные характеристики, извлеченные из данных экспериментов по точению и фрезерованию с различными технологическими режимами.

Для формирования признаков из исходного сигнала для анализа применяют быстрое преобразование Фурье (FFT), получают спектральную плотность мощности (PSD), находят функцию автокорреляции (ACF). Для разложения сигнала могут использоваться методики декомпозиции, такие как вейвлет разложение.

Анализ сформированной группы оценок вибраций проводился для различных технологических условий путем обучения и тестирования как внутри, так и между наборами данных для токарной и фрезерной обработок.

Были исследованы четыре алгоритма классификации с учителем: машина опорных векторов (SVM), логистическая регрессия, метод «случайного леса» и градиентный бустинг (метод машинного обучения, который создает модель прогнозирования в виде набора или ансамбля слабых моделей прогнозирования в виде деревьев решений).

Анализ выбранных методов проводится сравнением между собой, как по точности, так и по способности к автоматизации извлечения признаков. Последний фактор является неотъемлемой частью создания автономных автоматизированных производственных ячеек. Результаты исследований показывают, что правильно подобранные частотно-временные характеристики могут привести к высокой точности классификации, хотя и ценой необходимости ручной предварительной обработки и разметки исходных данных для обучения экспертом.

Подходы по топологическому и вейвлет анализу обеспечивают сопоставимую точность оценки и прогнозирования наравне с частотно-временными методами без необходимости ручной предварительной обработки за счет полностью автоматических циклов формирования признаков.

Нестабильные вибрации, колебания при механической обработке приводят к снижению шероховатости для всех методов обработки. Также они являются причиной выхода из строя и повреждения инструментов и элементов станка. Поэтому желательно обнаруживать вибрации и путем изменения условий обработки избегать их. Делать это необходимо в режиме реального времени. Ситуация может усложниться за счет ложных и ошибочных оценок и выводов автоматизированных систем, а также принятия неоптимальных решений, например по снижению производительности.

В статье [33] продемонстрировано комбинированное применение нейронной сети, полученной методами машинного обучения и использование, основанной на физике процесса резания, модели для обнаружения вибраций при фрезеровании.

Данные о вибрациях, собранные во время обработки, группируют в небольшие временные отрезки. Они смещаются в процессе резания. Определяют по ним кратковременные частотные спектры, характеристики которых сопоставляются с пятью состояниями обработки, такими как

холостой ход, врезание в заготовку и выход из нее, устойчивое резание и вибрации.

Нейронная сеть была обучена по традиционной методике. Архитектура сети (число слоев, число нейронов в них, а также функции активации) была сведены к оптимальной по времени срабатывания и ресурсам на обучение сети с тремя сверточными слоями, за которыми следовала полно связанная нейронная сеть с одним скрытым слоем. В физической модели использовался фильтр Кальмана для выделения и устранения устойчивых вынужденных колебаний, чтобы выделить сигналы автоколебаний в необработанных данных.

Сочетание машинного обучения и физической модели, обеспечило повышение точности обнаружения вибраций в данных, соответствующих различным этапам процесса обработки, до 98,90%.

Другим направлением идентификация вибраций является использование оценки шероховатости поверхности обработанной детали. Данный параметр очень чувствителен к вибрации и резко отличается для процесса обработки без нее, как говорят, при устойчивом процессе обработки.

В статье [34] был исследован подход к обработке изображений, полученных после обработки поверхности для идентификации вибрации в процессе токарной обработки. Факт наличия вибраций определяется путем предварительного установления корреляции между шероховатостью поверхности и уровнем вибрации или колебаний в процессе точения. Анализируются изображения поверхности после процесса токарной обработки без вибраций и с большим количеством динамических возмущений.

Для различения процессов с вибрацией и без вибрации используется несколько параметров. Вычисляется среднее арифметическое уровня интенсивности полутонового изображения. Строятся гистограммы интенсивности освещенности, а затем вычисляются дисперсия, среднее значение и распределение интенсивности. Анализ текстуры поверхности на изображениях выполняется с использованием гистограммы второго порядка

или матрицы совпадений изображений. Вывод делается на основе совокупного учета полученных статистических характеристик изображения обработанной поверхности для выявления процесса с вибрацией или процесса без вибрации.

Одной из главных задач для исключения появления нежелательных вибраций во время обработки является разработка надежного метода по прогнозированию появления колебаний при различных условиях механической обработки. В статье [35] предлагается система прогнозирования динамических возмущений разного уровня при обработке в режиме реального времени. Модернизированный алгоритм скользящего среднего предназначен для повышения скорости формирования данных. Основой работы является метод декомпозиции локального среднего, который подходит для работы с нестационарными сигналами сил резания и вибраций.

При обработке сигнала извлекаются самые значимые параметры для построения векторов признаков. Предложена модель прогнозирования вибраций при механической обработке, основанная на скрытой Марковской модели. Это статистическая модель, моделирующая вероятностный процесс с неизвестными параметрами. Целью является определение неизвестных параметров на основе наблюдаемых данных. Оптимизационный алгоритм Витерби - алгоритм поиска наиболее вероятной последовательности событий, используется для определения оптимальной траектории при выполнении обработки.

Взаимосвязь между векторными последовательностями во входном пространстве в виде выбранных факторов и изображениями в пространстве принятых групп или классов была разработана на основе вероятностной модели. Предложенный подход показал, что появление вибраций при механической обработке можно эффективно прогнозировать заранее, до его появления. Подбор параметров модели, как показал анализ результатов эксперимента, подтвердил, что как точность, так и оперативность данного подхода могут быть улучшены.

Динамическое взаимодействие элементов технологической системы определяется с помощью различных датчиков (индуктивных, тензометрических, оптических). Для определения областей устойчивости проводится анализ стабильности динамической системы с использованием диаграмм логарифмической и фазовой амплитудно-частотных характеристик, зон устойчивости для определения стабильных и нестабильных областей режимов резания или конструктивных параметров технологической системы.

Вибрации подавляются методами активного или пассивного демпфирования. В статье [36] в основном рассматривается современное состояние контроля вибраций при механической обработке, включая методы демпфирования, связанные с процессами растачивания, токарной обработки и фрезерования.

В статье [37] предлагается новый метод идентификации вибраций. В процессе обработки получают сигнал ускорения вибрации с акселерометра и вычисляют среднеквадратичное значение ускорения во временной области для каждого соответствующего элемента или участка сигнала. На основе него получают последовательность среднеквадратичных значений ускорения в реальном времени. Затем коэффициент вариации (то есть отношение стандартного отклонения к среднему значению) среднеквадратичной последовательности определяется и принимается в качестве показателя для идентификации вибрации.

Эксперимент с фрезерованием показывает, что коэффициент вариации может хорошо различать состояние (стабильное или вибрационное) процесса обработки. Предлагаемый способ имеет количественный и безразмерный показатель, который работает для различных обрабатываемых материалов и параметров обработки. Его можно расширить для применения в более широком диапазоне условий, таких как другие станки или способы обработки.

Также предлагается быстрый алгоритм определения коэффициента вариации, что делает его идеальным для мониторинга в режиме реального времени.

В статье [38] представлена разработка новой модели вибраций при резании. В ней используются измеренные силы резания вместо математической модели эмпирического характера, которая их описывает. Использование измеренных сил резания позволяет спрогнозировать условия появления вибраций в режиме реального времени и обеспечивать стабильную обработку. Адекватность модели вибрации проверяется с использованием анализа быстрого преобразования Фурье для обнаружения вибрации.

Данный подход в моделировании вибраций может быть использован как цифровой двойник для мониторинга и управления технологическими процессами с целью достижения большей производительности и улучшения качества поверхности.

Статья [39] связана с исследованиями по прогнозированию условий возникновения регенеративных вибраций при механической обработке коррозионно-стойкой стали. Их называют резанием по следу. Чтобы создать адекватную модель регенеративных вибраций, рассматривается инерционность и податливость заготовки. Колебания моделируются для поперечных деформаций с использованием теории много массовой модели. Движение режущего инструмента моделируется как система масса-пружина-демпфер. Изменяющиеся собственные частоты и динамическая жесткость системы инструмент-заготовка в процессе точения моделируются для изучения деформаций инструмента и снимаемого припуска в их взаимосвязи.

Модель материала Джонсона-Кука широко используется в качестве модели силы резания. В статье [10] она применяется для коррозионно-стойкой стали при анализе вибрации, чтобы понять влияние геометрии инструмента и параметров резания. Также рассматривается влияние динамического изгибающего момента резания, вызванного осевой составляющей силы резания. Было проведено моделирование, чтобы понять влияние геометрии инструмента и параметров резания на условия возникновения вибраций. Для проверки предложенного подхода были проведены эксперименты на трех типах режущих инструментов.

Вибрация - это основная проблема, которая ограничивает также применение промышленных роботов в области механической обработки. Критически важно создать адаптивное решение для обнаружения вибраций в процессе роботизированной обработки и реализовать онлайн-обнаружение вибраций в режиме реального времени.

Однако, в отличие от вибраций станка, колебания в процессе роботизированной обработки сложнее обнаружить из-за переменного коэффициента жесткости и меньшей жесткости обычного промышленного робота. В статье [11] представлено комплексное решение для онлайн-обнаружения помех в процессе роботизированной обработки.

Во-первых, чтобы обнаружить вибрации в процессе роботизированной обработки и избежать проблемы неправильной классификации вибрационного режима при разложении на гармоники колебаний, предложен метод адаптивного разложения сигнала. Он основан на малом промежутке времени анализируемого сигнала, определении мгновенной частоты. Во-вторых, оптимальные параметры разложения сигнала вычисляются с помощью генетического алгоритма. Оптимизируя дискретную длину шага параметра разложения, значительно сокращают время оптимизации.

Также определяются энергетические характеристики: приблизительная энтропия, энергетическая энтропия и предлагаемый коэффициент смещения энтропии, чтобы различать вибрации и устойчивое состояние процесса обработки.

Результаты моделирования и эксперимента показывают, что предлагаемый метод может соответствовать требованиям онлайн-диагностики в режиме реального времени и эффективно обнаруживать возникновение вибрации.

Чтобы улучшить чистоту и эффективность процессов механической обработки, исследователи в комплексе разрабатывают и применяют методы обнаружения, подавления или предотвращения вибраций. Работа [12] включает в себя использование различных методов для отслеживания и

обнаружения помех, от методов частотно–временной обработки сигналов (быстрое преобразование Фурье, преобразование Гильберта и т.д.), разложение сигнала (вейвлет анализ, ковариационное разложение и т.д.) до комбинации с моделями машинного обучения или глубокого обучения. Был проведен картографический анализ, чтобы выявить ограничения для этих методов и предложить возможные решения в перспективе для обнаружения вибраций в процессах механической обработки.

1.2 Гипотезы появления автоколебаний при резании

Всего существует три основных причины появления колебаний при резании. Это вынужденные колебания, связанные с раскачиванием технологической системы под действием переменных сил, например от неуравновешенности заготовки. Еще одна причина появления колебаний является параметрическое изменение параметров системы [11]. Например, при вращении трех кулачкового патрона это периодическое изменение жесткости по углу поворота. Третья причина появления колебаний - это автоколебания [10].

Несовершенство инструмента по жесткости может способствовать появлению колебаний. Автоколебания могут возникать из-за неравномерного износа режущих кромок, неровностей на поверхности инструмента или дефектов в его конструкции. Если скорость резания слишком высокая или низкая, то это может привести к возникновению автоколебаний. Неправильный выбор параметров обработки, таких как глубина резания, подача и скорость резания, может вызвать автоколебания [12].

Если заготовка или инструмент имеют малую жесткость, то это может привести к вибрации и автоколебаниям при резании.

Существует несколько способов снижения уровня вибраций при обработке на металлорежущих станках. Использование жестких и

виброустойчивых конструкций режущих инструментов и правильной технологии обработки [13].

Установка специальных амортизирующих устройств, начиная с опор под станок. Они поглощают энергию вибраций и снижают ее уровень. Регулярная проверка и обслуживание станка, включая замену изношенных деталей и смазку механизмов.

Повышение жесткости заготовки или инструмента за счет использования специальных материалов базовых державок, борштанга, корпусов при обработке, которые также могут снизить вибрации.

С точки зрения повышения точности за счет управления вибрациями при резании необходимо решить оптимизационную задачу. Оптимизация технологического процесса может проводиться для структурной и параметрической настройки.

Структурная оптимизация предполагает изменение структуры производственного процесса, например, изменение последовательности операций, замену оборудования, внедрение новых технологий. Критерии оптимизации при структурной оптимизации могут включать повышение качества и точности продукции, сокращение времени производства, уменьшение затрат на производство. Методы оптимизации при структурной оптимизации могут включать процессное математическое моделирование процесса (программное обеспечение AnyLogic), анализ данных (методы машинного обучения), экспериментальные исследования (регрессионные модели).

Параметрическая оптимизация предполагает изменение параметров производственного процесса на операциях, например, скорости резания, подачи, температуры нагрева материала. Критерии оптимизации при параметрической оптимизации могут включать повышение точности изготовления, снижение затрат на материалы и энергию, сокращение основного времени.

Для исследования динамики обработки процесса резания можно использовать различные виды математических моделей:

Моделирование процесса обработки с помощью метода конечных элементов (МКЭ) позволяет описать динамику процесса резания с учетом конструктивных параметров технологической системы, таких как геометрия режущего инструмента, форма и размеры заготовки, свойства материала и другие параметры. Для работы с этой моделью необходимо создать геометрическую модель технологической системы с формированием сетки конечных элементов, задать граничные условия и свойства материала, выполнить расчет напряжений и деформаций в линейной или нелинейной постановке.

Моделирование процесса резания с помощью метода конечных разностей (МКР) позволяет описать динамику процесса резания, используя численные методы для решения уравнений движения. Для работы с этой моделью необходимо задать начальные условия и свойства материала, выполнить расчет напряжений и деформаций в процессе резания. Моделирование процесса резания с помощью метода пластического течения и разрушения позволяет описать динамику стружкообразования и ее влияние на общую динамику технологической системы. Решается, используя численные методы для уравнений пластичности и используя критерии оценки прочности.

Моделирование процесса резания с помощью метода многомерной оптимизации позволяет оптимизировать конструктивные параметры технологической системы для достижения оптимальных параметров динамики процесса резания. Для работы с этой моделью необходимо определить целевую функцию, задать ограничения (точность, жесткость, прочность, кинематические параметры), провести оптимизацию и выполнить анализ результатов.

Все процессы механической обработки подвержены динамическим воздействиям из-за переходных или вынужденных вибраций при движении заготовки или рабочих органов станка, а также динамическим процессам,

присущим резанию, таким как регенеративный эффект (или резание по «следу») или запаздывание сил от смещений. Если их не контролировать, они могут привести к колебаниям высокой амплитуды, нестабильности и плохому качеству обработанной поверхности.

Динамическая жесткость конструкций, участвующих в механической обработке, очень важна для формирования динамических параметров процесса. Она также имеет значение для смещений элементов обрабатываемой системы и качества и размеров обрабатываемой поверхности.

Системы механической обработки включают в себя станок, режущий и вспомогательный инструмент, а также заготовку и приспособление. В зависимости от их относительной жесткости один или несколько компонентов могут доминировать в общей деформации в точке контакта инструмент-заготовка, что приводит к ошибкам формы и повышенной динамике процесса, что может привести к нестабильности процесса резания. Например, для обрабатывающих центров, которые состоят из станины, рабочего стола, несущей колонны, коробки скоростей, шпинделя, узел шпиндель-держатель-инструмент обычно является наиболее гибкой частью всей системы из-за особенностей геометрии этих элементов и множества контактных поверхностей между ними. С другой стороны, в некоторых станках может доминировать податливость обрабатываемой заготовки. Например при точении мало жесткого вала, растачивании трубы, фрезеровании лопаток компрессора. В любом случае усилия, возникающие в процессе резания, являются основной причиной деформаций системы.

В настоящее время из-за миниатюризации в электронной, медицинской, телекоммуникационной, аэрокосмической, автомобильной и оборонной промышленности снижаются размеры деталей, и растет их конструктивная податливость. В то же время требования к материалам с высокой износостойкостью требуют использования термической обработки для достижения заданной твердости и прочности. Следовательно, точное

прогнозирование усилий резания при обработке имеет значение. Это актуально как для проектирования режущих инструментов, а также для планирования операций механической обработки для обеспечения максимальной производительности и качества.

1.3 Механизм формирования погрешности обработки

Погрешности обработки на токарном станке разнообразны. Это неправильная установка заготовки. Если деталь установлена не правильно, то ее ось может смещаться относительно оси вращения станка, что приведет к биению и появлению вибраций.

Изношенный инструмент не обеспечивает точность и качество обработки. Причина - потеря настроечного размера и увеличения уровня сил резания при росте фаски износа [2].

Неправильная настройка станка может привести к погрешности обработки, например, если инструмент не выставлен под нужным углом, что приводит к другой геометрии режущей части, изменению траектории его движения и изменению режимов резания.

Если поверхность заготовки имеет погрешности (формы или волнистости), то инструмент испытывает вынужденные колебания из-за переменного припуска, срезаемого по обороту, например, вала.

1.4 Обзор вибрационных методов обработки

Вибрации при резании могут иметь не только отрицательное, но и положительное значение. Для усовершенствования технологических методов или технологических систем рассмотрим различные вибрационные методы. Они связаны с наложением вибраций разной частоты и амплитуды, а также направления на заготовку или на инструмент, или и на то и другое.

Для этого рассмотрим особенности различных методов обработки: точения, сверления, фрезерования.

Использование вибраций или их подавление определяется содержанием операций, последовательностью переходов, технологическими режимами. Сами устройства для крепления заготовки или инструмента или сам инструмент могут иметь дополнительные поддерживающие или направляющие элементы, характеризоваться конструктивными признаками, соответствующими описанию устройства. Это могут быть особые форма, конструкция, материалы, размеры и их соотношения.

1.5 Гашение вибраций инструмента в процессе расточки

В процессе обработки заготовок он часто сопровождается относительным перемещением режущего инструмента и обрабатываемой заготовкой, что приводит к вибрациям различного типа. Кроме того, коэффициент податливости вспомогательного и режущего инструмента является одной из причин повышения уровня вибрации инструмента. Это является основным препятствием для достижения минимальной шероховатости и увеличения производительности.

Чрезмерная вибрация инструмента ускоряет износ инструмента, что приводит к появлению неприятного шума высокой частоты, повреждению деталей станка и влияет на динамическую устойчивость технологической системы обработки.

Вибрация инструмента является большой проблемой в машиностроении; хотя в течение десятилетий проводились исследования по ее контролю, управлению или снижению уровня. Основоположник теории резания Тейлор инициировал тему по исследованию вибраций и предположил, что этот процесс является наиболее важным фактором, влияющим на результат обработки. Далее труд [18] объяснил механизм, с помощью которого генерируются вибрации. Причем впервые объяснили вибрации инструмента как следствие внутренних процессов обработки, а не внешними силами. Этот

вид колебаний – автоколебаний имеет множество теорий, которые объясняют механизм их появления.

Исследователи [19] обнаружили, что вибрация при обработке была вызвана неустойчивостью процесса резания. Эта нестабильность возникает в процессе механической обработки из-за переменной глубины резания. А изменения этой глубины обусловлены относительным движением инструмента и заготовки. При этом процесс движения и изменения вибраций обусловлен обратными связями в упругой системе станка.

Далее работы развили тему [10], что модулируемая толщина стружки напрямую связана с движениями инструмента и заготовки. Причем процесс раскочки связан с параметрами динамической системы станка (собственными частотами и формами колебаний). Это влияет на силу резания и приводит к увеличению амплитуды вибрации.

Колебания в процессе обработки резанием классифицируются как свободные, вынужденные вибрации и автоколебания [21]. При свободной и вынужденной вибрации источники этих возмущений можно устранить, их влияние можно уменьшить. Но в случае самовозбуждающихся вибраций взаимодействие инструмента и заготовки в процессе обработки приводит к вибрации инструмента, которое, в свою очередь, приводит к неустойчивости всей системы и может привести к неконтролируемому уровню возмущений [22].

Причины автоколебаний классифицируются как первичный источник и вторичный. Трение между инструментом и заготовкой является первичным источником. Формирование волнистой поверхности на поверхности резания вызывает вторичный источник колебаний – резание по «следу» [23].

Автоколебания режущего инструмента просчитывают либо путем прогнозирования ее возникновения на основе составления карт устойчивости [25]. Либо определения ее возникновения с помощью пассивных, полуактивных и активных методов контроля вибрации инструмента (подраздел 1.1).

Основной причиной вибрации является технологический элемент станка, имеющий наименьшую жесткость [24]. Инструменты с внутренними гасителями вибраций - демпферами обладают большей способностью контролировать вибрацию инструмента по сравнению с обычным инструментом. Управление активной или пассивной системой управления может исключить влияния регенерации колебаний из-за резания по следу, за счет постоянного сбивания относительной фазы колебаний на каждом обороте [26]. Пассивные демпферы – гасящие вибрации материалы, вставки, инерционные массы. Полуактивные и активные демпферы используют приводы, изменяющие параметры рассеяния колебаний и датчики контроля уровня вибраций.

Большинство этих демпферов используются в процессах механической обработки для подавления вибраций инструмента. Пассивные амортизаторы были просты в применении и экономичны. Они способны уменьшить трение, но обеспечиваемое ими демпфирование всегда имеет постоянные характеристики. Это не эффективно при изменении условий обработки.

Эта проблема была решена при использовании полуактивных демпферов, поскольку они могут изменять эффект демпфирования. Но для настройки демпфера или амортизаторов в соответствии с текущим состоянием требуется система контроля или управления. Таким образом, основная проблема с полуактивными амортизаторами заключается в том, что процесс настройки является трудоемким процессом, а параметры, вызывающие возмущения, неизвестны.

Чтобы уменьшить взаимодействие с человеком и исключить работу, связанную с настройкой виброгасящих устройств, используется активный демпфер. Активные демпферы успешно справляются с вибрацией в процессе обработки. Они обладают способностью обнаруживать изменения, вызванные возмущениями, и затем соответствующим образом изменять эффект демпфирования. Это стало возможным с помощью обратной связи, которая

была введена в процесс обработки, передает сигнал в систему управления и которая вносит необходимые изменения в демпфирование.

В начале операции инструмент острый и вибрации наименьшие. По мере выполнения обработки инструмент затупляется, а также увеличиваются возмущения, связанные с обработкой. Активный демпфер использует механизм обратной связи и исполнительный механизм, которые могут обеспечить более эффективную работу.

Для верификации предложенных математических моделей, описывающих колебания в технологических системах при обработке, необходимо иметь максимально достоверную информацию о реальных вибрациях. Для этого используются различные методы диагностики и анализа вибрационных сигналов при механической обработке. Как правило, это связано с заданием и определением определенного порогового уровня колебаний. Он задается исходя из необходимой точности, качества обработанной поверхности, стойкости режущего инструмента.

Сами вибрационные сигналы анализируются различными математическими алгоритмами. Они включают в себя частотные и частотно-временные методы и алгоритмы машинного обучения.

Выводы по разделу

На основе проведенного анализа недостатков и особенностей обработки маложестких деталей сформулирована цель работы. Ей является исследование влияния конструктивных параметров упругой системы станка - жесткости и демпфирования на особенности динамического поведения заготовки и инструмента при обработке.

Решаемые задачи:

- анализ влияния различных колебаний на параметры точности, методов и средств управления динамикой системы на точность обработки;
- анализ колебаний элементов технологической системы на основе динамических моделей, учитывающих взаимодействие колебаний элементов станка по различным осям системы;

– идентификация параметров элементов динамической системы обработки резанием. Проведение статических исследований жесткости. Методом собственных колебаний определение спектрального состава системы станка, демпфирующих и инерционных характеристик;

– экспериментальное исследование процесса обработки деталей типа вал или втулка с изучением влияния параметров осей жесткости подсистем инструмента и заготовки на точность размеров, расположения и формы.

2 Моделирование процессов при растачивании отверстий

2.1 Производственные испытания жесткости станков

В этом разделе рассматриваются важные особенности моделирования динамики процесса механической обработки, а также представлены методы, которые могут быть использованы для анализа и моделирования конструктивных элементов станка и технологических процессов.

Одним из конструктивных параметров технологической системы, обеспечивающим безвибрационный режим обработки, является жесткость [7]. Кроме сопротивления деформации, она определяет собственные частоты колебаний упругой системы станка. А это приводит к возникновению резонансных и анти-резонансных областей обработки по оборотам заготовки.

Для того чтобы правильно выбрать технологические режимы необходимо знать фактическую конструктивную жесткость. Производственные испытания жесткости станков проводятся для определения их способности выдерживать нагрузки и обеспечивать точность размеров и формы при обработке. Для этого используются специальные испытательные стенды, которые нагружают станок в соответствии с заданными параметрами.

Испытания жесткости проводятся на различных типах станков, включая токарные, фрезерные, сверлильные и другие.

Испытания жесткости станков проводятся в соответствии с международными стандартами, которые определяют условия испытаний, используемые методы и критерии оценки результатов. Такие стандарты включают в себя ISO 230 и другие.

Результаты испытаний жесткости станков представляются в виде графиков зависимости смещений от сил. Они позволяют определить коэффициент жесткости станка и его способность выдерживать нагрузки при работе по углу наклона данной зависимости.

Основными параметрами, которые учитываются при проведении испытаний, являются максимальная нагрузка, которую может выдержать станок для заданного уровня смещений и постоянные времени. Эта характеристика описывает быстродействие элементов упругой системы станка.

Перед началом испытаний станок должен быть подготовлен, проверен на наличие дефектов, заданной температуры. Устанавливается заготовка или оправка. После этого подключается система нагружения, которая создает заданную силу и определяет реакцию на нее элементов станка. В процессе испытаний жесткости станков осуществляется контроль деформации элементов станка. Контроль ведут по соответствующим направлениям и измерение изменений размеров и формы. Результаты измерений регистрируются в специальном протоколе испытаний.

После завершения испытаний результаты обрабатываются и анализируются. Они представляются в виде графиков, диаграмм и таблиц, которые позволяют оценить степень жесткости станка и его способность выдерживать нагрузки.

2.2 Статическое исследование жесткости и собственных частот

Рассмотрим фрезерные переходы. При обработке необходимо обеспечить минимальные силы резания и повысить точность.

Измерения жесткости фрезерной головки на станке (рисунок 1) [1].

Фреза концевая размером d равным 10 мм из материала P6M5. Измерение статической жесткости проводилось по оси u в двух взаимно перпендикулярных положениях головки (таблицы 1, 2).

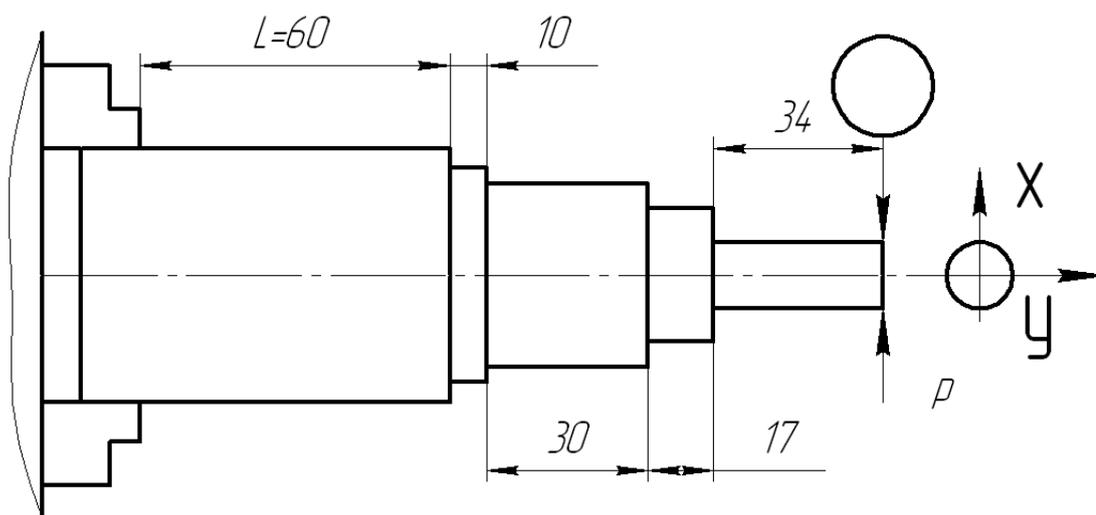


Рисунок 1 - Схема измерения

Таблица 1 - Первая серия испытаний

Нагрузка, Н	Перемещение, мкм		Нагрузка, Н	Перемещение, мкм	
	Нагружение	Разгрузка		Нагружение	Разгрузка
10	48	63	60	135	147
20	90	112	70	144	153
30	109	120	80	150	157
40	118	135	90	158	161
50	127	142	100	165	165

Таблица 2 - Вторая серия испытаний

Нагрузка, Н	Перемещение	
	Нагружение, мкм	Разгрузка, мкм
20	50(15)	15(62)
30	70(75)	32(83)
40	92(97)	110
50	112(116)	127
60	130	142
70	142	(69)151
80	148	159
90	155	165
100	161	171
110	167	175
120	174	-
130	180	-

На рисунке 2 показана схема нагружения на вертикально-фрезерном станке PROMA.

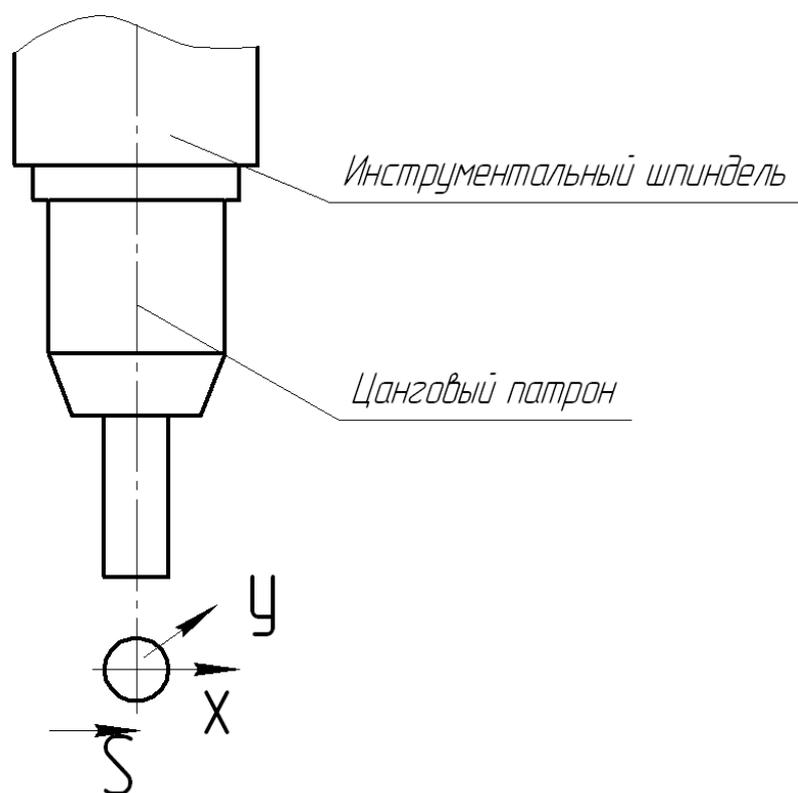


Рисунок 2 - Направления осей на вертикально-фрезерном станке PROMA

Жесткость станка PROMA (таблицы 3-5). В таблице 5 - на конце фрезы диаметром 10 мм.

Таблица 3 - Жесткость станка PROMA по координате x на конце фрезы

Сила P, мм (Н)	Перемещение при нагружении x, мм	Перемещение при разгрузке x, мм
1	2	3
10	0,03	0,07 при 0
20	0,05	0,2
30	0,11	-
40	0,175	0,3
50	0,24	0,34
60	0,29	0,365

Продолжение таблицы 3

1	2	3
70	0,34	0,40
80	0,39	0,42
90	0,43	-
100	0,47	-

Таблица 4 - Жесткость станка PROMA по координате x на конце патрона

Сила P, мм (Н)	Перемещение при нагружении x, мм	Перемещение при разгрузке x, мм
50	0,15	0,10
100	0,24	0,17
140		0,23
40	0,175	0,3
50	0,24	0,34
60	0,29	0,365

Таблица 5 - Жесткость вертикально-фрезерного станка PROMA по y

Сила P, мм (Н)	Перемещение при нагружении x, мм
10	0,09
20	0,14(11)
30	0,15
40	0,17
50	0,19
60	0,27
80	0,35

На рисунке 3 показана схема направления осевых линий для суппортной группы токарного станка. Жесткость указана в таблице 6.

Таблица 6 - Жесткость суппорта

Сила P, мм (Н)	Перемещение при нагружении по y, мм
40	0,01
60	0,03
90	0,005(по x)

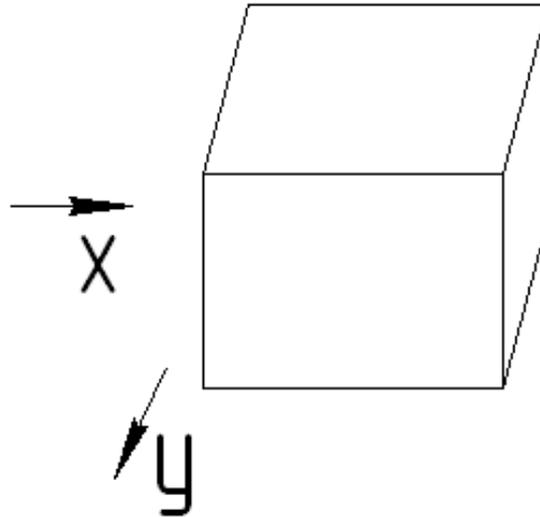


Рисунок 3 - Схема положения осей суппорта

Жесткость тисков на станке PROMA по координате x , y оказалась на несколько порядков выше, чем у шпинделя. Биение головки PROMA в сечении 1 равно 0,075 мм; в сечении 2 – 0,22 мм для подточенной фрезы (0,12 мм для новой фрезы).

Биение на станке 1К62 в сечениях: 1 – 0,41 мм; 2 – 0,26 мм; 3 – 0,53 мм (рисунок 4).

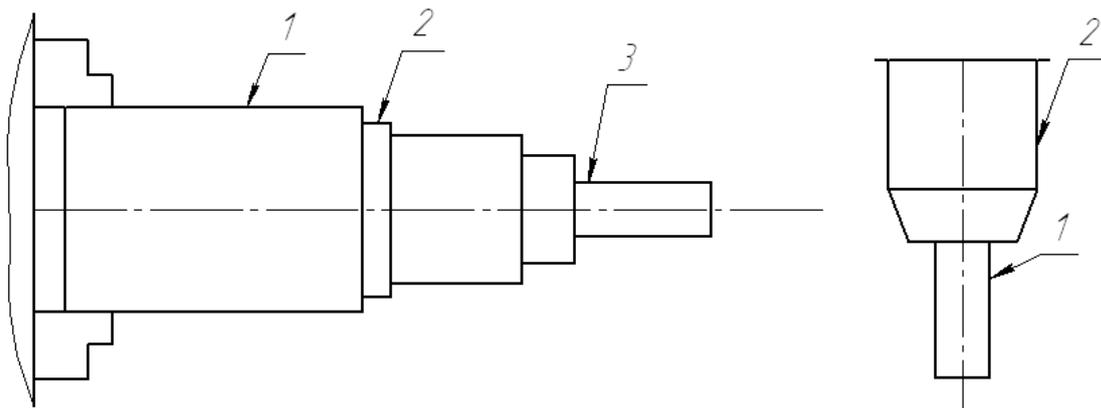


Рисунок 4 - Замер биения головки на фрезерном станке и на токарном 1К62

Измерения свободных колебаний инструментальной подсистемы и подсистемы заготовки записывались в файлы с тарировкой сигнала. Тарировка

выполнялась микрометрическим винтом по 5 мкм смещение на шаг измерения.

Регистрировались серии для свободных колебаний на станке ПРОМА по оси x (по направлению продольной подачи).

Серия свободных колебаний для станка ПРОМА по оси y (здесь же записывался холостой ход по y).

Записывались свободные колебания на станке 1К62 по оси y для фрезы (место смотри на рисунке 4 для статики). Регистрировалась серия для свободных колебаний на станке 1К62 по оси z. Свободные колебания резцедержателя 1К62 по x.

2.3 Математическая модель процесса с дополнительными степенями свободы

Понятие качества детали включает в себя степень соответствия геометрического образа реальной детали образу идеальному, заданному чертежом. Качество фактического геометрического образа детали определяется как совокупность показателей точности размеров, отклонения расположения, отклонения формы, волнистости поверхности, шероховатости, а также структуры и физико-механических свойств поверхностного слоя. Все эти параметры образуются при взаимном относительном смещении основных формообразующих подсистем станка [14] - подсистем “заготовка-опоры” и “инструмент-суппорт”.

Параметры относительных колебаний (их частота и амплитуда) влияют на процессы в зоне резания. Так как технологическая система замкнутая, картина взаимодействия упругой системы станка и процесса резания усложняется. Следует учитывать, что каждая подсистема обладает несколькими степенями свободы [5]. Управление динамикой ведется на основе априорной или рабочей информации о динамических характеристиках координат станка и основных параметрах возмущений.

Известны способы лезвийной обработки, которые включают управляемые перемещения по различным координатам. Это могут быть осевое и тангенциальное направления. Делается это с целью обеспечения точности за счет минимальных смещений в поперечном направлении и формирования равномерных остаточных напряжений путем стабилизации силы резания.

Для анализа и управления процессами обработки в таких технологических системах необходимо разработать математическую модель, учитывающую замкнутость подсистем станка и процессов резания [4], взаимовлияние смещений и сил резания в различных направлениях с учетом инерционности процесса стружкообразования и запаздывания сил резания.

2.4 Моделирование динамики много массовой системы

На расчетной схеме (рисунок 5) показан резец, срезающий слой δ металла. Образующаяся стружка, сбегая по резцу под действием силы резания P , вызывает силу трения Q , воздействующую на приведенную массу m_x , опирающуюся на упругое звено, имеющее жесткость c_x . Перемещение x массы m_x вызывает колебание толщины S_Γ срезаемого слоя H отсюда, в свою очередь, колебание силы резания P . Следовательно, контур x , в котором действуют силы трения Q , является замкнутым. Естественное рассеяние энергии колебаний в контуре определяется демпфирующим звеном b_x .

Кроме воздействия на величину силы трения Q , сила резания P при возмущении вызывает колебание контура y в направлении скорости резания V_s . Этот контур состоит из массы m_y , упругого C_y и демпфирующего b_y звеньев.

Колебание силы P вызывает колебание скорости резания, имеющей вид

$$\Delta P = V_s + y', \quad (1)$$

где V_s - постоянная составляющая;

y' - переменная составляющая.

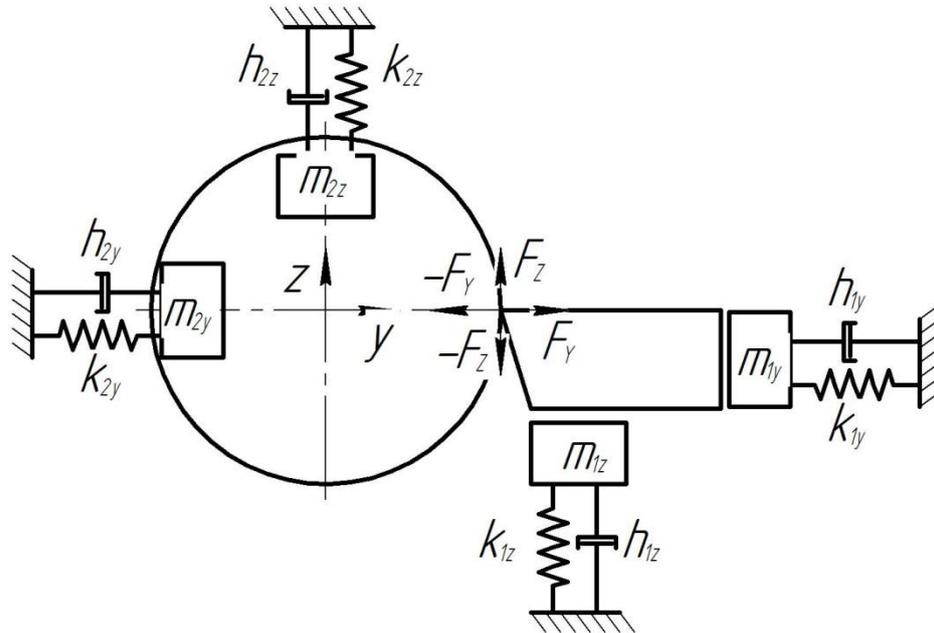


Рисунок 5 - Модель много массовой системы

Вследствие запаздывания сил P и Q в системе происходит накопление энергии, которое может привести к потере устойчивости, если естественное рассеяние энергии не достаточно.

$$\begin{cases} T_{x2}^2 \cdot \ddot{x} + T_{x1} \cdot \dot{x} + x = Q; \\ T_{y2}^2 \cdot \ddot{y} + T_{y1} \cdot \dot{y} + y = P; \\ T_p \cdot \dot{P} + P = -\kappa_x \cdot x - T_{ky1} \cdot \dot{y}; \\ T_Q \cdot \dot{Q} + Q = P - T_{kx} \cdot \dot{x} - T_{ky2} \cdot \dot{y}; \end{cases} \quad (2)$$

где A_x - амплитуда колебаний контура x , соответствующая устойчивому предельному циклу системы;

T_{ky1} , T_{ky2} , T_{kx} - пропорциональны A_x ,

B - коэффициент возмущения системы (сила, приходящаяся на единицу перемещения x);

κ_x - коэффициент передачи системы.

Из системы уравнений (2) видно, что члены T_{ky1} , T_{ky2} , T_{kx} содержащиеся в правых частях уравнений, играют роль квазидемпфирующих, повышающих устойчивость системы, так как они ограничивают величину энергии колебаний, возникающей из-за запаздывания сил P и Q .

Предлагаемый способ повышения виброустойчивости состоит в увеличении влияния при возмущениях системы множителей $T_{ky1} \cdot \dot{y}$ и $T_{ky2} \cdot \dot{y}$ по сравнению с другими членами уравнения (3) и (4). Для этого на суппорте станка или в шпиндельной системе выделяется в направлении y дополнительный колебательный контур y_1 с небольшой массой $m_{y1} < m_{y2}$, подпружиненной упругим элементом с жесткостью $C_{y1} < C_{y2}$.

Соотношение C_{y1} и C_{y2} подбирается таким, чтобы частота ω_{y1} , контура y_1 , была близка к собственной частоте системы. Предлагаемый способ позволяет подобрать соотношение амплитуд контуров A_x и A_y , повышающее устойчивость системы. Из уравнений системы (1), (2) видно, что влияние квази-демпфирующих членов на повышение устойчивости увеличивается не только при введении контура $y(2)$ в область резонанса с контуром $x(1)$, но и вследствие увеличения постоянных $T_{ky1} \cdot \dot{y}$ и $T_{ky2} \cdot \dot{y}$ при уменьшении жесткости C_{y1} и C_{y2} контуров y , y_1 .

Устойчивость технологически замкнутой системы при обработке также моделировалось в Matlab. Для этого в модели (2) коэффициенты – постоянные времени задавались соотношениями

$$T_1^2 = \left(\frac{m_y}{C_y} \right)^2; \quad T_2 = \frac{\beta_y}{C_y}; \quad (3)$$

$$T_3^2 = \left(\frac{m_z}{C_z} \right)^2; \quad (4)$$

$$T_4 = \frac{\beta_z}{C_z} \quad (5)$$

Коэффициент передачи процесса резания

$$K = K_y \cdot b. \quad (6)$$

где K_y - относительная сила резания, Н/мм²;

b - ширина срезаемого слоя.

Структурная схема процесса фрезерования приведена на рисунке 6.

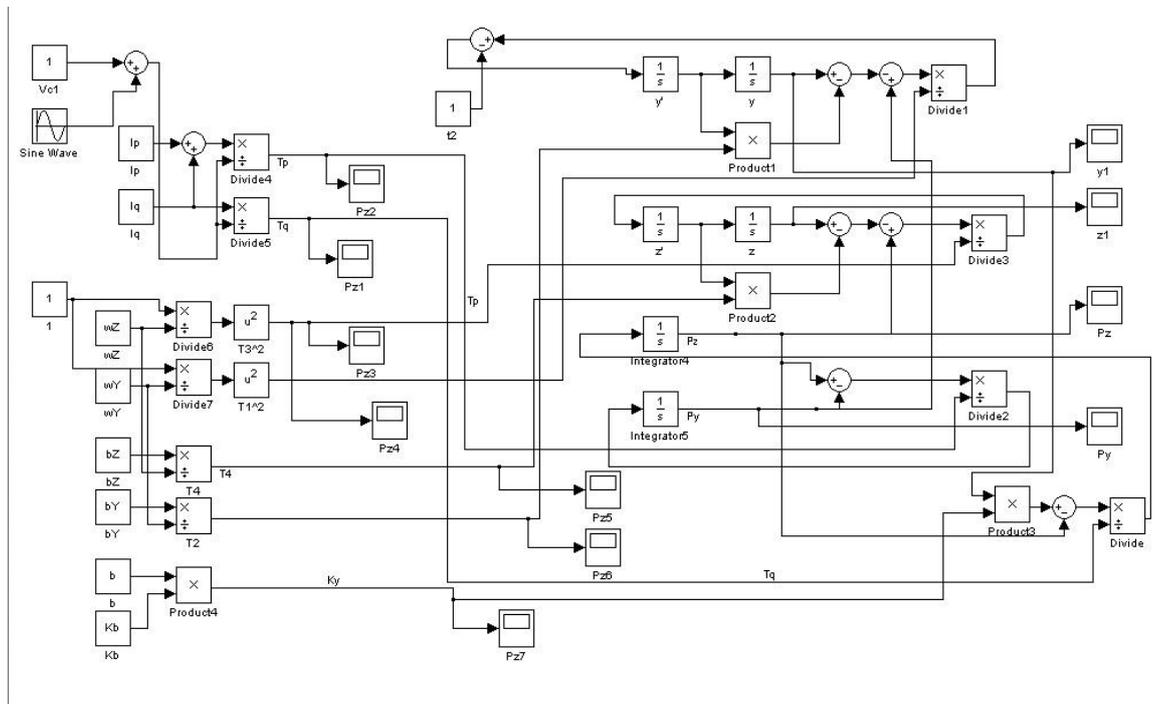


Рисунок 6 - Модель обработки по системе (2)

При моделировании видно (рисунок 7 и рисунок 8), что в случае изменения скорости резания, возмущения в системе затухают быстрее и сильнее, что повышает точность обработки [27]. Можно обработать заготовку с той же точностью, но при более интенсивных режимах резания.

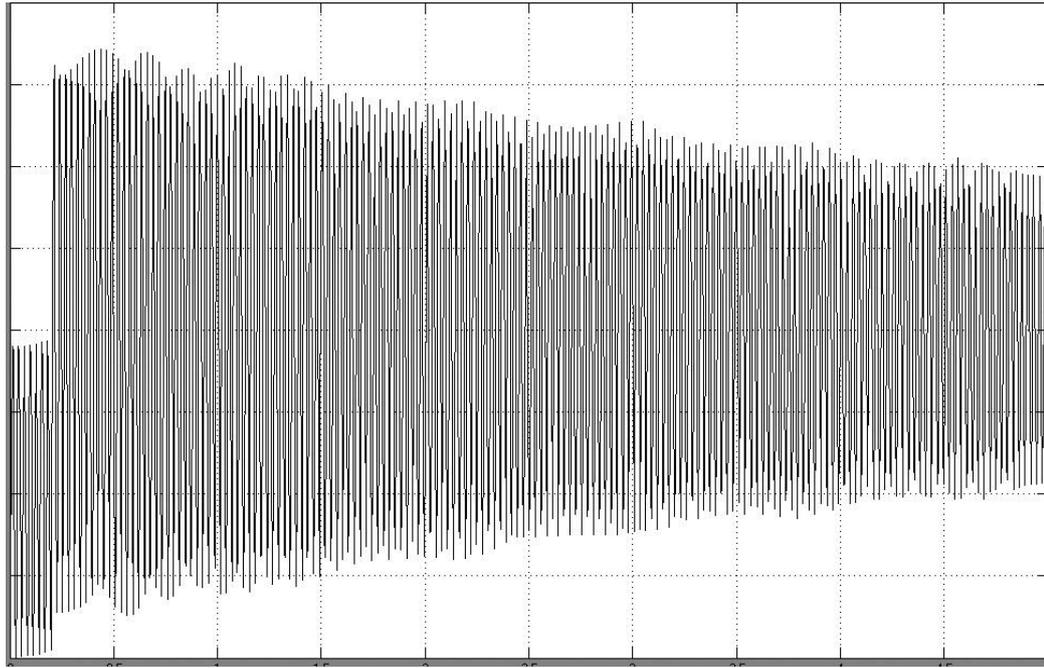


Рисунок 7 - Графики затухания поперечных колебаний инструмента при обычном резании (а) и при модулировании скорости резания (б)

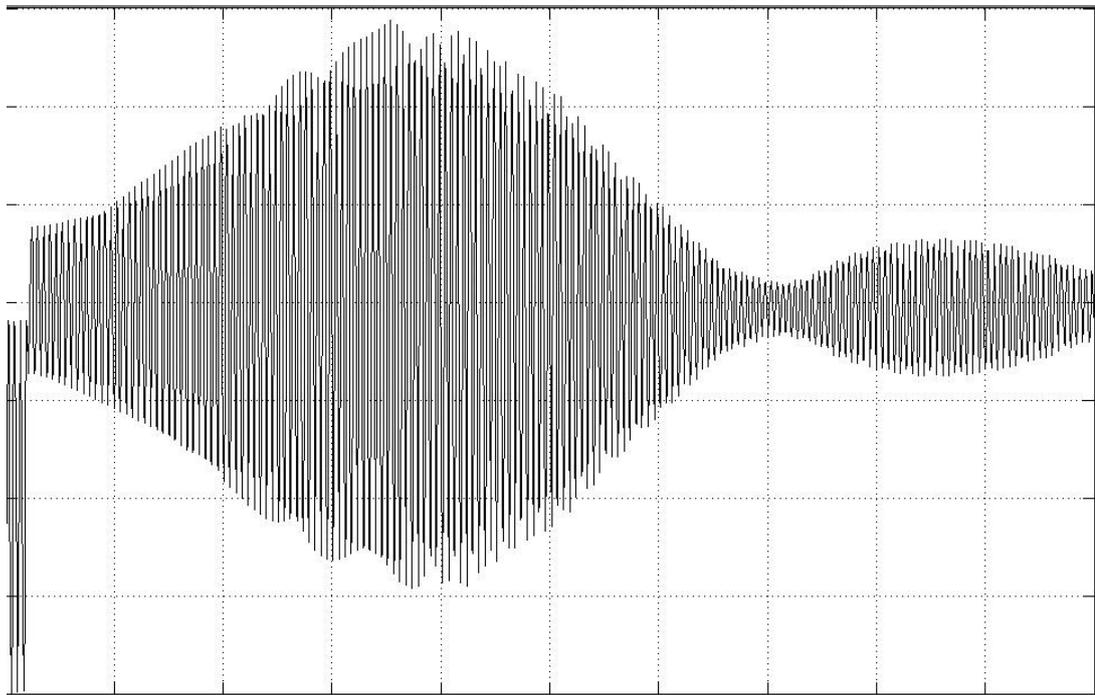


Рисунок 8 - Графики затухания поперечных колебаний инструмента при обычном резании (а) и при модулировании скорости резания (б)

Использование вибрационных державок также обеспечивает повышение точности при росте нагрузок на режущую часть [15]. За счет повышения амплитуды смещений в тангенциальном направлении энергия возмущения рассеивается в касательном колебательном контуре. Поперечное направление становится более устойчивым. За счет этого происходит вибрационная стабилизация вершины инструмента в поперечном направлении.

Выводы по разделу

В разделе проведено экспериментальное определение параметров технологической системы на станке. Методом импульсного нагружения ударом динамометрическим молотком были определены осциллограммы затухающих колебаний. По спектрограммам определены собственные частоты подсистем заготовки и инструмента, а также коэффициенты затухания, демпфирования и инерционные коэффициенты.

На основе полученных данных проведено моделирование процесса точения с модулированием скорости резания. Оно показало более быстрое затухание возмущений. Это положительно скажется на точности и качестве обработанной поверхности.

3 Моделирование динамических параметров инструмента

3.1 Управление динамикой обработки при растачивании

В процессе растачивания вибрация инструмента является важным фактором, который приводит к его износу, плохому качеству поверхности и повреждению режущей части. Вибрация борштанг может быть уменьшена с помощью пассивных, полуактивных и активных методов [12]. Снижение уровня вибрации инструмента в процессе растачивания становится эффективным за счет включения в конструкцию инструмента или резцедержателя демпфирующего механизма. При росте износа инструмента его вибрация увеличивается, что приводит к его выходу из строя по причине поломки.

На появление автоколебаний влияет также жесткость режущего инструмента [3]. При растачивании она определяется, главным образом, вылетом борштанги от места заделки. Кроме этого, на колебания при резании оказывает влияние ориентация осей жесткости технологической системы. Для установки в патроне заготовки и борштанги в суппорте станка суммарное влияние будет определяться взаимодействием осей жесткости заготовки и инструмента. Так же влияет на появление колебаний геометрия режущей части инструмента, выбор режимов резания.

Рассмотрим пример обработки отверстия для деталей показанной на рисунке 9. Для диаметра отверстия 76 мм при длине трубы около 900 мм возникает ситуация обработки глубокого отверстия. Учитывая марку материала - коррозионностойкий сплав 12Х14Н10Т с плохой обрабатываемостью, сливным типом стружки, при растачивании такой трубы поверхность на уровне требований чертежа ($Ra\ 1.25\ \mu\text{m}$) обеспечить будет очень трудно.

Рассмотрим статические и динамические особенности поведения расточного инструмента в виде борштанги прямоугольного сечения.

Изменяется ориентация осей жесткости за счет поворота державки вокруг продольной оси, а также изменения схемы направления инструмента.

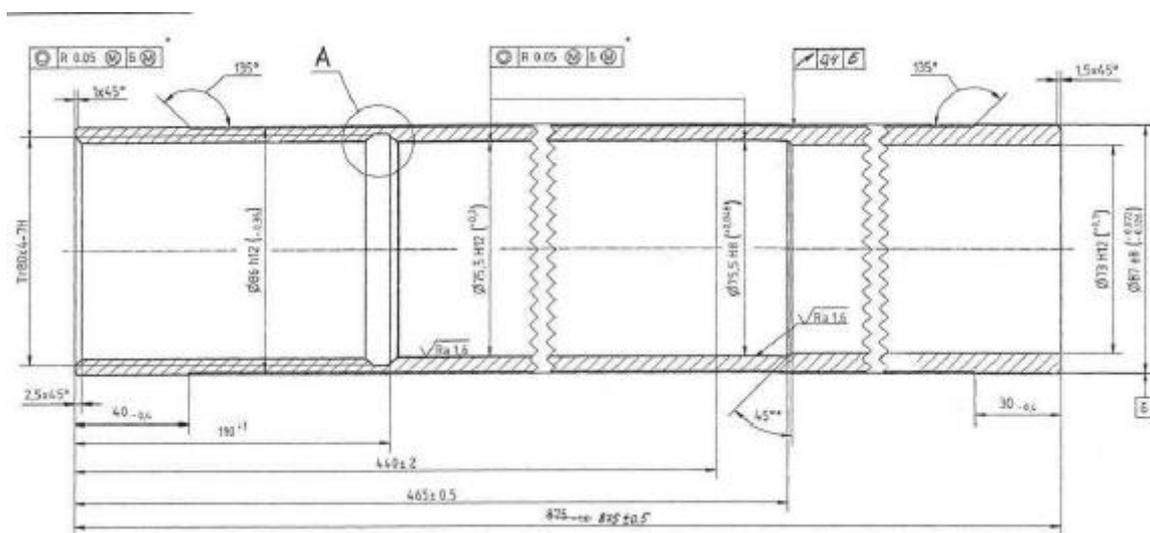


Рисунок 9 - Пример детали с использованием перехода - растачивания

Порядок проведения расчета на жесткость и резонансные режимы борштанги с различной ориентацией осей жесткости был следующим:

- расчет деформаций борштанги под действием силы резания с разной ориентацией осей жесткости инструмента;
- модальный анализ борштанг с разной ориентацией осей жесткости;
- гармонический анализ борштанг с разной ориентацией осей жесткости.

Для моделирования использовался метод конечных элементов. Для этого разработана трехмерная модель режущего инструмента (рисунок 10). Она состоит из более массивной державки, которая используется для фиксации инструмента в резцедержателе станка. Основная державка квадратного сечения, на конце которой расположен расточной инструмент-вставка.

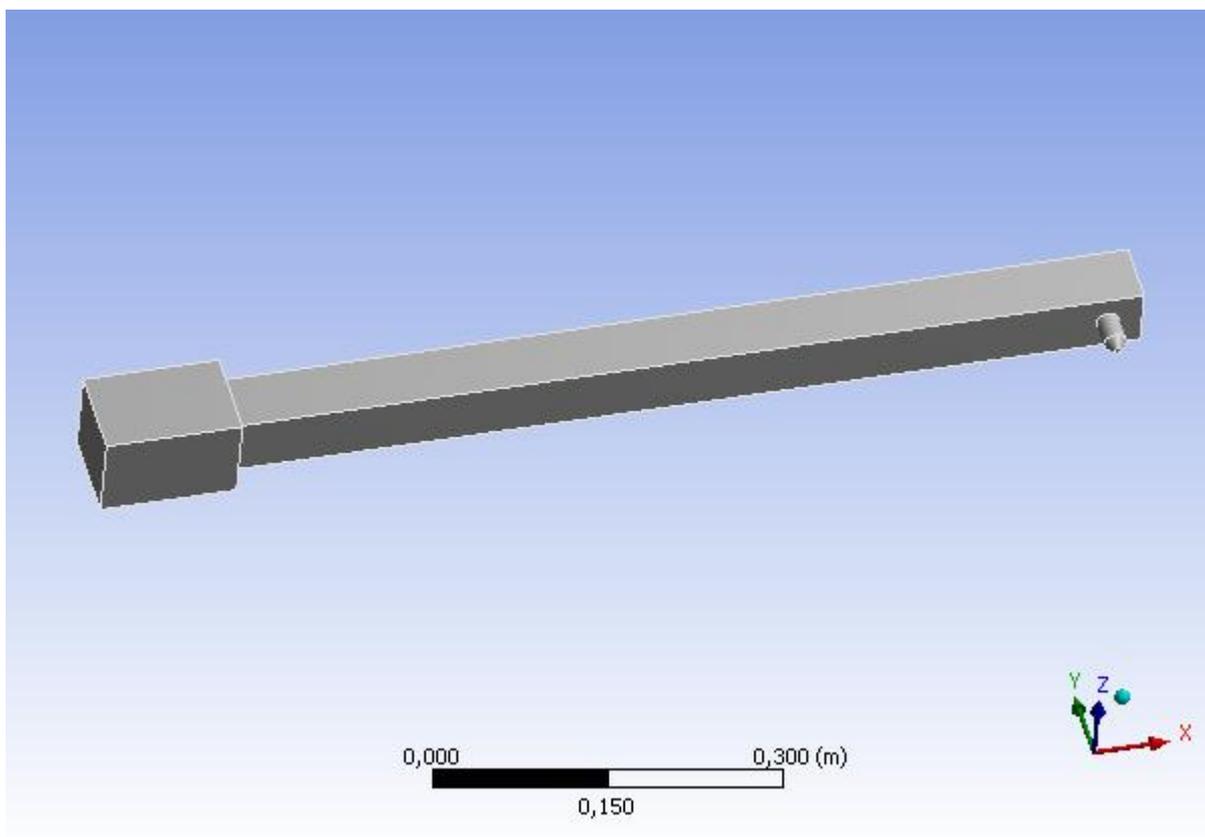


Рисунок 10 – Модель борштанги (1 вариант)

После создания трехмерной модели она экспортируется в расчетную среду.

В качестве материала выбрана конструкционная сталь.

Модель разбивалась на конечные элементы с размером сетки по умолчанию 0,003 м.

Условия заделки выбраны следующие. Для массивной части выбиралась плоскость параллельная расположению режущего инструмента вставки и задавалась как жесткая заделка.

Сила прикладывалась по вершине резца вставки. Вектор силы раскладывался по основным составляющим по осям x , y и z .

Величина соответствующих компонентов сил резания принималась равной 400, 800 и 1200 Н (рисунок 11).

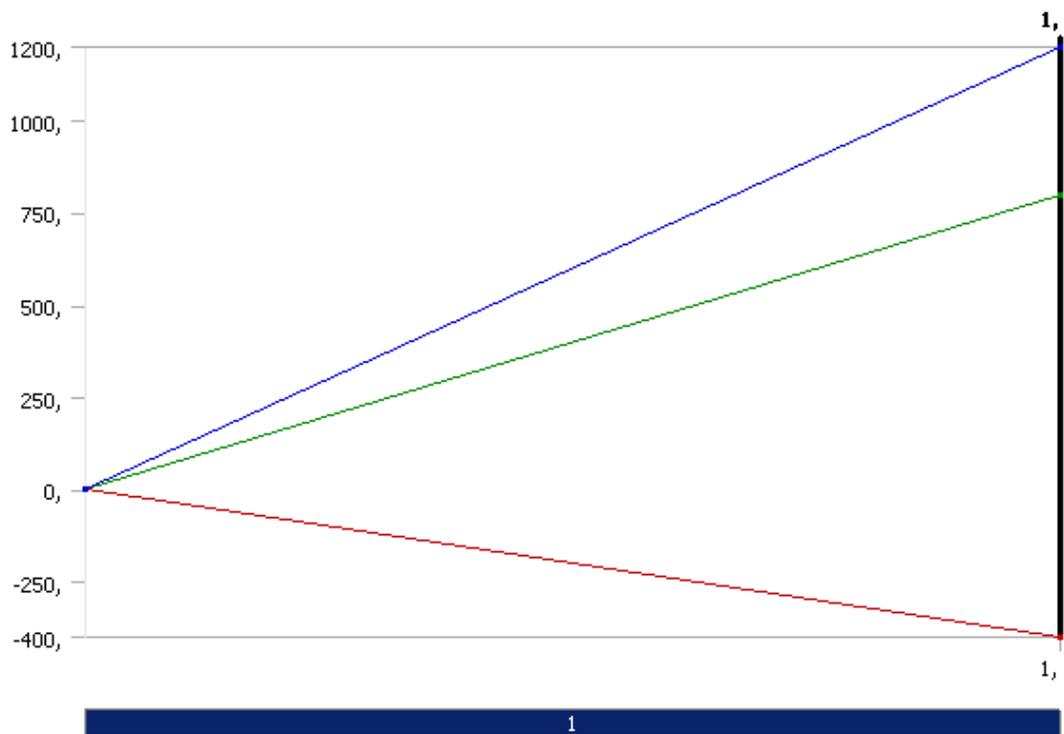


Рисунок 11 – Значения сил по координатам, приложенные к резу

В качестве результатов расчетов определялась общая информация на вершине реза, а также компоненты смещения вдоль осей x и z там же.

На рисунке 12 показана общая деформация для борштанги вариант первый.

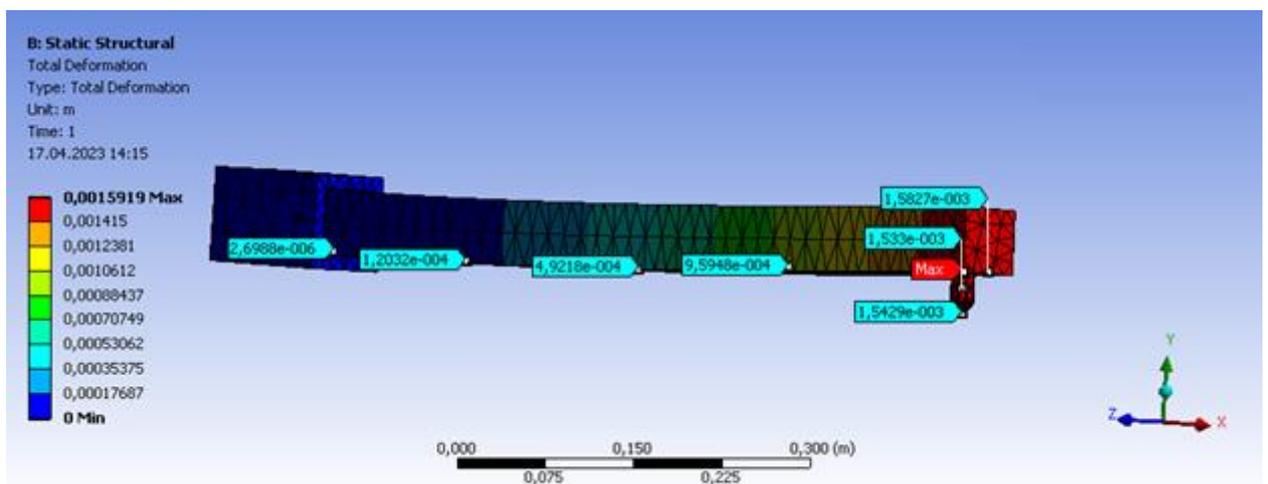


Рисунок 12 – Общая деформация по точкам для борштанги (первый вариант)

Это инструмент, у которого резец-вставка проходит перпендикулярно плоскости державки.

Вариант второй борштанги имеет расположение резца-вставки вдоль диагонали сечения державки.

Как видно, общая деформация составила 1,5 мм.

Для второго варианта инструмента величина деформации составит 1,5 мм (рисунок 13).

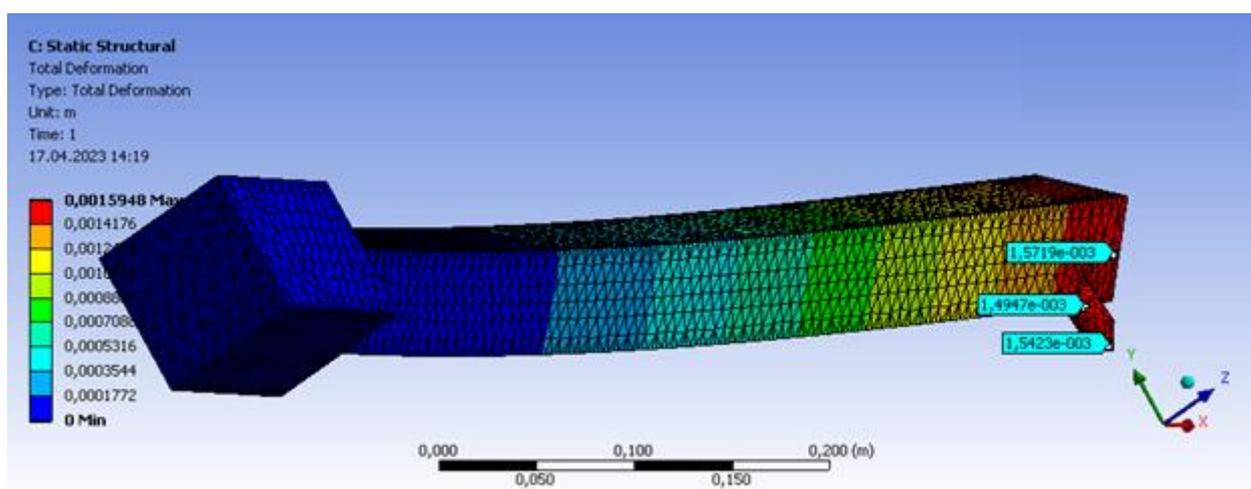


Рисунок 13– Общая деформация по точкам для борштанги (второй вариант)

Разница составляет четыре знака после запятой.

Рассмотрим деформации по осевым компонентам (рисунки 14 - 17). По оси x для второго варианта борштанги деформация равна 0,0001 м (рисунок 14). По оси y - 0,0008 м (рисунок 15), а по оси z - 0,0013151 м (рисунок 16).

Для первого варианта деформация по оси y равна 0,0007999 м (рисунок 17). По осевой z 0,001305 м.

Тут, как видно, второй вариант борштанги чуть-чуть уступает первому варианту по величине деформации. Разница составляет не существенную величину.

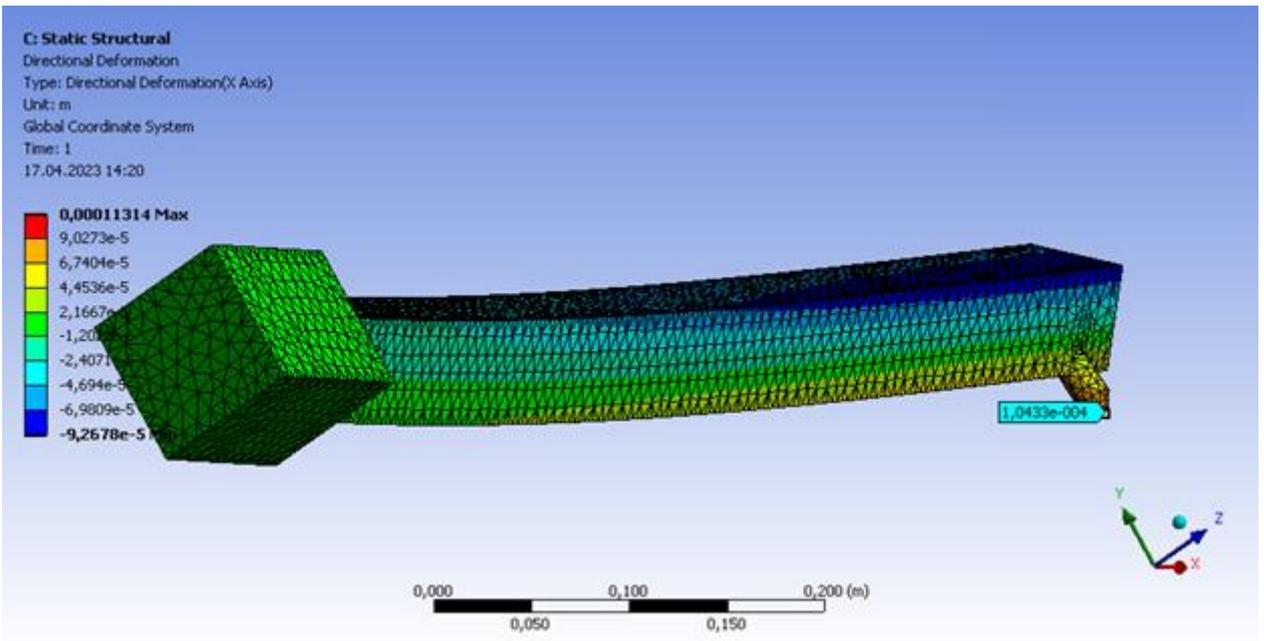


Рисунок 14 – Деформация по оси X для борштанги (второй вариант)

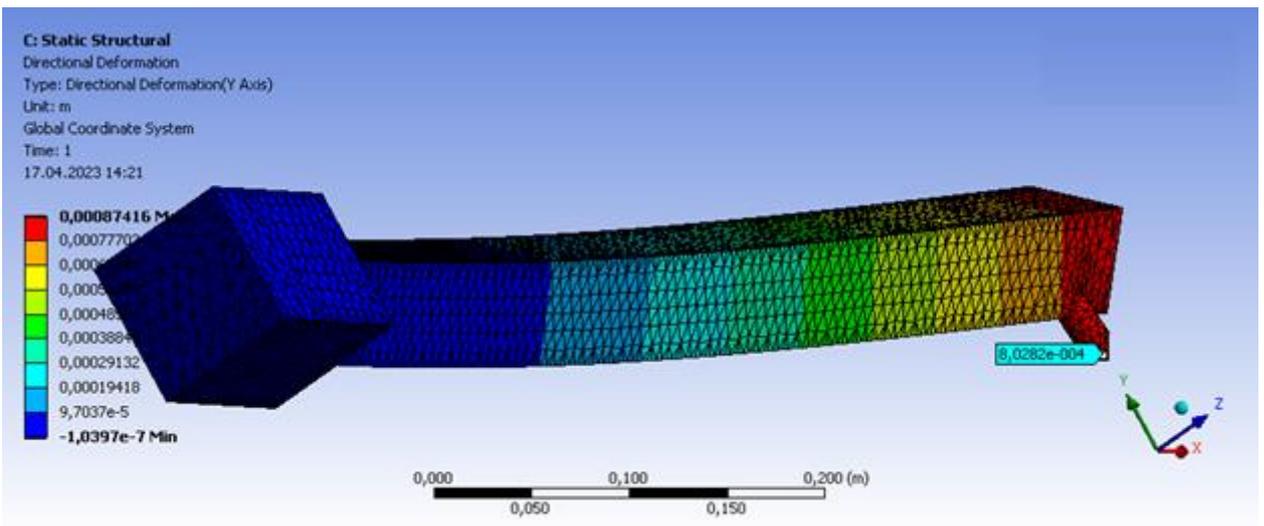


Рисунок 15 – Деформация по оси Y для борштанги (второй вариант)

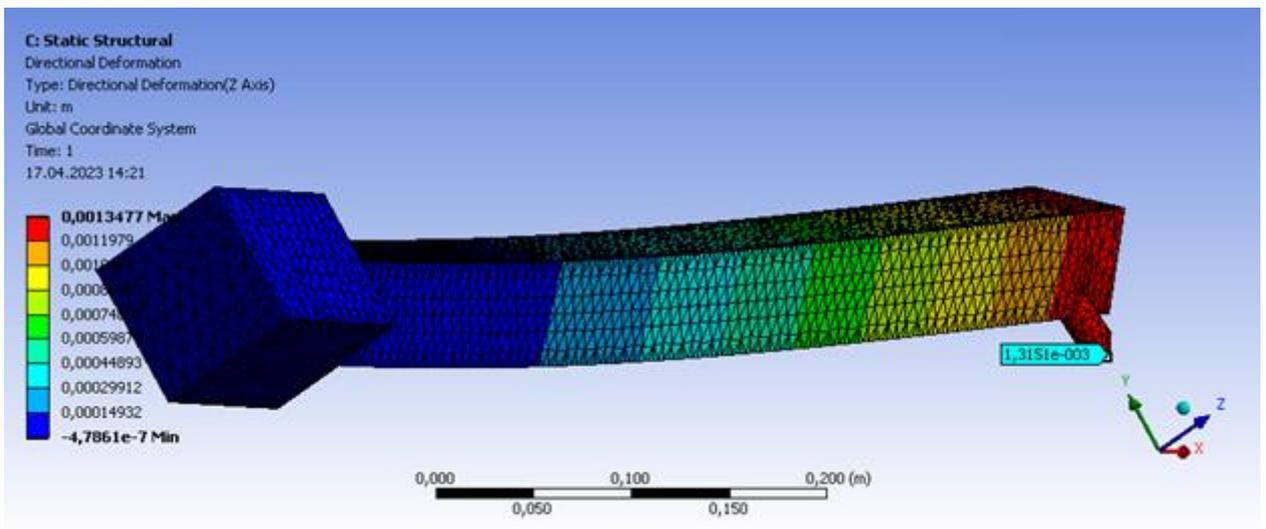


Рисунок 16 – Деформация по оси Z для борштанги (второй вариант)

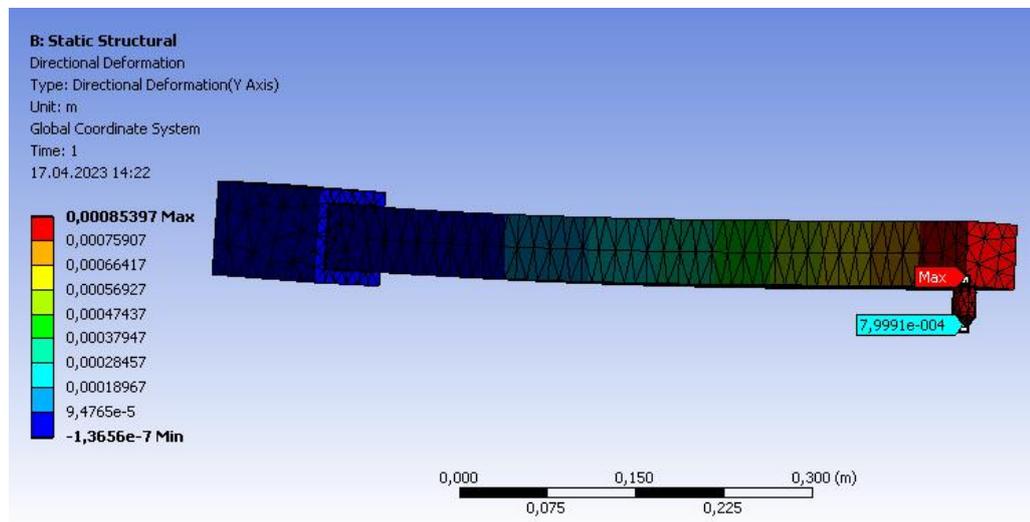


Рисунок 17 – Деформация по оси Y для борштанги (первый вариант)

Моделирование смещений для борштанги с зауженной державкой, тонкая часть которой расположена в одном направлении с резцом показало следующие результаты (рисунок 18).

Общая деформация намного больше – 4,5 мм. Это за счет увеличения деформации в направлении оси z – 4,2 мм. Для осевого направления x – 0,45 мм, а для y – 0,0059 мм.

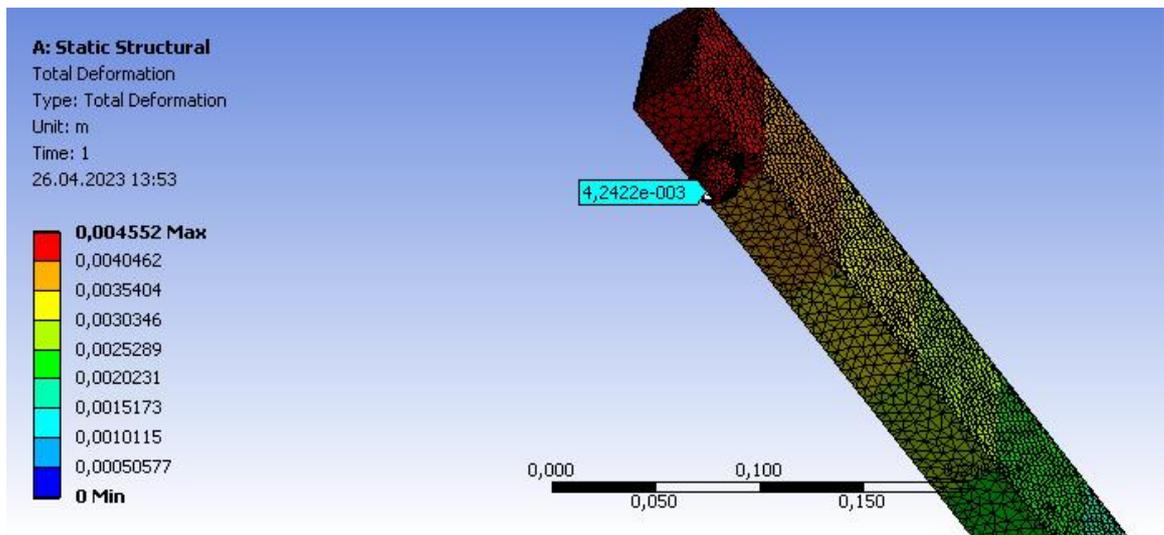


Рисунок 18 – Модель зауженной борштанги

Деформация по u для последнего варианта борштанги на порядок меньше, чем для первых двух вариантов.

3.2 Модальный анализ борштанг

Рассмотрим модальный анализ для вариантов конструкций борштанг. В обоих случаях система закрепления остается по той же самой плоскости утолщенной части державки.

Все остальные параметры выбирались такими же, как и для статического анализа.

Результаты расчета представлены на рисунке 19 и в таблице 6. Показано значение собственных частот колебаний (рисунок 20), соответствующих первым 6 гармоникам (таблица 6).

Полученные значения частот сгруппированы по двое.

Разница в частотах составляет значительную величину для первых трех пар расчетных значений.

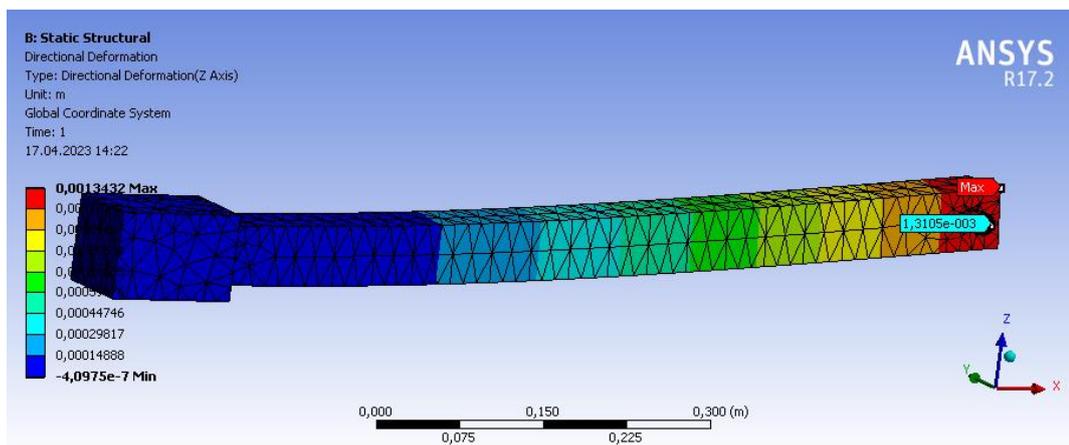


Рисунок 19 – Деформация по оси Z для борштанги (первый вариант)

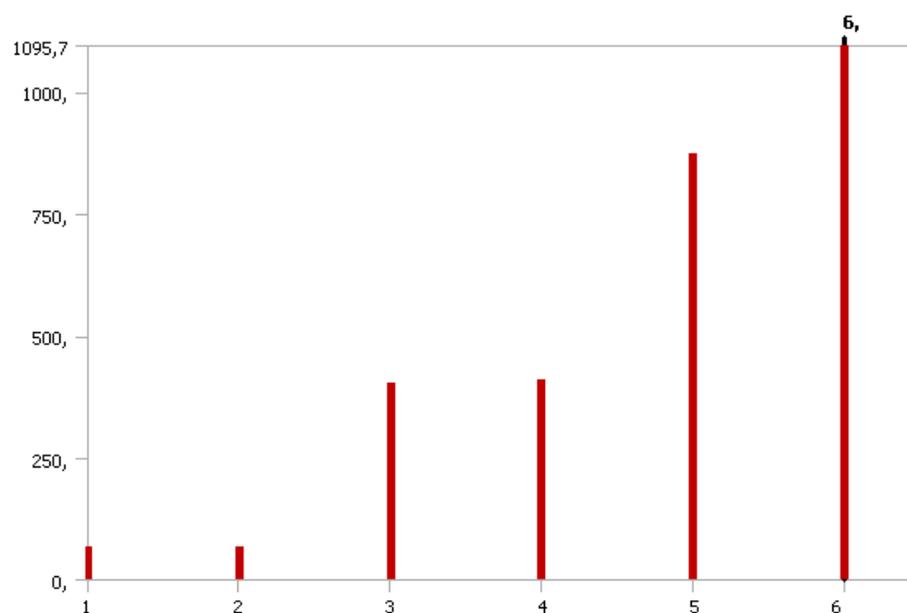


Рисунок 20 – Спектр частот для борштанги (второй вариант)

Таблица 7 – Частоты колебаний

Гармоника колебаний	Частота (2 вариант), Гц	Частота (1 вариант), Гц
1 мода	65,837	66,073
2 мода	66,538	66,283
3 мода	404,04	405,57
4 мода	409,1	407,84
5 мода	875,41	873,
6 мода	1095,7	1099,7

Для первых двух групп значения чуть выше для первой частоты, и чуть ниже для второй. Значения для третьей пары частот обратные. Первое чуть ниже, второе – чуть выше. Разница в результатах расчета получается не значительной.

Статический анализ конструкций борштанг на максимальное смещение по осям (X - рисунок 21, Y - рисунок 22, Z - рисунок 23) с другими параметрами разбиения сетки (0,002 мм).

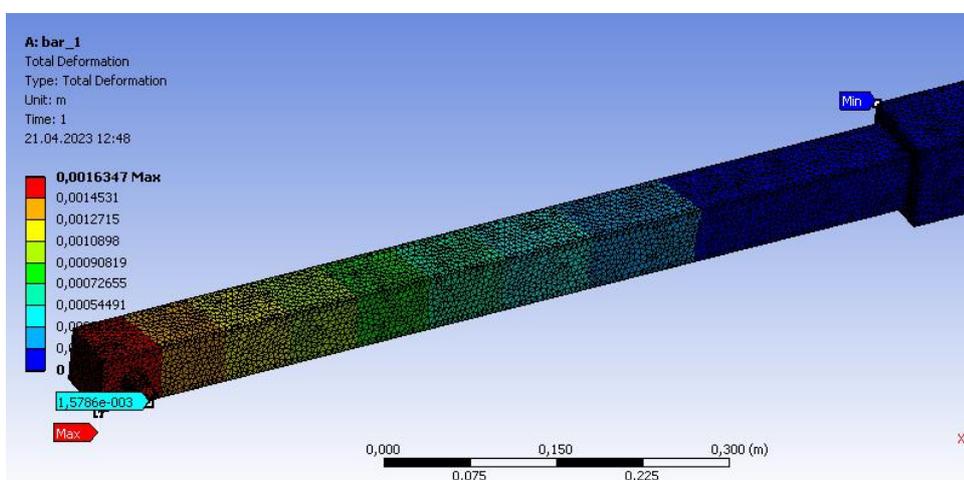


Рисунок 21 – Общая деформация борштанги (первый вариант)

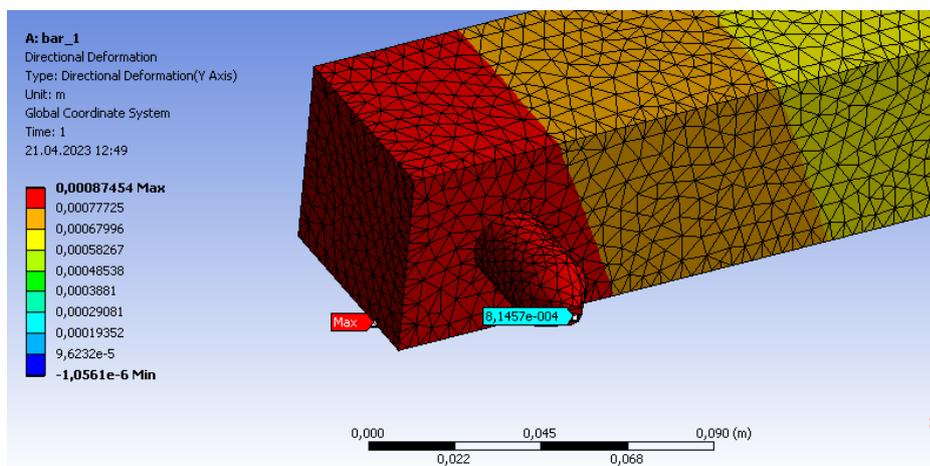


Рисунок 22 – Деформация по оси Y (первый вариант)

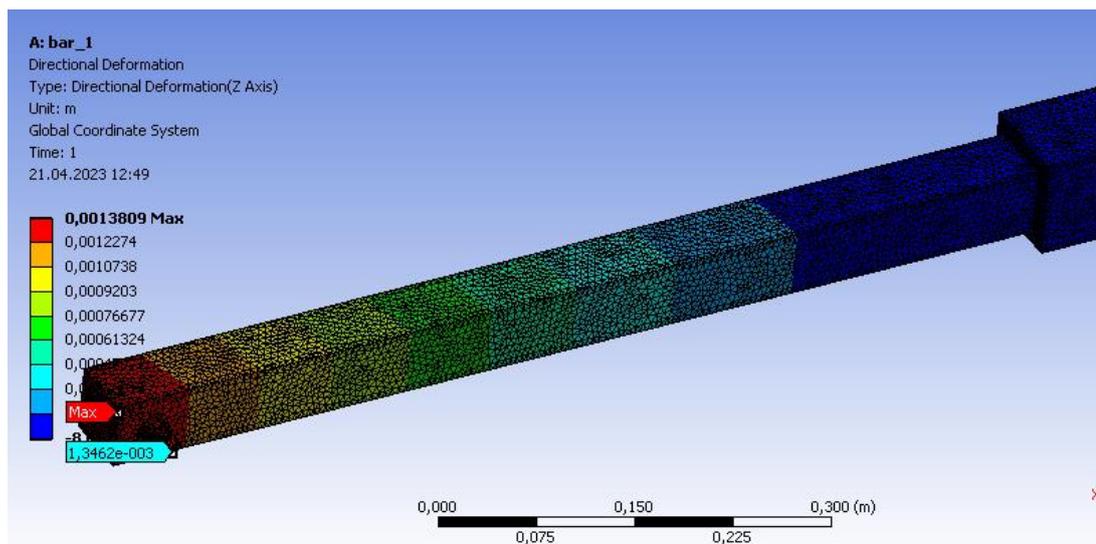


Рисунок 23 – Деформация по оси Z (первый вариант)

Для расчета деформаций по осям координат разница полученными значениями существенно и составляет порядка долей микрометра. Для оси y полученное значение для первого и второго варианта соответственно были 0,00081457 и 0,0008196 мм. По оси z - 0,0013462 и 0,0013546 мм. Общая деформация - 0,0015786 и 0,0015859 мм. Напряжения в заделке больше для первого варианта (21,7 и 21,6 МПа) (1 вариант - рисунок 24 и 2 - рисунок 25).

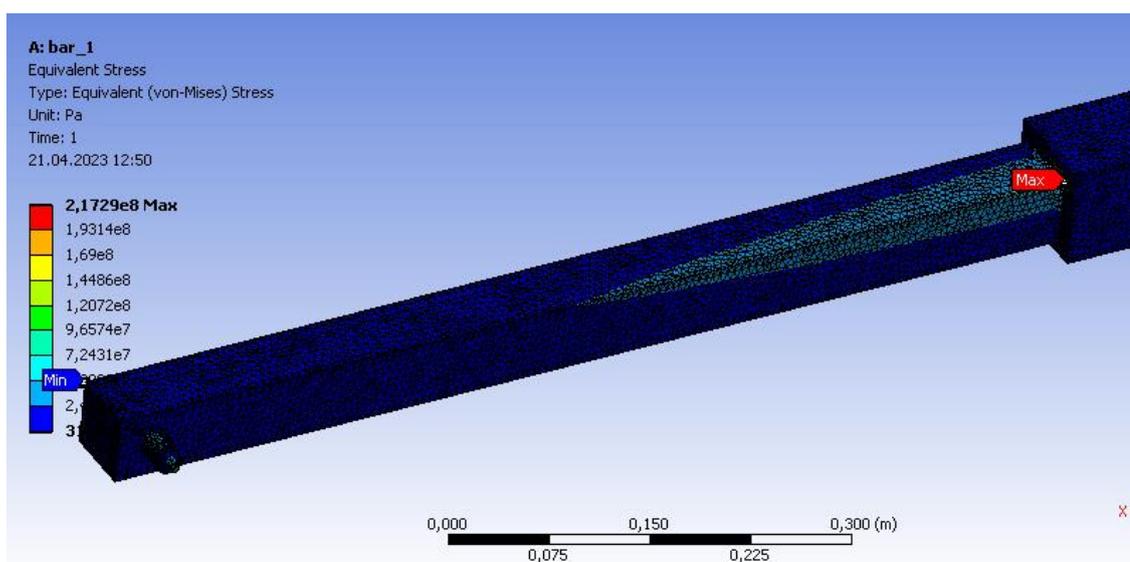


Рисунок 24 – Напряжения в борштанге (первый вариант)

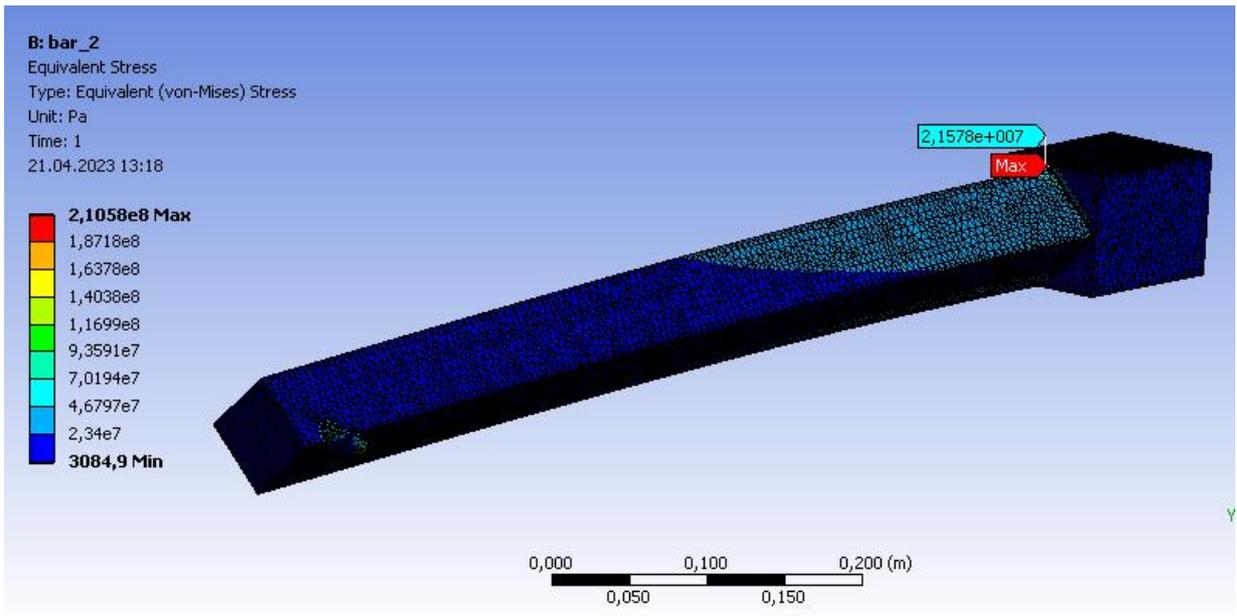


Рисунок 25 – Напряжения в борштанге (второй вариант)

Общая деформация на рисунке 26, по оси X – на рисунке 27.

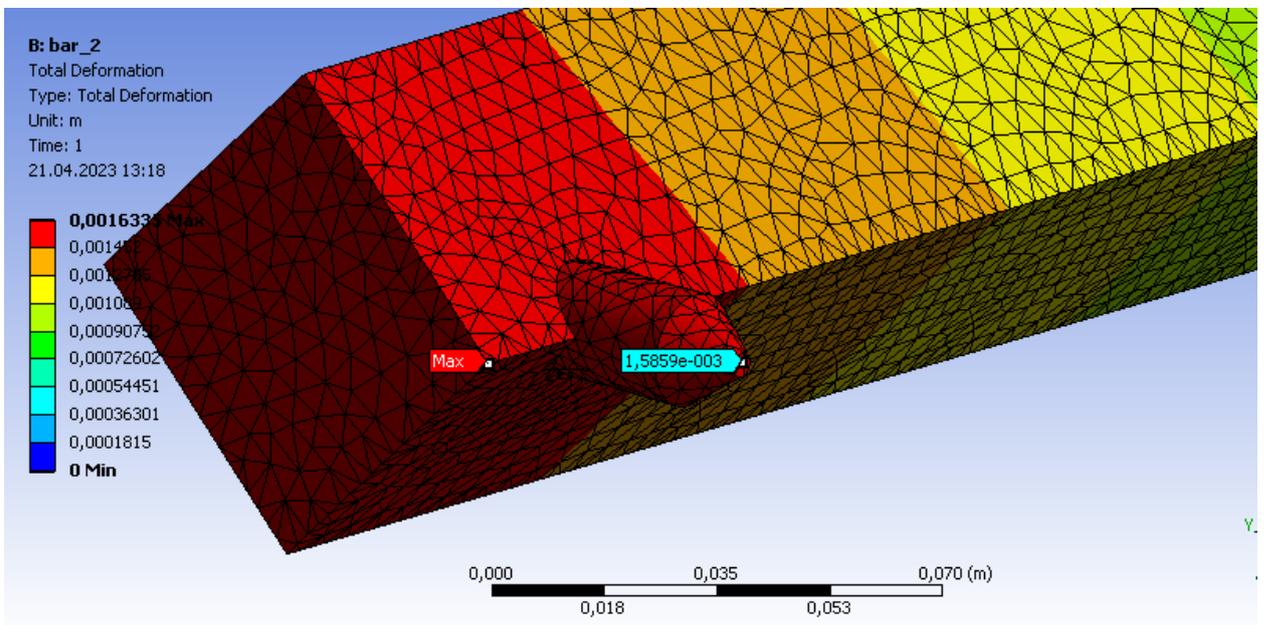


Рисунок 26 – Общая деформация (второй вариант)

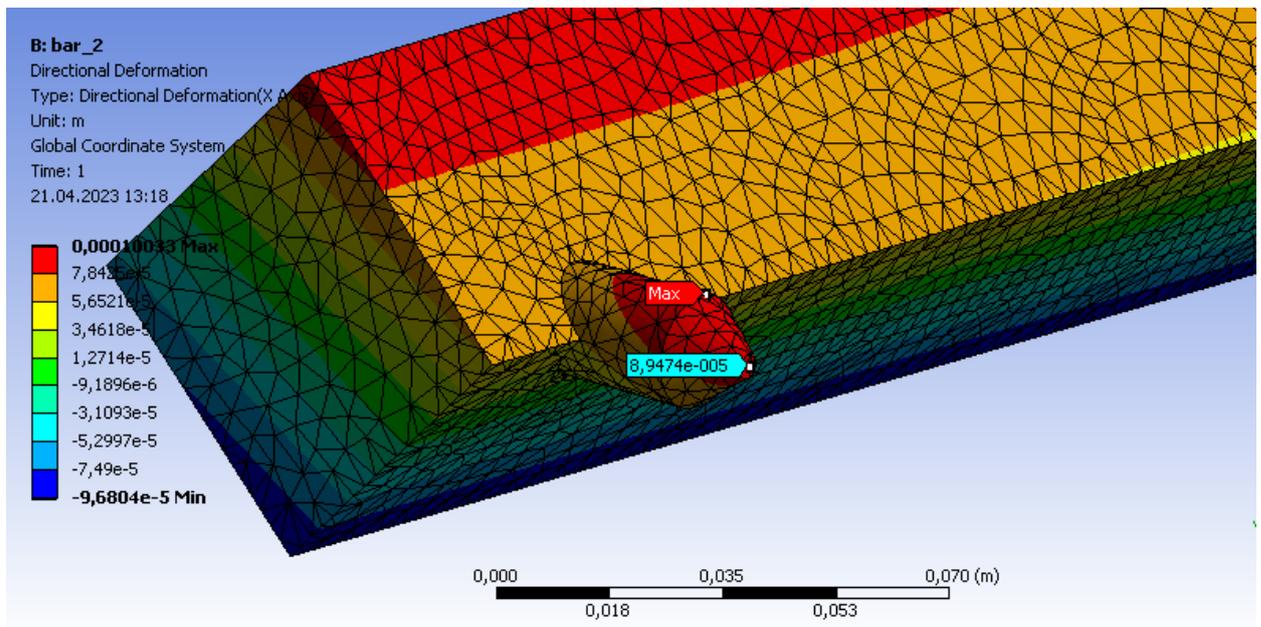


Рисунок 27 – Деформация по оси X (второй вариант)

Для повышения эффективности обработки расточной инструментом необходимо изменять положение осей жесткости (Y - рисунок 28 и Z - рисунок 29). Этого поворота державка с квадратным сечением не достаточно. Для нее форма должна иметь существенную асимметричность.

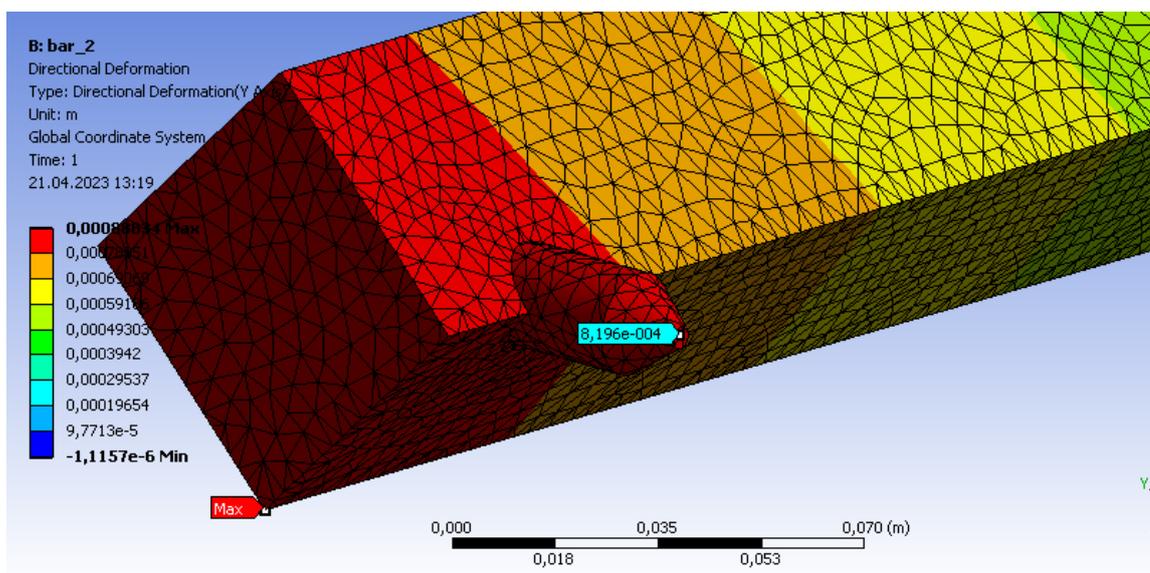


Рисунок 28 – Деформация по оси Y (второй вариант)

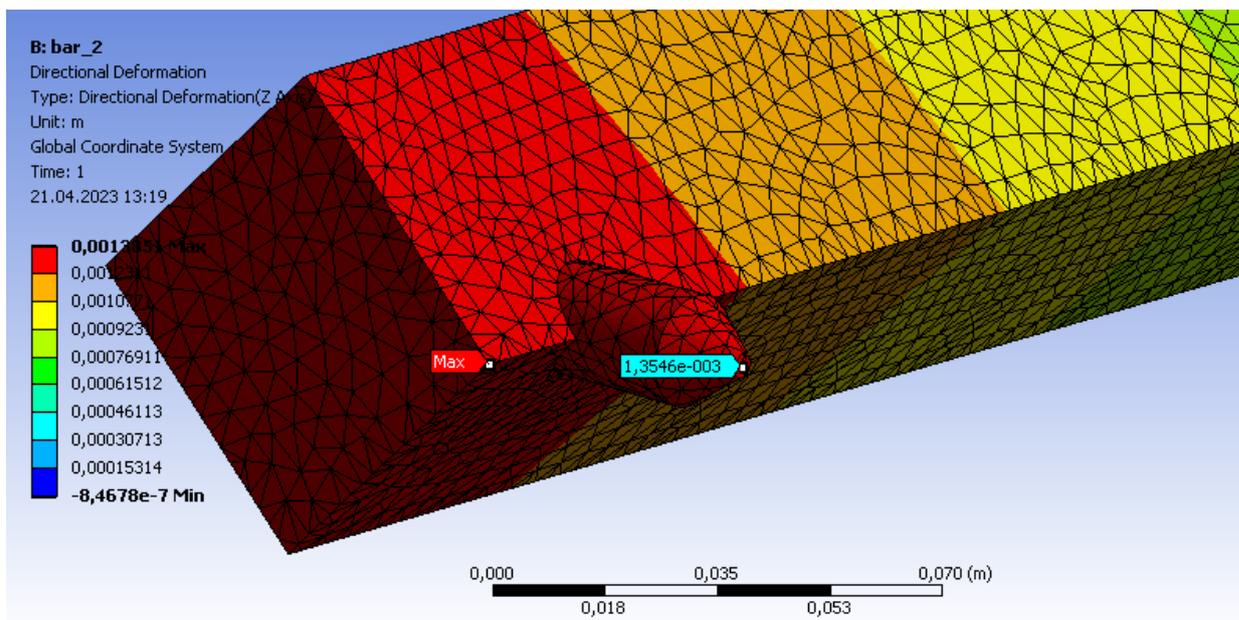


Рисунок 29 – Деформация по оси Z (второй вариант)

Рассмотрим вариант деформации борштанги с прямоугольным сечением, у которой одна сторона длиннее другой (подраздел 3.1).

3.4 Моделирование инструмента с направляющей

Известны двух опорные схемы установки расточного инструмента [19]. Используется, как правило, одна направляющая опора непосредственно перед обрабатываемым отверстием. Это позволяет позиционировать инструмент для обеспечения точности положения оси. Но, при обработке с увеличением вылета инструмента, увеличивается его деформация. Это приводит к погрешности формы обрабатываемого отверстия.

Для снижения этих деформаций используется вторая опора, расположенная за заготовкой. В случае использования расточных станков данная схема реализуется просто за счет установки соответствующих направляющих.

В нашем случае используется токарный станок. Предлагается нарастить вылет борштанги за счет направляющей части (рисунок 30).

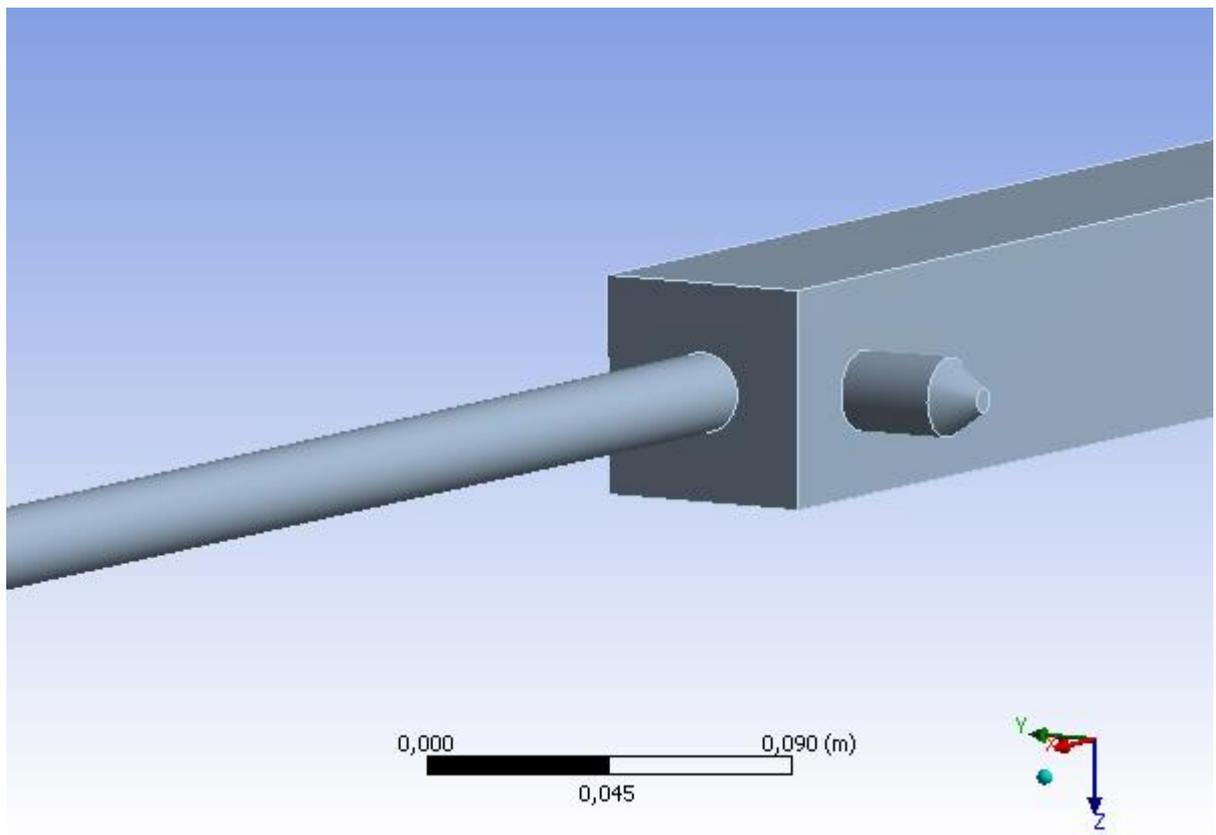


Рисунок 30 – Модель борштанги по 1 варианту с направляющей

Если обработка ведется на токарном станке, задача усложняется. Необходимо внутри патрона расположить опору, которая обеспечивала бы направление режущего инструмента за счет соответствующей оправки.

Опора должна быть вращающаяся, так располагается внутри шпинделя. Конструктивно она может быть выполнена в виде подшипника качения. Перед началом обработки крайней конец направляющей оправки должен быть сцентрирован в подшипнике, расположенным внутри патрона или шпинделя за заготовкой.

Выполнено моделирование деформации инструмента вставки расположенного в борштанге с направляющей. На конце направляющей оправки борштанги указана скользящая посадка со свободным перемещением вдоль оси инструмента. Все остальные расчетные параметры остаются теми же, что и для первого статического расчета.

Результаты моделирования показаны на рисунках 31-39.

На рисунках 31 и 32 показаны напряжения и деформации в борштанге с осями жесткости по первому варианту.

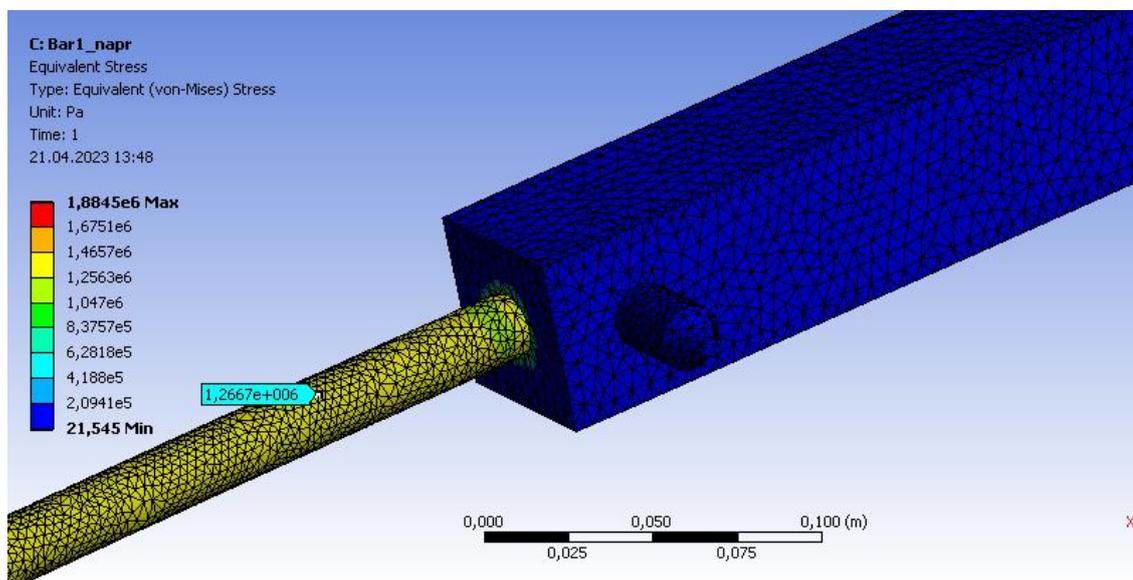


Рисунок 31 – Напряжения в борштанге с осями жесткости по первому варианту

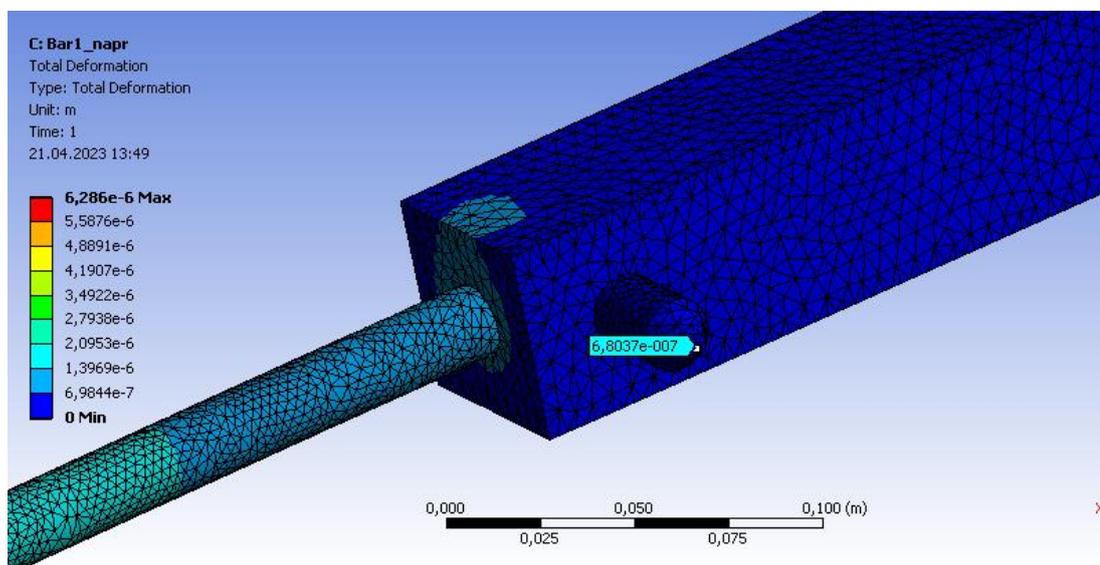


Рисунок 32 – Деформация в борштанге с осями жесткости по первому варианту

На рисунках 33 - 35 показаны деформации по осям x, y и z в борштанге с осями жесткости по первому варианту с направляющей.

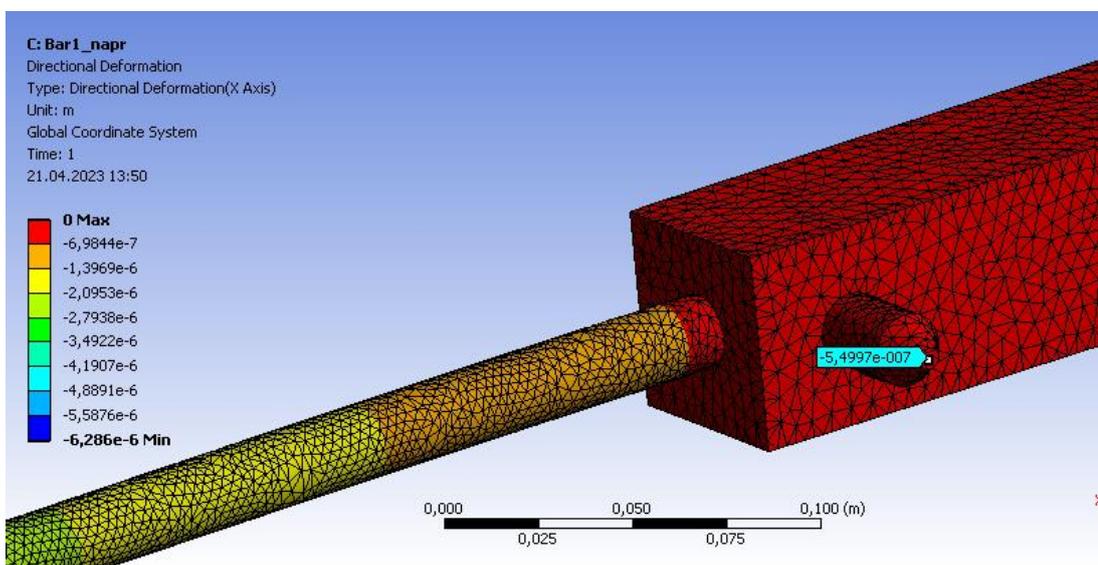


Рисунок 33 – Деформация в борштанге по первому варианту по оси X

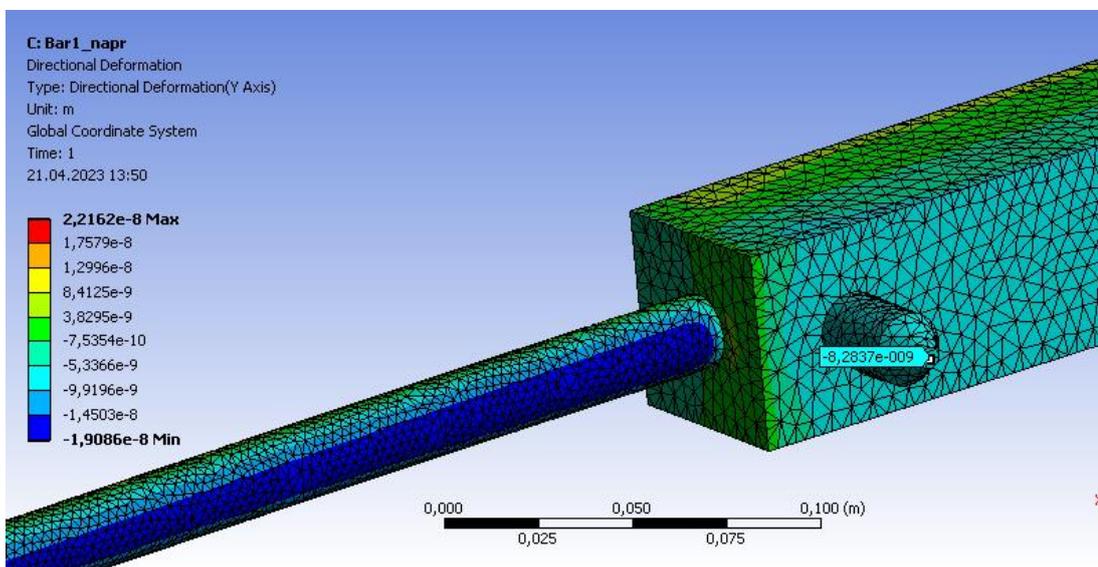


Рисунок 34 – Деформация в борштанге по первому варианту по оси Y

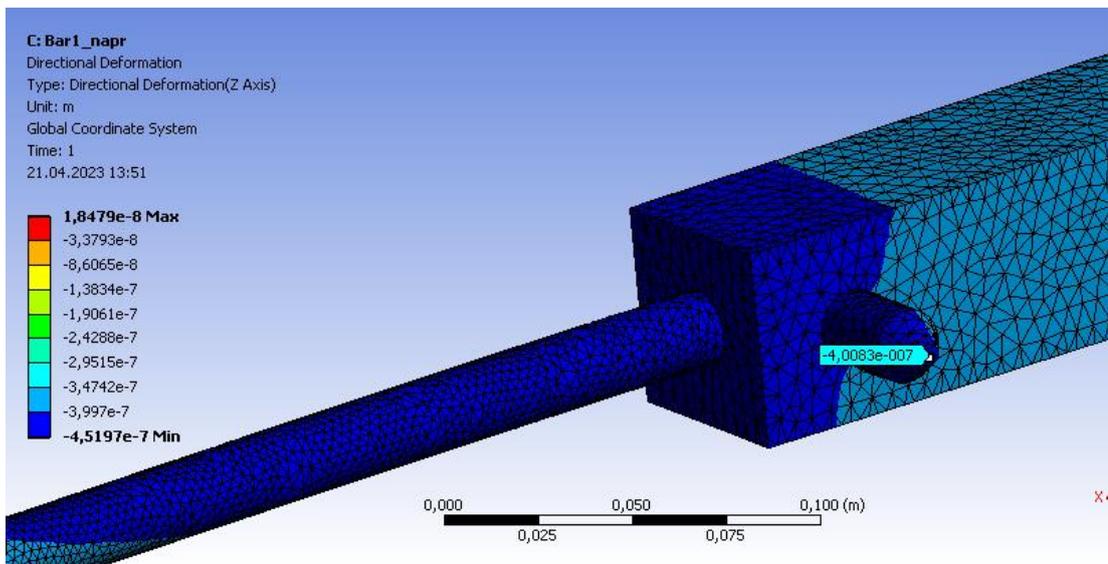


Рисунок 35 – Деформация в борштанге по первому варианту по оси Z

На рисунках 36 - 39 показаны деформации по осям x, y и z в борштанге с осями жесткости по второму варианту с направляющей.

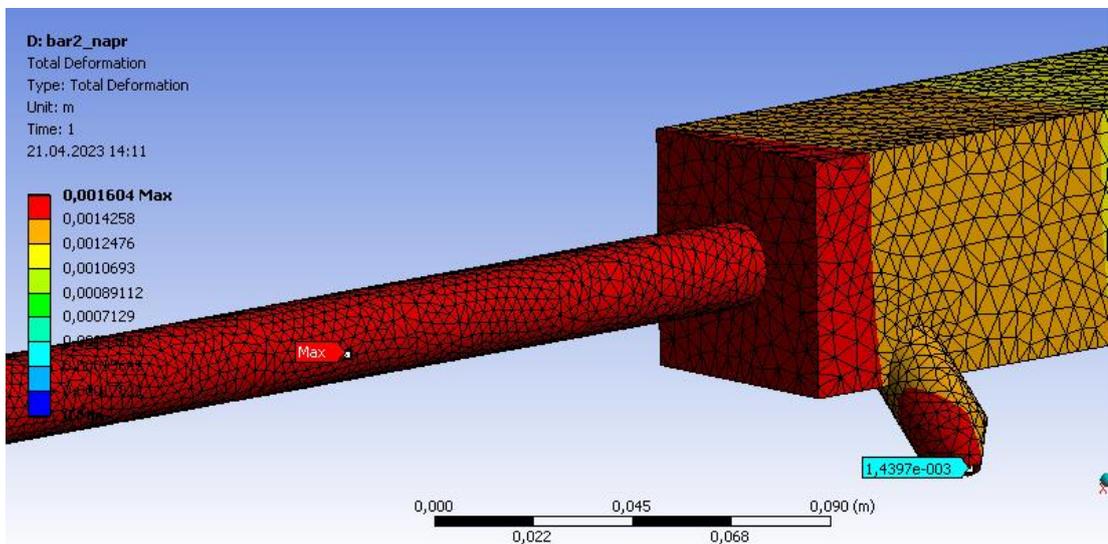


Рисунок 36 – Деформация в борштанге с направляющей по второму варианту

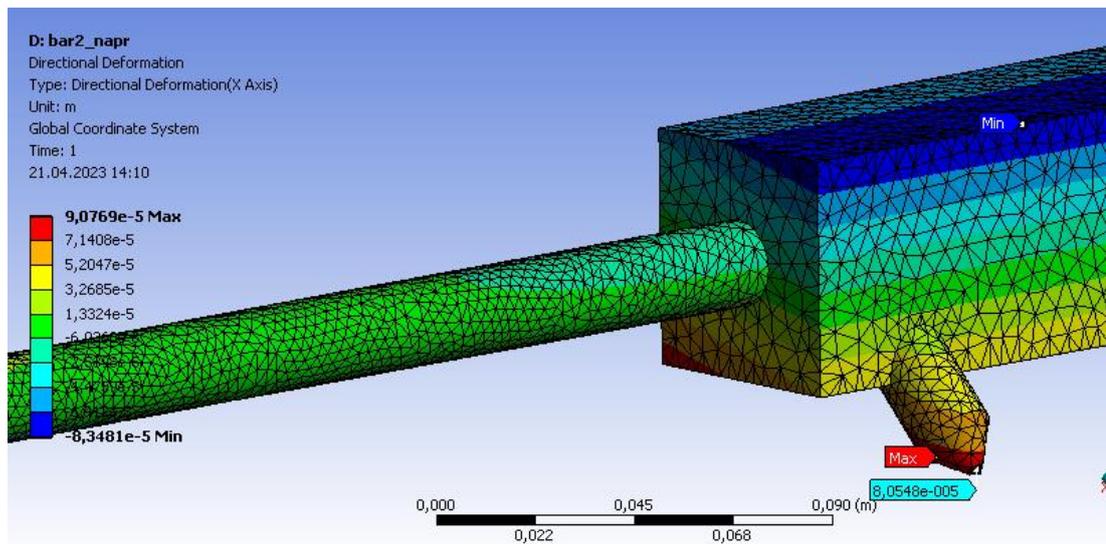


Рисунок 37 – Деформация в борштанге с направляющей по второму варианту по оси X

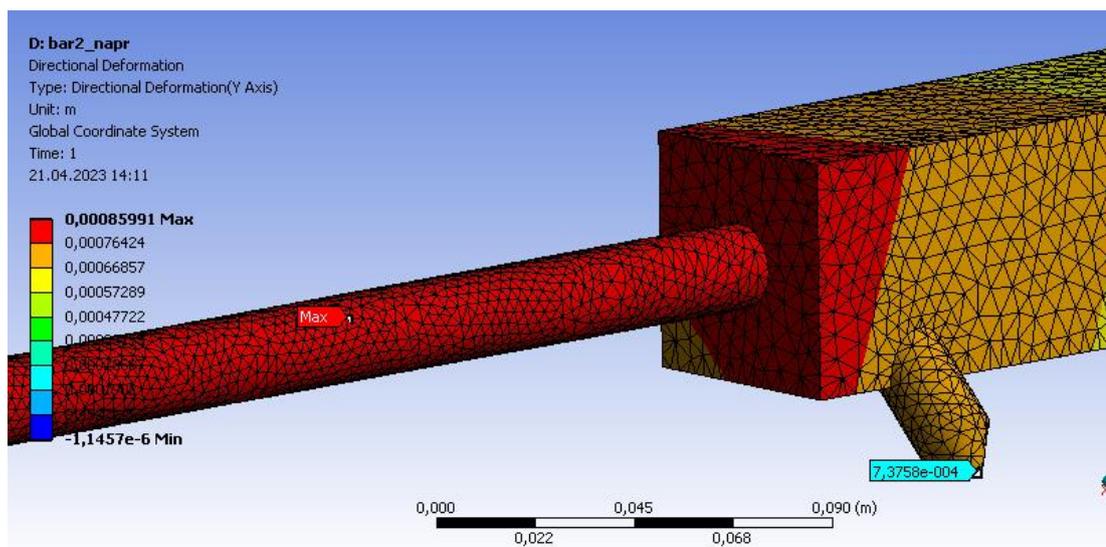


Рисунок 38 – Деформация в борштанге с направляющей по второму варианту по оси Y

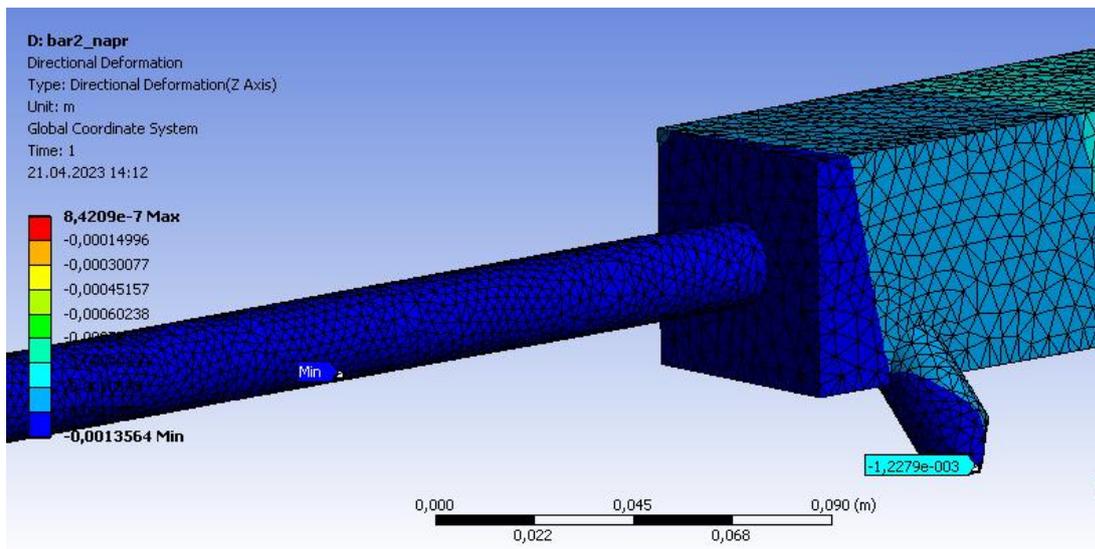


Рисунок 39 – Деформация в борштанге с направляющей по 2 варианту по оси Z

Для первого варианта по осям X, Y, Z и общая деформация составила 0,000000549 мм, $8,2837 \cdot 10^{-9}$ мм; $4,0083 \cdot 10^{-7}$ мм; $6,8 \cdot 10^{-7}$ мм.

Для второго варианта по осям X, Y, Z и общая деформация составила 0,00008054 мм, $7,3758 \cdot 10^{-4}$ мм; $1,2279 \cdot 10^{-3}$ мм; $1,4397 \cdot 10^{-3}$ мм.

В направляющей оправке напряжения будут 18,8 и 10,25 МПа (рисунок 40).

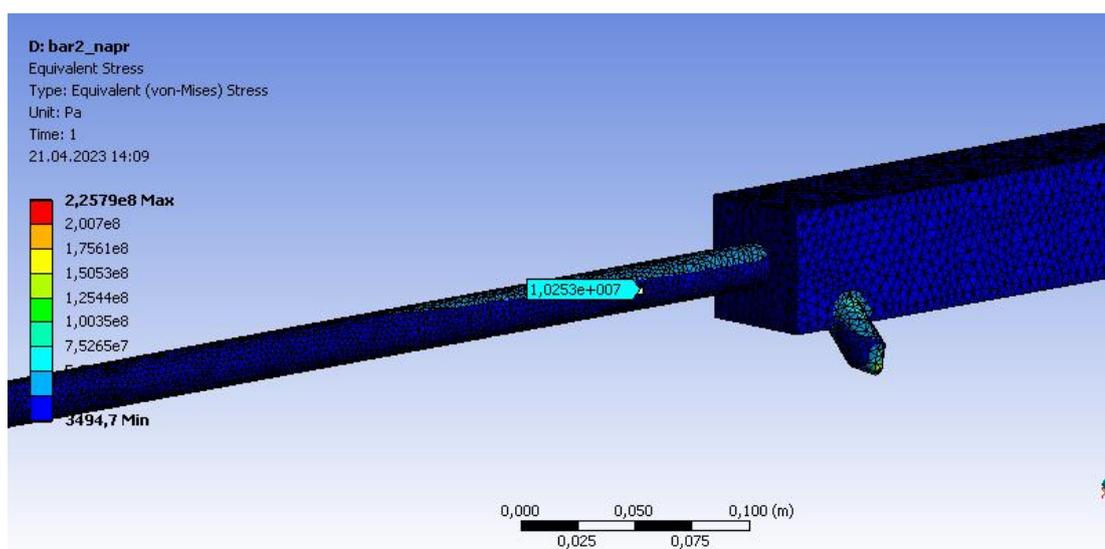


Рисунок 40 – Напряжения в борштанге с направляющей по второму варианту

С направляющей инструмент имеет более высокую жесткость, что обеспечивает меньшие деформации и смещает собственные частоты в более высокий диапазон.

3.5 Гармонический анализ борштанги с направляющей

Модальный анализ для борштанги по первому варианту показал результаты чуть отличающиеся от первого.

Гармонический анализ проводился с приложением сил переменной частоты в диапазоне от 30 Гц до 1100 Гц с равным шагом (таблица 7). Сила резания по осям была принята следующая. По оси X – 100Н, по оси Y - 200 Н, по оси Z – 500 Н.

При модальном анализе определяли собственные частоты колебаний. При гармоническом анализе частота изменения внешней силы задавалась на десяти расчетных значениях (рисунок 41).

Определялись деформации по осям на соответствующих частотах. Эти зависимости приведены на рисунке 42- для двух вариантов инструмента с направляющей.

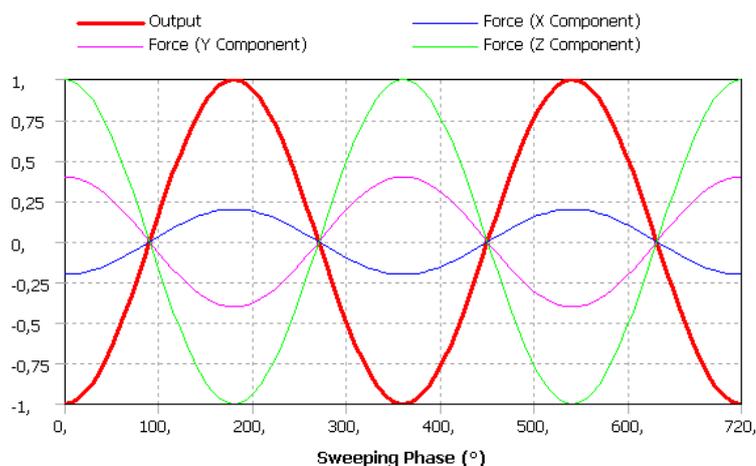


Рисунок 41 - Нагружение борштанги по направлениям осей переменной силой

Таблица 7 - Частота силы при гармоническом анализе

Этап	Частота, Гц
1 шаг	137
2 шаг	244
3 шаг	351
4 шаг	458
5 шаг	565
6 шаг	672
7 шаг	779
8 шаг	886
9 шаг	993
10 шаг	1100

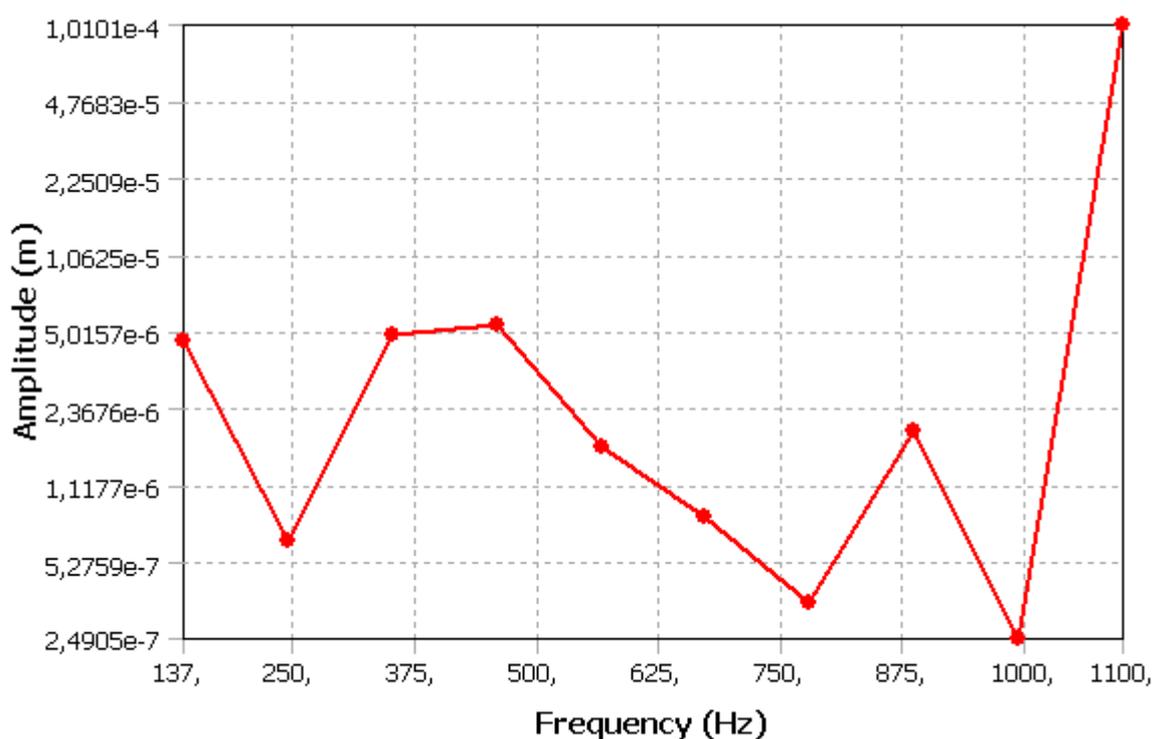


Рисунок 42 - Спектр колебаний на возмущения силой по оси X (частота в таблице)

Второй вариант борштанги с направляющей показал следующие результаты (рисунки 43 - 50). Наибольшие амплитуды были по осям X, Y, Z соответственно 3342,4 Па при 1100 Гц, 0,000056648 м при 137 Гц, 0,00055908 м при 886 Гц.

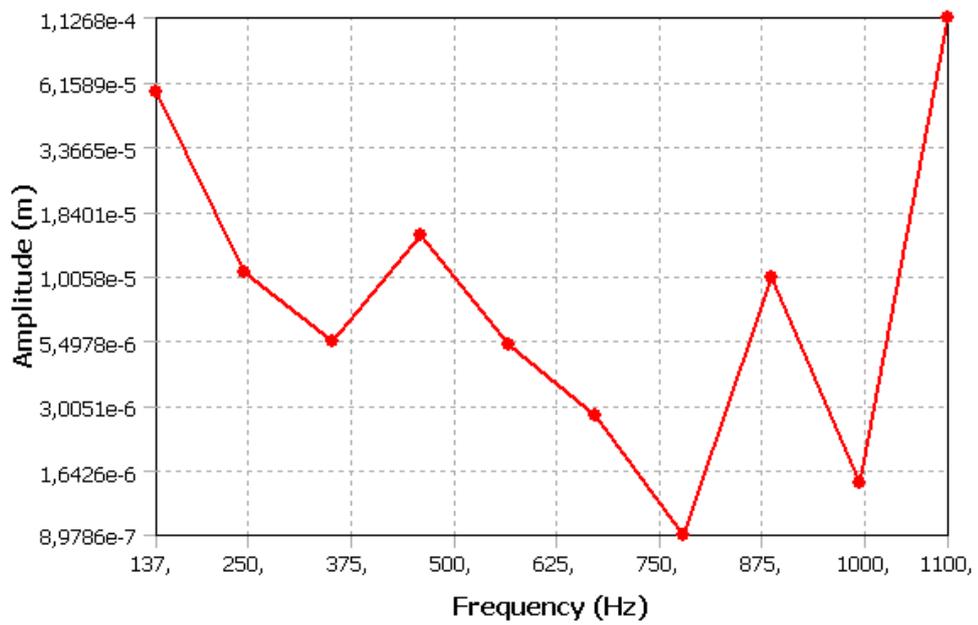


Рисунок 43 - Спектр колебаний на возмущения силой по оси Y (частота в таблице 7)

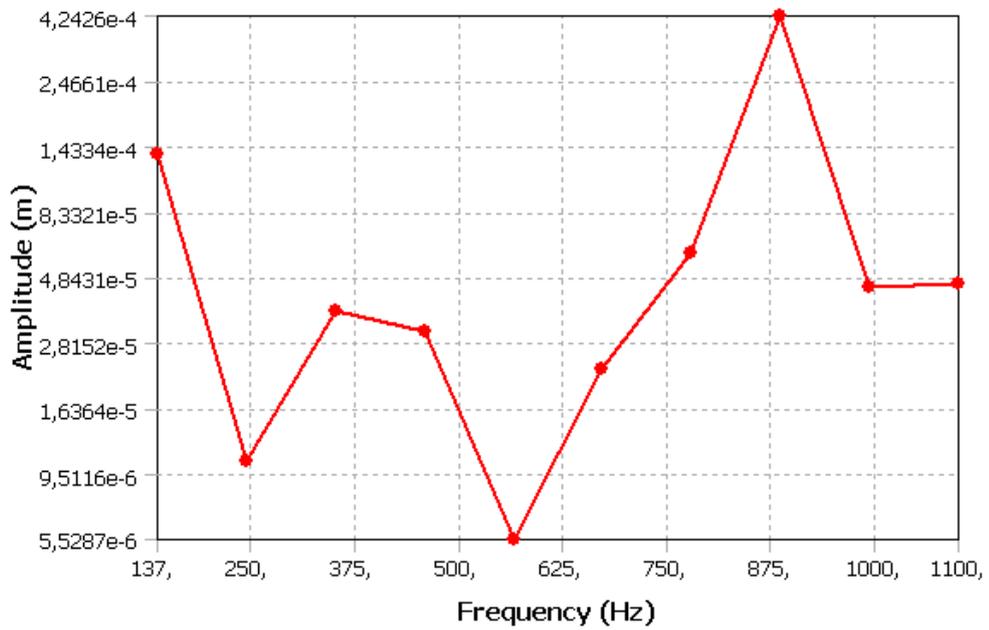


Рисунок 44 - Спектр колебаний на возмущения силой по оси Z (частота в таблице 7)

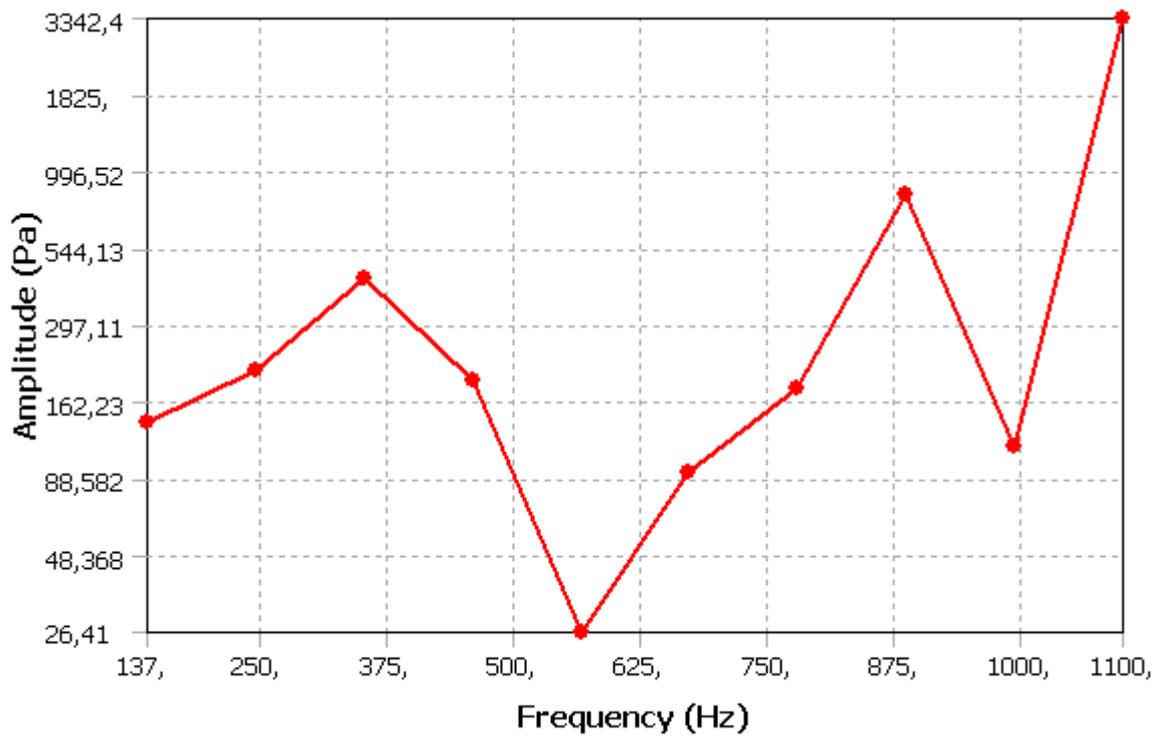


Рисунок 45 - Спектр колебаний на возмущения силой по оси X (частота в таблице 7)

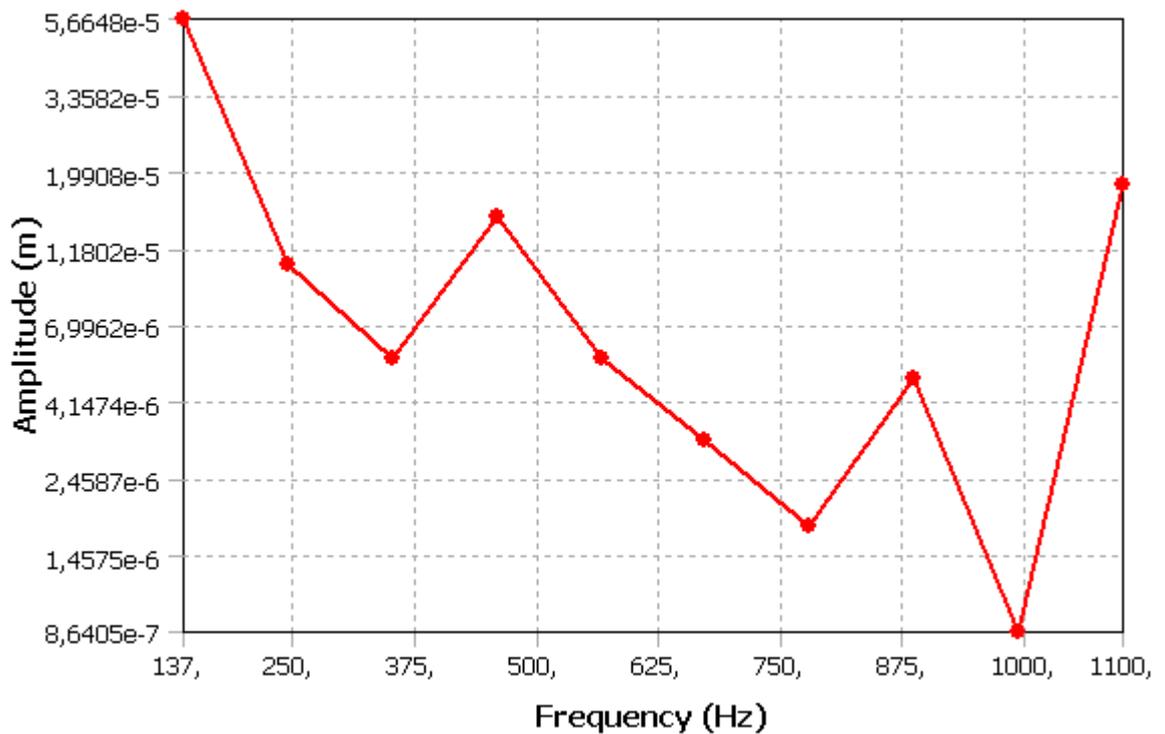


Рисунок 46 - Спектр колебаний на возмущения силой по оси Y (частота в таблице 7)

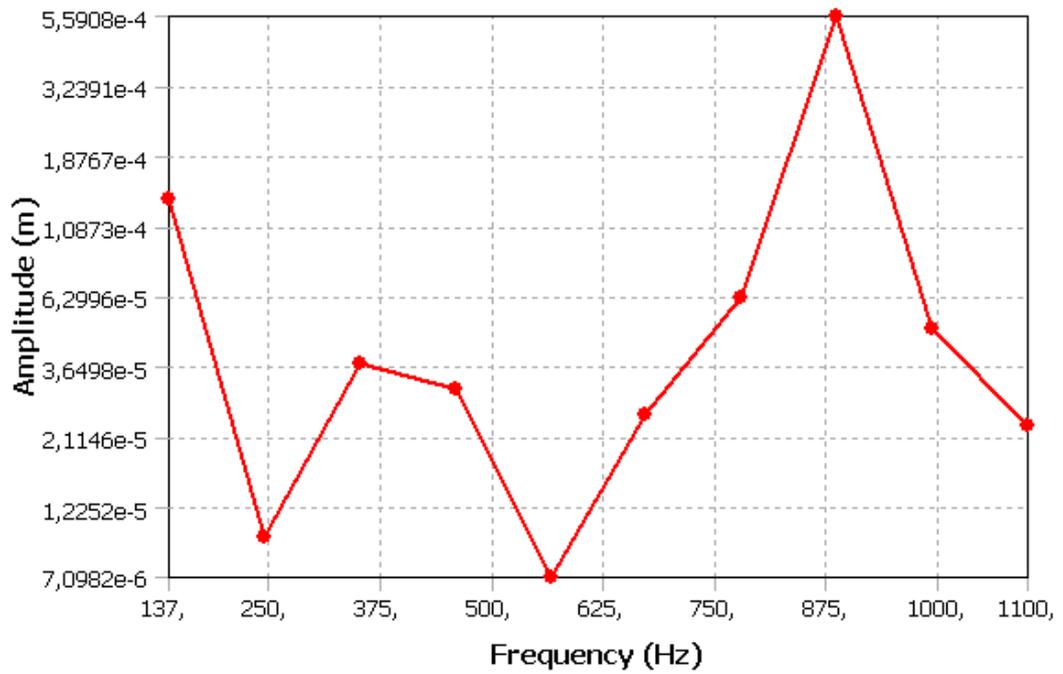


Рисунок 47 - Спектр колебаний на возмущения силой по оси Z (частота в таблице 7)

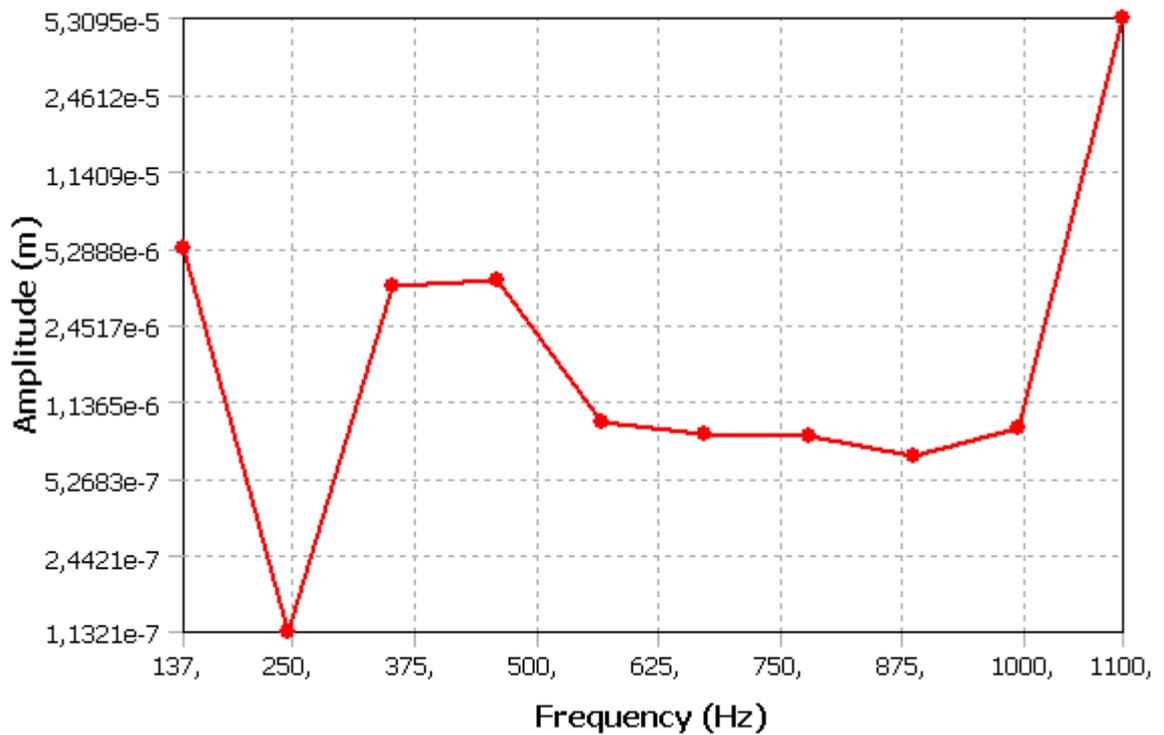


Рисунок 48 - Спектр колебаний на возмущения силой по оси X (частота в таблице 7)

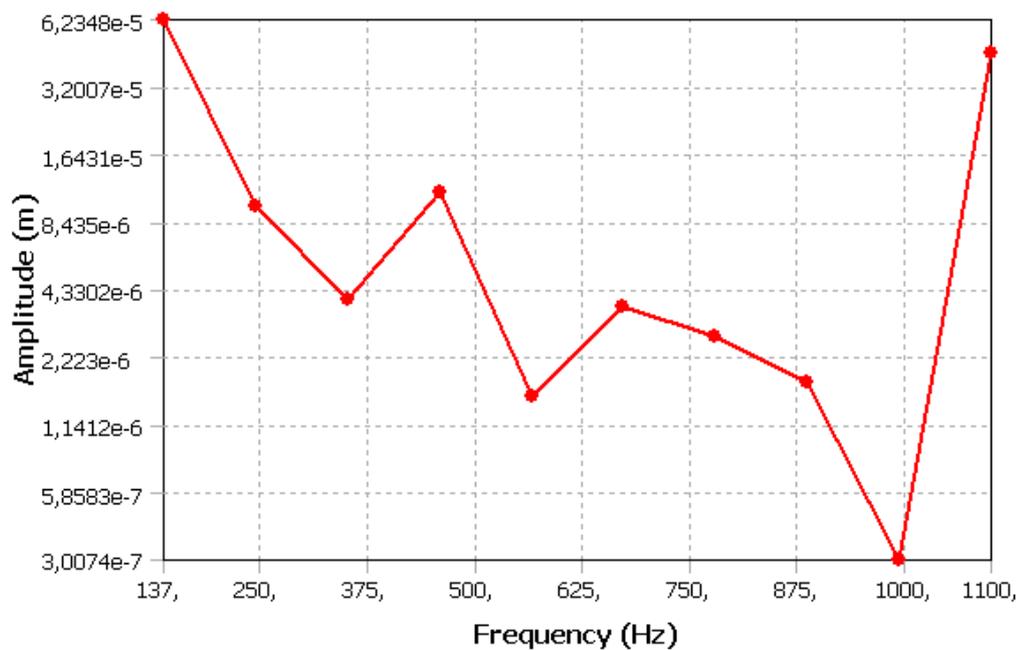


Рисунок 49 - Спектр колебаний на возмущения силой по оси Y (частота в таблице 7)

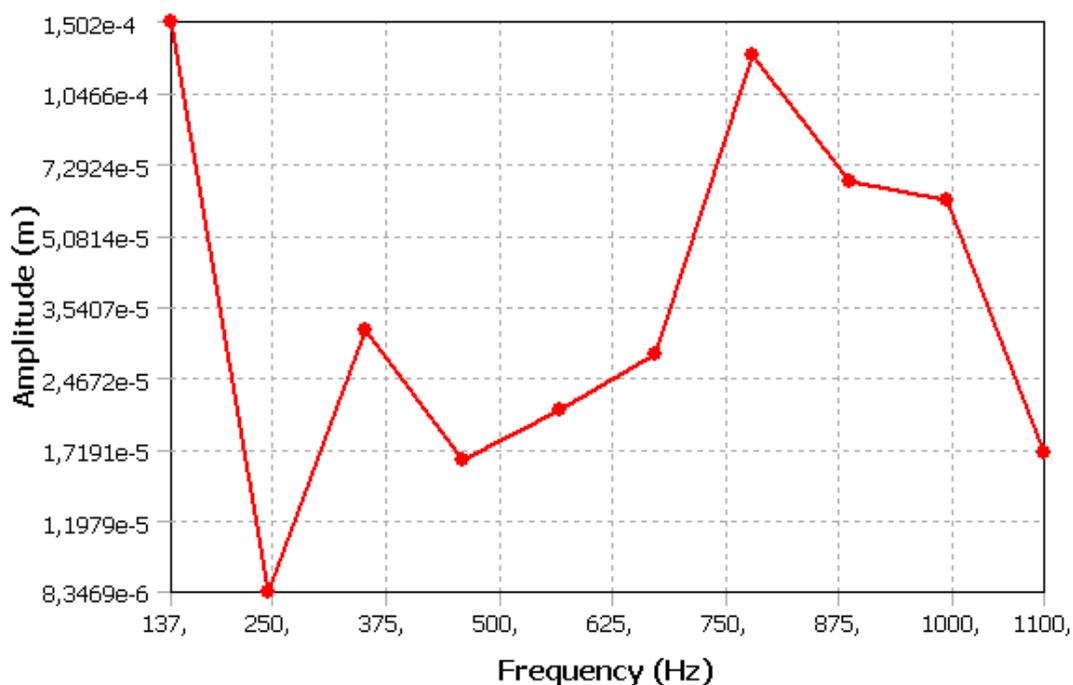


Рисунок 50 - Спектр колебаний на возмущения силой по оси Z (частота в таблице 7)

Гармонический анализ борштанги по второму варианту с направляющей. Результаты расчета следующие.

Наибольшие амплитуды были по осям X, Y, Z соответственно 0,000053095 м при 1100 Гц, 0,000062348 м при 137 Гц, 0,0001502 м при 137 Гц.

Выводы по разделу

Для уменьшения вибраций при растачивании глубокого отверстия в трубе из 12X18Н10Т расточным резцом с квадратным сечением державки необходимо предпринять ряд мер.

Использовать резец с правильной геометрией, который соответствует материалу и размерам трубы. Это позволит снизить нагрузку на режущий инструмент и сократить вибрации.

Подобрать оптимальные параметры резания, такие как скорость резания, подачу и глубину резания. Это поможет избежать автоколебаний, критических сил или резонанса при обработке.

Использовать специальные приспособления для фиксации трубы и режущего инструмента. Для инструмента это направляющая оправка. Для трубы – люнет. Это позволит уменьшить возможность биения и вибраций.

Провести точную настройку вылета режущего инструмента перед началом работы. Это поможет снизить возмущения при обработке. По высоте можно инструмент поднять чуть выше осевой линии. Это даст возможность снизить трение по задней поверхности.

4 Расчет виброустойчивости аналитическим методом

4.1 Актуальность аналитических методов

Расточная обработка является одной из важнейших операций механической обработки. Устранение вибраций при растачивании является сложной задачей при проектировании производственного процесса. При расточной обработке борштанга является слабым звеном, конструктивно имеет малую жесткость. Поэтому очень сильно влияет на шероховатость поверхности, износ инструмента и силы резания из-за колебаний или прогибов инструмента. При растачивании вибрация является основным фактором, влияющим на шероховатость и волнистость поверхности, износ инструмента и силы резания.

Возникают две задачи. Снижение вибрации при обработке и контроль уровня колебаний при резании.

Контроль вибраций в процессах механической обработки является важной составляющей повышения качества поверхности и устранения динамических возмущений, снижения износа режущего инструмента. Важно выбрать подходящий станок, чтобы уменьшить или свести к минимуму колебания в процессе обработки.

Размер расточной борштанги определяется на основе соотношения L/D (отношение длины к диаметру). Данные экспериментов с различными соотношениями показали, что наилучшее соотношение L/D равно 3. Все, что больше, приводит к вибрациям.

Шероховатость поверхности является одним из важных факторов качества поверхностного слоя. На шероховатость поверхности влияют различные параметры, такие как материалы инструмента и заготовки, силы обработки, жесткость технологической системы. Также может влиять ударная вязкость, демпфирование.

При обработке резанием непосредственное измерение сил резания в режиме реального времени, вибраций обрабатываемой заготовки и инструмента является сложной технологической задачей и требует сложной аппаратуры и настройки.

В современных исследованиях применяют бесконтактные лазерные виброметры для измерения вибраций вращающихся заготовок и инструмента. Использование такого типа датчиков является удобным и точным типом измерительного устройства. Имеют высокое быстродействие по сравнению с другими устройствами для измерения вибрации, такими как акселерометры.

Лазерный доплеровский виброметр измеряет вибрацию в виде сигналов акустооптического излучения, а для получения характеристик из данного сигнала, проводится анализ в частотной области. В частности использовался быстрое преобразование Фурье. При обработке различных твердых материалов необходимо учитывать три основных фактора, таких как сила резания, шероховатость обработанной поверхности и износ инструмента.

Сила резания зависит от комплекса параметров обработки, таких как скорость резания, подача, глубина резания и геометрических параметров режущей части. К ним относятся угол наклона режущей кромки, главный и вспомогательный углы в плане, передний и задний углы, радиус режущей кромки, радиус при вершине резца. Также влияют материал режущей части и материал заготовки.

Общепринято по резанию влияние параметров процесса обработки на силы резания следующее. Подача и глубина резания оказывают значительное влияние на силу резания и мощность резания. Скорость резания не оказывает существенного влияния на силы, и, более того, может способствовать снижению силы резания. Глубина резания оказывает наибольшее влияние на силу резания.

Разработка статистических и математических моделей процесса обработки важна для обеспечения оптимальных условий резания с целью получения качественной продукции с минимальными производственными

затратами и трудоемкостью. Оптимизация технологических факторов направлена на повышение эффективности производственного процесса.

Исследования влияния геометрических параметров режущего инструмента на шероховатость поверхности показывают следующее. Радиус при вершине резца и углы в плане инструмента являются главными факторами, влияющими на чистоту поверхности.

Использование множества разных датчиков (акселерометров), невозможно для измерения вибрации вращающихся объектов. Использование бесконтактных датчиков вибраций обеспечивают упрощение экспериментальной установки.

4.2 Расчет виброустойчивости аналитически

Процесс механической обработки направлен на повышение точности исходной заготовки. Это процесс многоступенчатый для поверхностей, которые имеют высокие требования по точности размеров, расположения и формы. В отдельных случаях поверхности могут иметь низкие требования по точности, но высокие требования по параметру микронеровностей. Поэтому в таких случаях тоже необходимо использовать много переходную технологию.

Точность исходной заготовки не соответствует даже самым минимальным требованиям, указанным на чертеже детали. Формирование геометрической формы определяется постепенным прохождением заготовки по этапам технологического процесса. Разнообразие конструктивных форм обрабатываемых поверхностей требует применения различных технологических методов обработки. Они реализуются при различных кинематических схемах снятия припуска. В одних случаях могут вращаться заготовки, в других обрабатывающий инструмент. И в том, и другом случаях возникают динамические возмущения в технологической системе.

Процесс обработки традиционными технологиями заключается в отделении слоя материала от основного материала заготовки. Фактически это

управляемый процесс разрушения поверхностного слоя с заданными параметрами. Этот процесс имеет сложную физическую природу. В ходе обработки возникают процессы упругой и пластической деформации, процессы трения, разрушения, нагрева. Причем все они имеют не стационарный характер, то есть изменяются во времени.

Все указанные изменения во многом носят случайный характер. Это связано с тем, что на температурные и силовые параметры процесса резания влияет множество независимых случайных факторов. Это состояния технологического оборудования. Оно определяется общей компоновкой станка и взаимосвязями различных силовых и направляющих элементов оборудования, а также текущим его состоянием. Это степень износа различных подвижных элементов, состояние смазки и смазочной системы, уровень соответствия настройки станка для выполняемых работ.

К факторам, влияющие на процесс обработки, относятся и параметры заготовки. Точность размеров заготовки и распределение пространственных погрешностей вместе со структурой и физико-механическими свойствами материала заготовки определяют параметры упругопластического деформирования в зоне резания. От них также зависят особенности разрушения материала.

Одним из главных факторов, влияющих на результат обработки, является вид и состояние режущего инструмента. Сюда относятся его типоразмер, геометрические характеристики режущей части, инструментальной материал.

В случае программного управления движениями рабочих органов станка оказывают влияние параметры управляющей системой числового программного управления.

В ходе обработки возникает сложная физическая картина процессов деформирования. Деформируются элементы технологической системы силового контура, определяющие взаимодействие заготовки и инструмента. Это приводит к изменению деформирования непосредственно в зоне резания.

Особенности стружкообразования зависят от площади снимаемого слоя, которая меняется в ходе общей деформации элементов всей технологической системы. На это накладываются влияние процессов трения.

Из-за неоднозначной зависимости силы трения от величины и направления скорости резания могут возникать автоколебания. Самоподдерживающиеся колебания в технологической системе будут определяться параметрами только самой системы. Но при перемещении относительно заготовки и инструмента эти параметры также изменяются, что приводит к изменению и характеристик автоколебаний.

Они описывается двумя основными параметрами - это частота колебаний и амплитуда. Чистота автоколебания определяется собственной частотой лимитирующего или самого слабого элемента технологической системы. В случае обработки точением – это, как правило, заготовка. Из-за величины конструктивной жесткости этой подсистемы возникают низкочастотные автоколебания в диапазоне до нескольких сот герц.

В случае растачивания или обработки другим осевым инструментом типа сверление, зенкерование, фрезерование, доминирующей колебательной системы будет являться подсистема инструмента. Из-за более высокой жесткости подсистемы частота колебаний будет иметь величину порядка нескольких тысяч герц.

При обработке могут возникать на нескольких автоколебательных процессах, суммирующихся друг с другом. Кроме этого действуют вынужденные колебания. Они связаны с изменением параметров в зоне резания, например, снимаемого припуска. Это могут быть неровности заготовки, например огранка. Это могут быть особенности кинематики процесса резания, например при фрезеровании. Каждый зуб врезается в заготовку и снимает толщину слоя, которая изменяется при вращении инструмента. Это изменение может идти с нарастанием от минимума до максимума, когда фрезерование по подаче. Или, наоборот, от максимума к минимуму при фрезеровании против подачи.

В результате процесс резания носит сложный динамический характер. Колебания элементов технологической системы приводит к формированию погрешностей геометрического облика обрабатываемой заготовки. Так как деформации имеют различный частотный состав, динамические возмущения на разных уровнях по частоте приводит к формированию различных геометрических погрешностей.

Статическая деформация, которая определяется средней величиной силы резания, приводит к изменению точности размеров. Низкочастотные колебания и вибрации приводит к формированию погрешности расположения и формы. Высокочастотные колебания определяет волнистость и микро профиль поверхности.

В совокупности динамические возмущения при обработке определяют общую геометрическую точность заготовки. Поэтому одной из главных задач исследования процессов резания является описания и моделирования динамических возмущений в технологических системах.

Процесс анализа динамики обработки выполняется с использованием различных методик. Это может быть и статический расчет с определением деформации в зоне резания и перемещение заготовки и инструмента относительно друг друга. Это может быть частотный анализ процесса обработки. Для этого моделируют поведение станка при помощи распределенных или сосредоточенных моделей, а также модели полученных методом конечных элементов. Далее прикладывает к элементам упругой системы изменяющиеся силы с определенной частотой, и смотрят отклик.

Еще одной разновидностью анализа динамических процессов является модальный анализ. Он заключается в определении собственных частот и форм колебаний отдельных элементов или всей технологической системы. Далее результаты этого анализа используется для определения наиболее рациональных режимов обработки. Это режимы резания, при которых обеспечивается анти резонансная настройка для обеспечения максимальной точности.

Есть противоположный подход по повышению эффективности обработки. Он связан с обеспечением резонансной настройки параметров систем. В этом случае обеспечиваются управляемые динамические возмущения процесса резания. Таким образом, реализуется вибрационный процесс обработки. Он приводит к снижению сил резания из-за особенностей воздействия динамических нагрузок на зону резания. В этом случае наблюдается провал предела прочности и предела текучести, что облегчает отделение стружки от основного материала заготовки.

Но при этом возникает ряд отрицательных эффектов. Это формирование волнистости или муара на обработанной поверхности. Повышение динамических нагрузок на режущей части инструмента. Увеличение температуры в зоне резания из-за процессов трения, так как колебательная скорость увеличивается. Причем может увеличиваться на порядок относительно заданной скорости резания. Это отрицательно сказывается на прочности и стойкости режущего инструмента. Хотя процесс снижения силы резания способствует повышению стойкости. Так что в данном случае возникает оптимизационная задача.

Нужно подобрать параметры вибраций таким образом, чтобы обеспечить максимальное повышение эффективности за счет снижения сил резания. При этом, нанести минимальный ущерб при формировании качества поверхности и обеспечить максимальную стойкость режущего инструмента. Это достигается при оптимальном соотношении частоты и амплитуды колебания или вибрации, создаваемой в зоне резания.

Источником вибрации может служить и сам процесс резания, и процесс трения в зоне обработки. В этом случае используется автоколебательная схема генерирования вибраций. Могут быть низкочастотный среднечастотный или высокочастотный состав колебаний в зависимости от параметров лимитирующего элемента технологической системы, который и создает эти автоколебания.

Вибрации в зоне резания могут использоваться дополнительно для обеспечения стружкодробления. Это особенно актуально для обработки вязких, пластичных материалов типа коррозионностойких сплавов.

Вибрации могут использоваться для обеспечения точности. Это связано с эффектами воздействия высокочастотных вибраций на низкочастотные колебания и влияет на статический отжим элементов технологической системы. В случае создания управляемых автоколебаний высокочастотного состава наблюдается стабилизация и уменьшение амплитуды колебаний низкочастотного состава. При этом происходит уменьшение статических прогибов заготовки или инструмента. То есть за счет управляемого снижения качества поверхностного слоя по параметрам волнистости обеспечивается повышение точности размеров, расположения и формы.

Для моделирования процессов вибрационной обработки необходимо знать три основных конструкторских параметра технологической системы. Это коэффициент жесткости в различных направлениях каждого элемента, взаимодействующих в ходе обработки. То есть необходимо иметь данные по жесткости в различных направлениях обрабатываемой заготовки, станочного приспособления и режущего инструмента.

Это можно сделать в ходе статических испытаний с использованием специального нагрузочного устройства. Динамометр механического или электронного типа позволяет создавать заданную нагрузку и прикладывать ее в заданных точках в определенном направлении. Регистрируя соответствующие смещения элементов технологической системы, можем по соотношению деформация к нагрузке, определить коэффициент жесткости.

Нужно учитывать, что коэффициент жесткости имеет переменный характер при перемещении резца вдоль оси заготовки при токарной обработке или при изменении вылета расточного инструмента при обработке отверстий в неподвижных заготовках.

Вторым параметром, который необходимо определить для динамического моделирования, является коэффициент демпфирования. Он

определяет способность рассеивать энергию возмущений в элементах технологической системы. Определяется из экспериментальных исследований по затухающим колебаниям данного элемента в определенном направлении. Для этого надо обеспечить регистрацию смещений при выведении его из состояния статического равновесия. Это можно выполнять при помощи ударного или импульсного воздействия на заготовку.

Далее по соотношению амплитуд колебаний, полученных из графика затухающих смещений элемента технологической системы, получают коэффициент демпфирования.

Третьим параметром, который необходимо знать для моделирования вибрации, является инерционность. Он определяется из графика затухающих колебаний по изменению общей амплитуды с учетом приложенной нагрузки. Может определяться из частоты собственных колебаний определенных по графику затухающих смещений.

Расчет виброустойчивости технологической системы для растачивания глубокого отверстия в трубе из нержавеющей сплава проводится по методике [14].

В ней определяются ограничения по величине подачи с учетом прочности режущей пластины, с учетом прочности державки и ее жесткости

$$S_1 \leq \left[\frac{\pi \cdot D_{\text{оп}}^3 [\sigma]}{320 C_{P_z} t^{x_z} l_{\text{оп}} K_{P_z}} \right]^{1/y_z}, \quad (6)$$

$$S_2 \leq \left[\frac{34 \cdot t^{(0.77-x_z)} q^{1.35} (\sin 60)^{0.8}}{C_{P_z} (\sin \varphi)^{0.8} K_{P_z}} \right]^{1/y_z}, \quad (7)$$

$$S_3 \leq \left[\frac{0,15 \cdot D_{\text{оп}}^4 E [\delta]}{10 C_{P_z} t^{x_z} l_{\text{оп}}^3 K_{P_z}} \right]^{1/y_z}, \quad (8)$$

где t - глубина резания, мм;

q - толщина пластины, мм;

C_{P_z} , K_{P_z} - коэффициент и показатели степени для определения тангенциальной силы резания;

φ - главный угол в плане;

$D_{оп}$ - диаметр оправки, мм;

$l_{оп}$ - длина оправки, мм.

Жесткость заготовки

$$g_{оз} = \frac{\dot{A}}{(l-x)^3}, \quad (9)$$

где l – длина заготовки, мм;

x – расчетная координата, мм.

$$\dot{A} = 3EJ, \quad (10)$$

где E – модуль упругости, МПа;

J - момент инерции сечения заготовки, мм⁴.

$$J = 0,05D_H^4 \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_H} \right)^2 \right], \quad (11)$$

где D_H – диаметр отверстия до обработки, мм;

D_1 – диаметр детали, мм.

Масса инструмента

$$m_{оз} = \rho \frac{\pi}{4} [D_H^2 l - D_2^2 x - D_1^2 (l_1 - x)], \quad (12)$$

где ρ - плотность материала, кг/м³;

D_2 – диаметр отверстия после обработки, мм;

l_1 - длина отверстия, мм.

Собственная частота

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{m}}. \quad (13)$$

Для расчетов принимается коэффициент вязкого трения $k=300$ кг/с, жесткость передачи винт - гайка – 10^5 Н/мм и жесткость упорных подшипников шпинделя $7,6 \cdot 10^6$ Н/мм.

Результаты расчета следующие

$$S_1 \leq \left[\frac{\pi \cdot 50^3 \cdot 720}{320 \cdot 204 \cdot 2^1 \cdot 0,8 \cdot 0,9} \right]^{1/0,75} = 0,275 \text{ мм/об},$$

$$S_2 \leq \left[\frac{34 \cdot 2^{(0,77-1)} \cdot 4^{1,35} \cdot (\sin 60)^{0,8}}{204 (\sin 45)^{0,8} \cdot 0,8} \right]^{1/0,75} = 1,14 \text{ об/мин},$$

$$S_3 \leq \left[\frac{0,15 \cdot 0,05^4 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 0,005}{10 \cdot 204 \cdot 2^1 \cdot 0,9^3 \cdot 0,8} \right]^{1/0,75} = 0,79 \text{ мм/об},$$

$$J = 0,05 \cdot 72^4 \left[1 - \left(\frac{72}{90} \right)^2 \right] = 1343693 \text{ мм}^4,$$

$$\dot{A} = 3 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 1343693 = 8,1 \cdot 10^9,$$

$$g_{03} = \frac{8,1 \cdot 10^9}{(800-2)^3} = 16 \text{ Н/мм},$$

$$g_{03} = \frac{8,1 \cdot 10^9}{(800-400)^3} = 1,27 \cdot 10^2,$$

$$g_{03} = \frac{8,1 \cdot 10^9}{(800-790)^3} = 8,1 \cdot 10^5 \text{ Н/мм},$$

$$m_{03} = 7,8 \cdot 10^{-6} \frac{\pi}{4} [90^2 \cdot 900 - 76^2 \cdot 20 - 72^2 (900 - 20)] = 12,8 \text{ кг},$$

$$m_{03} = 7,8 \cdot 10^{-6} \frac{\pi}{4} [90^2 \cdot 900 - 76^2 \cdot 400 - 72^2 (900 - 400)] = 146 \text{ кг},$$

$$m_{03} = 7,8 \cdot 10^{-6} \frac{\pi}{4} [90^2 \cdot 900 - 76^2 \cdot 775 - 72^2 (900 - 775)] = 132,6,$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{16 \cdot 10^3}{12,8}} = 5,6 \text{ Гц},$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1,27 \cdot 10^5}{146}} = 4,69 \text{ Гц},$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8,1 \cdot 10^8}{132,6}} = 393,6 \text{ Гц}.$$

Данный расчет используется для определения собственных частот колебаний подсистемы «опоры-заготовка». Для расчета была выбрана консольная схема закрепления заготовки трубы без учета используемого люнета. Соответственно, изменение частоты колебаний обрабатываемой

трубы определяется положением инструмента в зоне резания вдоль продольной оси. Также оно зависит от изменения момента инерции поперечного сечения при снятии припуска.

Для дополнительного повышения жесткости заготовку можно подвергнуть термосиловой обработке [16].

Выводы по разделу

В результате расчета определены параметры жесткости технологической подсистемы заготовки, а также приведенные массы в тех же сечениях.

В результате расчетов определены для трех сечений значения собственных колебаний. Они составили для сечений с вылетом заготовки значение около 5 Гц. У патрона значение собственных частот колебаний заготовки резко возрастает до 394 Гц. Использование люнета приводит к относительному выравниванию собственных частот по длине заготовки [17]. Но не сможет их выровнять абсолютно, что будет приводить к изменению динамического режима работы режущего инструмента и нестабильности качества обработанной поверхности.

Сочетание собственных частот заготовки и инструмента определяет зону опасных частот при вращении заготовки или инструмента. Это частоты равные и кратные частоте вращения заготовки (при токарной схеме обработке) или инструмента (при растачивании на многоцелевом или расточном станке).

Заключение

Была проведена идентификация параметров элементов динамической системы обработки точением и фрезерованием. Провели статические исследований жесткости. Методом собственных колебаний определили спектрального состава системы станка, демпфирующих и инерционных характеристик.

Проведен статический анализ инструментальной подсистемы станка при растачивании. Определили деформацию с учетом конструктивных параметров сечения державки и ее углового ориентирования по направлениям координатных осей.

Для уменьшения вибраций при растачивании глубокого отверстия в трубе из 12X18Н10Т расточным резцом с квадратным сечением державки необходимо предпринять ряд мер.

Использовать резец с правильной геометрией, который соответствует материалу и размерам трубы. Это позволит снизить нагрузку на режущий инструмент и сократить вибрации.

Подобрать оптимальные параметры резания, такие как скорость резания, подачу и глубину резания. Это поможет избежать автоколебаний, критических сил или резонанса при обработке.

Использовать специальные приспособления для фиксации трубы и режущего инструмента. Для инструмента это направляющая оправка. Для трубы – люнет. Это позволит уменьшить возможность биения и вибраций.

Провести точную настройку вылета режущего инструмента перед началом работы. Это поможет снизить возмущения при обработке. По высоте можно инструмент поднять чуть выше осевой линии. Это даст возможность снизить трение по задней поверхности.

В результате расчета вибрационной устойчивости определены параметры жесткости технологической подсистемы заготовки, а также приведенные массы в тех же сечениях.

В результате применения методики динамических расчетов определены для трех сечений значения собственных колебаний подсистемы заготовки - трубы. Они составили для сечений с максимальным вылетом заготовки значение около 5 Гц. У патрона значение собственных частот колебаний заготовки резко возрастает до 394 Гц. Использование люнета приводит к относительному выравниванию собственных частот по длине заготовки. Но не сможет их выровнять абсолютно, что будет приводить к изменению динамического режима работы расточного инструмента и нестабильности качества обработанной поверхности.

Сочетание собственных частот заготовки и инструмента определяет зону опасных частот при вращении заготовки или инструмента. Это частоты равные и кратные частоте вращения заготовки (при токарной схеме обработке) или инструмента (при растачивании на многоцелевом или расточном станке). При назначении технологических режимов необходимо избегать данных опасных зон для избегания явления резонанса.

Результаты исследований частично опубликованы в статье, первая страница которой показана на рисунке А.1 в приложении А с указанием содержания сборника (рисунок Б.1 в приложении Б).

Список использованных источников

1. А.с. 1422535 СССР. Устройство для автоматического управления процессом механической обработки. О.И.Драчев, Г.Г.Палагнюк. (СССР). – 4 с.: ил.
2. Абакумов, А.М. Идентификация технологических процессов механической обработки на металлорежущих станках/ А.М. Абакумов, В.П. Курган, В.Н. Михелькевич. – Самарский политехнический ин-т., 1991. – 118 с.
3. Васильков, Д.В. Динамика технологических систем механической обработки/ Д.В.Васильков, В.Л. Вейц, В.С. Шевченко. – С.–Петербург: ТОО «Инвентекс». – 1997. – 320 с.
4. Васин, С.А. Прогнозирование виброустойчивости при точении и фрезеровании/ С.А. Васин. – Серия «Библиотека инструментальщика». – М.:Машиностроение, 2006.– 384 с.
5. Вейц, В.Л. Моделирование процесса стружкообразования при лезвийной обработке/ В.Л. Вейц, В.В. Максаров//СТИН. – 2002. - №4. - С.3-7.
6. Драчев О.И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей/ О.И. Драчев.- М.: Политехника, 2005. – 289 с.
7. Драчев, О.И. Диагностика и управление процессом термосиловой обработки/ О.И. Драчев//Межд.научно–практическая конференция «Инновация–2008».Ташкент.–2008. – С.107–108.
8. Жарков, И.Г. Влияние вибраций на волнистость поверхности при фрезеровании пазов/ И.Г. Жарков, А.Н. Волков //Станки и инструмент. – 1968. - №12. - С.28.
9. Заковоротный В.Л. Динамика процесса резания. Синергетический подход/ В.Л. Заковоротный, М.Б. Флек– Ростов-на-Дону: «Терра»-2006.- 876 с.

10. Кабалдин, Ю.Г. Механизмы деформации срезаемого слоя и стружкообразования при резании/Ю.Г. Кабалдин // Вестник машиностроения. - 1993. - № 7. - С.25–30.
11. Кабалдин, Ю.Г. Солитонный механизм возмущения вибраций в технологических самоорганизующихся системах обработки резанием/ Ю.Г. Кабалдин// Вестник машиностроения. – 2000. - №3.- С.31-37.
12. Пановко, Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов/ Г.Я. Пановко– М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006.– 176 с.
13. Патент РФ №2169058, кл. В 23 В 29/00. Устройство для обработки глубоких отверстий, 2001.
14. Патент РФ №2292990, кл. В23В27/00. Резец для вибрационного резания, 2007
15. Патент РФ №2355546, кл. В23Р25/00, Устройство для вибрационной обработки, 2008.
16. Подураев, В.Н. Динамическая модель элементов технологической системы с учетом кинематической неустойчивости процесса резания/ В.Н. Подураев, В.И. Малыгин, Л.В. Кремлева // Вест. машиностроения. - 1996. – № 6. – С.18–23.
17. Прогрессивная технология термосиловой обработки нежестких деталей тип вал/ Д.А. Расторгуев [и др.]//Прогресивні технології системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць.–Донецьк: ДонНТУ, 2009. Вип. 38.– С. 72–82.
18. Расторгуев Д.А., Драчев О.И., Романова О.Г. Моделирование многолезцовый обработки/Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. № 4 (27). С. 115-119.
19. Расторгуев, Д.А. Моделирование процесса фрезерования концевыми фрезами/Д.А. Расторгуев, А.А. Царев //Самара.Изв.Самарского

науч.центра РАН.Спец.выпуск: "Безопасность. Технология. Управление", выпуск 7.–2008. - С.178–183

20. Расторгуев, Д.А. Повышение эффективности вибрационной обработки глубоких отверстий/ О.И. Драчев, Д.А. Расторгуев, Д.Е. Салабаев//Металлообработка.– 2006. – №2. – С. 2 – 5.

21. Расторгуев, Д.А. Построение и анализ математической модели технологической системы процесса сверления/ Д.А. Расторгуев, О.И. Драчев, Д.Е. Салабаев. - Металлообработка. – 2007. – №4. – С. 2-6.

22. Расторгуев, Д.А. Управление двух резцовым точением маложестких валов/ Д.А. Расторгуев, О.И. Драчев //Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Материалы международной научно–технической конференции – Севастополь: Изд–во СевНТУ, 2009. – С. 109–110.

23. Расторгуев, Д.А. Частотный анализ подсистемы деталь-опоры при обработке маложестких деталей./ Д.А. Расторгуев, А.О. Драчев// Справочник. Инженерный журнал. -2008- №10. – С.8-13

24. Сидоренко, Л.С. Математическое моделирование физических явлений процесса резания металлов на основе законов реологии/ Л.С. Сидоренко//СТИН. – 2000. - №7. – С.40-43.

25. Синергетический синтез управления динамикой металлорежущих станков с учетом эволюции связей/ Заковоротный В.Л. [и др.].- Ростов н/д: издательский центр ДГТУ, 2008. - 324 с.

26. Способ вибрационной обработки длинномерных валов/ Д.А. Расторгуев [и др.]//Конструкторско–технологические аспекты информатики в промышленности, т. I, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin, 2009. - С.61–69.

27. Эльясберг, М.Е. Повышение устойчивости автоколебательной системы станка при воздействии периодического низкочастотного изменения скорости резания / М.Е. Эльясберг // СТИН. –1989. - №10. - С. 19-21; №11 . - С. 6-8

28. Afazov, Shukri & Scrimieri, Daniele. (2020). Chatter model for enabling a digital twin in machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 110. 1-6. 10.1007/s00170-020-06028-9.
29. Khalifa, Othman & Densibali, Amirasyid & Faris, Waleed. (2006). Image processing for chatter identification in machining processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 31. 443-449. 10.1007/s00170-005-0233-4.
30. Kounta, Cheick Abdoul Kadir A & Arnaud, Lionel & Kamsu-Foguem, Bernard & Tangara, Fana. (2022). Review of AI-based methods for chatter detection in machining based on bibliometric analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 122. 10.1007/s00170-022-10059-9.
31. Liang, Chen & Yu, Shudong & Ma, Yali & Li, Cancan & Jiayong, Wei. (2021). Theoretical and experimental studies of chatter in turning and machining stainless steel workpiece. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 117. 1-22. 10.1007/s00170-021-06643-0.
32. Muhammad, Bashir & Wan, Min & Feng, Jia & Zhang, Weihong. (2017). Dynamic damping of machining vibration: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 89. 2935-2952. 10.1007/s00170-016-9862-z.
33. Qizhi, Chen & Zhang, Chengrui & Hu, Tianliang & Zhou, Yan & Ni, Hepeng & Wang, Teng. (2021). Online chatter detection in robotic machining based on adaptive variational mode decomposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 117. 1-23. 10.1007/s00170-021-07769-x.
34. Rahimi, M.Hosseini & Hoai Nam, Huynh & Altintas, Yusuf. (2021). On-line chatter detection in milling with hybrid machine learning and physics-based model. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 35. 25-40. 10.1016/j.cirpj.2021.05.006.
35. Sun, Huibin & Zhang, Xianzhi & Wang, Junyang. (2015). Online machining chatter forecast based on improved local mean decomposition. *The*

International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 84. 10.1007/s00170-015-7785-8.

36. Wang, Wei-Kang & Wan, Min & Zhang, Wei-Hong & Yang, Yun. (2022). Chatter detection methods in the machining processes: A review. Journal of Manufacturing Processes. 77. 240-259. 10.1016/j.jmapro.2022.03.018.

37. Ye, Jian & Feng, Pingfa & Xu, Chao & Ma, Yuan & Huang, Shuanggang. (2018). A novel approach for chatter online monitoring using coefficient of variation in machining process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 96. 10.1007/s00170-017-1544-y.

38. Yesilli, Melih & Khasawneh, Firas & Mann, Brian. (2022). Transfer learning for autonomous chatter detection in machining. Journal of Manufacturing Processes. 80. 1-27. 10.1016/j.jmapro.2022.05.037.

39. Yesilli, Melih & Khasawneh, Firas & Otto, Andreas. (2022). Chatter detection in turning using machine learning and similarity measures of time series via dynamic time warping. Journal of Manufacturing Processes. 77. 190-206. 10.1016/j.jmapro.2022.03.009.

Приложение А

Публикация

УДК 519.6+534.1+621.9

Д.Ю. Рягузов¹, Д.А. Расторгуев²

ДИНАМИКА ОБРАБОТКИ ТОЧЕНИЕМ МАЛОЖЕСТКОЙ ДЛИННОМЕРНОЙ ЗАГОТОВКИ

Тольяттинский государственный университет

(Россия, Тольятти, ¹penny51638@yandex.ru, ²rast_73@mail.ru)

Аннотация. Доминирующей элементарной погрешностью при механической обработке маложестких деталей является упругая деформация самой заготовки. Статическую составляющую этой деформации снижают за счет рациональной схемы установки с дополнительными опорами. Динамическую составляющую снизить трудно, так как она зависит от собственных частот элементов технологической системы и может значительно изменяться вдоль оси заготовки. Обеспечение точности обработки маложестких длинномерных заготовок предлагается повышать путем моделирования динамических процессов на основе использования много массовой модель со сосредоточенными переменными коэффициентами. Технологическая система представлена в виде взаимодействующих через процесс резания подсистем инструмента и заготовки с опорами. Предлагается методика по идентификации параметров представленной модели. Для учета изменяющихся конструктивных параметров подсистемы заготовка – опоры определяют коэффициент жесткости и демпфирования в ее основных сечениях – по краям и в середине. В результате моделирования определяются собственные частоты колебаний подсистем технологического оборудования. Частотный анализ позволяет определить уровень динамических смещений по элементам технологической системы. Результаты используются для обеспечения анти-резонансного режима обработки по всей длине заготовки. Процесс резания из-за колебаний снимаемого припуска имеет не стационарный характер. Выбирается зона

Рисунок А.1 – Научная статья (первая страница)

Приложение Б

Содержание сборника VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения»

Д.Ю. Рягузов ¹ , Д.А. Расторгуев ² ДИНАМИКА ОБРАБОТКИ ТОЧЕНИЕМ МАЛОЖЕСТКОЙ ДЛИННОМЕРНОЙ ЗАГОТОВКИ	526
А.Н. Соколова ¹ , Н.В. Шалагинова ² ОБУЧЕНИЕ ПРОГРАММИРОВАНИЮ НА PYTHON В КОНТЕКСТЕ ПОВЫШЕНИЯ ИТ-КОМПЕТЕНТНОСТИ СТУДЕНТОВ ВУЗА	534
А.Н. Старовойт РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА	541
А.П. Тонких ОБНАРУЖЕНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ПОМОЩЬЮ ГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССОРА	550
О.С. Филимонова ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНИК КАК КОМПОНЕНТ ИНФОРМАЦИОННОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ	560
А.Г. Хмелев ¹ , А.В. Хмелева ² , В.Д. Потапов ³ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ МНОГОФАКТОРНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ	570
С.В. Шибанов ¹ , А.С. Гусаров ² , Я.С. Шлепнев ³ ПОРТАЛ УПРАВЛЕНИЯ МЕТАДААННЫМИ СЕРВИСА ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ СОБЫТИЙ И ИСПОЛНЕНИЯ АКТИВНЫХ ПРАВИЛ	577
Е.Н. Шнейдеров ¹ , К.С. Крез ² АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ДАННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОБУЧЕНИЯ НА БАЗЕ MOODLE LMS ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО СЛЕДА ОБУЧАЮЩЕГОСЯ	587