

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 Совершенствование технологического процесса производства валов путем  
модернизации технологического оснащения

Обучающийся

С.Э. Анненков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.т.н., доцент, Д.Г. Левашкин

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

## Содержание

Введение .....	3
1 Анализ подходов к повышению гибкости производства .....	6
1.1 Общие концепции совершенствования оснащения .....	6
1.2 Подходы совершенствования технологии обработки валов .....	9
2 Моделирование динамики технологической системы .....	23
2.1 Поперечные колебаний вала, как распределенной системы .....	23
2.2 Динамика вала с учетом рассеяния энергии .....	24
2.3 Дискретный подход к моделированию динамики вала .....	27
3 Теоретическое исследование динамики обработки вала .....	35
3.1 Обоснование системы установки в люнетах .....	35
3.2 Метод начальных параметров .....	41
4 Экспериментальное исследование колебаний вала .....	50
4.1 Исследование собственных частот .....	50
4.2 Статические исследования вала .....	70
5 Проектирование системы опор .....	72
5.1 Система выверки .....	72
5.2 Проектирование механизма регулирования положения опор .....	72
5.3 Проектирование системы управления зажимом .....	75
Заключение .....	80
Список используемых источников .....	82
Приложение А Сертификат по публикации .....	87

## Введение

Современное машиностроительное производство в настоящий момент характеризуется следующими особенностями: это короткий жизненный цикл изделий, большая номенклатура выпуска изделий, непредсказуемые изменения требований потребителей. Все это приводит к тому, что основной объем производимой продукции относится к мелко или среднесерийному типу производства. Они имеют много похожих параметров. Это, например использование автоматизированных станков с числовым программным управлением. Главное преимущество этого оборудования заключается в возможности быстрой переналадки на изготовление различных изделий. Это дает возможность выпускать большую номенклатуру продукции с различными характеристиками. При этом изменения могут быть конструктивными по конфигурации деталей, маркам материалов, техническим требованиям к поверхностям деталей. Эти особенности приводят к изменениям, как в проектировании технологических процессов, так и их реализации.

Основным направлением в совершенствовании технологических процессов является проектирование технологического оснащения, которое обеспечивает быструю переналадку на выпуск различных изделий и деталей. Такую оснастку называют перекомпонованной. Это один из ключевых элементов гибкого производства, который обеспечивает быструю переналадку по сравнению со стандартным приспособлением или инструментом. Установка таких приспособлений на универсальном оборудовании (для любого типа обработки: токарных, сверлильных, фрезерных работ) обеспечивает их дополнительную гибкость и расширяет технологические возможности.

Основное требование потребителя машиностроительной продукции заключается в обеспечении высокого качества при меньшей себестоимости. Для обеспечения этих противоречивых требований необходимо, чтобы

производственные системы и технологические системы, как часть производственных, имели возможность быстрой переналадки, были высокопроизводительными, высокоточными и надежными в эксплуатации.

Основным способом реализации технологических переходов является использованием числового программного управления, обеспечивающего перемещение относительно друг друга заготовки и инструмента с заданными кинематическими параметрами по указанной траектории движения. Соответственно, для этого необходимо обеспечить точное взаимное положение заготовки и инструмента в начальный момент установки. Для этого приспособление должно реализовать необходимую схему базирования. Точность установки, складывается из трех составляющих, таких как погрешность базирования, погрешность силы закрепления, и погрешность самого приспособления. Схема закрепления должна обеспечить надежную фиксацию заготовки при действии на нее сил резания, но при этом должна быть минимальная погрешность от сил зажима. Учитывая то, что приспособление должно иметь возможность быстрой переналадки, и поэтому будет иметь много подвижных регулируемых элементов, точность его будет снижаться, также как и общая конструктивная жесткость. За счет увеличения числа контактных стыков будет расти доля контактной деформации. Все это естественно снижает точность обработки.

Для валов актуально оснащение, которое обеспечивает их положение на станках токарного или шлифовального типа. Это касается различного вида патронов и поджимных центров.

Для валов, которые относятся к категории маложестких, то есть с отношением длины к диаметру более 10, актуально использование дополнительных опор. Опоры - люнеты, используются для уменьшения величины пролетов заготовки. Это повышает жесткость обрабатываемой детали, снижает погрешность от упругих деформаций, повышает качество поверхности и стойкость режущего инструмента.

При использовании люнетов необходимо учитывать, что использование более двух опорных элементов создает неопределенность базирования, так как их расположение на одной прямой невозможно из-за погрешностей выверки элементов технологической системы. В результате при вращении заготовки в опорах создаются вынужденные силы, определяемые частотой вращения заготовки.

Кроме указанного недостатка, увеличивается время на установку заготовки и выверку этих опор.

Главная цель представленной работы связана с обеспечением точности обработки мало жесткого вала, закрепленного в системе самоцентрирующих люнетов, за счет обеспечения максимальной стабильности динамических параметров подсистемы заготовка опоры.

Для этого необходимо решить ряд задач. Первая - это смоделировать поведение длинномерной мало жесткой заготовки, как распределенной системы. Второе - смоделировать поведение мало жесткого вала в виде сосредоточенной двух массовой модели. Одна из нас представляет формообразующую подсистему деталь-опоры, вторая - подсистема резец-суппорт. Получить зависимость амплитуды относительных колебаний в зависимости от параметров технологической системы. Третья задача - смоделировать поведение мало жесткой детали с учетом различного сочетания жестких и демпфирующих опор распределенных по длине заготовки. Провести натурные эксперименты, подтверждающие результаты теоретического моделирования.

## **1 Анализ подходов к повышению гибкости производства**

### **1.1 Общие концепции совершенствования оснащения**

Основными направлениями обеспечения технологических возможностей гибких производственных систем является модульность оснащения [4]. Это касается и компоновки самих станков. Как правило проектируется многовариантная компоновка одного и того же оборудования, которая позволяет использовать по требованиям заказчика различные инструментальные головки. Такой подход позволяет расширить номенклатуру технологических переходов, обеспечить большую гибкость технологической системы, снизить время переналадки [5]. Кроме этого, в структуре технологических систем все шире применяют различные диагностические каналы для сбора информации о ходе различных процессов, протекающих в ходе непосредственной обработки резанием. Причем контролируется не только сам процесс обработки, но и различные процессы, характеризующие функционирование самого станка. Это касается, например, точности движения суппортов, инструментальных шпинделей, состояния направляющих и подшипниковых опор, точности позиционирования за счет отслеживания работы элементов привода. Данные системы позволяют не только диагностировать текущее состояние заготовки, инструмента, инструментальных подсистем, но и управлять процессами [31].

Использование систем числового программного управления, модернизированных для задач управления, позволяет реализовать способы адаптивного управления, которое значительно повышает точность, качество обработки, стойкость режущего инструмента.

Гибкие производственные системы включают в себя группу станков, которые могут быть переналажены согласовано, причем переналадка касается не только замены управляющих программ, но и переналадку станочного и инструментального оснащения [6].

В случае невозможности подстройки установочных и зажимных элементов зажимного приспособления, возможна замена отдельных блоков или самого приспособления на основе модульной компоновки. Унификация стыковочных и зажимных поверхностей для установки самого приспособления обеспечивает такую возможность [32].

Такая переналадка или перекомпоновка возможно за счет того, что существует структурная иерархия конструктивных элементов. Есть базовые элементы и дополнительные модули. Последние могут реализовывать различные кинематические движения за счет использования отдельных приводов, шпинделей, суппортов и резцедержателей, поворотных или индексных устройств, различных адаптеров и переходных блоков или втулок. По конструктивным особенностям, весу и размерам, такие дополнительные элементы меньше и легче, чем базовые установочные элементы. Поэтому они могут быть заменены достаточно быстро с минимальными усилиями и затратами. Это также соответствует идеологии бережливого производства, Одним из основных элементов такого подхода является сокращение непроизводительных затрат, в том числе на переналадку оборудования.

Требования к переналаживаемым системам следующие [7]. На этапе начального проектирования такого оснащения необходимо обеспечивать гибкость или возможность быстрой и эффективной переналадки за счет инструментальной доступности и эффективных конструктивных решений. Внимание должно обращаться так же на необходимость привязки к системе координат станка. В принципе это напоминает комбинирование агрегатного оборудования, когда из стандартных комплектующих, начиная со станины, формируется общий облик станка за счет дополнения вспомогательными станинами, рабочими столами, инструментальными головками, контрольно измерительными модулями. Еще одной особенностью гибких производственных систем современного уровня является возможность перехода от выпуска единичных изделий до выпуска больших объемов того же самого изделия на одном и том же оборудовании. В современной

терминологии это можно обозначить как масштабируемость. Модульная компоновка с возможностью установки конструктивных блоков на основе стандартизированных установочных элементов или, как еще называют установочных интерфейсов, обеспечивает возможность быстрой и эффективной переналадки [8].

Например, для сверлильного станка под системой будет являться привод подачи, который можно варьировать по типу передачи. Из возможных конструктивных вариантов выбирается тот, который будет обеспечивать более широкие технологические возможности, то есть, больший диапазон и количество скоростей. Для инструментального шпинделя разнообразие обеспечивается за счет использования различных установочных элементов, переходных блоков, втулок или патронов [34].

Одним из элементов, который позволяет обеспечивать большую гибкость технологической системы, является многошпиндельные сверлильные головки, которые дают возможность обработки одновременно отверстий различного диаметра по заданному шаблону пространственного расположения. Для единичного и мелкосерийного производства снижается время замены инструмента, а для серийного производства обеспечивается одновременная обработка комплекта отверстий.

Еще одним ограничением сверлильных установок является ограниченная степень свободы движения инструмента. В данном случае это движение вдоль одной координаты - возвратно-поступательной. Включение в установочный элемент инструментального шпинделя дополнительного привода обеспечивающего перемещение инструмента и в горизонтальной и в вертикальной плоскости [9].

Гибкость сверлильного модуля повышается за счет правильного выбора патрона для закрепления инструмента. Обычный кулачковый патрон обеспечивает закрепление сверла с цилиндрическим хвостовиком. Возможности быстрой замены такого патрона с переходными втулками дает



возможность закреплять инструмент, как с длинным, так и коротким хвостовиком, в том числе коническим.

Еще одним направлением повышения гибкости сверлильного оборудования является увеличение степеней подвижности рабочего стола. Это может быть и вращение вокруг вертикальной оси [33].

Еще одним из элементов повышения гибкости технологического оборудования является использование систем подачи смазочно-охлаждающей жидкости [10]. Особенно актуально это для сверлильных переходов и обработки другим осевым инструментом. Правильное расположение систем подачи и направления сопла обеспечивает снижение силы резания, повышение стойкости инструмента, снижает расход смазочно-охлаждающих жидкостей. Механизация дополнительных вспомогательных переходов также является одним из элементов повышения гибкости, в том числе для совершения ускоренных подводов в разных направлениях рабочих органов станка.

Встройка в компоновочные решения зажимных приспособлений регулировочных элементов, например, дугообразных со сквозной прорезью элементов, куда под необходимым углом могут встраиваться захваты или прихваты. Причем это может осуществляться и в горизонтальном и вертикальном направлениях [35].

Такие же решения могут использоваться непосредственно в компоновке металлорежущего оборудования. Инструментальная головка может располагаться на дугообразном несущем элементе, что позволяет менять угловое положение инструментального шпинделя [24].

## **1.2 Подходы совершенствования технологии обработки валов**

Описанные выше подходы указывают, какие направления могут использоваться для совершенствования технологического оснащения. Может

меняться компоновка самого оборудования, компоновка технологических элементов оснащения, их состав, комплектность, форма и размеры [11].

Для обработки валов с протяженной осью необходимо обеспечивать равную жесткость обрабатываемой заготовки при перемещении зоны резания вдоль оси заготовки. Данный подход можно реализовать за счет нескольких путей.

Первый путь, это использование многолезцовой обработки. В данном случае включаем заготовку в силовой контур, который состоит из двух резцов, направленных противоположно друг другу. Получается при этом, что радиальные силы резания, которые обеспечивают максимальную деформацию обрабатываемого вала, компенсируют друг друга. Поперечное смещение заготовки вала будет сведено к минимуму [13].

Данный способ повышения жесткости имеет ряд недостатков. В связи с неодинаковыми условиями резания на противоположных инструментах из-за неравномерности распределения припуска, неуравновешенности самой заготовки, абсолютной компенсации сил резания достигнуть не удастся. В результате этого на противоположных сторонах заготовки формируются неравномерные остаточные технологические напряжения, которые в последующем будут приводить к короблению заготовки или детали [25].

Кроме этого, возникают трудности при обработке ступенчатых валов из-за сложности одновременного движение резцов в противоположных направлениях.

Другой способ стабилизации оси вала заключается в использовании дополнительной опоры – люнета, расположенного непосредственно рядом с зоной обработки. В этом случае его закрепляют непосредственно на суппорте.

Недостатком данного способа обработки является то, что неуравновешенная часть заготовки, расположенная вне зоны обработки, начинает интенсивно влиять на условия резания [12].

Ниже приведен обзор существующих технологических подходов к использованию систем опор, что позволяет обеспечить выравнивание условий обработки вдоль оси заготовки, а также в каждом поперечном сечении этой самой заготовки.

Изображение базового люнета представлено на рисунке 1.

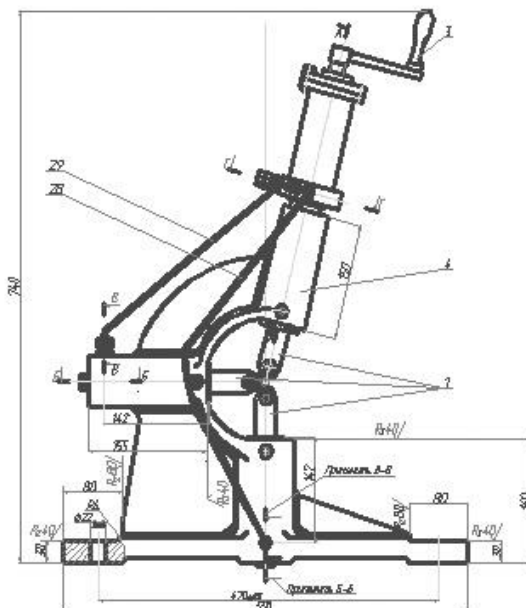


Рисунок 1 – Базовый люнет

Люнет предназначен для стабилизации оси мало жесткой детали на токарных операциях [14].

Люнет по совокупности конструктивных признаков, таких как компоновка, форма детали, габариты и соотношение размеров, относится к одному из двух типов объектов патентования устройство. Люнет можно рассматривать как станочное оснащение, которое используется для стабилизации оси длинномерной заготовки. А также его можно рассматривать как элемент системы управления процессом обработки вала.

Это признаки устройства. Признаки способа присутствуют, если рассматривать люнет, как элемент комплекса для стабилизации оси детали и работающего по определенному алгоритму. Рассмотрим люнет в рамках

подхода по стабилизации оси детали. Основная задача люнета обеспечение неизменного положения обрабатываемого сечения заготовки под действием центробежных сил и сил резания.

Совершенствование конструкции такой опоры должна быть направлена на достижение нескольких технических задач. Первое, это естественно повышение точности за счет повышения жесткости технологической системы, стабилизации оси заготовки, как под действием статических, так и динамических факторов [15].

Другой момент может быть связан с проведением дополнительной обработки шеек вала в месте расположения зажимных роликов люнета. Дело в том, что под действием зажимных усилий при вращении заготовки в этих опорах происходит процесс поверхностного пластического деформирования. Люнет, по сути, выступает в роли накатника.

Если использовать систему стационарных люнетов, необходимо сводить это действие к минимуму, так как на заготовке останутся расположенные с равным шагом накатанные шейки, которые будут иметь другой размер и шероховатость поверхности.

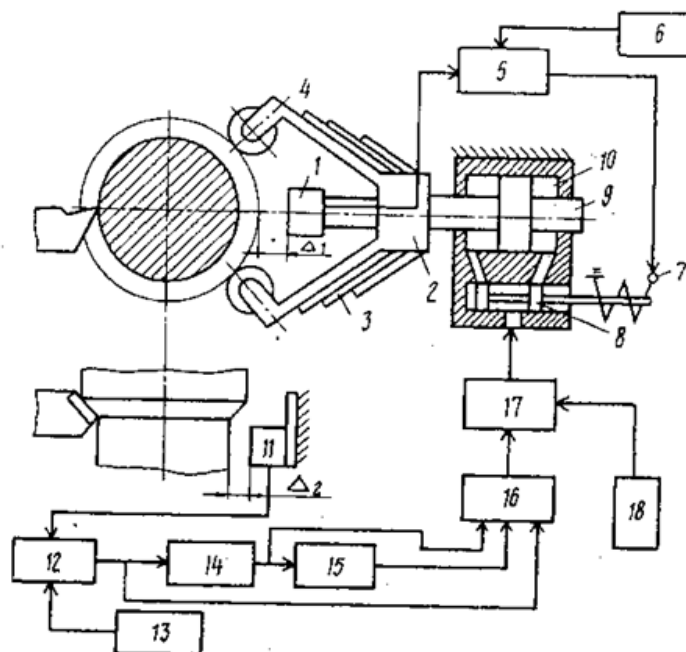
В нашем случае техническое решение - способ стабилизации оси детали и устройство для его осуществления [16].

Патентный поиск проводим по базам данных на сайте Федеральной интеллектуальной патентной службы, а также Европейской базе данных. Для поиска используя соответствующие индексы международного классификатора изобретений (МКИ). Для определения рубрики МКИ определяем ключевое слово “Люнеты”. По “Указателю к МКИ” уточняем рубрику МКИ: B23Q15/00 – системы управления обработкой деталей.

Индекс универсального десятичного классификатора (УДК) определяем по “Указателю к универсальной десятичной классификации”: 621.9 – обработка резанием.

Ниже приведены описания технических решений, найденных в процессе поиска.

Устройство для обработки деталей [1] на рисунке 2.



1 - датчик, 2 - опора-призма, 3 - упругие элементы, 4 - ролики, 5 - дифференциальный усилитель, 6 - задатчик положения опоры-призмы, 7 - электромагнитный преобразователь, 8 - золотниковое устройство, 9 - шток-поршень, 10 - сервопривод, 11 - датчик, 12 - блок уровня вибраций, 13 - задатчик уровня вибраций, 14 - блок дифференцирования, 15 - блок двойного дифференцирования, 16 - сервопривод, 17 - управляемый редуктор давления, 18 - насосная станция.

Рисунок 2 - Схема обработки по авторскому свидетельству №1024226

Устройство №1024226 предназначено для стабилизации зоны резания за счет использования опор люнета, который обеспечивает функцию опоры, сопротивляющейся действию радиальной силы резания [1]. Он имеет возможность перемещаться в радиальном направлении за счет управляемого гидравлического привода 10. Для стабилизации положения оси заготовки применяется датчик 11 уровня вибрации, который отслеживает величину зазора между обработанной поверхностью заготовки и датчиком 11. Сигнал с него переходит в блок определения уровня вибраций. В данном случае имеется в виду абсолютный размах или максимальная амплитуда смещений. Данная величина сравнивается с допустимым уровнем колебаний, который

определяется заранее при помощи задатчика 13 уровней вибрации. Далее, для определения скорости изменения сигнала, он проходит через блок дифференцирования 14. Для определения ускорения изменения сигнала дальше он проходит через блок второго дифференцирования 15. Три сигнала: о величине смещения, скорости и ускорения его изменения, поступают на блок управления 16, который выдает сигнал по величине положения золотника 8 и регулируемого редуктора 17.

С выхода блока управления 16 происходит изменение давления рабочей среды при помощи регулируемого редуктора 17. Цепь управления обеспечивает изменение жесткости опорной системы. Второй контур управления работает на смещение. Для этого происходит контроль зазор  $\Delta_1$  между датчиком 1 и обрабатываемой поверхностью заготовки. Опорные рычаги люнета 2 имеют вид упругих пластин 3, на конце которых располагаются опорные ролики 4. Изменение положения шток-поршня 9 в гидравлическом цилиндре 10 происходит при смещении золотникового устройства 8 при помощи электромагнитного преобразователя 7. А сигнал на этот преобразователь поступает с усилителя сигнала 5 после сравнения заданной величины зазора с полученной величиной зазора, который снимается с сигнала датчика 1. При изменении этого зазора  $\Delta_1$  сигнал рассогласования с соответствующим усилением поступает на электромагнитный преобразователь 7, который производит смещение золотникового устройства 8. Это приводит к перераспределению давления в левой и правой рабочих полостях гидравлического привода 10. В результате происходит смещение всей опоры-призмы 2 со стабилизацией контролируемого зазора  $\Delta_1$ . Данная система обеспечивает двойное повышение точности за счет контроля положения обрабатываемой и обработанной поверхности. Причем система срабатывает с учетом скорости и ускорения изменения амплитуды сигнала о смещении заготовки.

Управление жесткости и положением обрабатываемой заготовки обеспечивает управление, как статическими, так и динамическими

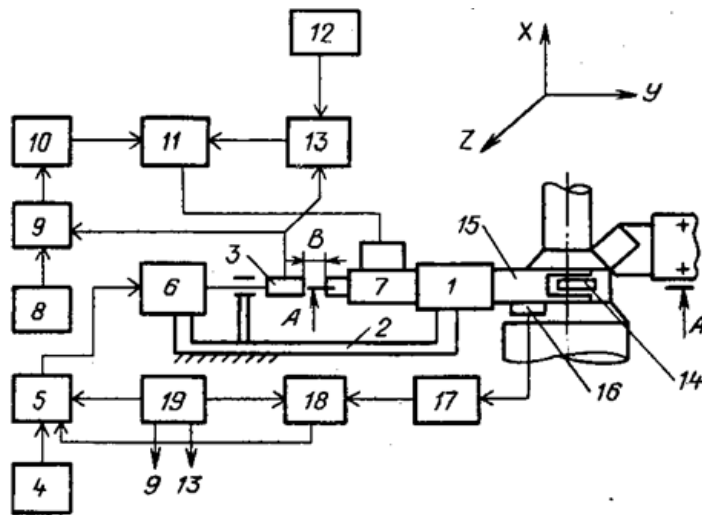
смещениями. В том числе за счет изменения резонансных свойств подсистемы заготовка-опоры.

Экспериментальное подтверждение эффективности данной системы показывает, что для рабочих частот возмущений при обтачивании заготовки в диапазоне до 200 Гц, наблюдается снижение уровня вибрации на порядок. Это приводит к тому, что повышается точность размеров, расположения и формы, а также снижение шероховатости. Стабилизация динамических возмущений, действующих на инструмент, обеспечивает повышения его стойкости до 3 раз.

Повышение общей жесткости технологической системы дает возможность повышения режимов обработки как по силовым параметрам, то есть глубине резания и подачи, так и по скоростным параметрам, то есть увеличение скорости резания [31].

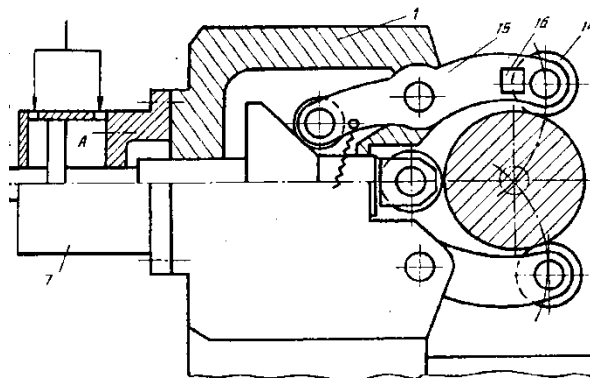
Следующее устройство для обработки ступенчатых осесимметричных деталей [2] показано на рисунке 3 и 4. Там показана схема устройства с его разрезом А-А на рисунке 3 (самоцентрирующий люнет с силовым приводом). Самоцентрирующий люнет 1 крепится на стойке 2, первый первичный преобразователь 3. Первый контур управления линейным перемещением первого первичного преобразователя включает последовательно включенные датчик положения 4, первый дифференциальный усилитель 5, сервопривод 6 линейных перемещений.

Второй контур управления силового замыкания самоцентрирующего люнета состоит из силового привода 7, датчика 8 уровня вибраций, блока управления 9, клапана 10 регулировки давления рабочей среды с пропорциональным электрическим управлением, электромагнитного преобразователя 11. Третий контур управления стабилизации размера обрабатываемой детали включает датчик 12 относительного положения первого первичного преобразователя и шток-поршня силового привода люнета, второй дифференциальный усилитель 13, ролики 14, закрепленные на рычагах 15.



1 - самоцентрирующий люнет, 2 - стойка, 3 - первичный преобразователь, 4 - задатчик положения, 5 - дифференциальный усилитель, 6 - сервопривод линейных перемещений, 7 - силовой привод, 8 - задатчика уровня вибраций, 9 - блок управления, 10 - клапан регулировки давления, 12 - электромагнитный преобразователь, 13 - дифференциальный усилитель, 14 - ролики, 15 – рычаги, 16 - первичный преобразователь, 17 - блок распознавания, 18 - запоминающее устройство, 19 – усилитель.

Рисунок 3 - Схема обработки



1 - самоцентрирующий люнет, 7 - силовой привод, 14 - ролики, 15 – рычаги, 16 - первичный преобразователь

Рисунок 4 - Люнет

Четвертый контур управления обхода препятствий состоит из последовательно соединенных второго первичного преобразователя 16 осевой силы трения, блока распознавания 17, запоминающего устройства 18,



усилителя 5 и сервопривода 6. Четырехконтурная система управления оснащена коммутатором 19.

Устройство работает следующим образом. Автоматическая система стабилизации оси обрабатываемой детали, состоящая из самоцентрирующего люнета и четырех контурной системы управления, настраивается на обработку, последовательно включая контуры управления. Первый контур линейного перемещения первого первичного преобразователя работает следующим образом. Первый первичный преобразователь 3 перемещается в крайнее верхнее положение по команде от задатчика положения 4 через последовательно включенные первый дифференциальный усилитель 5 и сервопривод линейных перемещений 6. Он кинематически связан с корпусом первичного преобразователя 3. Последний перемещается по направляющим, которые крепятся на стойке 2 и показаны условно. Самоцентрирующий люнет 1 оснащен силовым приводом 7, который осуществляет силовое замыкание, через второй и третий контуры, Второй контур управления – силового замыкания само центрирующего люнета 1 работает следующим образом. Задатчик уровня вибраций 8 процесса резания включает в работу блок управления 9. Он, в свою очередь, задает режим работы клапану с пропорциональным электрическим управлением 10. Последний, в зависимости от знака и величины управляемого напряжения, поступающего от блока управления 9, может автоматически изменять рабочее давление от нуля до максимума в процессе обработки.

Рабочее давление от клапана с пропорциональным электрическим управлением 10 через электромагнитный преобразователь 11, которой в подготовительном режиме (без обратной связи) от задатчика вибраций 8 подает рабочую среду, (например, масло) в полость А силового привода 7, назначается в зависимости от уровня вибраций в процессе резания системы станок-приспособление-инструмент-заготовка (СПИЗ). При подаче рабочей среды в полость А силового привода 7, шток-поршень которого переместится в крайнее верхнее положение, а его торец в этом положении устанавливается

с зазором В относительно первого первичного преобразователя 3, который также находится в крайнем верхнем положении. Зазор В устанавливается заранее в зависимости от функционального назначения самоцентрирующего люнета:

Стабилизация оси обрабатываемой детали без пластического деформирования или с последующим после точения пластическим деформированием всей наружной поверхности детали. В процессе резания уровень вибраций, воспринимаемый самоцентрирующим люнетом 1, регистрируется первым первичным преобразователем 3 и, преобразуется в электрический сигнал. Далее он поступает на вход блока управления 9, где вырабатывается закон управления изменения давления рабочей среды для клапана 10 так, чтобы уровень вибраций при резании не превосходил заданный от датчика уровня вибраций 8. Второй контур управления в подготовительном режиме отводит самоцентрирующий люнет 1 в исходное состояние, готовит его к работе, а в процессе обработки следит за уровнем вибраций системы СПИЗ. Третий контур стабилизации размера обрабатываемой детали работает от датчика относительного положения 12, сигнал которого вместе с выходным сигналом первого первичного преобразователя 3 пропорциональному изменению зазора В поступает на вход второго дифференциального усилителя 13, последний формирует сигнал управления для электромагнитного преобразователя 11, который в свою очередь распределяет рабочее давление в силовом приводе 7 так, чтобы обеспечить заданный размер детали, т.е. такое положение роликов 14, которое задано датчиком 12. Ролики 14 закреплены на рычагах 15 с возможностью вращения вокруг своей продольной оси. Работа третьего контура управления связана с работой второго контура через электромагнитный преобразователь 11. В процессе точения оба контура работают одновременно.

При разведенных на максимальный диаметр заготовки роликах 14, обрабатываемую деталь устанавливают на станок и зажимают в патроне

задней бабки, включают привод вращения заготовки, Вступают в работу три контура управления одновременно. Сигнал с задатчика 4, проходя через блоки 5 и 6 позволяет перемещать первый первичный преобразователь 3 относительно стойки 2, сохраняя зазор В постоянным. Постоянство зазора В поддерживается работой второго и третьего контура управления. Перемещаясь, первичный преобразователь 3 перемещает и шток-поршень силового привода 7, а последний перемещает рычаги 15, что позволяет фиксировать обрабатываемую деталь через ролики 14. При входе преобразователя 3 на заданную координату, что соответствует касание роликов 14 наружной поверхности детали, он останавливается согласно команде задатчика 4. При необходимости для более точной настройки или создания поверхностно-пластических деформаций на заданную глубину, зазор В может изменяться от задатчика 12 автоматически или вручную. После этого подводится инструмент и включается продольная подача.

При внешнем силовом воздействии на ролики, превышающем силу, развиваемую шток - поршнем, последний переместится от заданной величины, что приведет к уменьшению зазора [3]. В этом случае работают одновременно второй и третий контуры управления. Давление рабочей среды в силовом приводе 7 будет расти до тех пор, пока не будет скомпенсировано отклонение от заданного зазора В. Одновременно сигнал с первого первичного преобразователя 3 поступает на второй и третий контуры управления. В этом случае сигнал рассогласования на блоке управления 9 и дифференциальном усилителе 13 вырабатывают сигналы управления, пропорциональные сигналу рассогласования зазора В. При возникновении вибраций в процессе резания, превышающих уровень заданий задатчиком 8, срабатывает второй контур силового замыкания самоцентрирующего люнета, который задает рабочее давление. При данном давлении уровень вибраций не повышает уровня, заданного задатчиком 4.

При включении продольной подачи вместе с инструментом перемещаются ролики 14. При обкатывании их по наружной поверхности

обрабатываемой детали возникает осевая сила трения [30]. Она противодействует перемещению роликов 14 вдоль детали по оси X и изгибает рычаги 15, на которых крепятся ролики 14.

При появлении этой силы включается в работу четвертый контур управления обхода препятствий, который работает следующим образом. Второй первичный преобразователь осевой силы 16 закреплен на одном из рычагов 15 в плоскости, перпендикулярной оси центров станка. Например, в верхнем положении, рядом с осью вращения ролика 14. Он регистрирует осевую силу отжима ролика о деталь рычага 15 и выдает электрический сигнал, пропорциональный этой силе на блок распознавания 17. Там происходит оценка причин возникновения сигнала (например, ложного срабатывания, когда стружка попала под ролик, резкий отвод инструмента, заусенец на торце детали или истинного сигнала: фаска-ступень от предыдущего съема). Распознавание построено на принципе счета последовательности импульсов, выдаваемого вторым первичным преобразователем осевой силы 16 в течение одного оборота. При включении продольной подачи сигнал в блоке 17 регистрируется в течение 3-5 оборотов, усредняется и подается в запоминающее устройство 18. Величина начального сигнала зависит от глубины деформируемого слоя, качества поверхности, обработанной на предыдущих операциях, материала, продольной скорости роликов и т.д. В связи с этим начальная осевая сила может меняться от прохода к проходу, а, следовательно, при точении следующего слоя запоминающее устройство 18 обнуляется и вводится новая информация.

При наезде роликов 14 на буртик фаску (вверх или вниз в зависимости от направления движения люнета по отношению к задней бабке), оставленную от предыдущего прохода на обрабатываемой детали, преобразователь 16 регистрирует плавное увеличение осевой силы трения в течение одного оборота детали. Величина этого сигнала сравнивается с величиной начального сигнала в запоминающем устройстве 18. Сигнал приращения, пропорциональный приращению осевой силы поступает на вход

первого дифференциального усилителя 5, который выдает сигнал управления, с учетом знака, для сервопривода 6, а последний перемещает первичный преобразователь 3. Если зазор В изменяется, срабатывает третий контур. В этом случае шток-поршень перемещается за первым первичным преобразователем 3, и рычаги 15 и ролики 14 плавно расходятся или сходятся по переходной поверхности детали образовавшейся от предыдущего прохода инструмента (до диаметра детали, обработанного на предыдущем проходе). Это длится до тех пор, пока сигнал в запоминающем устройстве 18 не станет равным начальному сигналу при первых 3-5 оборотах продольной подачи. В этом случае ролики 14 выходят на поверхность, обработанную на предыдущем проходе, и разжим или зажим прекращается.

Четвертый контур управления работает, используя блоки 5, 6 первого контура, по отклонению осевой силы трения роликов 14 о поверхность обрабатываемой детали.

Для последовательности команд в систему управления введен коммутатор 19, который подает команды на блоки 5, 9, 13, 18 по ходу технологического процесса.

Включение четырех контурной системы в технологическую цепь станка позволяет сохранить заданную технологическую ось обрабатываемой детали при переходе от одной обработанной поверхности диаметра к другой.

Эксперименты проводились на станке РВ-104 на заготовке из стали 30Х13 длиной 1540 мм с перепадом диаметров 40-60 мм. Геометрия инструмента была следующей. Главный угол в плане  $\varphi$  равен  $45^\circ$ , вспомогательный угол в плане  $\varphi_1$  равен  $10^\circ$ . Режим резания по скорости резания 310 об/мин, подаче 0,11 мм/об и глубине резания 2,5 мм. Отклонение оси в пространстве в зоне перехода роликов с одного диаметра на другой не превышает 2 - 4 мкм.

Отклонение оси детали определяется погрешностью обработки системы автоматического управления. Автоматическая система управления позволяет также самоцентрирующим люнетам проводить поверхностно-

пластическое деформирование для улучшения качества обработанной поверхности и создания остаточных напряжений для стабилизации оси маложестких валов, что позволяет повысить надежность готовых деталей и снизить себестоимость за счет совмещения технологических приемов.

#### Выводы по разделу

В разделе приведены результаты анализа существующих подходов к совершенствованию технологического оснащения. Отмечены основные принципы совершенствования, которые относятся к модульности, масштабированию, гибкости переналадки.

Рассмотрены основные подходы обеспечения высокоэффективной, точной, производительной обработки маложестких валов. Рассмотрены их преимущества и недостатки.

Отмечена перспективность использования самоцентрирующийся рычажных люнетов, которые имеют широкие технологические возможности по типоразмерам закрепляемых заготовок. Также обеспечивают гибкость в регулировании таких конструктивных параметров, как жесткость и демпфирование, что дает возможность регулировки динамических параметров подсистемы деталь-опора в широком диапазоне для управления амплитудой относительных колебаний заготовки и инструмента.

## 2 Моделирование динамики технологической системы

### 2.1 Поперечные колебаний вала, как распределенной системы

В случае обработки мало жесткого вала, система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающего его поведение с учетом направления и величины действующих сил, выглядит следующим образом

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EJ_z \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( N \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \rho F \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \rho F a_1 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = g_1(x, t); \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EJ_y \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( N \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \rho F \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} - \rho F a_2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = g_2(x, t); \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EJ_\omega \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( GJ_k \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \rho F \left( a_2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} - a_1 \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) + \rho J_a \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \psi(x, t), \quad (3)$$

«где  $\rho$  - плотность материала;

$F$ -площадь поперечного сечения;

$J_y$  и  $J_z$ - осевые моменты инерции;

$J_k$  – момент инерции при кручении;

$J_w$  - секториальный момент инерции;

$q_1, q_2$  - интенсивность нагрузки в соответствующей плоскости» [22].

Полярный момент инерции относительно центра изгиба

$$J_a = J_0 + (a_{12} + a_{22})F, \quad (4)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  - координаты центра изгиба.

Ось  $Z$  считается продольной вдоль оси вала, а оси  $X$  и  $Y$  направлены в поперечном направлении.

В зависимости от вида опорных устройств на концах стержня задаются концевые условия, приведенные в справочной литературе [21].

В случае осесимметричного вала, у которого отсутствуют конструктивные элементы, приводящие к различной жесткости в различных поперечных направлениях, будет наблюдаться малое взаимное влияние изгибных и крутильных колебаний. Это приводит к тому что уравнение описывающее данные виды колебаний разделяются [23]. При обработке вала крутильные колебания можно учитывать. Если необходимо анализировать влияние например процесса стружкообразования, так как крутильные вибрации приводит к изменению скорости резания, сил трения. В первом приближении можно учитывать только поперечной вибрации которые зависят от жесткости сечения вала которая определяется моментом инерции и характеристикой материала - к модулем упругости.

Поэтому будет  $a_1=a_2=0$ . Если жесткость сечения  $EJ(x)$ , то распределенная масса

$$m = F\rho. \quad (5)$$

При перемещении зоны резания вдоль оси вала реакция опор будет изменяться. Коэффициент  $G$  при смещении,  $K$  – для производной смещения.

## 2.2 Динамика вала с учетом рассеяния энергии

Из-за колебаний возникают дополнительные потери энергии, связанные с действием демпфирования, которое определяем как силу внутреннего трения  $f(x)$ .

Смещения формируют вектор  $u(x, t)$  с компонентами по соответствующим осям  $u_y$  и  $u_z$ , а также угловой вектор  $\varphi(x;t)$  с компонентами  $\varphi_y$  и  $\varphi_z$ . Вектор силовых факторов это поперечная сила  $Q(x;t)$  и изгибающий момент  $M(x;t)$  с компонентами  $M_y$  и  $M_z$ .

Дисбаланс вала по осям  $y$  и  $z$  имеет компоненты  $e_1$  и  $e_2$ .



При учете инерционных нагрузок которые возникают при колебании валов уравнения, описывающие эти колебания будут следующими

$$m \frac{\partial^2 U_y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EJ \frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + f \left( \frac{\partial^3 U_y}{\partial x^2 \partial t} + \omega \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} \right) \right] + \beta \frac{\partial U_y}{\partial t} + KU_y =$$

$$= m\omega^2 (e_1 \cos \omega t - e_2 \sin \omega t), \quad (6)$$

$$\frac{m \partial^2 U_z}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EJ \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} + f \left( \frac{\partial^3 U_z}{\partial x^2 \partial t} + \omega \frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} \right) \right] + \beta \frac{\partial U_z}{\partial t} + KU_z =$$

$$= m\omega^2 (e_1 \sin \omega t + e_2 \cos \omega t). \quad (7)$$

Обычный алгоритм решения таких уравнений требует задания граничных условий. Для вала заготовки установленного на операции могут быть два варианта со свободным концом  $Q_y=Q_z=0$  и  $M_y=M_z$  или с жесткой заделкой  $u=0$ ;  $\varphi=0$ . Первый вариант означает, что на конце нет реакций поперечных сил. Во втором варианте - отсутствуют поперечные и угловые смещения.

Точность обработки на операциях, связанных с вращением или заготовки или инструмента, напрямую связана с величиной упругих деформаций элементов технологической системы. Если мы говорим про обработку токарную, где вращается заготовка, к слабым звеньям в технологической системе будет отнесена именно она. Поэтому для анализа точности технологических операций выполняемых на станках токарного типа, необходимо анализировать смещение и колебания подсистемы заготовки. При этом, естественно, необходимо учитывать схему закрепления и включать смещения элементов базирующих и фиксирующих заготовку.

Основными расчетными параметрами при анализе динамики технологической системы является понятие технологической жесткости или обратный параметр - технологическая податливость. Зависящий от этих параметров, а также инерционности спектр собственных колебаний, форма собственных колебаний подсистемы заготовки с опорами. Для того, чтобы

определить собственные частоты и формы соответствующих колебаний, можно применить метод граничных элементов, который позволяет по граничным условиям определять эти параметры.

При этом в данном методе расчета можно учитывать, как собственные колебания, так и вынужденные с учетом конструктивных особенностей заготовки, опор, возмущающих воздействий. Любые колебания при обработке можно представить в виде суммы гармонических функций. Тогда смещение заготовки будут описываться уравнениями

$$\begin{aligned} U_y(x,t) &= U_y'(x)\cos\theta t + U_y''(x)\sin\theta t; \\ U_z(x,t) &= U_z'(x)\cos\theta t + U_z''(x)\sin\theta t. \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\theta = \omega$  - для вынужденных колебаний от неуравновешенности и  $\theta = \lambda$  - для колебаний на границах устойчивости.

Если подставить выражение (7) в исходную систему (6), приравнять соответствующие коэффициенты при гармонических функциях  $\sin\theta t$  и  $\cos\theta t$ , получим систему обычных дифференциальных уравнений.

При этом каждое сечение будет определяться набором векторов

$$\bar{a}(x) = \begin{pmatrix} \bar{a}_z' \\ \bar{a}_z'' \\ \bar{a}_y' \\ \bar{a}_y'' \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$$\bar{a}_z' = \begin{pmatrix} \bar{U}_z' \\ \bar{\varphi}_y' \\ \bar{M}_y' \\ \bar{\theta}_z' \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$\bar{a}_z'' = \begin{pmatrix} \bar{U}_z'' \\ \bar{\varphi}_y'' \\ \bar{M}_y'' \\ \bar{\theta}_z'' \end{pmatrix}; \quad (11)$$

$$\bar{a}_y' = \begin{pmatrix} \bar{U}_y' \\ \bar{\varphi}_z' \\ \bar{M}_z' \\ \bar{\theta}_y' \end{pmatrix}; \quad (12)$$

$$\bar{a}_y'' = \begin{pmatrix} \bar{U}_y'' \\ \bar{\varphi}_z'' \\ \bar{M}_z'' \\ \bar{\theta}_y'' \end{pmatrix}. \quad (13)$$

### 2.3 Дискретный подход к моделированию динамики вала

Естественно для длинномерного вала рассматривать математическую модель с распределенными параметрами. Для облегчения расчета можно перейти к дискретному описанию в виде много массовой системы.

Метод граничных элементов весь вал разбивает на определенные участки, которые характеризуются определенными конструктивными параметрами, связанными с размерами этого участка. Например, шейка вала определенного диаметра. Она представляется в виде без массового участка с одинаковой жесткостью на изгиб в его пределах. На конце участка сосредотачивается его масса и, при необходимости, демпфирующий элемент, если учитывается внутреннее трение энергии. При расчете рассматриваются смещения: поперечные деформации и угловые повороты. Эти параметры, а также силовые характеристики по поперечным силам и изгибающим моментам также рассматриваются на крайних узловых участках.

Переходим от описания колебаний в виде системы дифференциальных уравнений к системе линейных уравнений, записанных в матричной форме, которые связывают граничные условия и деформационные параметры в расчетных  $i$ -й и  $(i+1)$ -й ячейках:

$$\bar{a}_{i+1} = [A(G\bar{a} + \bar{g})]i \quad (14)$$

где  $A$  и  $G$ -переходные матрицы участка и узла;  
 $\bar{q}$ -вектор нагрузки.

Метод начальных параметров заключается в том, что краевая задача сводится к решению нескольких задач Коши с соответствующими начальными условиями.

Решение тогда

$$\bar{a}_i = P_i \bar{a}_0 + \bar{u}_i, \quad (15)$$

где  $\bar{a}_0$  -вектор начальных параметров для крайнего торца вала;

$P_i$  -квадратная матрица, столбцами которой являются 16 нормальных решений;

$u_i$ -вектор частного решения, определяемый внешней нагрузкой.

Для определение собственных колебаний необходимо расписать формулу (14) при  $u=0$  для правого торца заготовки. Из системы линейных однородных уравнений находится относительно неизвестных начальных параметров решение. Условие существования данного решения, равно нулю определителя системы линейных однородных уравнений

$$\Phi(\omega = \Omega_i) \equiv 0, (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (16)$$

где  $\Omega_i$  - собственные частоты системы.

Затем для каждой собственной частоты  $\Omega_i$  по (15) находим соответствующую форму колебаний.

В случае внешнего возмущения ( $q=0$ ) в систему уравнений будет входить возмущающая сила с частотой, которая определяется вращением заготовки. К этому приводят все задачи о вынужденных колебаниях с

частотой вращения  $\omega$ . Кроме этого данное возмущение может определяться другими составляющими, например, переменным припуском [17].

Из системы неоднородных уравнений находят неизвестные восемь начальных параметров. Это поперечные смещения, угловые смещения, поперечные силы и изгибающие моменты.

Для расчета колебаний длинномерного вала установленного в системе самоцентрирующих люнетов (рисунок 5) применим расчетную схему, согласно рисунка 6.

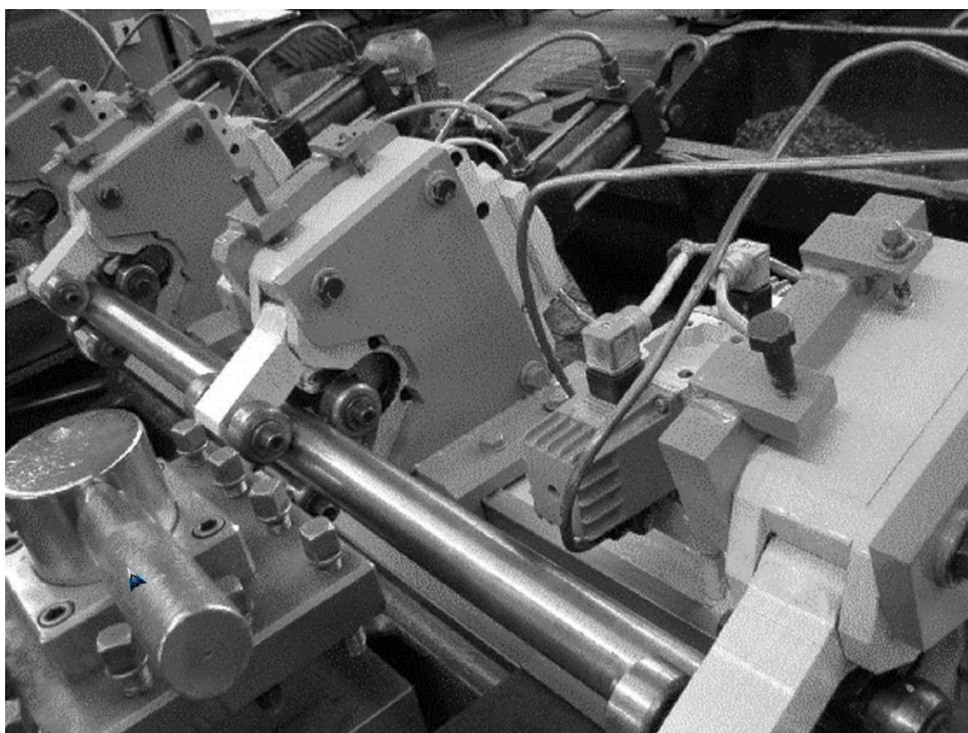


Рисунок 5 – Установка со стороны задней бабки

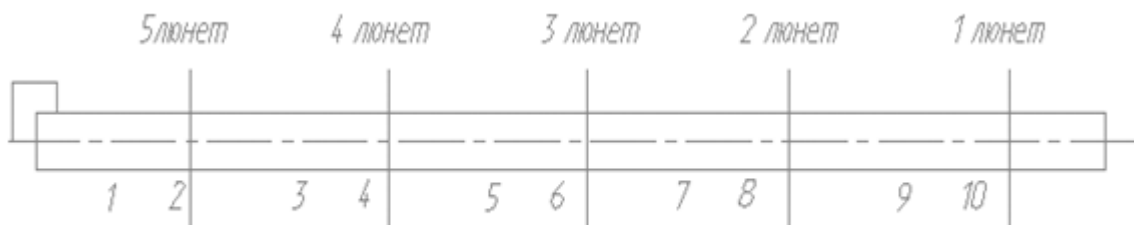


Рисунок 6 – Схема установки люнетов

Если рассматривается задача по определению колебаний вынужденных действием периодической силы, решается уравнение

$$EJ \frac{\partial^2 v}{\partial x^4} + \rho F \frac{\partial^2 v}{\partial t^4} = A \omega^2 \cos \omega t \sin \frac{\pi x}{l}, \quad (17)$$

для которого граничные условия будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} x = 0; & & Q_0 = K_{oy} y_0; & & M_0 = 0; \\ x = l; & & Q_l = -K_{ey} y_l; & & M_l = 0; \\ x = x_p; & & M_{p+} = M_{p-}; & & \varphi_{p+} = \varphi_{p-}; \\ & & & & Q_{p+} = Q_{p-} + P_y, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $EJ$  -изгибная жесткость вала;

$F$ -площадь поперечного сечения,

$\rho$  - плотность,

$A$  - постоянная,

$\omega$ -угловая скорость вала.

В случае свободных колебаний для распределенной системы:

$$EJ \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho F \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \quad (19)$$

где  $v$  -поперечное перемещение стержня.

Решение будет иметь вид

$$v(x, t) = y(s) \sin \omega t. \quad (20)$$

А для  $y(x)$  уравнение колебаний

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - \frac{\lambda^4}{l^4} y = 0, \text{ где } \lambda = l \sqrt{\frac{\rho F \omega^2}{EJ}}. \quad (21)$$

Если амплитуда угла поворота  $\varphi$ , изгибающий момент  $M$  и поперечная сила  $Q$  решение уравнения (20)

$$y(x) = y(0)S_1(x) + \varphi(0)lS_2(x) + \frac{M(0)l^2}{EJ}S_3(x) + \frac{Q(0)l^3}{EJ}S_4(x), \quad (22)$$

где функции Крылова  $S_i(x)$

$$\begin{cases} S_1(x) = \frac{1}{2} \left( ch \frac{\lambda x}{l} + \cos \frac{\lambda x}{l} \right); \\ S_2(x) = \frac{1}{2\lambda} \left( sh \frac{\lambda x}{l} + \sin \frac{\lambda x}{l} \right); \\ S_3(x) = \frac{1}{2\lambda^2} \left( ch \frac{\lambda x}{l} - \cos \frac{\lambda x}{l} \right); \\ S_4(x) = \frac{1}{2\lambda^3} \left( sh \frac{\lambda x}{l} - \sin \frac{\lambda x}{l} \right). \end{cases} \quad (23)$$

Зависимости (16) в матричной форме

$$Y(x) = A(x)Y(0), \quad (24)$$

в которой соответствующие матрицы

$$Y(x) = \begin{pmatrix} y(x) \\ \varphi(x)l \\ \frac{M(x)l^2}{EJ} \\ \frac{Q(x)l^3}{EJ} \end{pmatrix}; \quad (25)$$

$$Y(0) = \begin{pmatrix} y(0) \\ \varphi(0)l \\ \frac{M(0)l^2}{EJ} \\ \frac{Q(0)l^3}{EJ} \end{pmatrix}; \quad (26)$$

$$A(x) = \begin{pmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\ \lambda^4 S_4 & S_1 & S_2 & S_3 \\ \lambda^4 S_3 & \lambda^4 S_4 & S_1 & S_2 \\ \lambda^4 S_2 & \lambda^4 S_3 & \lambda^4 S_4 & S_1 \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Матрица  $A$  –“матрица переноса” преобразует параметры в сечении с абсциссой  $X=0$  в параметры сечения  $X=l$ .

Для  $k$ -го участка вала матрица жесткости имеет вид

$$A_{k-1;k} = \begin{pmatrix} S_1 & \beta_k S_2 & \frac{\beta_k^2}{\alpha_k} S_3 & \frac{\beta_k^3}{\alpha_k} S_4 \\ \frac{\lambda_k^4}{\beta_k} S_4 & S_1 & \frac{\beta_k}{\alpha_k} S_2 & \frac{\beta_k^2}{\alpha_k} S_3 \\ \frac{\lambda_k^4}{\beta_k} dk S_3 & \frac{\lambda_k^4}{\beta_k} dk S_4 & S_1 & \beta_k S_2 \\ \frac{\lambda_k^4}{\beta_k^2} dk S_2 & \frac{\lambda_k^4}{\beta_k^2} dk S_3 & \frac{\lambda_k^4}{\beta_k^2} dk S_4 & S_1 \end{pmatrix}, \quad (28)$$

где  $\alpha$  равен отношению  $EJ_k/EJ$ ;

$EJ_k$ -изгибная жесткость  $k$ -ого участка;

$F_k$  - площадь  $k$ -ого участка.

Параметр отношения длины участка ко всей длине вала

$$\beta = l_k/l, \quad (29)$$

где  $l$ -пролет стержня;

$l_k$ -длина  $k$ -ого участка, заключенная между  $k-1$  и  $k$ -м сечениями.



А коэффициент податливости

$$\lambda_K^4 = l_K^4 F_K \rho w^2 / EJ. \quad (30)$$

Матрица жесткости  $A$  для  $k$ -го участка при  $\rho = 0$  и  $\lambda = 0$  состоит из участка длиной  $l_K$  с жесткостью  $EJ_K$ .

$$G_{k-1;k} = \begin{pmatrix} 1 & \beta_k & \frac{\beta_k^2}{2\alpha_k} & \frac{\beta_k^3}{6\alpha_k} \\ 0 & 1 & \frac{\beta_k}{\alpha_k} & \frac{\beta_k^2}{2\alpha_k} \\ 0 & 0 & 1 & \beta_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (31)$$

где  $\beta$  - параметр отношения длины участка ко всей длине вала;

$\alpha$  - отношение  $EJ_K/EJ$ .

Матрица  $M_k$  в отличие от матриц  $A_{k-1;k}$  и  $G_{k-1}$  осуществляет точечное преобразование параметров при переходе через сечение

$$M_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \nu_k & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (32)$$

где  $\nu_k$  - поперечное колебание массы.

Если в  $k$ -ом сечении сосредоточить точечно массу  $m_k$ , то амплитуда колебаний поперечной силы будет иметь величину  $m_k \omega w$ .

В  $k$ -м сечении стержня расположена упругая опора с коэффициентом жесткости  $K_k$ . Поперечная сила равна величине реакции опор а соответствующая матрица:

$$Q_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\varepsilon_k & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (33)$$

где  $\varepsilon_k$  коэффициент

$$\varepsilon_k = \frac{K_k l^3}{EJ} \quad (34)$$

В следующем разделе по указанным формулам проведен расчет смещений оси вала.

Выводы по разделу

Разработана математическая модель в виде системы уравнений в частных производных для мало жесткой заготовки, рассматриваемой как распределенная система. Приведено общее решение данных уравнений, а также отмечены вычислительные трудности для определения положения упругой оси заготовки.

Предлагается перейти от системы дифференциальных уравнений к системе уравнений в матричной форме на основе метода начальных параметров, который позволяет также учитывать все конструктивные параметры заготовки и опор. Представлены переходные матрицы для различных участков, которые характеризуются жесткостью, инерционностью, упругостью и демпфированием.

### **3 Теоретическое исследование динамики обработки вала**

#### **3.1 Обоснование системы установки в люнетах**

Задача по точной установке длинномерного мало жесткого вала на станках токарного типа может решаться различными способами. Традиционный подход связан с использованием самоцентрирующих патронов для центрирования в одном из крайних сечений заготовки с передачей крутящего момента, а с другой стороны осуществляется поджим задним центром. Для устранения провисания заготовки и снижения влияния ее неуравновешенности при вращении используют промежуточную опору или систему опор. Таким элементом выступает люнет. Он бывает разного исполнения: с закрытой и открытой частью для установки вала. В последнем случае возможна обработка непосредственно в сечении, где расположена данная опора. При вращении мало жесткой заготовки, ее части, которые находятся в пролете между опорами, испытывают действия центробежных возмущающих сил. Это приводит к тому, что заготовка начинает отклоняться в поперечном направлении с изгибом продольной оси. В результате этого происходит угловое смещение в месте расположения самой опоры. Поэтому такой подход отличается ограниченностью технологических возможностей и он не устраняет главную причину повышенной погрешности – недостаточную и неравномерную жесткость вдоль оси заготовки.

Использование системы люнетов, расположенных вдоль оси заготовки с равномерным шагом приводит к сокращению длины пролетов между опорами и соответствующему повышению жесткости. Но в этом случае возникает новая причина динамических возмущений, действующих в процессе резания. При установке данных опор на одну технологическую ось возникает несоосность, определяемая методом настройки и точностью используемых контрольно-измерительных средств. В результате несоосности при вращении возникают кинематические возмущения, аналогичные

действия поперечных сил, возникающих при вращении коленчатого вала. Каждое сечение, расположенное в месте расположения опоры можно представить в виде небольшого шарнира, имеющего определенный эксцентриситет. При этом направление этих эксцентриситетов относительно оси заготовки может иметь случайный характер. И при вращении возникает кинематическое возмущение, которое равно или кратно частоте вращения заготовки.

Решение данной проблемы может лежать в области регулирования параметров опор вдоль оси заготовки с учетом расположения зоны резания. В данном случае необходимо стабилизировать только те сечения, где происходит процесс обработки. Для этого опоры, расположенные вдоль оси заготовки, должны иметь возможность изменять характер воздействия на зажимаемую поверхность.

Разработанная конструкция самоцентрирующего люнета предусматривает использование механизированного привода зажима на основе гидравлического привода. Данный механизм может работать в двух режимах. Первый, когда давление оказывается непрерывно на поршень-шток и это приводит к сжатию с заданной силой рычагов базовыми роликами. На базовую поверхность оказывается непрерывное силовое воздействие с заданной величиной. Во втором случае давление, действующее на золотниковом устройстве, убирается. В результате этого расположение рычагов будет обеспечено на том уровне, когда сила сжатия при подаче давления действовала, но само силовое воздействие отсутствует. При этом рычаги оказывают стабилизирующее воздействие на базовую поверхность заготовки, проводя гашение динамических возмущений от неуравновешенности вращающейся заготовки. Отслеживание положения зоны обработки, со своевременным переключением характера работы данных опор, обеспечивает равную жесткость обрабатываемых сечений с одновременным гашением динамической неуравновешенности. В результате у нас получается двойной эффект. Это и выравнивание коэффициента

жесткости вдоль оси заготовки и устранение кинематических возмущений от неточности установленных опор относительно технологической оси станка.

Использование такой системы опор с переменным режимом работы позволяет дополнительно отказаться от использования заднего центра. Как показали теоретические и экспериментальные исследования, силовое замыкание заготовки между кулачками зажимного патрона и задним центром создает дополнительную погрешность при обработке. Она связана с температурным удлинением самого вала. При обработке происходит нагрев элементов технологической системы, и в том числе, заготовки [18].

При нагревании вала происходит его удлинение вдоль оси, что приводит к созданию дополнительной продольной силы. Действие этой силы направлено на сжатие заготовки. Даже для небольшого эксцентриситета по расположению осевых точек в крайних сечениях возникает изгибающий момент, который приводит или к дополнительному искривлению оси заготовки. Действие этой силы является переменным, так как температурный нагрев самой заготовки в процессе резания изменяется.

Дополнительным эффектом от использования люнетов является также выравнивание качества обработанной поверхности. Так как стабилизируются параметры по жесткости, это приводит, во-первых, к уменьшению упругих деформаций технологической системы, так и к их стабилизации. Мы наблюдаем снижение, как средней величины, так и среднеквадратичного отклонения деформаций.

Это сказывается на всех уровнях геометрической точности как точности размеров, расположения и формы. При выравнивании и стабилизации высокочастотных составляющих с частотой выше 1000 Гц происходит стабилизация микронеровностей обработанной поверхности. Это определяется тем, что весь спектр колебаний технологической системы взаимодействующих подсистем отражается на геометрии обработанной заготовки. Так как относительные колебания подсистем заготовка-опоры и инструмент-суппорт имеет разный частотный состав, от нескольких герц до

тысяч Герц, все это отражается на всей совокупности геометрических показателей обработанной заготовки [19].

Характер колебаний определяется собственными частотами взаимодействующих подсистем. В данном случае система заготовка - опоры является генератором низкочастотных колебаний, связанных с частотой вращения заготовки, а подсистема инструмента выступает генератором высокочастотных составляющих колебаний. Последние определяют деформации инструмента в различных направлениях. Доминирует смещение в тангенциальной плоскости вдоль действия вектора скорости резания. Возможно появление колебаний также в продольном направлении, совпадающим с движением подачи. В радиальном направлении колебания подсистемы инструмента определяются смещением всей суппортной группы, которые имеют относительно низкие собственные частоты и поэтому могут являться источником только низкочастотных колебаний. Но, с точки зрения формирования общей точности, доминирующее влияние оказывает подсистема заготовка – опоры, так как доля деформации этой системы составляет большую часть в общей погрешности от упругих деформаций.

Смещения инструмента могут иметь стабилизирующий характер [20]. Такой метод вибрационной стабилизации низкочастотных колебаний использует автоколебательный характер смещения инструмента средней и высокой частоты. За счет этого происходит рассеивание энергии колебаний в поперечном направлении заготовки с уменьшением их амплитуды. Данный способ повышения точности при вибрационной обработке имеет недостаток, связанный с большими циклическими нагрузками, действующими на инструмент в условиях повышенного трения и разогрева контактной зоны. Стойкость режущего инструмента в этом случае может снижаться, несмотря на то, что высоко- и среднечастотные колебания, прикладываемые к зоне резания, приводят к частичному разупрочнению обрабатываемого материала и снижению, за счет этого, силы резания [26].

Спектральный состав колебаний определяется так называемыми модами или гармониками колебаний, которые могут быть собственными или вынужденными. В случае совпадения последних наблюдается эффект резонанса с значительным возрастанием амплитуды колебаний. На этом основан один из подходов повышения вибрационной устойчивости технологической системы. Для этого определяют заранее области расположения собственных частот колебаний всех элементов технологической системы. Далее при выборе режимов обработки стараются назначить их в таком диапазоне, где возникающие вынужденные колебания по частотному составу не будут совпадать с спектром собственных колебаний элементов станка. Происходит так называемая рассогласованность по частотам с повышением точности и качества обработанной поверхности.

Использование люнета дает возможность обработки не только наружных, но и внутренних поверхностей заготовки. При этом возможна одновременная обработка отверстия и наружной цилиндрической поверхности. При обработке тонкостенных втулок это дает дополнительный технологический эффект, связанный с уменьшением прогиба самой стенки обрабатываемой втулки. Это обеспечивается за счет того, что каждый из инструментов, действующих напротив друг друга, выступает в роли дополнительной стабилизирующей опоры. Недостатком здесь может быть то, что зона резания двух инструментов располагается близко друг другу и они могут увеличивать динамический характер возмущения. При расстановке люнетов общепринятым является их разнесение на длину, учитывающую диаметр заготовки. Величина пролета не должна превышать, как правило, пяти диаметров. Это связано с тем, что при таком соотношении длины пролета заготовки и диаметра, обеспечивается эффективное гашение динамических вибраций, в том числе низкочастотного состава [27].

Само расположение люнетов можно согласовывать с положением, так называемых узлов и пучностей гармоник колебаний заготовки, которые определяются на основе собственного спектрального состава. Как правило,

учитываются не выше третьей гармоники колебаний, так как более высокочастотный состав спектра вносит относительно небольшую долю в общую энергию динамических возмущений [28].

Дополнительным эффектом, обеспечивающим стабилизацию оси заготовки, является угловое расположение люнета. Основным конструктивным элементом, который обеспечивает передачу силы зажима на базовой поверхности заготовки, является шток-поршень. На конце этого элемента располагается центральный базирующий ролик. Два рычага, которые опираются через промежуточные ролики на копир, приводятся в движение при продольном перемещении этого штока. Располагая его под определенным углом к горизонтальной плоскости, можем обеспечить более точное совпадение действия равнодействующей силы резания и данного элемента опоры. Это приводит к тому, что максимальная величина силы резания будет компенсироваться наиболее жестким элементом технологической опоры.

Для снижения действия возмущающих сил и от несоосности технологических опор и патрона, который передает крутящий момент, наиболее благоприятной ситуацией является использование поводкового кулачкового патрона. Это дает возможность разъединить центрирование в данном сечении с передачей крутящего момента. То есть функция базирования заготовки в радиальном направлении будет передана только на систему самоцентрирующих люнетов.

Возникает задача: за счет выбора параметров дополнительных опор, то есть их жесткости и демпфирования, а также подбором временного цикла переключения этих опор из одного режима работы в другой, необходимо обеспечить стабилизацию собственных частот колебаний подсистемы заготовка опоры, а также максимально повысить общую жесткость данного элемента. Тем самым мы будем стабилизировать условия обработки по всей длине заготовки.



### 3.2 Метод начальных параметров

Для моделирования поведения оси заготовки маложесткого вала, установленного в системе промежуточных опор на токарной операции с переключением режимов работы этих опор, применим метод начальных параметров [29].

До этого необходимо для каждого характерного участка вала составить переходную матрицу. Характерным участком можно считать для вала с цилиндрической поверхностью участок, соответствующий длине какой-либо гармонике колебаний. Если это ступенчатый вал, характерным участком будет конструктивный элемент заготовки, который имеет определенные геометрические характеристики - диаметр и длину. Составляется для каждого такого участка соответствующая переходная матрица в виде двух элементов: матрицы безмассового участка для невесомого стержня и матрицы массы для данного участка, который сосредотачивается на его конце.

Для описания поведения всего вала данные матрицы последовательно перемножаются. В месте расположения технологических опор в общее уравнение добавляется матрицы упругих опор.

Пример такого уравнения в виде произведения матриц переноса показан для перемножения матриц соответствующих участков

$$P = G_n M_n Q_n G_{n-1} M_{n-1} G_{n-1, n-2} \dots M_k Q_k G_{k-1} \dots M_0 Q_0, \quad (35)$$

где  $G_i, M_i, Q_i$  - соответствующие переходные матрицы, которые учитывают параметры безмассового участка вала, соответствующую массу этого участка и поперечную упругость технологической опоры;

$i$  – номер участка,

$i=0..n$ ;  $n$  – количество участков.

Такое уравнение вычисляется с учетом граничных условий по концам вала. На конце вала патрон кулачковый с минимальной жесткостью в угловом направлении и опора также имеет нулевую угловую жесткость. Принимаем в качестве опор по границам заготовки вала шарниры

$$Y_n = P \cdot Y_0, \quad (36)$$

и если развернуть

$$\begin{pmatrix} Y_n \\ \varphi_n \cdot l \\ \frac{M_n \cdot l^2}{EJ} \\ \frac{Q_n \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_0 \\ \varphi_0 \cdot l \\ \frac{M_0 \cdot l^2}{EJ} \\ \frac{Q_0 \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}, \quad (37)$$

где  $EJ$  - изгибная жесткость участка заготовки;

$l$  - длина вала;

$y_i$ ,  $\varphi_i$ ,  $Q_i$  и  $M_i$  - соответственно поперечное смещение, угол поворота, поперечная сила и изгибающий момент в  $i$  сечении;

$a_{jk}$  - коэффициенты общей матрицы.

Для расчета вала матрица сосредоточенной массы  $M_i$  в  $i$ -ом сечении

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ v_i & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (38)$$

где

$$v_i = \frac{m_i \omega^2 l^3}{EJ}, \quad (39)$$

где  $m_i$  - приведенная в сечении  $i$  масса;

$\omega$  - собственная частота колебаний.

Для без массового участка вала с конструктивной жесткостью  $EJ_i$  и длиной  $l_i$

$$G_i = \begin{pmatrix} 1 & h_i & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} & \frac{h_i^3}{6 \cdot u_i} \\ 0 & 1 & \frac{h_i}{u_i} & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} \\ 0 & 0 & 1 & h_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (40)$$

где

$$h_i = l_i / l, \quad (41)$$

где  $l_i$ - длина  $i$ -ого участка,

$l$ - длина всей детали;

$$u_i = EJ_i / EJ, \quad (42)$$

где  $EJ_i$  - изгибная жесткость  $i$ -ого участка.

В качестве внешней силы принимаем гармоническую силу возмущения, которую привязываем к частоте вращения заготовки. Она может быть ей равна или кратна.

Тогда уравнение с учетом внешнего возмущения для соседних сечений  $i$  и  $i-1$

$$Y_i = G_i Y_{i-1} + \psi_i, \quad (43)$$

где

$$\psi = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{P_i \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}, \quad (44)$$

где  $P_i$  – амплитуда переменной силы, имеющей частоту  $\Omega$ .

Для технологической опоры переходная матрица

$$Q_i = \begin{pmatrix} 1 & h_i & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} & \frac{h_i^3}{6 \cdot u_i} \\ 0 & 1 & \frac{h_i}{u_i} & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} \\ 0 & 0 & 1 & h_i \\ -e_i & -e_i \cdot h_i & -\frac{e_i \cdot h_i^2}{2 \cdot u_i} & 1 - \frac{e_i \cdot u_i^3}{6 \cdot u_i} \end{pmatrix}, \quad (45)$$

где  $e_i = \frac{c_i \cdot l^3}{EJ}$ ;  $c_i$  – коэффициент жесткости люнета.

Из четырех составляющих матриц граничных участков, два условия для шарнира будут равны нулю и для крайних сечений  $Y_0$  и  $Y_n$  они будут иметь вид

$$Y_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi_0 \cdot l \\ 0 \\ \frac{Q_0 \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}; Y_n = \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi_n \cdot l \\ 0 \\ \frac{Q_n \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}. \quad (46)$$

Приравнивая соответствующие элементы матрицы переноса в уравнениях с нулевыми условиями

$$\left. \begin{aligned} 0 &= a_{12} \varphi_0 \cdot l + a_{14} \cdot Q_0 \cdot l^3 / (EJ) \\ 0 &= a_{32} \varphi_0 \cdot l + a_{34} \cdot Q_0 \cdot l^3 / (EJ) \end{aligned} \right\}. \quad (47)$$

Из этой системы уравнений можем определить собственную частоту  $\omega$  колебаний нашей системы. Если рассматривается задача определения формы колебаний заготовки вала для вынужденной силы в этой системе уравнений собственная частота заменяется чистотой вынужденной  $\Omega$ .

Для того чтобы провести расчет для внешней силы из уравнения (47) определяется поперечная составляющая  $Q_0$  и угол поворота  $\varphi_0$  на одном

конце вала. Далее последовательно производим перемножение через матрицы переноса и определяем соответствующие характеристики во всех сечениях заготовки при изменении внешней частоты. Данный алгоритм повторяют еще раз, и находим новую форму колебаний. Для расчета необходимо подставлять в матрицы переноса соответствующие характеристики, определенные или конструктивно для заготовки или экспериментально для технологических опор.

Все технологические расчеты были выполнены с использованием математического пакета Mathcad, где в матричной форме производилась перемножение соответствующих матриц переноса.

Полученные результаты в виде формы оси заготовки вала для различных условий моделирования показаны на рисунках 8-13.

Модель включает в себя 12 узлов, 5 из которых представляют собой упругие опоры S7. Участки вала между ними разбиваются на безмассовые участки и участки с сосредоточенной массой. Результаты моделирования показаны на рисунках 7 – 11, где при различных условиях по жесткости опор приведены результаты смещения оси заготовки.

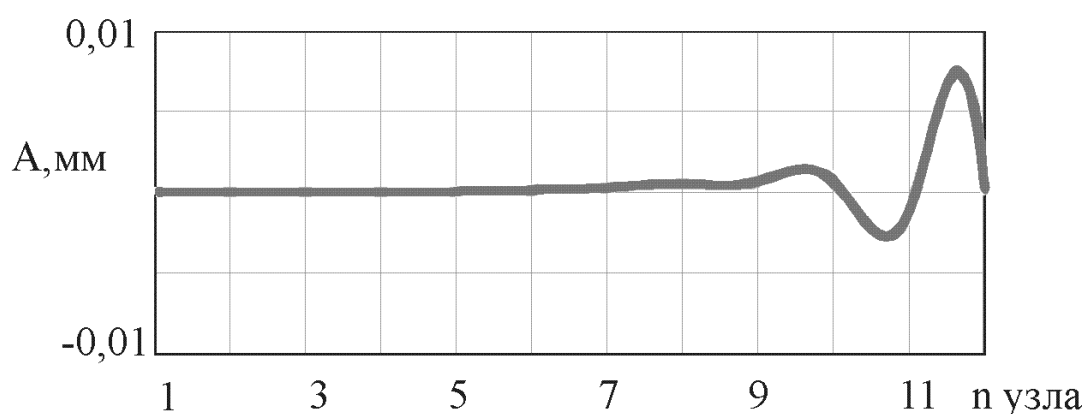


Рисунок 7- Колебания вала: все опоры жесткие (параметры жесткости 120000 Н/м; частота 62,8 Гц; резание в узле Z10)

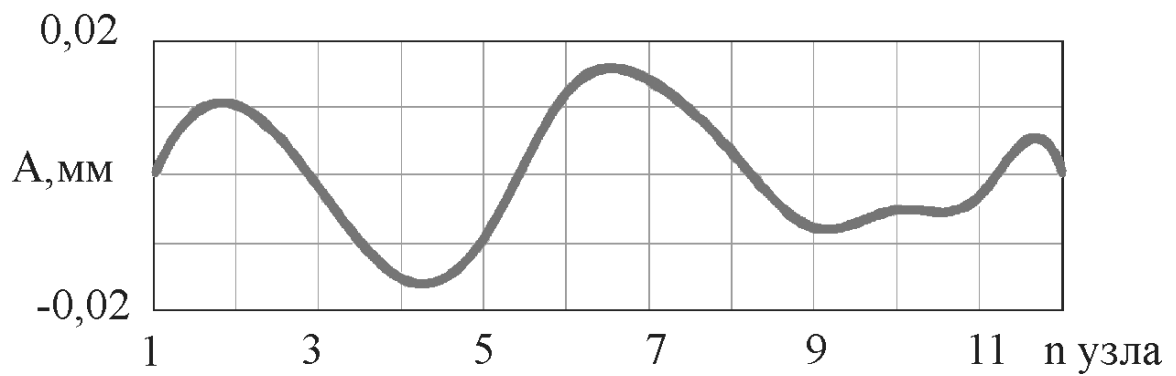


Рисунок 8- Колебания вала: 12000 Н/м; 314; Z10

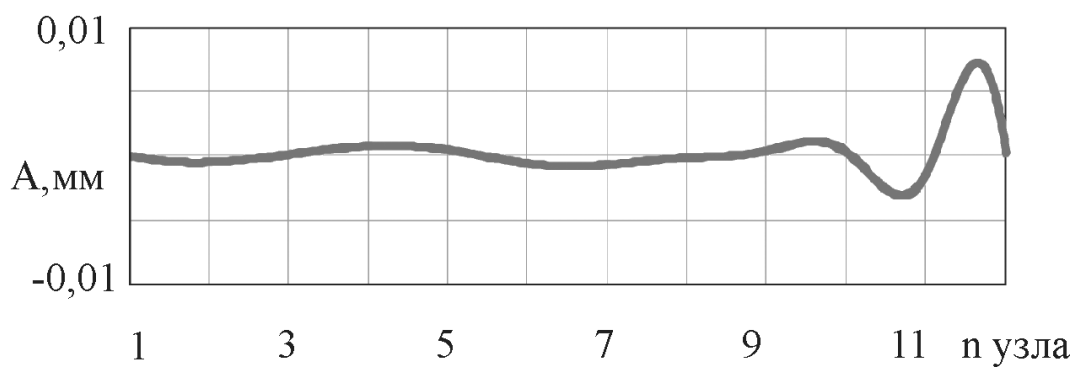


Рисунок 9 - Колебания вала: опоры жесткие 120000 Н/м с зоной резания; остальные демпфирующие 12000 Н/м; 314; Z10

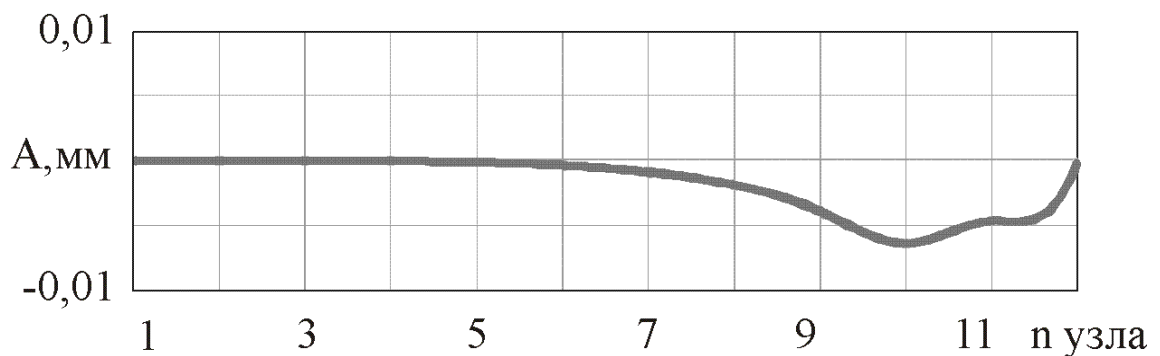


Рисунок 10 - Колебания вала: все опоры жесткие 120000 Н/м; 31,4; Z8

Данные результаты свидетельствуют о том, что форма колебаний оси заготовки очень сильно зависит от характера опор, которые используются для стабилизации ее положения.

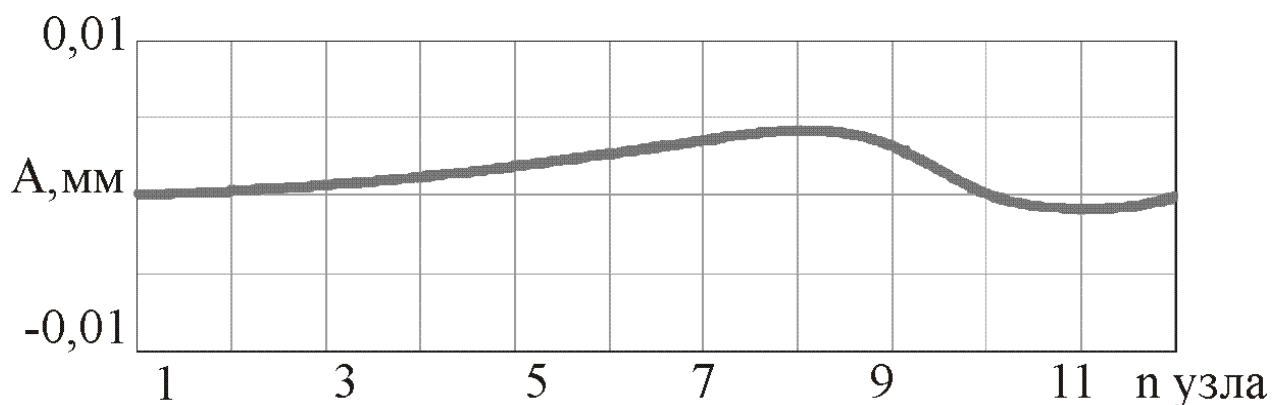


Рисунок 11 - Колебания вала: все опоры демпфирующие 12000 Н/м;31,4; Z8

Полученные результаты расчетов показывают совместное значительное влияние на смещение зоны резания в зависимости от условий обработки. К ним относятся и частота вращения заготовки и положение зоны резания и характеристики технологических опор. Все эти влияющие факторы нужно учитывать обязательно совместно, а не отдельно.

При выборе всех этих параметров необходимо обеспечивать минимальное смещение оси заготовки вала в сечениях, расположенных вне зоны резания, так как динамические возмущения от этих сечений все равно будут передаваться в зону обработки, и приводить к снижению точности и качества обработанной поверхности.

Для постановки задачи по определению амплитуды колебаний с учетом явления резонанса в виде сосредоточенной массы, учитывая жесткость и коэффициент демпфирования, уравнение амплитуды смещения следующее

$$A = \frac{P_0}{c \sqrt{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2}\right)^2 + \frac{4\Omega^2 n^2}{\omega^4}}}, \quad (48)$$

где  $P_0$  - амплитуда возмущающей силы;

$\omega$  - круговая собственная частота колебаний;

$\Omega$  - частота вынужденной силы;

$n$  - коэффициент демпфирования.

В случае постоянства амплитуды вынужденной силы величина амплитуды смещений будет зависеть от комплекса конструктивных параметров: коэффициента жесткости  $c$ , демпфирования  $n$  совместно с собственной частотой колебаний  $\omega$ . При изменении коэффициента жесткости  $c$  в функции продольной координаты вдоль оси заготовки, соответствующий знаменатель изменяется и величина амплитуды  $A$  становится нестабильной. То есть, помимо статического прогиба, который определяется статическим коэффициентом жесткости  $c$ , переменным по длине пролета, возникает переменная динамическая составляющая, связанная с тем же самым фактором.

Определение изменения собственной частоты колебаний при изменении характера режима работы технологических опор необходимо проводить по переходному уравнению колебаний вала с учетом граничных условий для определения собственных частот:

$$\begin{vmatrix} a_{12}a_{14} \\ a_{32}a_{34} \end{vmatrix} = 0. \quad (49)$$

Решая данный определитель, определяем набор собственных частот системы, равный количеству сосредоточенных масс, используемых при моделировании участков заготовки вала. Результаты расчетов свидетельствует о том, что значение собственной частоты колебаний вала при переключении режимов работы люнетов составляет около 60%. Экспериментально изменение собственной частоты определяется из графика переходного процесса при приложении импульсной нагрузки в виде кратковременного удара в соответствующих сечениях. Результаты показывают что собственные частоты различных участков вала изменяются в 1,48 раза (от 30 Гц до 44 Гц).

Вынужденные колебания вала



$$y(t) = A \sin(\omega \cdot t - \gamma), \quad (50)$$

где  $\gamma$  - сдвиг фазы перемещения от силы

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{2\Omega \cdot n}{\omega^2 - \Omega^2}. \quad (51)$$

Из формулы (51) следует, что при изменении знаменателя из-за изменения собственной частоты колебаний  $\omega$  при постоянной частоте вынужденных колебаний  $\Omega$  происходит смещение фазы  $\gamma$ , а это, в свою очередь, по уравнению (50) приводит к не стационарности колебаний из-за изменения общей фазы гармонических колебаний.

#### Выводы по разделу

С учетом определенных экспериментально параметров технологической системы: коэффициентов жесткости, инерционности и демпфирования, произведено моделирование поведения элементов технологической системы обработки точением заготовки, установленной в опорах.

Получены зависимости амплитуды колебаний отдельно для каждой из подсистем, а также амплитуда относительных колебаний, которая определяет точность и качество обработанной поверхности.

Проанализировано влияние различных конструктивных параметров, а также технологических параметров процесса резания (коэффициента жесткости резания, изменяющейся толщины срезаемого слоя) на динамическое поведение взаимодействующих элементов.

## **4 Экспериментальное исследование колебаний вала**

### **4.1 Исследование собственных частот**

Задачей данного эксперимента было определение собственных частот подсистемы заготовка - опоры в зависимости от характера работы самоцентрирующих люнетов. Режим работы данных опор может осуществляться в двух видах. Режим жесткой опоры действует, когда давление рабочей среды в гидроцилиндре действует все время в течении закрепления. Режим демпфирующая опора реализуется при перекрытии давления рабочей среды. В результате давление с обеих сторон поршня гидравлического привода одинаковое. Рабочие полости перекрыты, рычаги люнетов находятся в положении, которое было обеспечено при их схождении при подаче давления, но непосредственно в работе, рычаги на заготовку не действуют. Вдоль оси заготовки образца стоит пять опор. Режим их работы может переключаться в произвольном сочетании.

В ходе проведения экспериментальных работ использовался токарный станок РВ106 оборудованный системой стационарных самоцентрирующих люнетов. Для экспериментальных исследований использовалась заготовка в виде прутка, который имел постоянный диаметр 30 мм. Общая длина образца составляла 3000 мм. Материал прутка 30ХН3А. Использовались пять стационарных опор с гидравлическим приводом зажима и оборудованные системой переключения режима работы опор. В ходе экспериментальных исследований крайние элементы всегда в режиме работы жестких опор для создания оси вращения заготовки. Три центральных люнета переключались в различные режимы в соответствии с сечением, в котором происходило или исследование собственных колебаний или проводился процессор резания. Для определения жесткости опор использовалась система нагружения при помощи динамометрического устройства. В результате были получены

следующие коэффициенты жесткости. Режим жестких опор:  $K = 20 \cdot 10^6$  Н/м; режим демпфирующих опор -  $K = 0.5 \cdot 10^6$  Н/м.

Сигнал о смещениях заготовки получали с помощью бесконтактного датчика Bently–Nevada, работающего на принципе изменения электромагнитного поля при внесении в него электропроводящего материала. Принцип работы токовихревой. Для питания датчика использовался напряжение 18 вольт. Сигнал с датчика заводился через звуковую карту на цифровой осциллограф и регистрировался в виде файла с форматом Wave.

Поперечные смещения оси заготовки вала регистрировалась для холостого хода. Режим работы шпинделя принимался следующим. Обороты шпинделя  $n$  изменялись в диапазоне от 120 до 400 об/мин.

Зарегистрированные колебания во время увеличения частоты вращения заготовки увеличиваются от 0,03 до 0,11 мм.

Сам зарегистрированный сигнал имеет полигармоническую форму. Разложение временной развертки сигнала с использованием преобразования Фурье в амплитудно-частотные спектр показывает наличие множества гармоник, большинство из которых кратно несущей частоте колебаний, определяемый частотой вращения заготовки. Период колебаний составлял  $T=0,06-1,15$ с.

Высокочастотные составляющие колебания в спектре сигнала определяются возмущением на холостом ходу от элементов опор. Это возмещение действующие от базовых роликов, которые конструктивно вращаются в игольчатых подшипниках, которые имеют высокую собственную частоту, передающиеся на базируемую заготовку. Также возмущения возможны от шпиндельных опор самого станка. Несущие подшипники - роликовые или шариковые, вызывают превращение гармонических возмущений с частотой равной или кратной числу несущих элементов в виде роликов или шариков. В случае использования самоцентрирующих люнетов возмущения от шпиндельной опоры эффективно гасятся в частотном диапазоне от 100 до 500 Герц.

Использование системы люнетов, которые можно переключать в разные режимы работы, расширяет технологические возможности за счет отстройки собственной частоты подсистемы заготовка опоры от частоты возмущающей силы, которая может определяться или частотой вращения заготовки или быть кратно. Например, от неравномерности снимаемого припуска. В последнем случае частота возмущения все равно будет кратно равна частоте вращения заготовки.

Как показывают результаты аналитического исследования методом начальных параметров, минимальное смещение оси заготовки будет при включении жесткого режима опор на всех люнетах. Но как уже было сказано выше, в этом случае будет наблюдаться кинематическое возмущение с максимальной амплитудой из-за погрешностей выверки этих опор относительно одной технологической оси. Больше амплитуда наблюдается в случае, если режим жестких опор включается только в том месте, где проходит зона обработки, а остальные люнетов, кроме крайних работают в режиме демпфирующих опор.

Особенностью обработки длинномерных заготовок является то, что в начальный момент времени они могут иметь значительную кривизну. Обычно она устраняется при помощи предварительной правки. Если отсутствует технология или устройство для проведения специализированной правки таких длинномерных заготовок, остаточная кривизна может достигать значительных значений (до миллиметров). Поэтому на первоначальном проходе такую заготовку целесообразно обрабатывать в люнетах, которые работают в режиме только демпфирующих опор. Это позволит снизить возмущение, которое возникает при вращении заготовки, имеющей начальную кривизну.

Кроме этого, если заготовку со значительной начальной кривизной закрепить в жестких люнетах, произойдет в ее продавливание в прямолинейное положение за счет упругих деформаций заготовки. При

раскреплении произойдет обратная деформация с восстановлением исходной кривизны.

Предельно достижимая погрешность с использованием такой системы стабилизации оси заготовки для вала длиной до 3 м обеспечивает погрешность не более 50 мкм с шероховатостью не более Ra 6,3 мкм.

В ходе эксперимента в радиальном направлении по центру заготовки устанавливался датчик бесконтактного контроля токовихревого типа Bentley Nevada. Через АЦП он подключался к компьютеру, где в программе в цифровом осциллографе производилась запись колебаний заготовки. Частота дискретизации равнялась 10000 Герц. Рабочий диапазон датчика до 3 м, где наблюдается линейная зависимость зазора и выходного напряжения. Импульсное воздействие на заготовку осуществлялась при помощи ударного динамометрического молотка. Несколько раз, с интервалом, достаточными для затухания собственных колебаний, проводилось ударное воздействие в радиальном направлении в сечение заготовки, где определяли собственные колебания.

Результаты, полученные в ходе эксперимента, представлены на последующих рисунках в виде записанной временной последовательности, а также результаты спектрального анализа. Спектр определялся двумя способами. Это быстрое преобразование Фурье и определение энергетического спектра колебаний. Измерения производились в разных сечениях заготовки, в пролете между опорами, непосредственно под опорами в виде рычагов с зажимными роликами при различных рабочих режимов действия опор.

Первый результат показывает колебания заготовки между первым и вторым люнетами (отсчет ведется с правого торца заготовки) при установке в люнетах в режиме демпфирования.

Получена запись колебаний для пяти ударов и на рисунке 12 развернутая запись по временной шкале X, где виден сложный полигармонический характер смещений заготовки с постепенным их

затуханием, которое определяется демпфированием в данном сечении заготовки.

Энергетический спектр показывает сложный составной гармонический сигнал собственных колебаний с доминирующей частотой (рисунок 13).

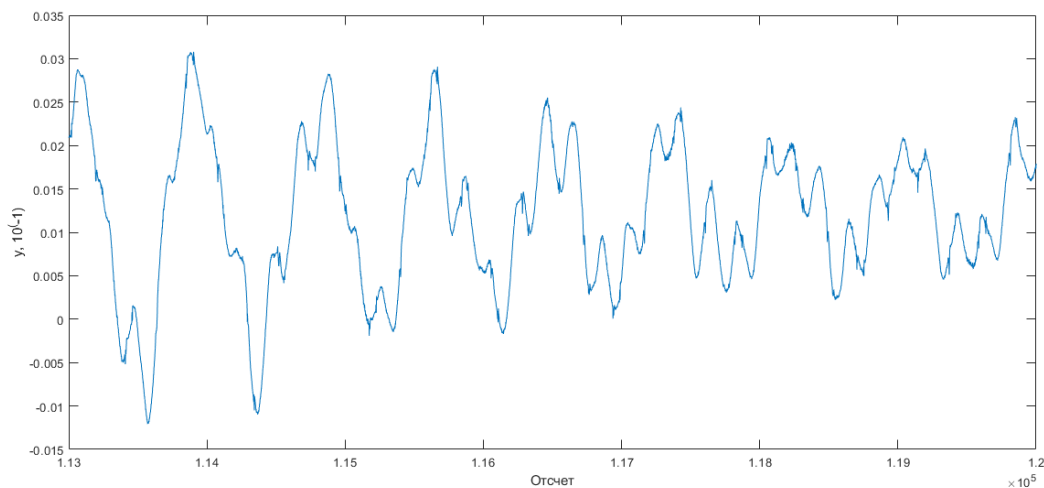


Рисунок 12 - Колебания между 1 и 2 люнетом. Все люнеты демпфирующие. Давление 25 атм (увеличенный масштаб)

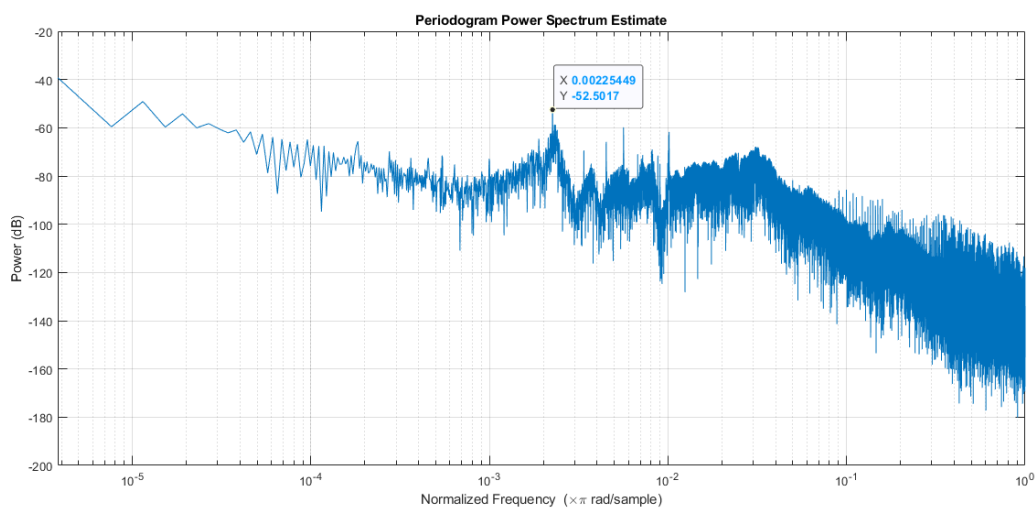


Рисунок 13 - Энергетический спектр колебаний между 1 и 2 люнетом. Все люнеты демпфирующие. Давление 25 атм.

На следующем рисунке 14 показана запись аналогичных сигналов при работе всех опор в режиме жестких люнетов. По характеру затухающие колебания сильно не изменились на спектре колебаний и видно, что произошло небольшое смещение в область более высоких частот. В герцах это соответствует 26 Гц. На спектре колебаний, полученных быстрым преобразованием Фурье (рисунок 15), видно несколько гармонических составляющих, которые имеют большую амплитуду и расположенных примерно на одинаковом расстоянии (рисунок 16). После 500 Герц спектр практически сходит в ноль, то есть высокочастотные составляющие отсутствуют в принципе.

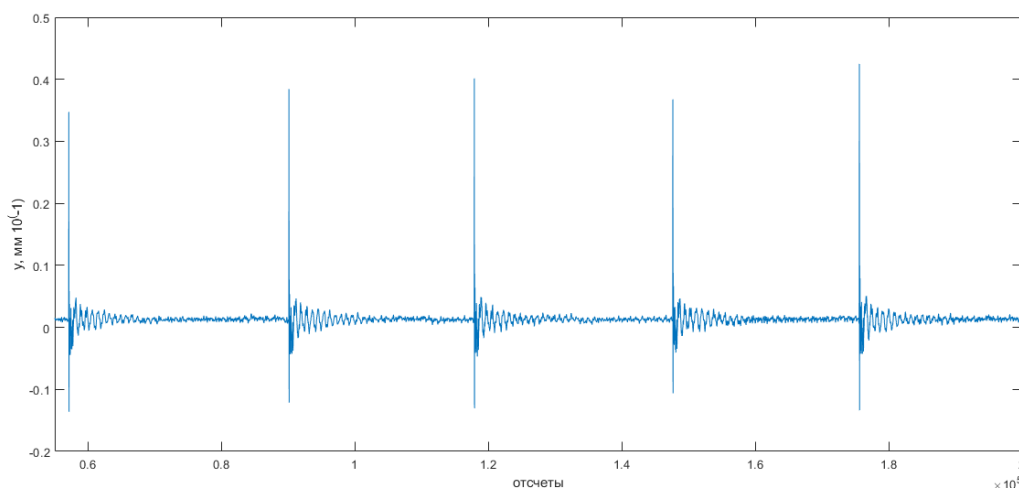


Рисунок 14 - Колебания между 1 и 2 люнетом. Все люнеты жесткие.  
Давление 25 атм.

Для следующего сечения между вторым и третьим элементом характер колебаний даже по внешнему виду отличается достаточно сильно (рисунок 17). Но особенно ярко это проявляется в спектре, где даже общее его поведение изменяется значительно.

Значение частоты, соответствующей первому пику на энергетическом спектре (рисунок 18), отличается значительно. Оно почти совпадает со

значением частоты, полученной в первом сечении при жестком режиме работе опор.

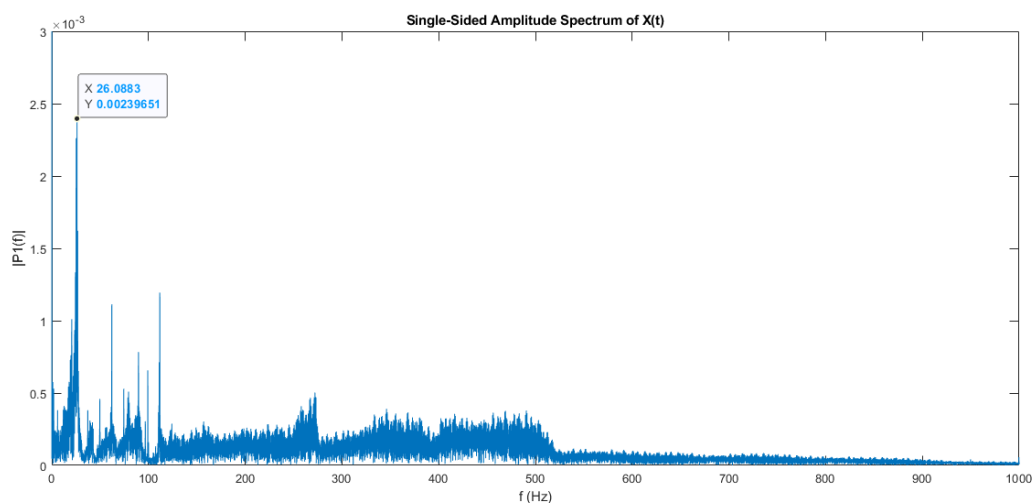


Рисунок 15 - Спектр колебаний между 1 и 2 люнетом. Все люнеты жесткие. Давление 25 атм.

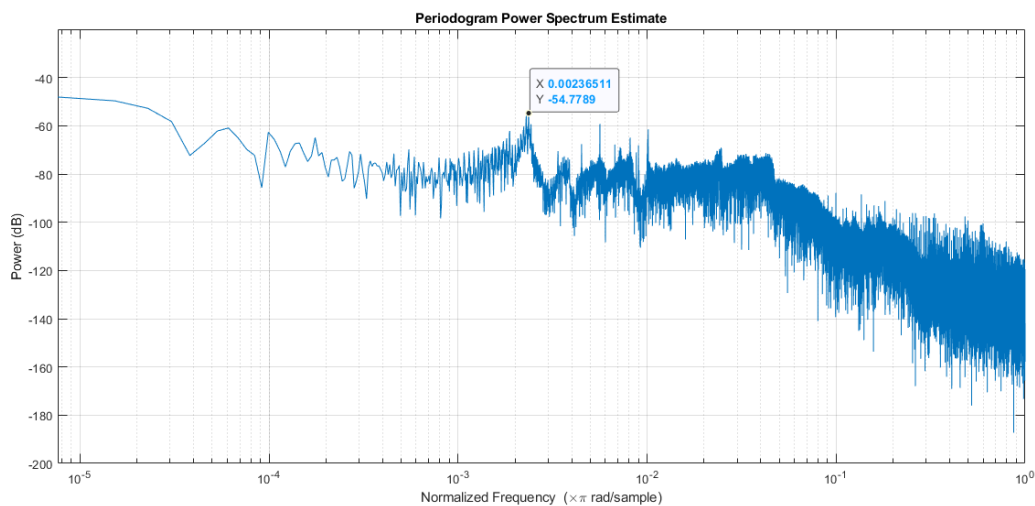


Рисунок 16 - Энергетический спектр колебаний между 1 и 2 люнетом. Все люнеты жесткие. Давление 25 атм.

На спектре наблюдаются значительные гармоники более высокого порядка. Хорошо это видно на спектре, полученном быстрым преобразованием Фурье, где эти более высокие гармоники имеют



значительное количество и, при этом, небольшое затухание с ростом частоты колебаний.

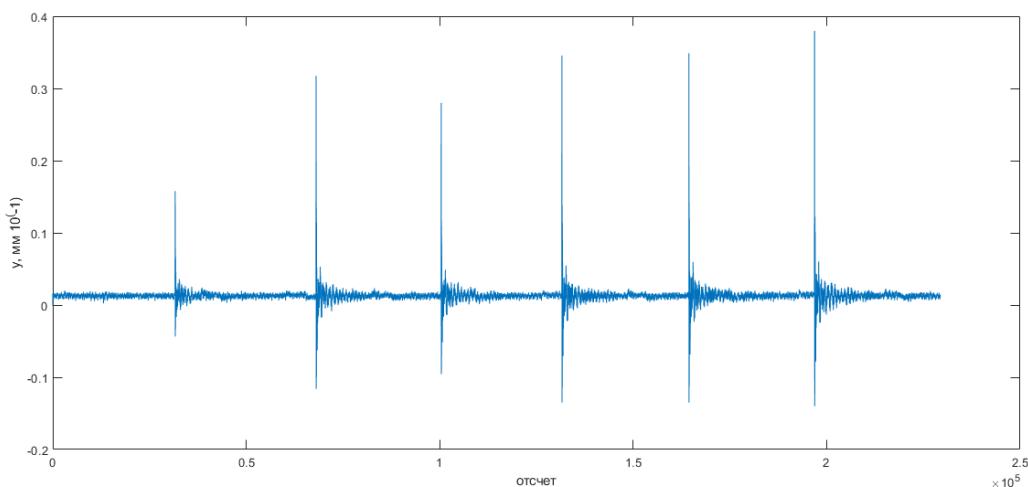


Рисунок 17 - Колебания между 2 и 3 люнетом. Все люнеты демпфирующие. Давление 25 атм.

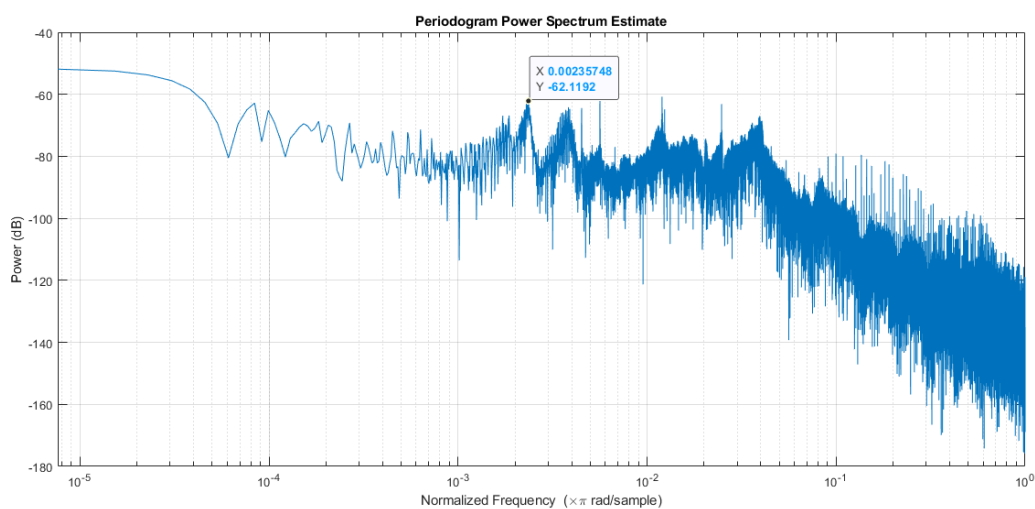


Рисунок 18 - Энергетический спектр колебаний между 2 и 3 люнетом. Все люнеты демпфирующие. Давление 25 атм.

Если переключить режим опор в другое сочетание, где производится измерение между вторым и третьим люнетами, они работают в жестком режиме (рисунок 19). Остальные в режиме демпфирующих опор. В результате характер колебаний изменяется, затухание по времени

увеличивается. На спектре колебаний появляются дополнительно более высокочастотные компоненты, то есть характер колебаний усложняется (рисунок 20).

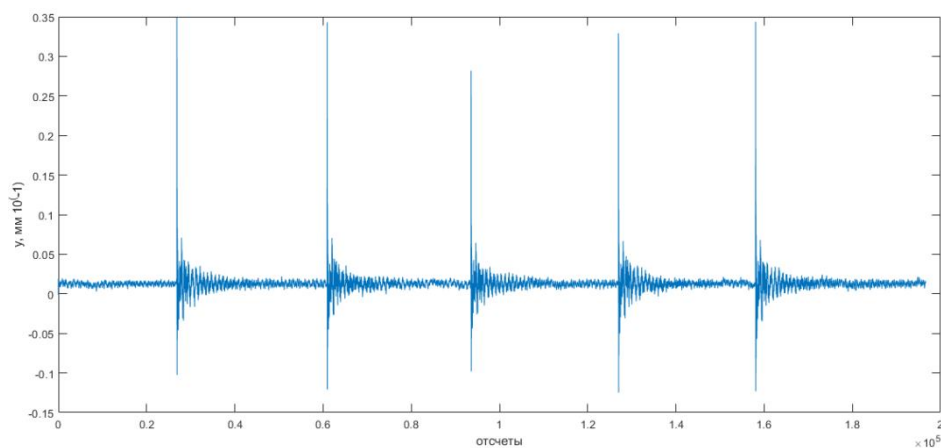


Рисунок 19 - Колебания между 2 и 3 люнетом в жестком режиме. Люнеты 1, 4, 5 - демпфирующие. Давление 25 атм.

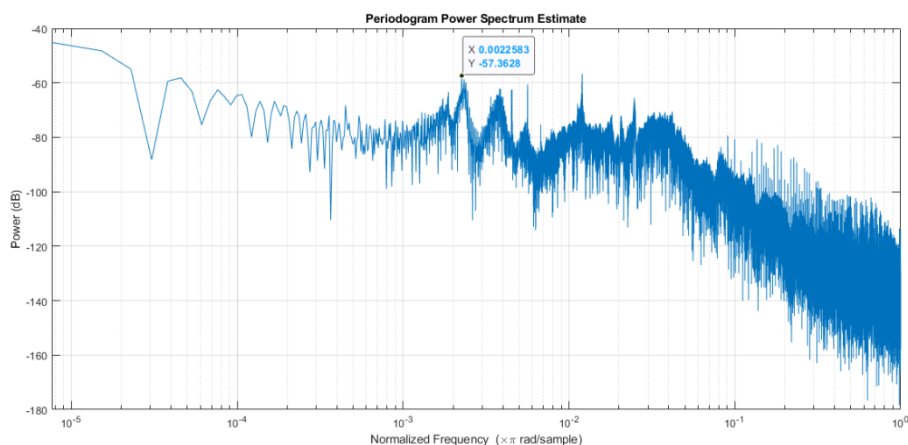


Рисунок 20 - Энергетический спектр колебаний между 2 и 3 люнетом в жестком режиме. Люнеты 1, 4, 5 - демпфирующие. Давление 25 атм

При уменьшении давления рабочей среды с 25 атмосфер до 20 результат по собственным колебаниям получается парадоксальный (рисунок 21). Скорость затухания сигнала увеличивается, то есть при меньшем давлении в рабочей системе демпфирование в системе растет (рисунок 22).

Собственные колебания первой гармоники растут, а вторая гармоника становится по величине сопоставима с первой, то есть увеличивается относительная величина высокочастотных составляющих.

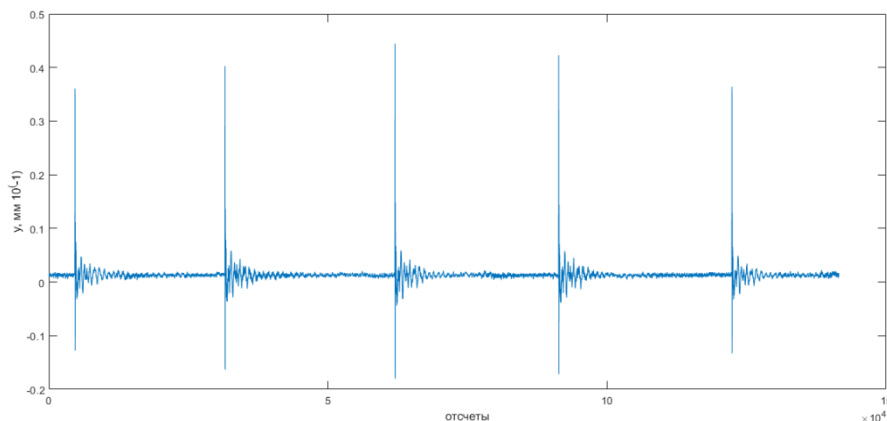


Рисунок 21 - Колебания между 2 и 3 люнетом в жестком режиме. Люнеты 1, 4, 5 - демпфирующие. Давление 20 атм.

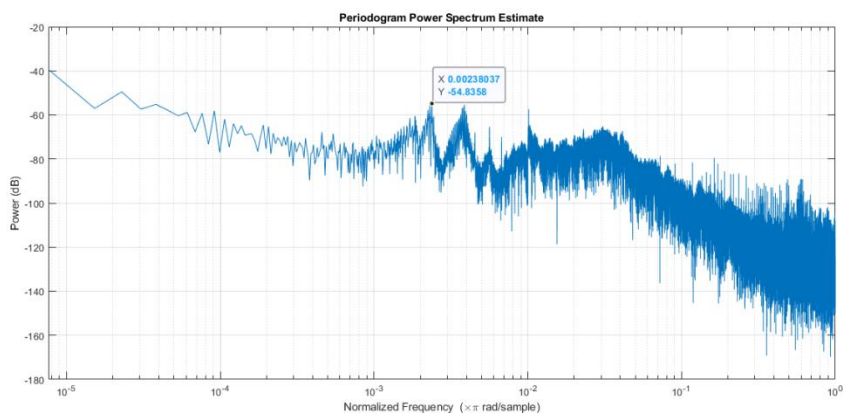


Рисунок 22 - Энергетический спектр колебаний между 2 и 3 люнетом в жестком режиме. Люнеты 1, 4, 5 - демпфирующие. Давление 20 атм.

На спектре, полученного преобразованием Фурье для демпфирующего режима в разных сечениях видно, это значительное увеличение и высоты амплитуды сигнала и числа высокочастотных компонентов, особенно в области 400 Герц (рисунки 23, 24).

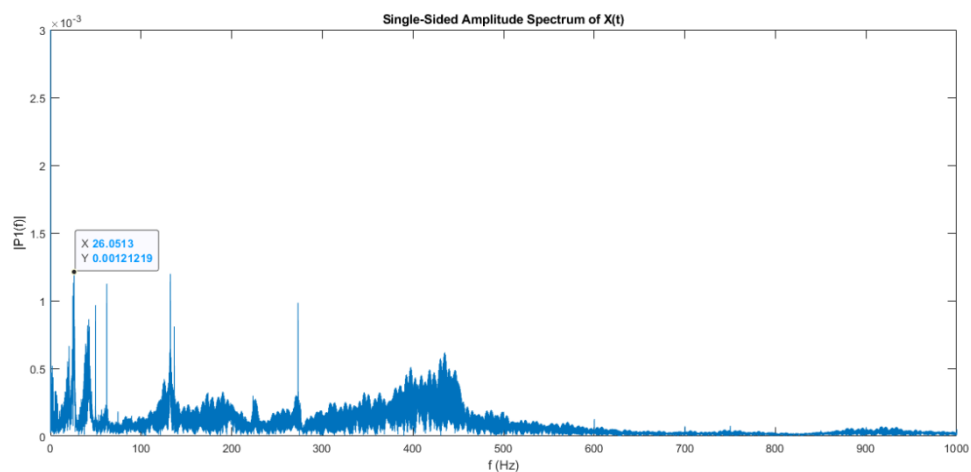


Рисунок 23 - Спектр колебаний между 2 и 3 люнетом в демпфирующем режиме. Давление 25 атм.

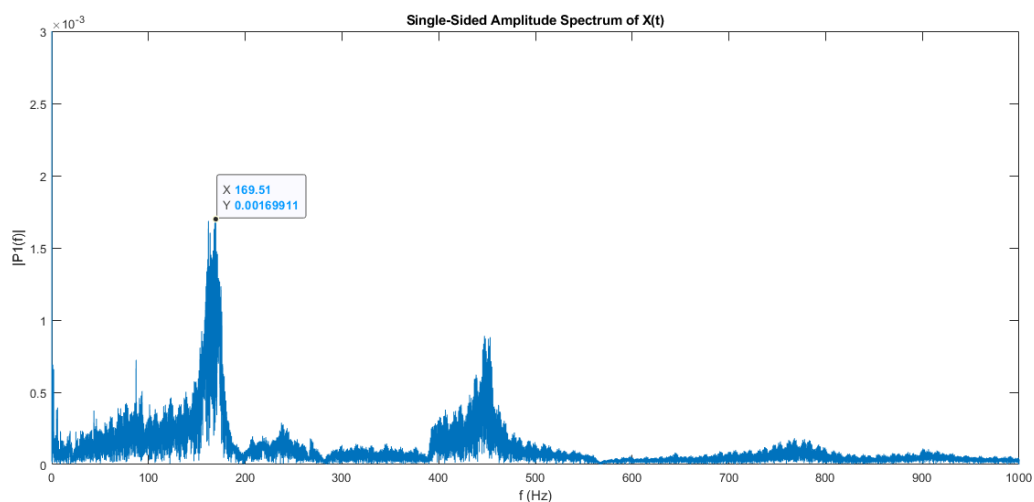


Рисунок 24 - Спектр колебаний у патрона. Люнеты в демпфирующем режиме.

Если перейти к собственным колебаниям в сечении, расположенном около зажимного патрона, характер сигнала в жестком режиме изменяется очень сильно (рисунок 25). При работе люнетов в жестком режиме, затухания колебаний происходит очень быстро.

На спектре сигнала расположена первая гармоника (рисунок 26), которая равняется 170 Герц, а также наблюдается значительный рост высокочастотных составляющих на уровне 450 Герц и кроме этого

появляется высокочастотная составляющая сигнала в области между 700 и 800 Герц.

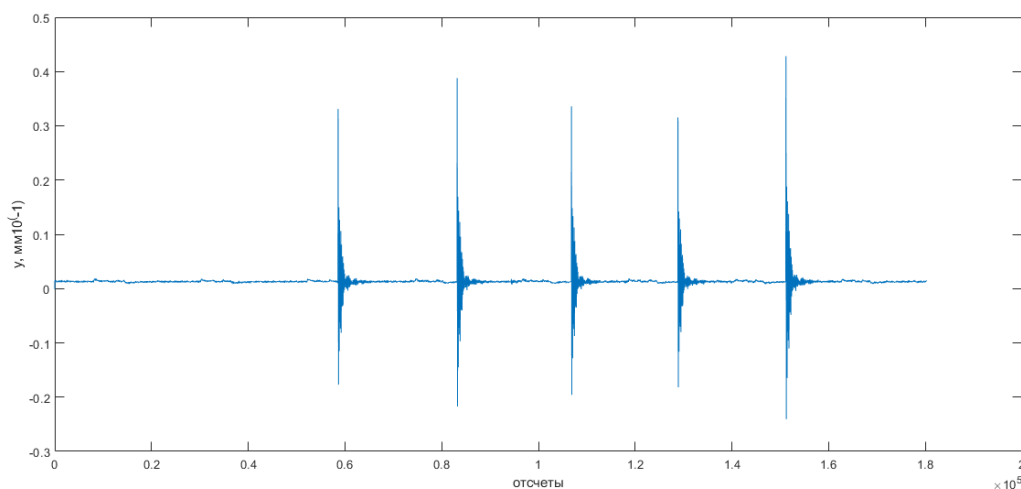


Рисунок 25 - Спектр колебаний у патрона. Люнеты в жестком режиме.

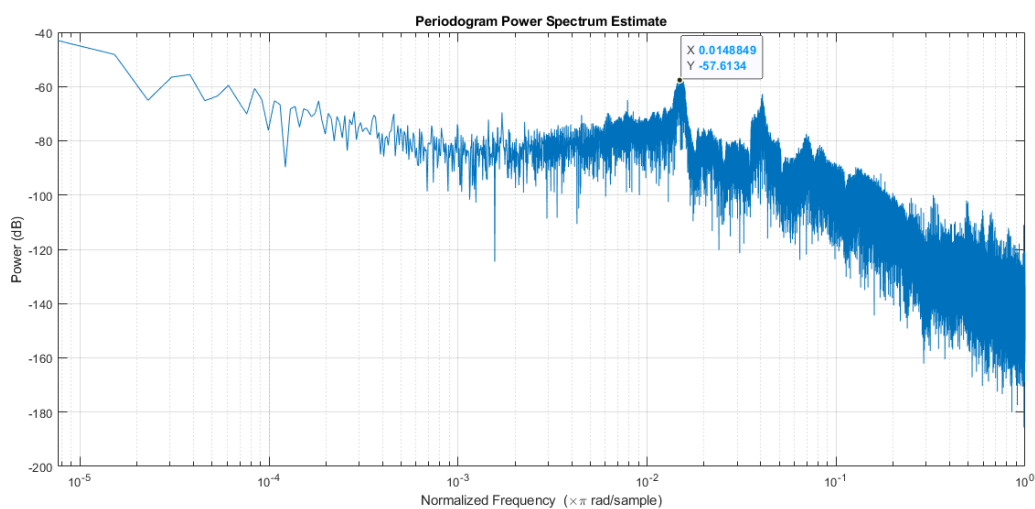


Рисунок 26 - Энергетический спектр колебаний у патрона. Люнеты в жестком режиме.

Если посмотреть на спектр колебаний, полученный методом Фурье между вторым и третьим опорами (рисунок 27), работающими в жестком

режиме, а остальные в режиме демпфирования, виден сложный спектральный характер.

Первая гармоника снижается по сравнению с сечением первым-вторым люнетами. При этом рядом располагается целый ряд гармоник, которые расположены неравномерно на уровне 140 Гц. Наблюдается вторичной всплеск, который превышает первую гармонику колебаний.

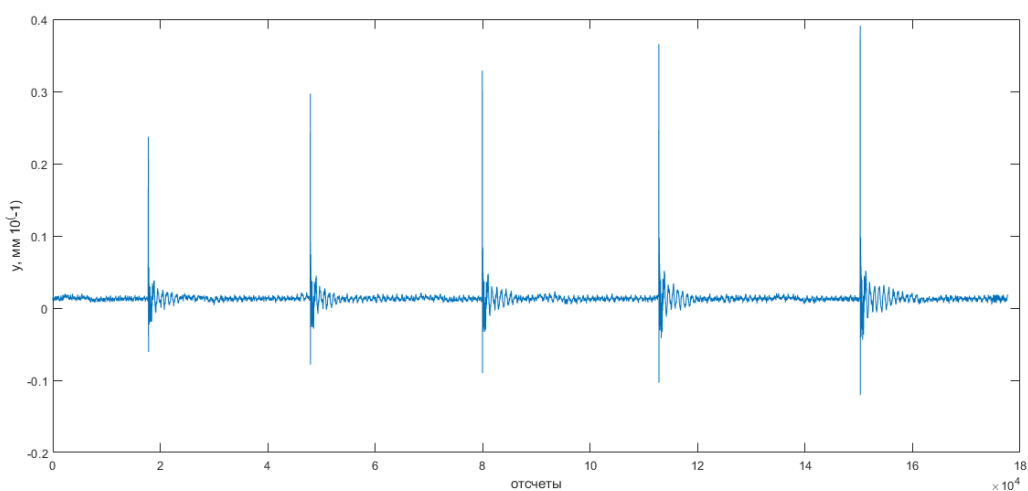


Рисунок 27 - Колебания между 1 и 2 люнетами. Все люнеты в жестком режиме. Давление 20 атм.

На уровне от 200 до 500 Гц высокочастотная составляющая также имеет неравномерный характер. При снижении давления рабочий характер спектра изменяется не очень значительно (рисунок 28).

Если рассматривать изменение положения сечения, то для первого сечения между первым и вторым и опорами собственная частота уменьшается амплитуда значительно. Увеличивается при этом в области высокочастотных компонентов. Более выровненный характер спектра без ярких всплесков в области низких частот до 100 Гц. Наблюдается тройная гармоника, расположенная через одно и тоже расстояние.

Переключение всех опор в жесткий режим - растут высокочастотные составляющие спектра, увеличивается частота первой гармоники

незначительно и уменьшается амплитуда в области высокочастотных составляющих. Наблюдается появление локализованного сигнала на уровне 260 Гц, а общий уровень высокочастотного компонента растет.

Если посмотреть сигнал под роликом, при вращении заготовки его частотный спектр значительно усложняется за счет появления множества гармоник расположенных с равным шагом (рисунок 28). При этом на уровне частоты вращения заготовки появляется явно выраженный пик. Если посмотреть на временную запись сигнала по отчетам, при прохождении датчика под роликом наблюдается явное изменение амплитуды колебаний заготовки под опорой и по мере ее выхода из под опоры (рисунок 29).

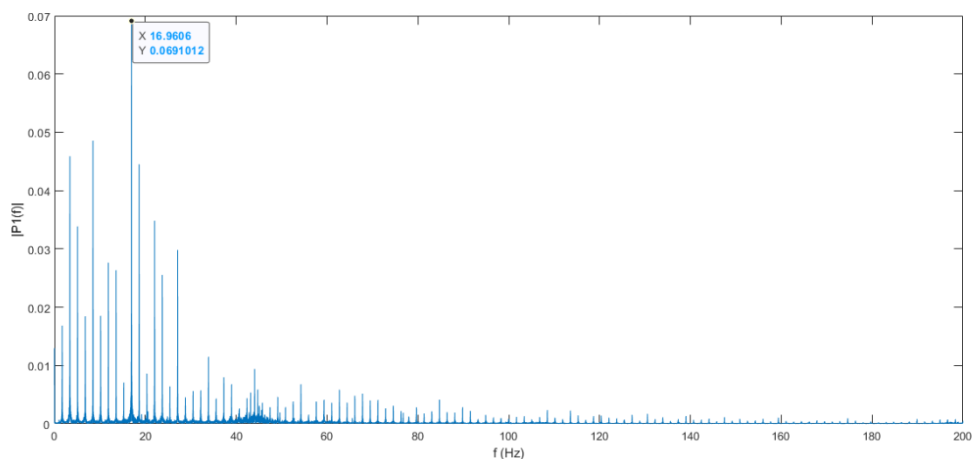


Рисунок 28- Спектр под роликом четвертого люнета

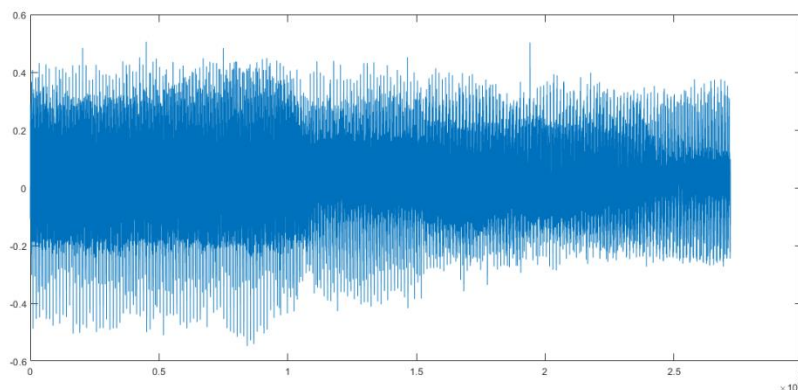


Рисунок 29 – Запись колебаний под роликами четвертого люнета

Левая часть записи сигнала до момента отчетов  $10^6$  амплитуда имеет значительную величину. Далее она постепенно сужается и, в конце записи сигнала, увеличивается где-то на 50%. Это говорит о том, что дополнительные опоры приводят к значительному изменению динамической жесткости системы заготовки. При обработке это приведет к значительным изменениям динамических смещений элементов технологической системы и к значительному изменению точности обработки и качество полученной поверхности.

Если посмотреть на спектр колебаний вращающейся заготовки в пролете между люнетами, то видно значительное снижение высокочастотной составляющей (рисунок 30).

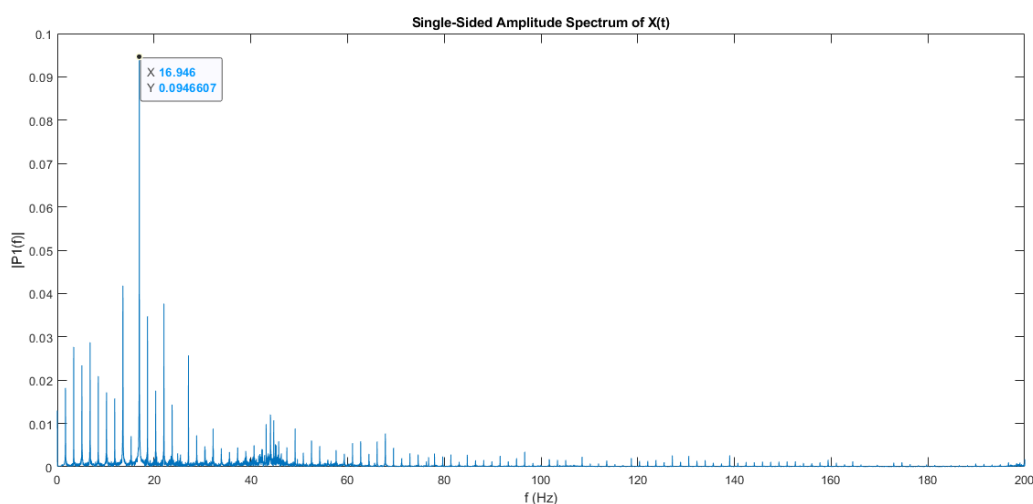


Рисунок 30 – Спектр колебаний в пролете между 3 и 4 люнетами.

Скорее всего, данные компоненты вносятся в спектр колебаний заготовки зажимными элементами приспособления. К ним, в данном случае, относятся рычаги, где установлены зажимные ролики через игольчатые подшипники. Данные компактные элементы вносят высокочастотный компонент, который и проявляется в спектре сигнала.



При перемещении контролируемой области от опоры к середине пролета из-за гашения возмущения в самой заготовке данные составляющие проявляется на спектре сигнала уже меньше. Характер колебаний в пролете между люнетами имеет более равномерный характер.

По развернутой записи колебаний заготовки при частоте ее вращения 160 оборотов в минуту у третьего люнета видим сложный характер (рисунок 31) с наличием множества составляющих колебаний, а также шумовой компоненты (рисунок 32).

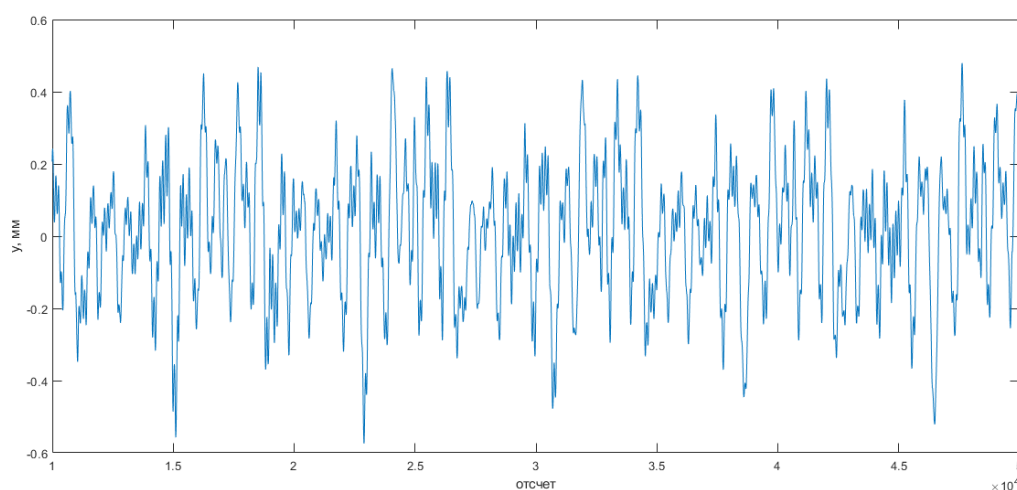


Рисунок 31 – Колебания на холостом ходу. 160 об/мин. Третий люнет

Два последовательных рисунка с записью колебаний и спектром сигнала представлены для одной и той же схемы установки, но для первого случая первый люнет должен был разжат, во втором - зафиксирован. Связано это с особенностями формы образца заготовки, которая имела значительные искривления на свободном конце, который попадал в сечении первого люнета.

Но изменение режима работы опор с люнетом и без него, даже с учетом возмущения искривленной заготовки, показывает практически полную идентичность колебаний, что также отражается в аналогичных спектрах

сигналов. Если посмотреть на запись колебаний на увеличенной частоте вращения 400 оборотов в минуту в сечении между вторым и третьим опорами (рисунок 33) виден более сложный характер колебаний.

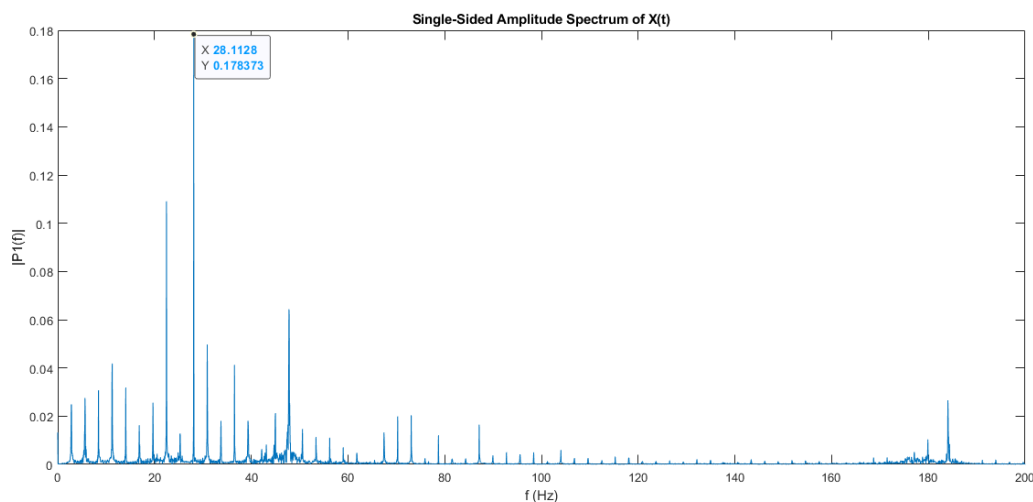


Рисунок 32 – Спектр колебаний на холостом ходу. 160 об/мин. Третий люнет. Первый люнет не фиксирует.

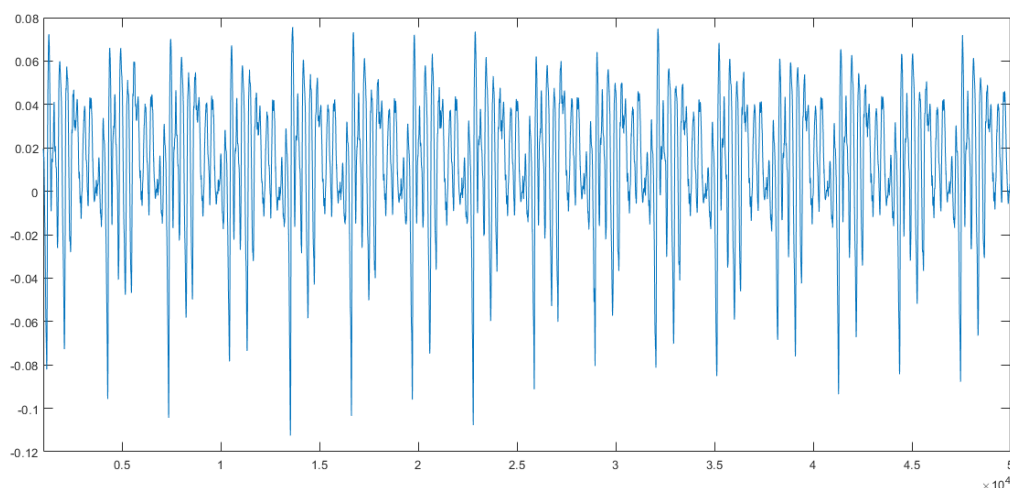


Рисунок 33 – Колебаний на холостом ходу. 400 об/мин. Второй и третий люнет.

Спектр имеет несимметричный вид. Спектр сигнала увеличивается в сторону более высоких частот (рисунок 34).

Первая гармоника ярко выражена и равняется 71 Гц. Остальные расположены во все стороны с равным шагом и начинаются на частоте 6,7 Гц, что соответствует возмущающей силе от вращения заготовки.

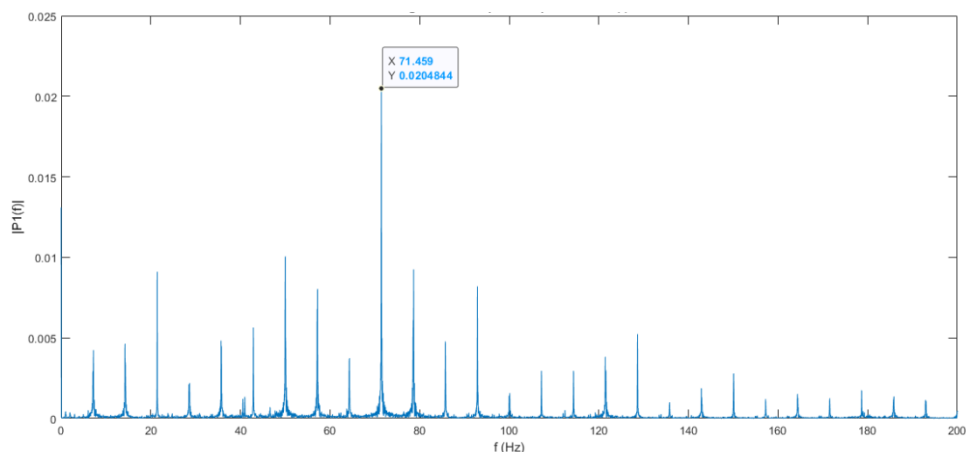


Рисунок 34 – Спектр колебаний на холостом ходу.400 об/мин. Второй и третий люнет.

Для другого сечения между 4 и 3 опорами (рисунок 35) спектр перераспределяется, и первая гармоника уже увеличена (14 Гц). Хотя у 70 Гц также остается значительно увеличенной (рисунок 36).

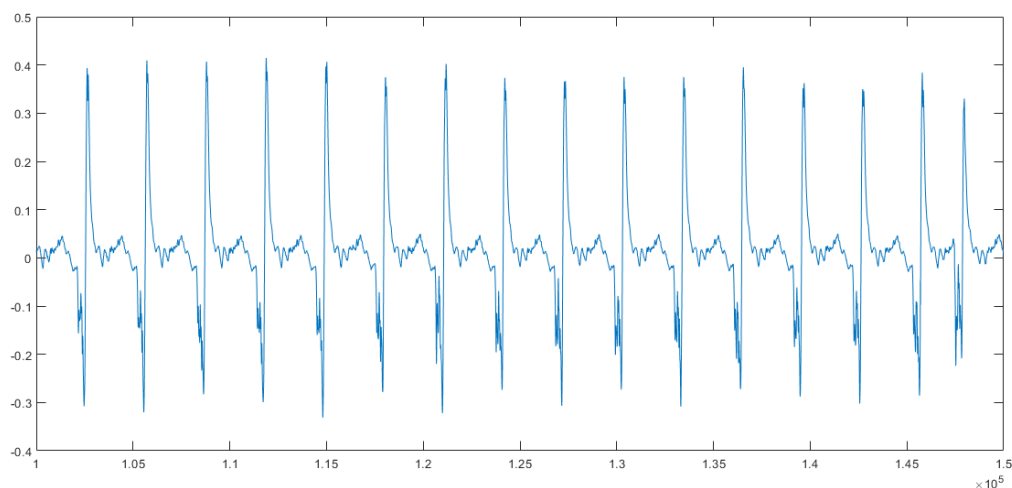


Рисунок 35 – Колебаний на холостом ходу.400 об/мин. Четвертый и пятый люнет.

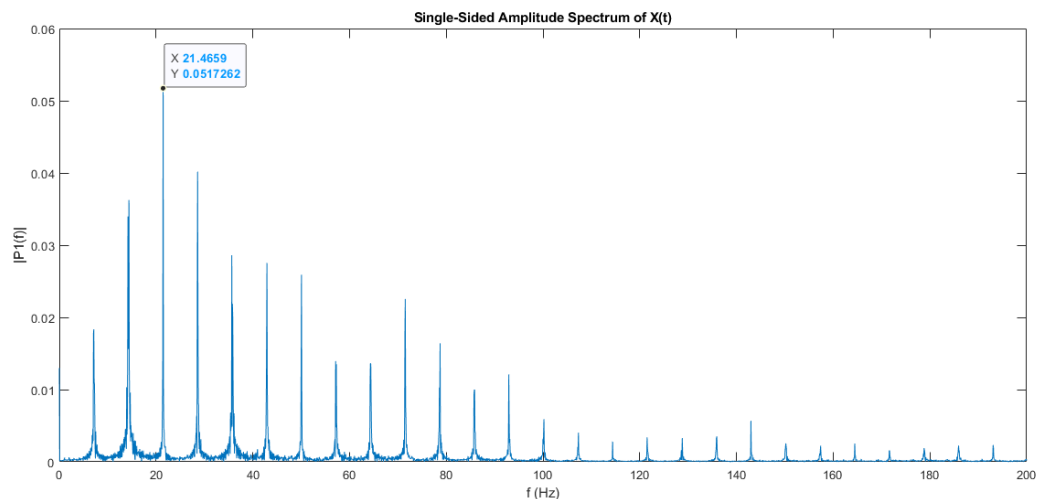


Рисунок 36 – Спектр колебаний на холостом ходу.400 об/мин. Четвертый и пятый люнет.

То есть при перемещении вдоль оси такой длинномерной заготовки происходит постоянное изменение спектрального состава колебаний заготовки, с учетом расположения опор и характера их работы.

Соответственно, при резании из-за изменяющихся динамических характеристик заготовки и, в первую очередь собственной частоты колебаний, будем иметь постоянные изменения амплитуды относительных колебаний инструмента и заготовки, что будет вносить свою составляющую в общую погрешность обработки.

Между четвертой и пятой опорами характер колебаний заготовки изменяется очень значительно, принимая совершенно другую форму, отличающуюся от двух предыдущих областей замеров.

Спектр сигнала также изменяется. Первая максимальная амплитуда смещается к 21 Гц, ну а характер распределения амплитуд равноотстоящих друг от друга гармоник также претерпевает изменения, что еще раз доказывает нестабильный характер собственных динамических параметров подсистемы заготовки.

Дополнительные изменения в форме колебаний заготовки вносят значительную погрешность формы, размеров и расположения самой

заготовки вала, которая представляет из себя исходный прокат. Он обработан после правки вручную на прессе. Это приводит к значительным изменениям положения контролируемой поверхности. Даже дополнительные опоры не могут пережать определенные дефекты заготовки по кривизне и компенсировать их за счет сил зажима.

Представленные выводы по нестабильности динамических характеристик заготовки вдоль ее оси наглядно демонстрируются в ходе записи колебаний при черновой обработке вала (рисунок 37) при прохождении резца под вторым люнетом к третьему люнету.

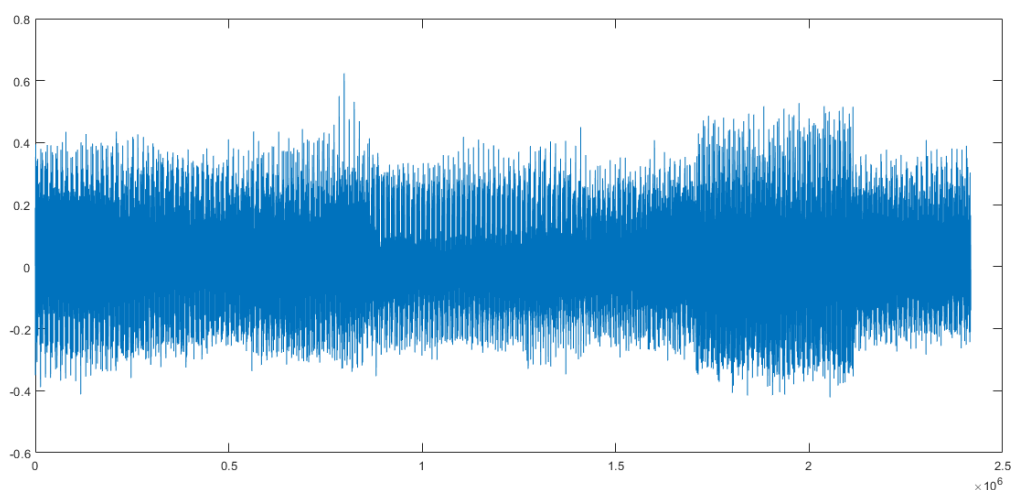


Рисунок 37 – Колебаний при черновом резании. Сечение между вторым и третьим люнетами. Первый, второй и третий люнеты – жесткие опоры.

Там наблюдается явно выраженная нестабильность амплитуды колебаний вдоль оси. Для стабилизации зоны обработки первая, вторая и третья опоры включались в режим жестких фиксаторов, а четвертая и пятая в режим демпфирующих опор.

Первая гармоника колебаний значительно возрастает на уровне 16,9 Гц (рисунок 38).

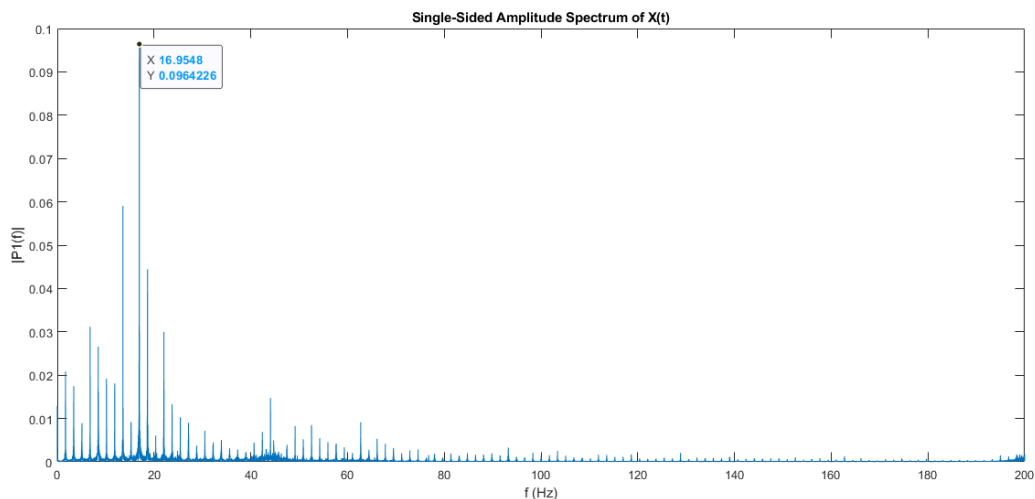


Рисунок 38 – Спектр колебаний при черновом резании. Второй и третий люнет. Первый, второй и третий люнет.

Остальные составляющие имеют значения минимум в два раза меньше. Наблюдаются на уровне 45 Гц вторичные всплески высокочастотных составляющих.

## 4.2 Статические исследования вала

Протоколы измерений экспериментального исследования биения и размеров после чернового точения вала 30ХН3А длиной 3000 мм, диаметром 53 мм. Предварительно обработали сечение под вторым люнетом. Затем заготовку перевернули и зажали в патроне по чистой поверхности и в первом люнете. От второго до пятого люнетов жесткие, а первый – демпфирующий по черной поверхности. Режимы обработки:  $S=0,22$  мм/об;  $v=20,8$  м/мин;  $n=125$  об/мин;  $t=1,1$  мм. Инструмент резец токарный проходной с механическим креплением пластин Т5К10.

К валу, в выбранных сечениях, прикладывалась статическая сила с помощью нагрузочного винта и динамометра. Тарировочный коэффициент динамометрической скобы  $K=7,14$  Н/м. Перемещения вала измерялись

индикатором с ценой деления 0.01мм, установленным на стойке, жестко закрепленной на станине станка.

Из полученных зависимостей, для рядом расположенных сечений жесткость незначительно, но изменяется. В случае переключения режимов работы опоры с демпфирующего на жесткий режим работы изменения достигают почти 30%.

#### Выводы по разделу

В разделе приведены результаты экспериментального исследования по колебаниям вала. Использовались различные режимы работы опор. Определялись колебания вдоль оси заготовки в зависимости от характера их работы. Исследования проводились, как для холостого хода, так и для процесса резания. Для определения собственных частот колебаний подсистемы заготовка-опоры использовался метод импульсного воздействия с записью собственных затухающих колебаний заготовки. Результаты исследований опубликованы, что подтверждается сертификатом, представленным в Приложении А.

## **5 Проектирование системы опор**

### **5.1 Система выверки**

При установке самоцентрирующих люнетов возникает задача выверки их положения. Необходимо достичь соосности сечений для центрирования зажимаемой заготовки. В случае возникновения отклонения от соосности, рычаги люнета будут действовать как возмущающий фактор, приводя к параметрическим колебаниям заготовки при обработке.

Для этого установочные элементы самоцентрирующих люнетов должны иметь регулировочные механизмы для их смещения в горизонтальном и вертикальном направлениях. Это обеспечит снижение времени выверки и повышение точности обработки. Сама выверка может проходить с учетом откалиброванного регулировочного механизма выверки или с использованием дополнительных установочных приспособлений. Для этого могут использоваться калибровочные оправки, по которым будет происходить установка опор, или можно использовать цифровые системы выверки с использованием оптических методов контроля положения люнетов в рабочем пространстве станка. Данное приспособление использует два элемента: источник лазерного излучения и приемник данного излучения. Источник устанавливается в патроне станка, реализуя технологическую ось, а приемник устанавливается в рычагах люнета и показывает его текущее положение относительно нулевой точки станка. Используя механизм выверки, выводят люнет в необходимое положение с заданной точностью.

### **5.2 Проектирование механизма регулирования положения опор**

Задача – спроектировать механизм регулирования положения самоцентрирующих опор для настройки их по оси технологической системы.



Механизм регулирования положения опоры содержит плиту, установленную на балку кронштейна. На плите между кронштейнами по скользящей посадке установлен клин, который опирается на клин, который перемещается винтом. Опорная плита соединяется по пазу типа ласточкиного хвоста с направляющей. Кронштейн фиксируется на плите и фиксирует шаговый привод винта регулировки вертикального положения опорной плиты. Кронштейн выполняет аналогичную функцию в горизонтальной плоскости. Клин упирается в наклонную плоскость опорной плиты. Для направления движения клин имеет две направляющих перемещающихся во втулках.

Устройство работает следующим образом. Установленный на опорной плите кронштейн прикрепляется к люнету. При выверке люнет необходимо выставить в определенную точку, соответствующей технологической оси системы. Для этого на шаговые приводы перемещений подаются сигналы, соответствующие величине смещения заготовки от заданного положения, которое определяется или оптическим методом или по сигналам с токовихревых датчиков BENTLY-NEVADA. За счет перемещения клина скользящий по его наклонной плоскости клин перемещается вверх. Соответственно поднимается по направляющим кронштейнам плиты направляющая. При подаче клина от винта привода горизонтального перемещения опорная плита по «ласточкиному хвосту» смещается в горизонтальной плоскости. Для фиксации кронштейна на опорной плите есть Т-образные направляющие со шпоночным пазом.

Люнет при выверке фиксируется в пластинах при помощи механизма зажима. При выверке его положение задается механизмом регулировки при помощи кронштейна. Для придания жесткости конструкции механизм регулировки подпирается кронштейном с горизонтальными пазами. При перестановке люнета вдоль оси заготовки плита механизма регулировки крепится на балке клином винтом и к кронштейну винтами.

Технология установки заготовок длинномерных валов имеет определенный устоявшийся порядок. Для базирования опорных элементов самого люнета необходимо иметь на поверхности заготовки чистые технологические базы. Для этого необходимо на пониженных режимах по возможности с небольшим вылетом произвести обточку этих шеек. Кроме того, конструкция люнетов, которые предполагают независимое регулирование опорных элементов, требует процесса выверки с использованием, как правило, резьбовых регулировочных механизмов. Для этого на поверхности заготовки около опорной шейки должен быть сформирован еще контрольный пояска. Это чисто обработанная поверхность необходима для расположения на ней индикаторного устройства которое будет использоваться для контроля биения.

При обточке базы и контрольного пояска может возникнуть технологическая несоосность этих элементов относительно обрабатываемой поверхности. При обтачивании это будет приводить к дополнительному влиянию припуска, к неравномерности условий резания и переменной силе резания. В результате увеличивается погрешность от упругих деформаций технологической системы, действующей в радиальном направлении.

Использование новых конструкций самоцентрирующих люнетов, которые имеют трех рычажную компоновку с опорными роликами (одинарными или сдвоенными), обеспечивает центрирование непосредственно по самой поверхности заготовки без необходимости ее какой-либо дополнительной обработки. Регулированием давления рабочей среды или увеличением крутящего момента, если используется электромеханический привод зажима рычагами, можно обеспечить силовое воздействие опорных элементов роликов на базовую поверхность заготовки. Фактически при этом производим поверхностное пластическое деформирование в виде накатывания базовой шейки. После определенного времени вращения заготовки в рычагах с роликами происходит исправление

формы базовой поверхности и это приводит к дополнительной точности установки.

Дефектом является то, что свойства поверхности под роликами начинают отличаться от свойств поверхности между роликами в пролетах заготовки. Воздействие снижают при увеличении площади контакта за счет использования сдвоенных роликов большего диаметра. Это приводит к снижению удельного давления воздействия роликов на заготовку и снижению степени деформации. Кроме этого необходимо включать режим жестких опор с максимально жесткой фиксацией заготовки только в те моменты, когда необходимо. Это зависит от положения зоны резания, то есть необходимо отслеживать положение зоны обработки относительно элементов и в необходимые моменты времени переключать их из режима жесткой опоры в режим демпфирующей.

Как показывает и теоретические и натурные исследования динамических характеристик подсистемы заготовки, такое переключение приводит к изменению собственных частот подсистему заготовки и изменяет динамические, возникающие при резании, возмущающие силы центробежные и силы резания.

### **5.3 Проектирование системы управления зажимом**

Дополнительным технологическим недостатком использования именно системы самоцентрирующих люнетов является необходимость их выверки вдоль оси технологической системы. Дело в том, что использование люнетов даже без поджима задним центром создает несколько центров базирования вдоль оси заготовки, помимо центрирования в месте расположения зажимного патрона. В результате получается больше двух точек, задающих траекторию движения заготовки. Поскольку эти точки, в любом случае, будут располагаться относительно технологической оси системы с определенной погрешностью, возникает дополнительные вынужденные

возмущения, действующие на вращающуюся заготовку. В результате возникает кинематическое возбуждение параметрических колебаний, которые определяются расположением опор и степенью их несоосности относительно друг друга.

Степень возмущения может изменяться в зависимости от того, в каком режиме работает опора, в жестком или в демпфирующем. В любом случае, степень несоосности должна быть на этапе подготовки технологической операцией выставлена на минимальное значение. Для этого необходимо иметь возможность смещения опор в вертикальной плоскости по двум направлениям. Для этого необходимо использовать механизм выверки.

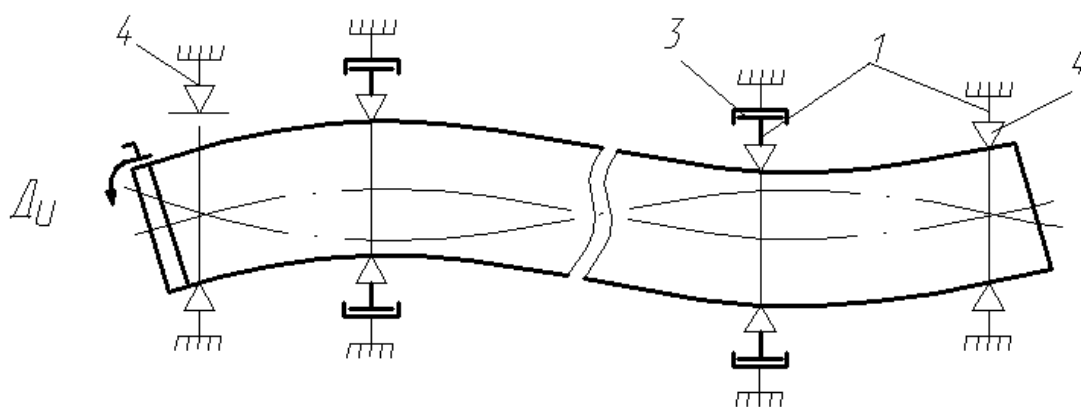
Первоначальный вариант связан с установкой самоцентрирующих элементов по контрольной отправке с жесткой фиксацией по данному элементу. Он имеет несколько недостатков и ограничений. Первый связан с необходимостью изготовления такой крупногабаритной точной оправки по шестому качеству точности с минимальным короблением. Это само по себе дорогостояще и технологически трудно. Кроме этого, люнеты в выставленном положении необходимо зафиксировать. До этого использовались быстротвердеющий эпоксидный клей. После его затвердевания производилась фиксация элементов при помощи винтовых зажимов. Но даже при этих условиях, из-за возникающих сдвиговых нагрузок, происходят небольшие смещения элементов относительно первоначального выставленного положения. Максимальная точность по точности находилась на уровне не выше 0,05 мм.

Использование отдельного механизма выверки с винтовыми передаточными механизмами или кинематическими узлами клинового типа обеспечивает точное и контролируемое смещение уже закрепленных на несущих элементах опор по необходимым направлениям. В настоящее время широко применяются оптические системы настройки. Для этого в одном сечении, как правило, в зажимном патроне, реализуется начальное положение технологической оси, а при помощи лазерного источника

реализуется сама технологическая ось системы. В рычагах следующей опоры устанавливается последовательно фотоприемник. Это может быть цифровая камера. На матрицу данной камеры проецируется лазерное пятно. Его положение в приемном устройстве определяется с точностью до 3 мкм и сравнивается с необходимым положением.

Действием регулировочных механизмов добиваются совпадения центра пятна лазерного луча, проецируемого на экран камеры, с необходимым положением. После этого зажимной механизм фиксирует положение опоры. Последовательно выполняют эту процедуру для каждой опоры вдоль оси заготовки. В данном случае не влияет расстояние между люнетами и их количество.

Для расширения технологических возможностей люнеты можно использовать как измерительные датчики (рисунки 39-41). Для этого необходимо определять смещение рычагов относительно центров их начального положения при вращении заготовки. На люнеты подается минимальное давление, которое необходимо только для того, чтобы привести их в соприкосновение с зажимаемой заготовкой. Далее, при вращении, если имеются какие-либо отклонения пространственного положения или формы поверхности, находящиеся в контакте с заготовкой опоры рычаги будут смещаться.



1 – люнеты; 2 – заготовка; 3 – демпфер; 4 – жесткий люнет

Рисунок 39 - Схема измерения прогиба люнетами

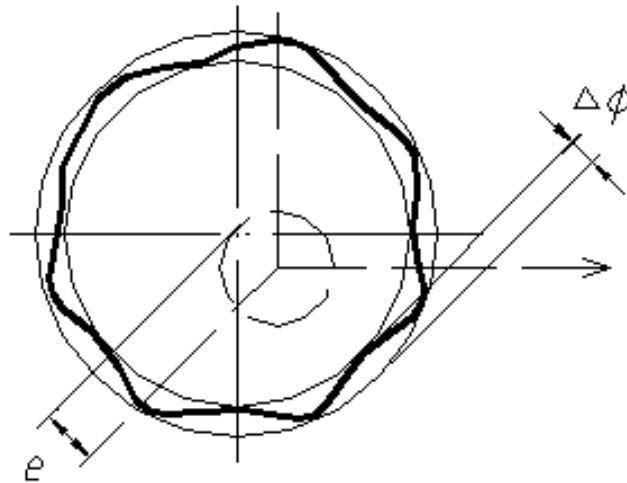


Рисунок 40 -Схема погрешностей

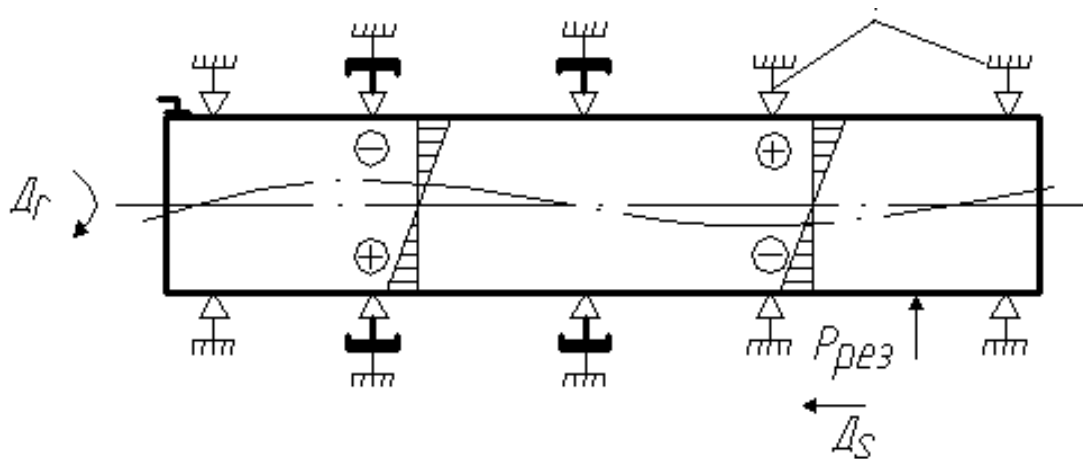


Рисунок 41 - Схема изменения напряженного состояния

Эти смещения будут фиксироваться соответствующими датчиками положения. В результате может быть сформировано пространственная карта расположения погрешности обрабатываемой поверхности заготовки по углу поворота в различных сечениях. Это позволит при разработке управляющей программы за счет экстраполяции полученных данных, сформировать распределение припуска по всей обрабатываемой заготовке. Знание распределения припуска по величине в различных сечениях и точках этих сечений обеспечит возможность стабилизации силовых параметров.

Например, пропорционально изменению глубины резания изменяя величину подачи, что позволит обеспечить стабилизацию силы резания.

#### Выводы по разделу

В разделе выполнен анализ различных конструкций самоцентрирующих люнетов. Разработано устройство для выверки опор, чтобы обеспечить их соосность относительно друг друга и относительно технологической оси станка.

Рассмотрен способ определения геометрии устанавливаемой заготовки при помощи подвижных рычагов люнетов, что расширяет технологические возможности станка по обработке. Это делает возможным учет погрешности геометрии формы заготовки, а также учет распределения напряжений возникающих в заготовке при жесткой фиксации с деформацией оси вала.

## Заключение

В работе выполнен анализ существующих подходов к совершенствованию технологического оснащения. Отмечены основные принципы совершенствования оснащения, которые относятся к модульности, масштабированию, гибкости переналадки.

Рассмотрены основные подходы обеспечения высокоэффективной, точной, производительной обработки маложестких валов. Рассмотрены их преимущества и недостатки.

Отмечена перспективность использования самоцентрирующих рычажных люнетов, которые имеют широкие технологические возможности по типоразмерам закрепляемых заготовок. Также они обеспечивают гибкость в регулировании таких конструктивных параметров, как жесткость и демпфирование, что дает возможность регулировки динамических параметров подсистемы деталь-опоры в широком диапазоне для управления амплитудой относительных колебаний заготовки и инструмента.

Разработана математическая модель в виде системы уравнений в частных производных для мало жесткой заготовки, рассматриваемой как распределенная система. Приведено общее решение данных уравнений, а также отмечены вычислительные трудности для определения положения упругой оси заготовки.

Рассмотрена методика расчета колебаний оси вала в матричной форме на основе метода начальных параметров, который позволяет учитывать все конструктивные параметры заготовки и опор. Представлены переходные матрицы для различных участков, которые характеризуются жесткостью, инерционностью, упругостью и демпфированием.

На основе разработанной двух массовой модели динамики процесса обработки с учетом двух формообразующих подсистем: деталь-опоры и инструмент-суппорт выполнен анализ амплитуды относительных колебаний.



С учетом определенных экспериментально параметров технологической системы: коэффициентов жесткости, инерционности и демпфирования, произведено моделирование поведения элементов технологической системы обработки точением заготовки, установленной в опорах.

Получены зависимости амплитуды колебаний отдельно для каждой из подсистем, а также амплитуда относительных колебаний, которая определяет точность и качество обработанной поверхности.

Проанализировано влияние различных конструктивных параметров, а также технологических параметров процесса резания (коэффициента жесткости резания, изменяющейся толщины срезаемого слоя) на динамическое поведение взаимодействующих элементов.

Приведены результаты экспериментального исследования по колебаниям вала в производственных условиях. Использовались различные режимы работы опор. Определялись колебания вдоль оси заготовки в зависимости от характера работы люнетов. Исследования проводились, как для холостого хода, так и для процесса резания. Для определения собственных частот колебаний подсистемы заготовка-опоры использовался метод импульсного воздействия с записью собственных затухающих колебаний заготовки.

Выполнен анализ различных конструкций самоцентрирующих люнетов. Разработано устройство для выверки опор, чтобы обеспечить их соосность относительно друг друга и относительно технологической оси станка. Рассмотрим способ определения геометрии устанавливаемой заготовки при помощи подвижных рычагов люнетов, что расширяет технологические возможности станка по обработке.

Основные задачи поставленные в работе были выполнены.

## Список используемых источников

1. Авт.св. СССР №1024226, В23Q15/00. Драчев О.И., Дорошенко М.Г., 1983.
2. Авт.св. СССР №1429488 В23Q15/00, Драчев О.И., Иванов О.И., 1986
3. Авт.св. СССР № 973296, Драчев О.И., 1982
4. Базров Б. М. Модульная технология в машиностроении : [монография] / Б. М. Базров. - Москва : Машиностроение, 2001. - 367 с. : ил. - Прил.: с. 363-367. - Библиогр.: с. 362. - ISBN 5-217-03061-5 : 250-00. - Текст : непосредственный.
5. Базров Б. М. Основы технологии машиностроения : учебник для вузов / Б. М. Базров. - Гриф МО. - Москва : Машиностроение, 2005. - 736 с. : ил. - (Для вузов). - Библиогр.: с. 736. - ISBN 5-217-03255-3 : 450-00. - Текст : непосредственный.
6. Базров, Б. М. Технология сборки машин : учебное пособие для вузов / Б. М. Базров, О. В. Таратынов, В. В. Клепиков. - Москва : Спектр, 2011. - 363, [1] с. - Библиогр.: с. 364. - ISBN 978-5-904270-54-4 : 100-00. - Текст : непосредственный.
7. Воронов Д. Ю. Разработка сборочных технологических процессов : учеб.-метод. пособие / Д. Ю. Воронов, А. В. Щипанов ; ТГУ ; Ин-т машиностроения ; каф. "Оборудование и технологии машиностроит. пр-ва". - ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2017. - 140 с. : ил. - Прил.: с. 104-109. - Библиогр.: с. 101-103. - CD-DVD. - ISBN 978-5-8259-1015-4 : 1-00. - Текст : электронный.
8. Горшков Б.М., Самарцев И.А. Влияние межмодульного устройства базирования и крепления на безотказность автоматически сменного узла перекомпонованной рабочей позиции технологического оборудования // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 4. С. 15-18.

9. Горшков Б.М., Самарцев И.А. Определение производительности перекомпонованной рабочей позиции // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2014. № 3 (29). С. 53-56.

10. Козулин М. Г. Технология сварочного производства и ремонта металлоконструкций : учеб. пособие для вузов / М. Г. Козулин. - ТГУ ; гриф УМО. - Тольятти : ТГУ, 2002. - 286 с. : ил. - Предм. указ.: с. 276-283. - Библиогр.: с. 275. - ISBN 5-8259-0104-3 : 28-00. - Текст : непосредственный.

11. Левашкин Д.Г. Методологические аспекты обеспечения точности и жесткости реконфигурируемых производственных систем с применением автоматически сменных узлов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2014. № 4 (30). С. 30-36.

12. Левашкин Д.Г. Обеспечение точности базирования сменных узлов призматической формы на основе анализа размерных цепей обработки их базирующих отверстий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2015. Т. 15. № 2. С. 5-12.

13. Левашкин Д.Г. Моделирование влияния взаимного расположения базирующих отверстий на точность базирования автоматически сменных узлов RMS // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2-2 (32-2). С. 94-99.

14. Левашкин Д.Г. Обеспечение жесткости и точности автоматически сменных узлов реконфигурируемых производственных систем // Вестник НГИЭИ. 2015. № 12 (55). С. 47-54.

15. Левашкин Д.Г. Анализ влияния точности автоматически сменных узлов на обработку деталей в реконфигурируемых производственных системах // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 5 (184). С. 27-31.

16. Михайлов А. В. Основы проектирования технологических процессов механосборочного производства : учеб. пособие / А. В. Михайлов, Д. А. Расторгуев, А. Г. Схиртладзе. - Гриф МО ; ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2004.

- 267 с. : ил. - Библиогр.: с. 264-267. - ISBN 5-8259-0172-8 : 143-64. - Текст : непосредственный.

17. Михайлов А. В. Технологические основы обеспечения качества изготовления деталей в машиностроении : учеб. пособие для вузов / А. В. Михайлов, О. И. Драчев, А. Г. Схиртладзе ; Министерство образования РФ ; ТГУ. - Гриф УМО. - Тольятти : ТГУ, 2004. - 164 с. : ил. - Библиогр.: с. 162-164. - ISBN 5-8259-0191-4 : 81-58. - Текст : непосредственный.

18. Проектирование технологии автоматизированного машиностроения : учеб. для вузов / И. М. Баранчукова, А. А. Гусев, Ю. Б. Крамаренко [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. - 2-е изд., испр. - Москва : Высш. шк., 1999. - 416 с. : ил. - (Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств / [редкол.: Ю. М. Соломенцев и др.]). - Прил.: с. 395-410. - Предм. указ.: с. 412-415. - Библиогр.: с. 411-412. - 61-60. - Текст : непосредственный.

19. Расторгуев, Д. А. Сборка в машиностроении : электронное учебно-методическое пособие / Д. А. Расторгуев ; М-во науки и высшего образования РФ, ТГУ, Институт машиностроения. - ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2021. - 111 с. - Прил.: с. 38-110. - Библиогр.: с. 36-37. - Режим доступа: Репозиторий ТГУ. - ISBN 978-5-8259-1567-8. - Текст : электронный.

20. Расторгуев Д.А., Кудрина Н.Ю., Бобровский А.В., Аржеткин А.В. Самоцентрирующие люнеты для обработки маложестких деталей // В сборнике: Наука, техника, образование г. Тольятти и Волжского региона. Тольятти, 2001. С. 39-40

21. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / А. М. Дальский, А. Г. Суслов, А. Г. Косилова [и др.] ; под ред. А. М. Дальского [и др.]. - 5-е изд., испр. - Москва : Машиностроение-1, 2003. - 941 с. : ил. - Предм. указ.: с. 928-941. - Библиогр. в конце гл. - ISBN 5-217-03083-6 : 2147-73. - Текст : непосредственный.

22. Технология машиностроения : учеб. для вузов. В 2 т. Т. 2. Производство машин / В. М. Бурцев, А. С. Васильев, О. М. Деев [и др.] ; под

общ. ред. Г. Н. Мельникова. - Изд. 2-е, стер. - Москва : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. - 639 с. : ил. - Библиогр.: с. 633-634. - ISBN 5-7038-1285-2 : 62-73. - Текст : непосредственный.

23. Технологические наладки механической обработки и сборки в машиностроении : учеб. пособие / А. Г. Схиртладзе, В. В. Морозов, О. И. Драчев [и др.]. - Гриф УМО ; ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2003. - 179 с. : ил. - Библиогр.: с. 178. - ISBN 5-89368-358-7 : 171-00. - Текст : непосредственный.

24. Технология машиностроения. Специальная часть : учебник для вузов / А. С. Ямников, М. Н. Бобков, Г. В. Малахов [и др.] ; под ред. А. А. Маликова, А. С. Ямникова. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. - 344 с. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/98478.html> (дата обращения: 21.06.2021). - Режим доступа: Электронно-библиотечная система "IPRbooks". - ISBN 978-5-9729-0425-9. - Текст : электронный. URL: <https://www.iprbookshop.ru/98478.html>

25. Царев А. М. Перекомпоуемые производственные системы реконфигурируемого производства. Обеспечение жесткости автоматически сменных узлов призматической формы : монография / А. М. Царев, Д. Г. Левашкин. - Москва : Компания Спутник+, 2007. - 303 с. : ил. - Прил.: с. 268-303. - Библиогр.: с. 258-267. - ISBN 978-5-364-00779-7 : 550-00. - Текст : непосредственный.

26. Царев А.М. Производительность и гибкость в условиях применения систем машин переменной компоновки и структуры // Наука - производству. 2001. № 9. С. 42-43.

27. Царев А.М. Основные положения теории производительности систем машин автоматического действия на примере перекомпоуемых производственных систем // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2014. № 3. С. 33-41.

28. Юнин И.Ю., Феофанов А.Н. Перекомпоуемые производственные системы реконфигурируемого производства // СТИН. 2010. № 7. С. 2-6.

29. Юнин И.Ю., Феофанов А.Н. Перекомпоуемые производственные системы реконфигурируемого производства (окончание. начало см. в №7 за 2010 г.) // СТИН. 2010. № 8. С. 2-5.
30. Y. Altintas, M. Weck: Chatter stability of metal cutting and grinding, CIRP Annals 53(2), 619–642 (2004)
31. Ghosh N., Ravi Y.B., Patra A., Mukhopadhyay S. Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion, Mechanical Systems and Signal Processing 21 (1) (2007) 466–479.
32. Haber R.E., Jimenez J.E., Peres C.R., Alique J.R. An investigation of tool wear monitoring in a high-speed machining process, Sensors and Actuators A: Physical 116 (3) (2004) 539–545.
33. Scheffer C., Kratz H., Heyns P.S., Klocke F., Development of a tool wear monitoring system for hard turning, International Journal of Machine Tools and Manufacture 43 (10) (2003) 973–985.
34. J. Tlusty: Manufacturing Processes and Equipment (Prentice Hall, Eglewood Cliffs 2000)
35. Tonshoff, H. K. , Wolfsberg, J. P. , Kals, H. J. J. , Konig, W., and Luttermelt, C. A. , 1988, “Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Process,” CIRP Ann. 0007-8506, 37(2), pp. 611–622.

**Сертификат по публикации**

