

ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СЕРВИСА

На правах рукописи



РУБЦОВ Михаил Анатольевич

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ
КООРДИНАТНО-РАСТОЧНЫХ СТАНКОВ ПУТЁМ КОМПЕНСАЦИИ
УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СТОЙКИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СТАНИНЫ

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., доцент Горшков Б.М.

Тольятти, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ И КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ МАШИН, И МЕТОДЫ ИХ ПОВЫШЕНИЯ.....	15
1.1 Анализ геометрических погрешностей, влияющих на снижение точности машин.....	15
1.2 Упругие контактные деформации в стыках машин.....	20
1.3 Расчет погрешностей геометрических характеристик машин	21
1.4 Пути повышения точности координатно-расточных станков.....	27
Выводы по первой главе. Постановка цели и задач исследований.....	34
Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ СИЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КООРДИНАТНО-РАСТОЧНОГО СТАНКА МОДЕЛИ 2А459АМФ4.....	36
2.1 Изучение общих и контактных взаимодействий несущей системы горизонтального координатно-расточного станка мод. 2А459АМФ4.....	36
2.2 Исследование упругих перемещений в стыке подсистемы “стол – станина стола”.....	39
2.3 Исследование упругих перемещений в стыке подсистемы “шпиндельная бабка – стойка”.....	40
2.4 Исследование упругих деформаций стойки.....	42
2.5 Исследование упругих перемещений в стыке подсистемы “салазки – станина стойки”.....	44
Выводы по второй главе.....	46
Глава 3. ТЕОРИТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КООРДИНАТНО-РАСТОЧНЫХ СТАНКОВ С ИХ ТОЧНОСТЬЮ.....	48
3.1 Математическая модель подсистемы «салазки – стойка станка»	48

3.2 Математическая модель изгибных деформаций станины и контактных взаимодействий стойки, салазок, роликовых направляющих станины.....	57
3.3 Динамическая модель стойки с системой гидродомкратов горизонтального координатно-расточного станка.....	63
Выводы по третьей главе.....	77
Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ УСТАНОВКА КОМПЕНСАЦИИ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СТОЙКИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СТАНИНЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КООРДИНАТНО-РАСТОЧНОГО СТАНКА	79
4.1 Конструктивно-функциональная схема лабораторной установки.....	80
4.2 Конструктивные особенности измерительных баз.....	86
4.3 Измерительной база на основе гироскопического эффекта.....	90
4.4 Экспериментальная опытно-промышленная установка.....	93
Выводы по четвёртой главе.....	97
Глава 5. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КООРДИНАТНО-РАСТОЧНЫХ СТАНКОВ ПУТЕМ КОМПЕНСАЦИИ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СТОЙКИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СТАНИНЫ.....	99
5.1 Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований точности отверстий, выполняемых на горизонтальных координатно-расточных станках.....	99
5.2 Экспериментальные исследования повышения точности горизонтальных координатно-расточных станков, оснащенных устройством компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины.....	105
5.3 Оценка результатов экспериментальных исследований	107
Выводы по пятой главе.....	112
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	113
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	115

ПРИЛОЖЕНИЕ А (Результаты экспериментальных исследований упругих перемещений).....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (Математическое описание воздействия силовых деформаций несущей системы станка на его геометрическую точность)...	143
ПРИЛОЖЕНИЕ В (Сравнительные результаты расточки отверстий в виде круглограмм)	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (Акты внедрения результатов НИР).....	160

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. При проектировании и эксплуатации металлорежущего оборудования возникает необходимость повышения и поддержания его точностных характеристик. Это особенно важно применительно к горизонтальным координатно-расточным станкам (КРС).

Наиболее широкое применение нашли горизонтальные координатно-расточные станки, устанавливаемые на три опорные точки относительно фундамента. Эти станки широко используются в автомобильной, железнодорожной и оборонной промышленности. Имеют ряд преимуществ над многоопорными системами. Проседание одной из опор приводит к наклону станка и не существенно влияет на относительные перемещения подсистемы «инструмент-заготовка». Однако силовые деформации станины (изгиб, кручение и контактные взаимодействия) от веса подвижных узлов нарушают статическую настройку технологической системы станка, следовательно, снижают его точность. Поэтому, повышение точности горизонтальных КРС является актуальной научно-технической задачей.

Классические методы повышения точности [26, 27, 36, 67, 71, 72, 92, 125, 140, 141, 143, 145, 146, 148, 149, 150, 155 и др.], состоят в выборе оптимальной конструкции станины и увеличении её жесткости, повышении качества сборки и доводки узлов, подборе оптимальных режимов резания и др. Порой эти методы исчерпывают свои возможности и становятся экономически невыгодными.

Оснащение станков адаптивными самоподнастраивающимися системами является весьма перспективным путём повышения их точности [6].

Настоящая работа посвящена повышению геометрической точности горизонтальных КРС, размещённых на трёх башмаках относительно фундаментной плиты, с использованием устройства компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины, на примере горизонтального КРС модели 2А459АМФ4.

В настоящее время станкостроительное предприятие ЗАО «Стан-Самара», являющееся правопреемником Самарского станкостроительного производственного объединения, выполняет ремонт и модернизацию технологического оборудования выпускаемого ранее. Участвует в ремонте высокоточных станков моделей 2458АФ1, 2459АФ1, 2А459АМФ4 и т.д. Поэтому дальнейшие исследования, направленные на повышение точности металлорежущего оборудования, путем его модернизации, особенно актуально применительно к такого типа станкам. При этом основными видами обработки являются сверление и растачивание глубоких отверстий, фрезерование сложных фасонных поверхностей и т.д.

Исследования проводились по заказу ФГУП НКТБ «ПАРСЕК» (г.о. Тольятти) в различные годы с 2011 по 2013 г.г.

Цель настоящей работы: повышение геометрической точности горизонтальных координатно-расточных станков путем компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины.

Для достижения поставленной цели проведён анализ факторов и конструктивных особенностей влияющих на точность машин. В соответствии с полученными результатами возникла необходимость решить комплекс научных и исследовательских **задач:**

1. Провести экспериментальные исследования упругой системы горизонтального КРС, с составлением укрупнённого баланса его точности и выявления элементов упругой системы оказывающих наибольшее влияние на снижение его точности.

2. Разработать математическую модель контактных взаимодействий в стыке подсистемы «салазки – стойка станка», позволяющую оценить сближение контактируемых поверхностей.

3. Разработать математическую модель, описывающую влияние изгибных деформаций станины, контактных взаимодействий в стыках подсистем «салазки - стойка станка» и «салазки - роликовые направляющие станины» на геометрическую точность станка.

4. Осуществить разработку динамической модели стойки с комплексом гидродомкратов горизонтального КРС как объект управления.

5. Разработать измерительную базу, для контроля силовых деформаций станин, на основе гироскопического эффекта.

6. Разработать, изготовить и отладить экспериментальную опытно-промышленную установку компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС.

7. Выполнить оценку эффективности повышения точности горизонтального КРС путем компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины.

Методы исследования:

Теоретические исследования диссертационной работы основаны на методах линейной алгебры, классической тригонометрии и механики, конечных элементов, теории резания, теории вероятности и математической статистики. Исследования воздействия силовых деформаций упругой системы на точность обработки проводились экспериментально в промышленных условиях на опытно-промышленной установке, оснащенной устройством компенсации угловых перемещений стойки при деформации её станины.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

– математическая модель контактных взаимодействий в стыке подсистемы «салазки – стойка станка», описывающая сближение контактирующих поверхностей, влияющих на угловые перемещения стойки;

– математическая модель, описывающая влияние изгибных деформаций станины и контактных взаимодействий стойки, салазок, роликовых направляющих станины на геометрическую точность станка;

– динамическая модель, описывающая поведение стойки горизонтального КРС с комплексом гидродомкратов как объект управления.

Практическая ценность заключается в:

- доказательстве положительного эффекта от использования устройства компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС;
- методике инженерных расчетов точности расточки отверстий выполняемых на горизонтальных КРС установленных на три опорные точки относительно фундамента;
- методике разработки динамической модели стойки горизонтального КРС с комплексом гидродомкратов как объект управления, позволяющей синтезировать регулятор системы управления;
- практической реализации устройства компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС;
- разработке лабораторной установки, выполненной на базе горизонтального КРС модели 2А459АМФ4 (патент на полезную модель РФ № 136380; заявл. 28.03.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.);
- усовершенствовании измерительно-регистрающей базы горизонтальных КРС для оценки силовых деформаций станин на основе использования гироскопического эффекта (патенты на полезную модель РФ: № 142880; заявл. 26.09.2013; опубл. 10.07.2014, Бюл.; № 140823; заявл. 24.01.2014; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14; патент РФ на изобретение № 2575508; заявл. 10.09.2014; опубл. 20.02.2016, Бюл. № 5);
- разработке и отладке экспериментальной опытно-промышленной установки компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС модели 2А459АМФ4.

Реализация результатов работы.

Основные результаты аналитических и экспериментальных исследований внедрены:

- в виде методики оценке влияния силовых деформаций упругой системы горизонтальных КРС (в статике) на точность обработки поверхностей (ФГУП НКТЬБ “ПАРСЕК”, г.о. Тольятти);

– в виде методики исследования перемещения стойки горизонтального КРС с комплексом гидродомкратов как объект управления (ФГУП НКТЬ «ПАРСЕК», г.о. Тольятти);

– в виде рекомендаций к выполнению серии лабораторно-исследовательских работ по учебным курсам «Основы технологии машиностроения», «Технология производства БМП» (ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса»);

– в виде устройства компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС модели 2А459АМФ4, позволившее снизить увод оси расточки глубоких отверстий, вследствие упругих силовых деформаций станины более чем в 2 раза (ФГУП НКТЬ «ПАРСЕК», г.о. Тольятти);

– при подготовке лекций по дисциплине «Автоматические линии, оборудование, ГПС» (ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса»).

О внедрении результатов диссертационной работы свидетельствуют соответствующие акты.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались:

– на 6 Международных научно-технических конференциях «Наука - промышленности и сервису» (Тольятти, 2012, 2014 г.г.) [80, 86], «Проблемы исследования и проектирования машин» (Пенза, 2013) [81], «Технологическое обеспечение машиностроительных производств» (Челябинск, 2013) [82], «70 years FIT» (Болгария, Созопл, 2015) [84], «Наукоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения» (Москва, 2016) [87];

– на Международном форуме по проблемам науки, техники и образования (Москва, 2013) [83];

– на Всероссийской научно-технической конференции «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2015) [85].

Публикации: по теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 3 из них в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 8 публикаций в трудах и материалах

международных, всероссийских научно-технических конференций, 3 патента РФ на полезную модель, 1 патент на изобретение.

На защиту выносятся основные научные положения:

1. Математическая модель, описывающая влияние изгибных деформаций станины и контактных взаимодействий стойки, салазок, роликовых направляющих станины на геометрическую точность станка;

2. Динамическая модель на примере стойки горизонтального КРС с комплексом гидродомкратов как объект управления.

3. Экспериментальная опытно-промышленная установка компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС модели 2А459АМФ4.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка используемых источников из 156 наименований. Работа изложена на 170 страницах, содержит 64 рисунка, 8 таблиц.

Работа выполнена на кафедре “Сервис технических и технологических систем” Поволжского государственной университета в период обучения в аспирантуре с 2012 по 2016 г.г.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель и задачи исследований. Рассмотрены методы исследования и защищаемые научные результаты. Определена практическая ценность полученных результатов.

В первой главе приведен анализ факторов и конструктивных особенностей влияющих на точность машин и методы их повышения.

Металлорежущее оборудование является одной из основ машиностроительного производства. КРС, используемые в машиностроении, позволяют с высокой точностью и производительностью, обрабатывать заготовки различных размеров и большой сложности. При этом на точность обработки, влияние оказывает множество факторов, но основу составляет геометрическая точность самого технологического оборудования. От точности машины зависят ее работоспособность, надежность, экономичность, производительность, уровень вибрации и шума, а также качество выпускаемой продукции.

Поэтому повышение геометрической точности технологического оборудования является важной научной и производственной задачей.

Данная задача остро стоит применительно к горизонтальным КРС средних размеров, установленным на три опоры относительно фундаментной плиты [23, 30, 31, 35, 71, 135, 108, 110, 112, 113, 116, 118, 1 и др.].

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям деформаций несущей системы горизонтального КРС и составления его баланса точности.

При проведении эксперимента стол заготовки устанавливался в среднее положение на станине, а салазки – в положение начала обработки. Для передачи нагрузки в шпинделе станка закреплялась оправка. С помощью винтового домкрата создавалась нагрузка.

Для измерения нагрузки использовался динамометр, который располагался между винтовым домкратом и оправкой. При повороте стола заготовки изменялось направление действующей силы. Нагружение станка при

эксперименте было выполнено по девяти направлениям, одно из которых усилие, приложенное вдоль оси шпинделя, рассмотренное как операция сверления.

Изменение нагрузки происходило от 0 до 8000 Н с шагом показаний измерительных приборов 500 Н.

Цена деления измерительных приборов (микрокаторов), позволивших составить баланс точности станка составляла 0,2 мкм.

В результате выявлено, что наибольшим силовым деформациям подвержена станина по направляющим которой перемещается стойка. Деформации изгиба и кручения станины приблизительно составляют 55 % в балансе упругих перемещений горизонтального КРС модели 2А459АМФ4.

В третьей главе приведены теоретические исследования снижения точности КРС. Геометрическая точность станка в первом приближении рассмотрена как сумма упругих перемещений при контактных взаимодействиях подсистем «салазки - стойка станка», «салазки – роликовые направляющие станины» и общих деформаций станины (изгиба и кручения).

Выполнено математическое описание влияния деформаций станины горизонтального КРС на снижение его точности, позволяющее выполнять расчет перемещений стойки и обрабатываемой заготовки, необходимых для стабилизации силовых деформаций изгиба и кручения станины станка (ПРИЛОЖЕНИЕ А). Получены аналитические зависимости, которые позволяют определить величины перемещений осей инструмента и отверстия. Вычисленные значения поправок записываются в систему числового программного управления, где происходит их обработка и выдача соответствующего управляющего сигнала.

При анализе теоретических и экспериментальных исследований выявилось, что силовые деформации несущей системы имеют удовлетворительное совпадение, максимальное расхождение составило 15%.

Разработана динамическая модель стойки горизонтального КРС с системой гидродомкратов как объект подлежащий управлению. Это позволило определить собственные передаточные функции по управлению и возмущению, с получением

динамических структур объекта управления, позволяющих синтезировать регулятор системы управления.

Четвёртая глава посвящена описанию разработанной экспериментальной опытно-промышленной установки компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС модели 2А459АМФ4.

При разработке опытно-промышленной установки была разработана установка, оснащенная устройством стабилизации положений осей обрабатываемого отверстия и инструмента (патент РФ на полезную модель №136380), что позволило существенно снизить влияние изгиба и кручения станины на точность установки. Но при этом была выявлена низкая помехозащищенность данного устройства, что привело к выводу о использовании устройства стабилизации положений осей обрабатываемого отверстия и инструмента только в лабораторных целях.

Для экспериментальных исследований силовых деформаций станины станка потребовалась разработка измерительной базы, а именно устройство для измерения силовых деформаций станины КРС (патент РФ на изобретение № 2575508), использующее гироскопический эффект. Это позволило повысить устойчивость самой измерительной базы. Были так же разработаны устройство для контроля силовых деформаций станин КРС (патент РФ на полезную модель № 142880) и устройство для измерения силовых деформаций изгиба и кручения станин КРС (патент РФ на полезную модель № 140823). Но при их использовании была выявлена высокая подверженность устройств колебаниям технологической системы станка, что позволило использовать их только в лабораторных целях.

Разработанная установка позволила оценить эффективность повышения точности обработки станка за счет оснащения горизонтального КРС устройством компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины, установив в месте соединения салазок и стойки два гидродомкрата. Компенсация угловых перемещений стойки при деформации станины осуществляется автоматически. В состав устройства входят рейка-шаблон, закреплённая на салазках под некоторым углом, распределительный клапан и станция гидравлического давления.

Таким образом, экспериментальная опытно-промышленная установка позволяет повысить точность горизонтального КРС путем компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины в условиях действующего производства.

Пятая глава посвящена оценке повышению точности на горизонтальном КРС, оснащённым устройством компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины.

Исследования погрешности обработки отверстий производились при расточке отверстия в заготовке диаметром $\varnothing 20^{+0,015}$ на горизонтальном КРС модели 2А459АМФ4. Измерения растачиваемых отверстий проводились на координатной измерительной машине.

Для определения необходимого количества отверстий использовался метод математической статистики. При этом точность оценки ε среднего квадратического отклонения была в пределах $\pm 0,2 S$ и принята надёжность $\alpha = 0,95$.

Статистическая обработка основанная на результатах измерений представлялась в виде круглограмм, полученных экспериментальным путём.

Подводя итог экспериментальному исследованию точности обработки на горизонтальных КРС, можно утверждать, что внедрение системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины станка обеспечило снижение погрешности в 2 раза. Овальность снизилась на 10%.

В результате установлено, что использование устройства компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины позволяет перевести станок из класса точности В в класс А.

Глава 1. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ И КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ МАШИН, И МЕТОДЫ ИХ ПОВЫШЕНИЯ

Металлорежущее оборудование является одной из основ машиностроительного производства. КРС, используемые в машиностроении, позволяют с высокой точностью и производительностью, обрабатывать заготовки различных размеров и значительной сложности. При этом на точность обработки, влияние оказывает множество факторов, но основу составляет геометрическая точность самого технологического оборудования. От точности машины зависят ее работоспособность, надежность, экономичность, производительность, уровень вибрации и шума, а также качество выпускаемой продукции [10, 13, 19, 20,25, 53, 75, 79, 89, 93, 99, 130, 136, 137, 158, 142, 147, 149, 156, 156 и др.].

Поэтому повышение геометрической точности технологического оборудования является важной научной и производственной задачей.

Данная задача остро стоит применительно к горизонтальным КРС средних размеров, установленных на три опоры относительно фундаментной плиты [24, 30, 110 и др.].

Необходимо провести дополнительные исследования снижения точности и осуществить анализ влияния разных факторов и конструктивных особенностей на точность машин и проанализировать методы их повышения.

1.1 Анализ геометрических погрешностей, влияющих на снижение точности машин

На упругую систему технологического оборудования действует большое количество факторов, которые приводят к снижению геометрической точности машин, поскольку они во многом определяют качество машин, их произво-

длительность, экономичность в эксплуатации. Многочисленные исследования точности машин, показывают, что большинство факторов влияют на погрешность через силу и тепло (рисунок 1.1). При этом последние, вызывают различные перемещения элементов технологического оборудования, нарушая относительное движение (положение) его исполнительных органов [2, 10, 12, 13, 14, 17, 59, 80, 102].

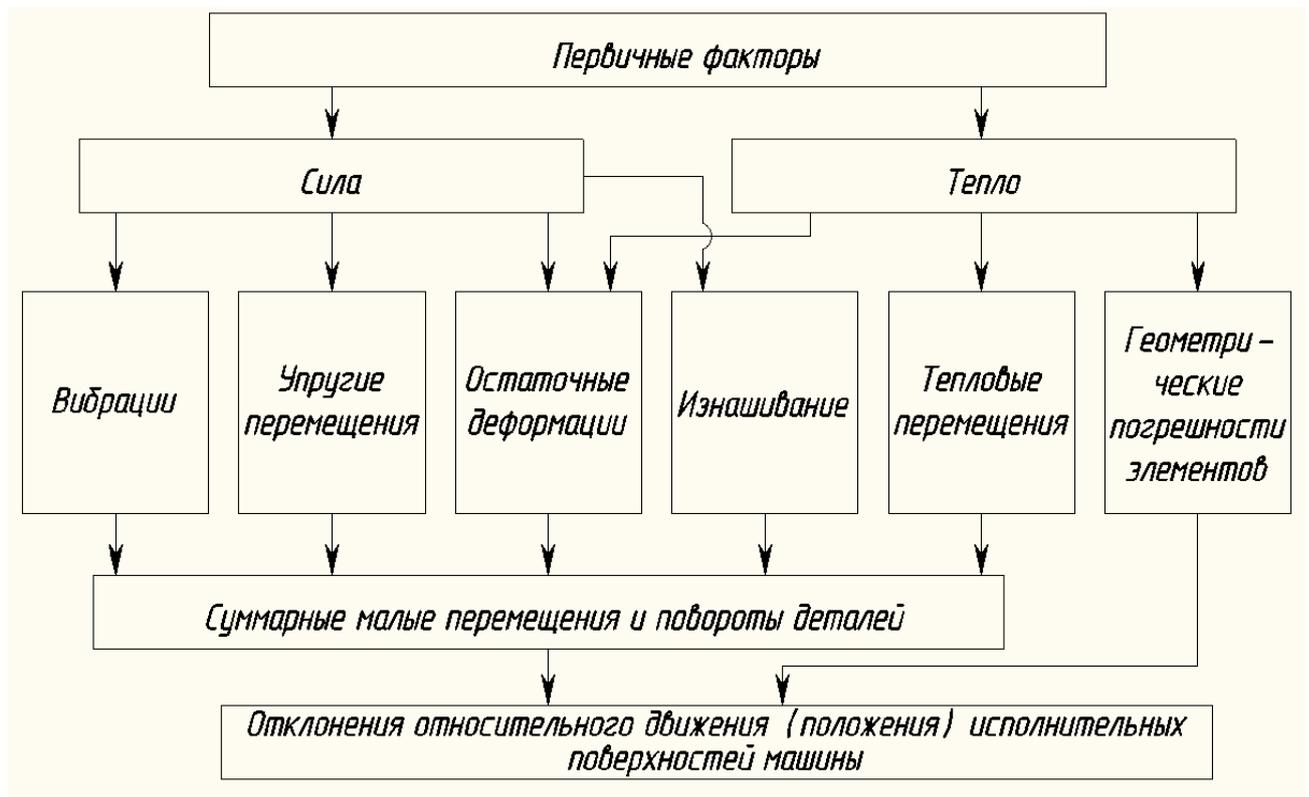


Рисунок 1.1 – Схема преобразования действия факторов в геометрические погрешности

В ряде исследований [22, 71, 75] виды погрешностей машин условно предложено разделить на несколько основных групп кроме геометрических, в которые входят:

- упругие (силовые) перемещения элементов машин;
- тепловые (температурные);
- вибрации (динамические);
- изнашивание элементов машин (например инструмента).

Также выделяют кинематические погрешности машин, но это только несколько детализирует описание процесса снижения геометрической точности машин отмеченных выше.

Рассмотрим кратко описание каждой группы погрешностей, приводимых различными авторами.

Геометрические погрешности.

Правильное функционирование машины, ее механизмов, выполнение ими служебных функций в первую очередь, обеспечивается за счет соответствующего относительного движения или положения исполнительных органов [10]. Отклонения приводят к появлению геометрических погрешностей, которые зависят от точности обработки деталей станка и их сборки и характеризуют ошибки взаимного расположения узлов станка [41, 75].

Отклонения указанных геометрических характеристик от заданных значений в процессе, например, растачивании вызывают погрешности обработки. Если погрешности обработки превышают допустимые значения, то станок не будет выполнять своё служебное назначение [10].

Упругие (силовые) погрешности наблюдаются при функционировании высокоточных машин и оказывают значительное влияние на их точность. Это связано с наличием подвижных узлов, например, стойки, обрабатываемой заготовки и др., что приводит к силовым деформациям несущей системы машин.

Тепловые (температурные) погрешности играют значимую роль в высокоточном технологическом оборудовании.

Для снижения негативного воздействия температурных полей на точность оборудования и, соответственно, обработки при проектировании металлорежущих станков используют [67]:

- рациональные схемы применения и расположения источников теплового излучения;
- совершенствование системы смазки в подвижных узлах;
- тепловая изоляция источников тепла от основных корпусных деталей несущей системы;

- применение интенсивного отвода тепла с помощью смазочно-охлаждающих жидкостей от источников теплового излучения;
- внесение целесообразных изменений в конструкцию оборудования с целью минимизации влияния температурных полей на него;
- использование специальных материалов с пониженным коэффициентом линейного расширения;
- искусственный подогрев отдельных частей несущей системы для восстановления температурного баланса несущей системы.

Однако, КРС, как правило, эксплуатируются в термоконстантных помещениях [72]. Масло, подаваемое в подвижные узлы станков предварительно, проходит через холодильный агрегат и его температура стабилизирована.

Вибрации (динамические) погрешности связаны с относительными колебаниями инструмента и обрабатываемой заготовки, а так же с переходными процессами при пуске, торможении, реверсировании и врезании инструмента [18, 57, 72, 75, 92, 129].

В общем случае на упругую систему станка действуют несколько источников колебаний, основными из которых являются [6]:

- процесс резания;
- ротор электродвигателя привода главного движения;
- ротор электродвигателя привода подач поперечного суппорта (или стола);
- ротор электродвигателя привода подач продольного суппорта (или стола).

Свойство станка противодействовать возникновению колебаний обычно называют виброустойчивостью. Колебания имеют сложный характер и отличаются формой.

Известны [71 и др.] пути увеличения виброустойчивости несущей системы технологического оборудования:

- повышенное качество сборки и изготовления деталей привода и балансировки вращающихся частей электродвигателей;

- увеличение жесткости станин технологического оборудования, которое позволяет снизить колебания;
- применение систем компенсации колебаний и управлением уровнем колебаний;
- и т.д.

Изнашивание элементов машин.

Наблюдается интенсивный износ направляющих подвижных узлов, а также кромок режущего инструмента. Вследствие их износа, происходит изменение размера обрабатываемой заготовки и наблюдаются другие виды погрешностей [8].

Для снижения влияния погрешностей инструмента нужно вести контроль его износа, своевременную переточку или замену.

Известны [6 и др.] пути автоматического управления процессом обработки, контроля за состоянием режущих кромок, эффективность которых подтверждается многочисленными исследованиями.

Кинематические погрешности – это погрешности, возникающие в кинематических схемах станка и оказывающие на скорость перемещения его подвижных органов.

Применение устройств коррекции для уменьшения зазоров в соединениях в значительной степени повышают геометрическую точность технологической системы [75].

На основе предварительного анализа факторов, влияющих на снижение геометрической точности машин особенно применительно к КРС, силовые деформации упругой системы станков оказывают наиболее существенное влияние на их точность.

Исключение тем или иным методом составляющих упругих деформаций несущей системы, например станины, позволит существенно повысить точность станка и соответственно точность обработки. Решению данной задачи посвящены основные аспекты настоящей работы.

1.2 Упругие контактные деформации в стыках машин

В настоящее время внимание уделяется много качеству контактирующих поверхностей технологического оборудования. При исследовании шероховатости взаимодействующих поверхностей был использован вероятностно-статистический подход, что дало возможность учитывать масштабный фактор при контактировании деталей станков. Существенный вклад в это направление представлено в работах [35, 55, 65].

Точность обработки в значительной мере зависит от жесткости упругой системы станка, которая определяется контактными деформациями в местах сопряжении узлов и деталей. Этому вопросу посвящено множество работ отечественных и иностранных ученых [3, 11, 15, 21, 44, 63, 131, 134, 135, 150, 152, 153 и др.].

Известны [11] экспериментальные исследования жесткости суппортов технологического оборудования. При этом выявилось, что собственная жесткость элементов станков на много больше жесткости контактируемых поверхностей. Отмечено, что существующие выражения не дают полного описания контактирующих поверхностей. Из-за отклонений их формы от заданной, происходит неравномерное распределение давлений.

В дальнейших исследованиях [56], было найдено сближение в стыках от давления и оценено влияние волнистости на его жесткость.

Огромный вклад в изучение контактных взаимодействий в стыках представлен в работах [9, 18, 35, 58, 56 и др.], сформировавших современные представления о процессах, протекающих в зонах контакта. В зонах стыка сначала входят в контакт друг с другом микровыступы [19]. На их форму влияют множество факторов, таких как физико-механические свойства поверхностных слоев, обработка и т.д. Для представления деформаций в зонах контактируемых поверхностей в работах [13, 19, 34] были рассмотрены возможности моделирования микронеровностей как стержневая модель, набор сфер и эллипсоидов.

Далее исследования контактных взаимодействий поверхностей продолжили

З.М. Левина и Д.Н. Решетов в работах [60, 61]. Они предложили: рекомендации по увеличению жесткости стыков машин; аналитические выражения, которые дают возможность оценить жесткость стыков при приложении нагрузок; методы расчета на работоспособности стыков разного вида. Стоит отметить, что предложенные авторами выражения учитывают многочисленные факторы, появляющихся в реальных условиях взаимодействия стыков.

При моделировании контактных взаимодействий в стыках в трудах [60, 61] поверхностные контактирующие слои рассмотрены как упругие прокладки между абсолютно жесткими элементами технологического оборудования. Однако следует отметить, что жесткость отдельных деталей имеет один и тот же порядок жесткости поверхностных слоёв.

При оценке погрешности смещения вершины режущего инструмента относительно обрабатываемой заготовки необходимо учитывать не только общие силовые деформации станины, но и контактные взаимодействия в стыке между салазками и направляющими, а так же контактные взаимодействия между салазками и стойкой, которые будут рассмотрены далее в настоящей работе.

1.3 Расчет погрешностей геометрических характеристик машин

Существует много методов, позволяющих рассчитывать образования геометрических погрешностей на станках [5, 8, 13, 21, 25, 56, 100, 138 и др.].

Так например в работе В.С. Корсакова [56] был рассмотрен метод расчета образования погрешностей при установки заготовок. Погрешность установки состоит из погрешности положения заготовки, погрешности базирования и погрешности закрепления.

В пособии научной школы Л.В. Худобина [126, 127] изложены основы теории базирования заготовок на операциях механической обработки. Подробно рассмотрены типовые схемы базирования и схемы установки заготовок и дана мето-

дика разработки рациональных схем базирования. Изложена сущность механизма образования погрешности базирования и методология расчёта этой погрешности.

Все методы можно свести к двум различающимся методам математического описания погрешностей обработки: статистическому и расчетно-аналитическому [7].

Достаточно сложно в исследовании процесса образования погрешностей обработки вскрыть причины и физическую сущность этих причин на точность обработки. Поэтому расчетно-аналитический метод более точный, так как базируется на теоретическом и экспериментальном изучении физической сущности процесса образования геометрических погрешностей. А статистический метод основан на изучении кривых распределения, полученных в производственных условиях, который даёт возможность оценивать точность обработки, выявлять погрешности (случайные и систематические), но не объясняя причин их возникновения [9].

Отечественные ученые, такие как Б.С. Балакшин, Б.М. Базров и др. внесли большой вклад в развитие методики математического описания механизма образования геометрических погрешностей обработки деталей на станках. [6, 7, 8, 9, 13, 26, и др.].

Разработанный расчетно-аналитический метод [25] заключается в определении влияния каждой из причин на погрешность обработки с последующим их суммированием. Общая погрешность размера детали:

$$\Delta = f(\Delta_y, \varepsilon, \Delta_n, \Delta_u, \Delta_m, \sum \Delta_p) \quad (1.2)$$

где: Δ_y - изменение размера при приложении силы резания;

Δ_n - погрешность наладки технологического оборудования;

ε - погрешность, вызванная при базировании заготовки;

Δ_m - погрешность при деформациях, вызванных от температуры;

Δ_u - изменение размера, вызванное изнашиванием;

$\sum \Delta_p$ - сумма погрешностей размеров определённой детали.

Если Δ_y рассматривается как сумма упругих перемещений элементов технологического оборудования, то можно использовать метод размерных цепей [9].

$$\Delta \bar{r}_i = \bar{r}_{\phi i} - \bar{r}'_i,$$

где: $\bar{r}_{\phi i}$ - изменение от идеального радиус-вектора;

$\Delta \bar{r}_i$ - погрешность при обработке в i -й точке;

\bar{r}'_i - радиус-вектор при соблюдении закона относительного движения режущего инструмента и обрабатываемой заготовки [9].

На рисунке 1.2 показана система координат отсчета заданного радиус-вектора \bar{r}_i

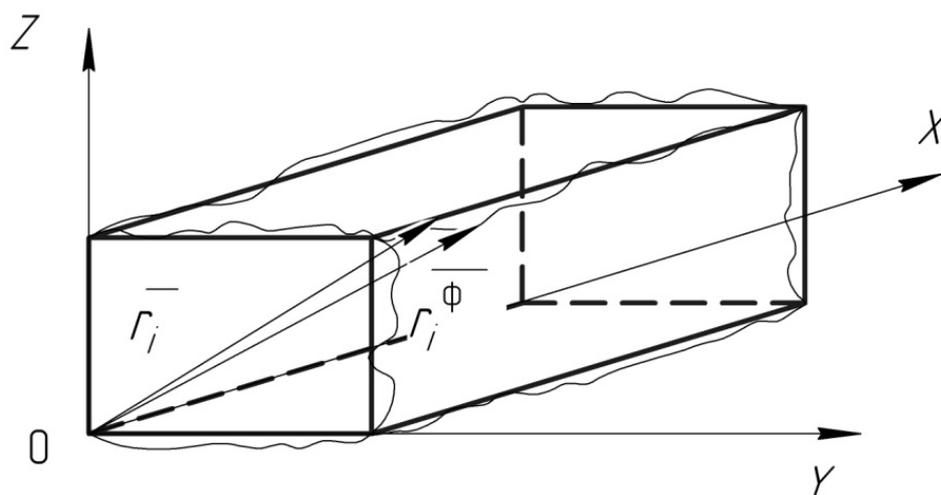


Рисунок 1.2 – Отсчет заданного радиус-вектора точки

При использовании метода координатной цепи находятся те детали, изменения размера и положения которых отражается на точности обработки. При этом строятся координатные системы на которых отмечаются опорные точки деталей [9].

Перемещения и поворот координатной системы является функцией перемещений их точек. При этом надо знать приложенные силы к опорным точкам и их жесткость.

Упругие перемещения опорных точек λ_y представляется в виде:

$$\lambda_y = f(P_i, j_{ni}) \quad (1.3)$$

где P_i - сила, действующая на i -ю опору;

j_{ni} - приведенная жесткость i -ой опоры

Вначале определяются координаты опорных точек в соответствующих координатных системах. Далее по формулам определяются точки приложения и направления сил, действующих в технологической системе. Действия внешних сил и моментов уравновешиваются силой реакций в опорных точках координатных систем. Под действием внешних сил и сил реакций возникают упругие перемещения опорных точек. Координатные системы обрабатываемой заготовки и режущего инструмента имеют ту особенность, что у них контакт с другими деталями осуществляется в пределах шести точек. Координатные системы остальных деталей имеют большое число точек контакта с другими деталями (контакт с деталями, на которые она опирается, и контакт с деталями, опирающимися на нее).

В эквивалентной схеме одна координатная система, как правило, принадлежащая станине, является неподвижной. Отсюда последовательность расчета сил, действующих в технологической системе, заключается в следующем.

После определения всех активных сил и моментов, производится расчет сил реакций в опорных точках обрабатываемой заготовки. Затем рассчитываются реакции в опорных точках последовательно в каждой следующей координатной системе вплоть до неподвижной системы координат. Причем силы реакций, действующие в опорных точках предыдущей координатной системы, для последующей системы выступают в роли активных сил. Аналогично вычисляются силы реакций в опорных точках, начиная от координатной системы режущего инструмента в направлении к неподвижной системе. У элементов технологической сис-

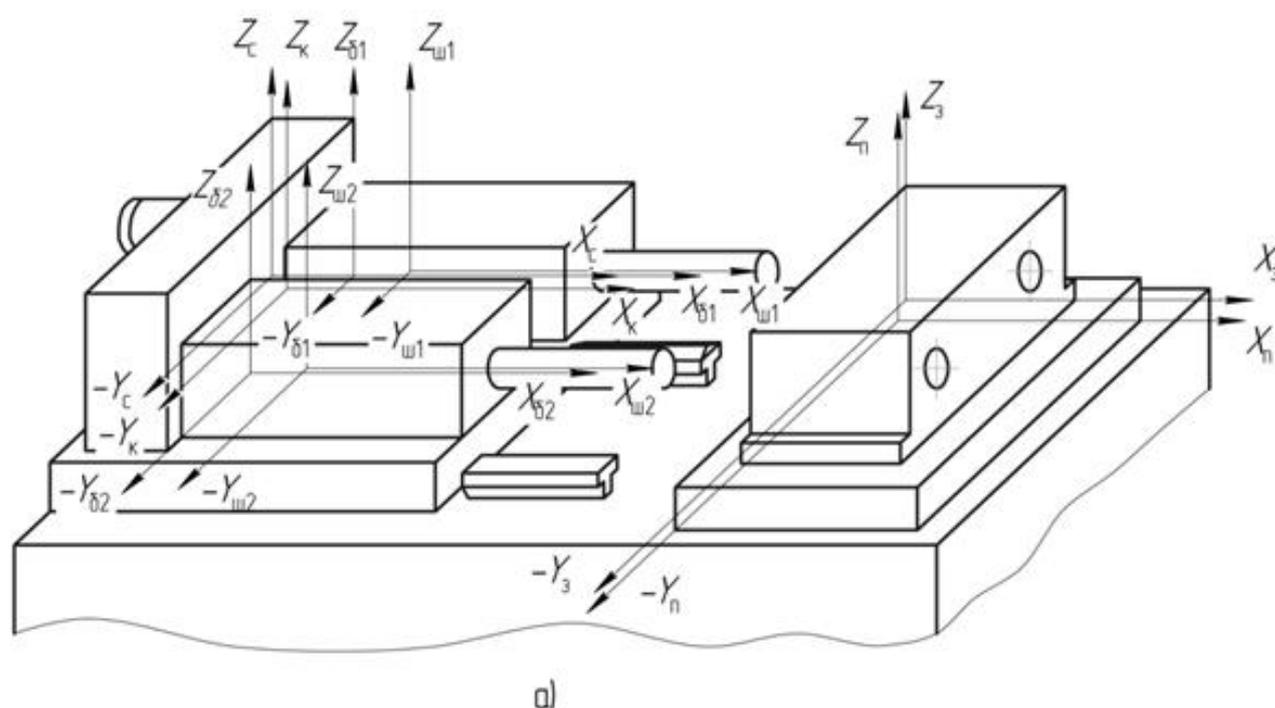
темы, имеющих число точек соприкосновения свыше шести для определения сил реакций имеется шесть уравнений равновесия статики и еще столько уравнений, сколько имеется точек контакта соприкосновения с другими элементами, смонтированными на данном элементе. Для элементов технологической системы, имеющих только шесть точек контакта, таких как обрабатываемая заготовка и режущий инструмент, достаточно шести уравнений равновесия статики.

При помощи приведённых выше уравнений можно: определить жесткость каждой опорной точки; рассчитать неорганизованные перемещения координатных систем, обусловленные упругими перемещениями опорных точек.

Следует отметить, что при использовании данного метода расчета для КРС участвует целая гамма точек кромки режущего инструмента [9].

Метод координатных цепей весьма трудоемок в использовании из-за требования большой предварительной аналитической работы и значительных математических расчетов. Поэтому в реальном времени достаточно трудно его использовать.

Впервые был разработан метод координатных систем с деформирующимися связями проф. Б.М. Базровым и апробирован его школой (рисунок 1.3).



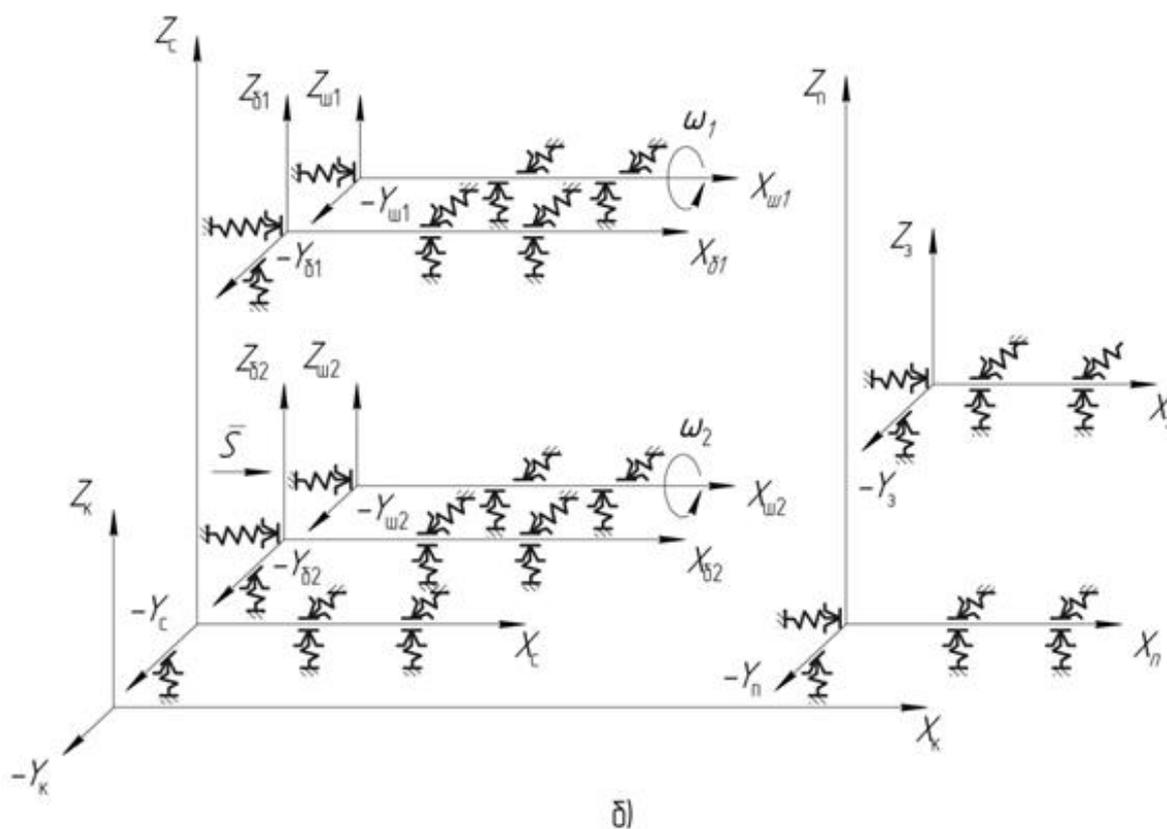


Рисунок 1.3 – Двухшпиндельный автомат:
 а) фронтальный вид; б) эквивалентная схема

Любая машина состоит из совокупности деталей, где каждая из них предназначена выполнять определенные служебные функции. В свою очередь деталь – это пространственное тело, представляющее собой совокупность поверхностей, каждая из которых тоже выполняет соответствующие функции.

Данный метод расчета геометрических погрешностей является высокоточным, но он требует большой подготовительной работы.

В настоящее время значительное распространение нашел числовой метод расчета точности технологических систем – метод конечных элементов. Этот метод применяется в различных САПР, например в программном комплексе ANSYS Workbench 14.5.

1.4 Пути повышения точности координатно-расточных станков

Классические методы повышения точности, состоят в выборе оптимальной конструкции станины и увеличении её жесткости, путем введения дополнительных перегородок и ребер жесткости, повышении качества сборки и доводки узлов, подборе оптимальных режимов резания, что существенно удорожает их стоимость, не всегда позволяет достичь желаемых результатов [22, 97, 110, 126, 143 и др.]. Вследствие актуальность направления повышения точности путем автоматического управления их элементами растет [6, 68, 70, 73, 74, 76, 101, 107, 109, 141 и др.]. Этот путь нашел свое развитие в России [9, 20, 29, 75, 130 и др.] и за рубежом [137, 139, 145 и др.].

Отечественные учёные, такие как: Б.М. Базров, Б.С. Балакшин, и др. внесли огромный вклад в развитие адаптивного обеспечения точности технологического оборудования и обработки [6, 13 и др.].

С помощью адаптивных систем решаются такие задачи как повышение производительности обработки, точности обработки заготовок по размеру и форме, включая повышение стабильности процесса по точностным показателям, повышение качества поверхностного слоя заготовки, стойкости режущего инструмента, снижение себестоимости обработки, оптимизации операции и так далее.

Впервые в процессе адаптивного управления предлагается одновременно получать информацию с заданной точностью о необходимых параметрах и вносить соответствующие поправки (рисунки 1.4, 1.5) в величины, функционально связанные с управляемой величиной [6].

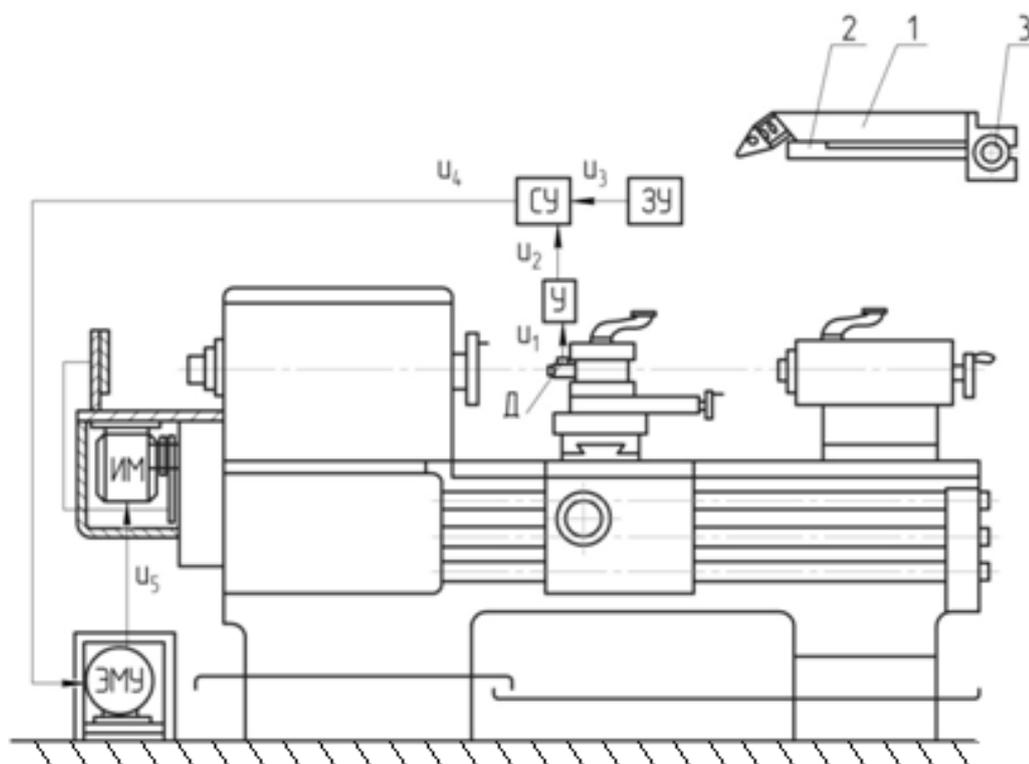


Рисунок 1.4 – Блок-схема системы адаптации по отношению к силе резания: где Д – узел динамометрический; u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 – цифровые или аналоговые сигналы; СУ – устройство сравнение; ЭМУ – электромашинный усилитель; ЗУ – датчик; ИМ – исполнительный механизм [6]

Исследования в настоящей диссертационной работе не затрагивают вопросы связанные с повышением производительности при черновой обработке, а также оптимизации режимов резания. Однако, методы адаптивного обеспечения точности технологического оборудования положены в основу настоящих исследований.

За рубежом повышению точности обработки рассматривался способ управления пространственным положением станины с заготовкой, представленным на рисунке 1.6.

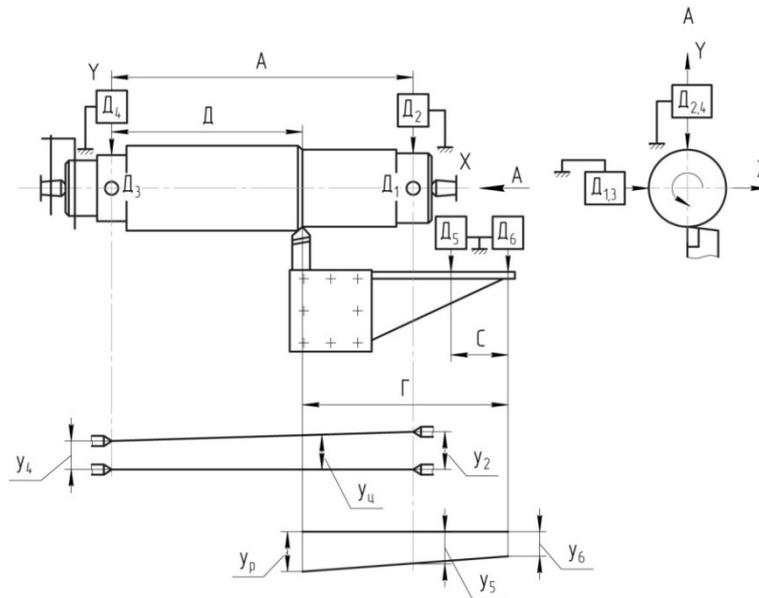


Рисунок 1.5 – Схема измерения геометрического расстояния между осью детали и вершиной резца:

$Д_1$, $Д_2$, $Д_3$, $Д_4$, $Д_5$, $Д_6$ – первичные преобразователи; $y_{ц}$ – перемещение технологического центра детали в обрабатываемом сечении; y_2 , y_4 – смещение контролируемых размеров вала заготовки, измеряемых соответствующими датчиками; y_5 , y_6 – перемещения линейки, контролируемые датчиками $Д_5$ и $Д_6$; $Д$ – расстояние между датчиком $Д_4$ и обрабатываемым сечением по оси X - X ; A – расстояние между датчиками $Д_4$ и $Д_2$ по оси X - X ; $С$ – расстояние между датчиками $Д_5$ и $Д_6$ по оси X - X ; $Г$ – расстояние между датчиком $Д_6$ и вершиной резца по оси X - X ; y_p – перемещение вершины резца по оси Y - Y [6].

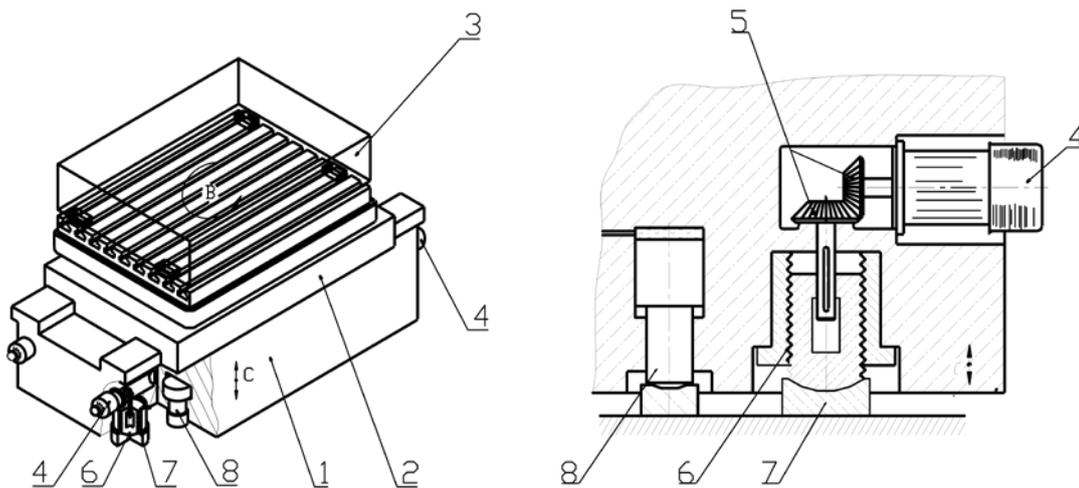


Рисунок 1.6 – Способ повышения точности оборудования путем пространственного управления станиной и столом с деталью (США): 1 – станина; 2 – салазки; 3 – обрабатываемая заготовка; 4 – электродвигатель; 5 – коническая передача; 6 – винтовая передача; 7 – подпятник; 8 – гидродомкрат

Данный способ не учитывает поведение инструмента при обработке, так как рассматривает только часть технологической системы высокоточного оборудования.

На рисунке 1.7 показана схема КРС модели 2455, оснащенный системой автоматической компенсации деформаций (САКД) Куйбышевским станкостроительным производственным объединением. САКД содержит индуктивный датчик 1, измерительную базу 2, выполненную в виде рамы, охватывающей верхний периметр станины. Стоит отметить, что КРС установлен на шаровые опоры 3, 4, 5, которые позволяют оценить перемещения всего станка в пространстве.

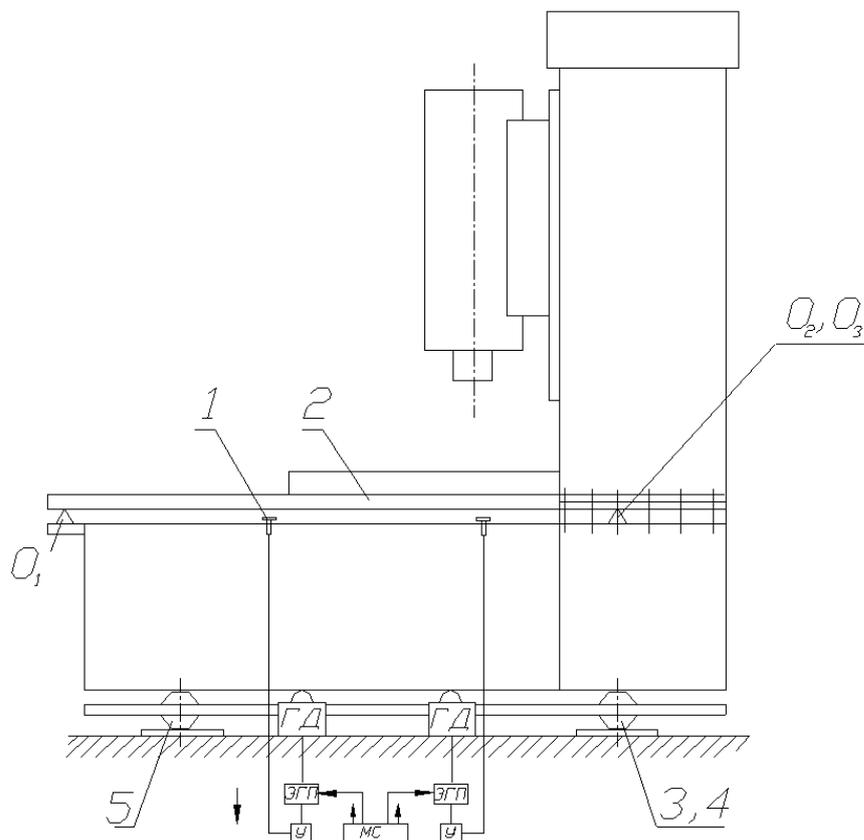


Рисунок 1.7 – КРС модели 2455, оснащенный системой автоматической компенсации деформаций

Рассмотренная измерительная база не позволяет полностью компенсировать возникшие деформации, что является существенным недостатком предложенной САКД.

В настоящих исследованиях планируется усовершенствовать и исследовать измерительно-регистрирующую базу горизонтальных КРС для оценки силовых деформаций станин на основе использования гироскопического эффекта.

На рисунке 1.8 представлено устройство автоматической компенсации силовых деформаций станин горизонтальных КРС, на рабочем столе, которого установлена корпусная заготовка. Вес заготовки может достигать 8000 Н, а сила веса подвижной стойки в сборе составляет 42500 Н [90, 113].

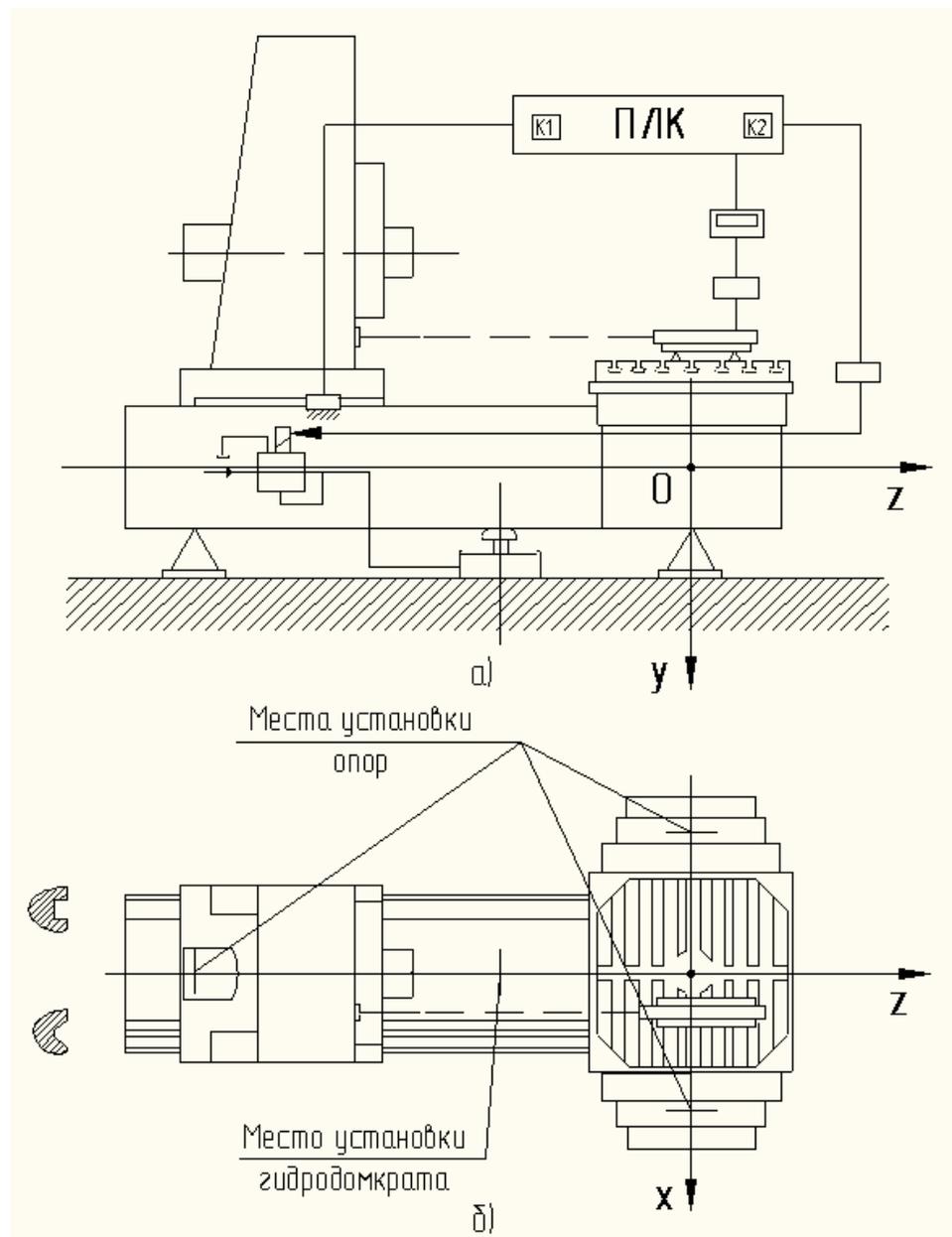


Рисунок 1.8 – Устройство автоматической компенсации силовых деформаций станин горизонтальных КРС

Компенсация силовых деформаций станин направлена на стабилизацию последних в диапазоне нескольких микрометров. Эта система, обладая значительными положительными моментами. Однако она уязвима к возмущениям, происходящим в реальном производстве, наблюдается нестабильность ее работы.

На рисунке 1.9 изображена установка на примере горизонтального КРС модели 2А459 АФ4 [78].

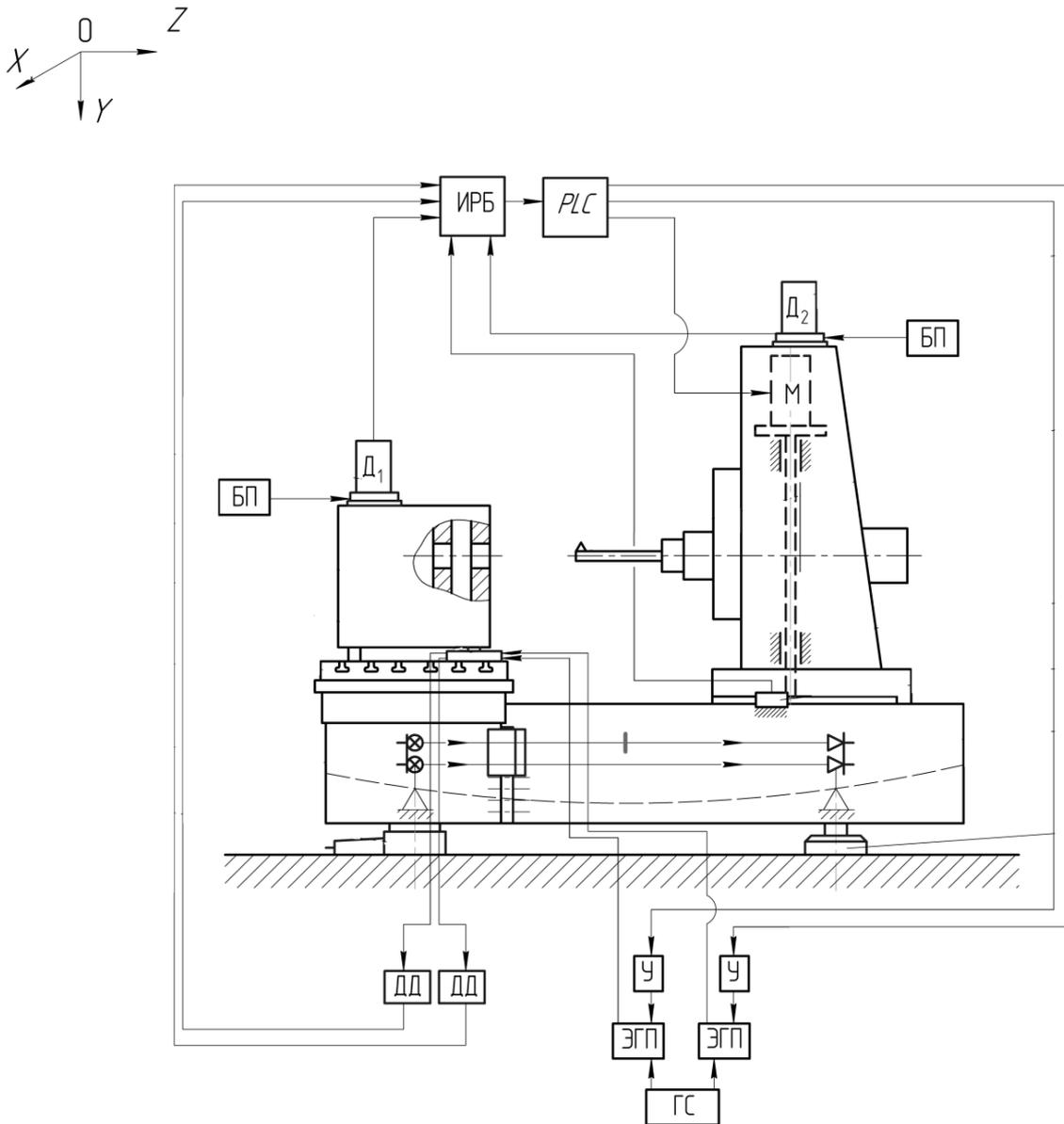


Рисунок 1.9 – Экспериментальная установка на примере горизонтального КРС модели 2А459 АФ4

Здесь рассмотрена возможность автоматической стабилизации положения заготовки. Эта настройка осуществляется за счет управления положением обрабатываемой корпусной заготовки относительно зеркала стола-спутника.

Однако эта установка не лишена недостатков. Одним из них является измерительная база, от стабильности работы которой зависит правильное функционирование системы автоматической стабилизации положения заготовки.. Сделана [78] попытка создания и оснащения оптоэлектронным устройством измерения силовых деформаций станины.

На рисунке 1.10 показано устройство автоматического управления шпиндельной бабкой на вертикальных направляющих стойки станка модели 24К40 СФ4 [115].

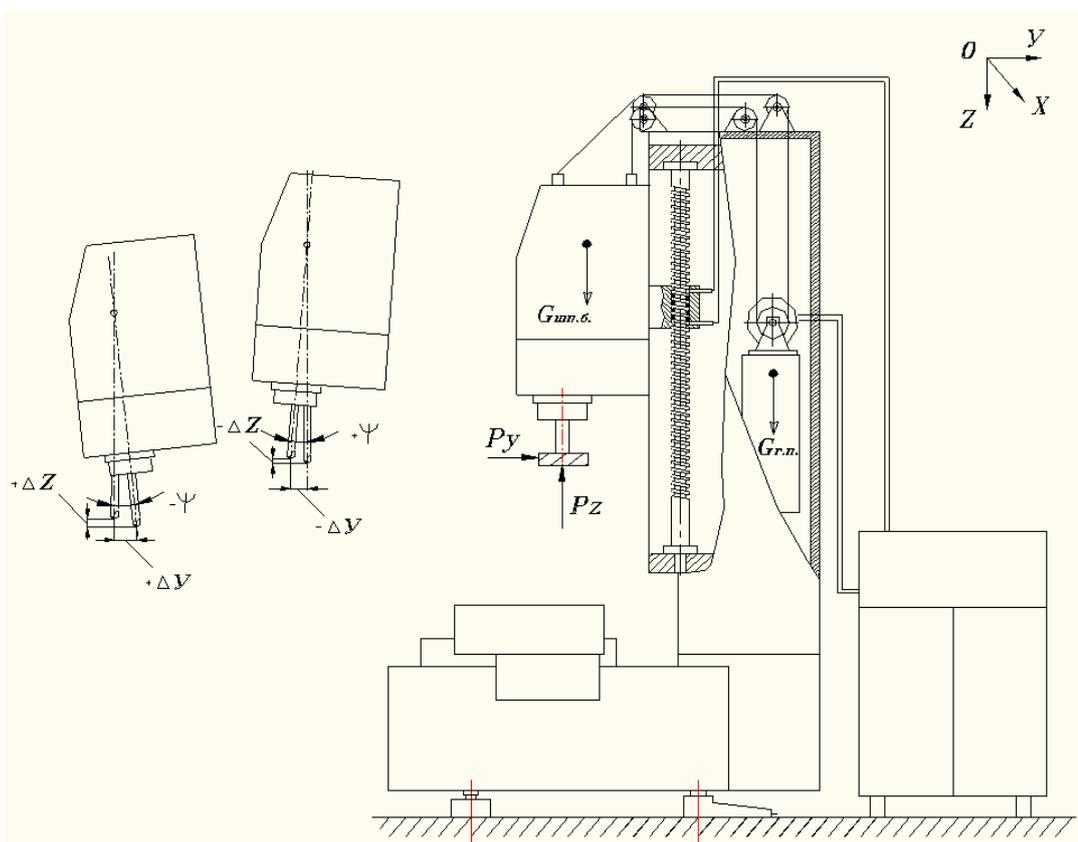


Рисунок 1.10 – Устройство автоматического управления шпиндельной бабкой на вертикальных направляющих стойки:

$\pm \Delta Y$, $\pm \Delta Z$ – линейные перемещения вершины режущего инструмента; $\pm \Psi$ – угол поворота корпуса шпиндельной бабки

Устройство автоматического управления шпиндельной бабкой на вертикальных направляющих стойки хорошо зарекомендовало себя, снизив погрешность при обработке в три раза, однако вопрос надежной измерительной базы остался не решенным и требовал дополнительных исследований.

Таким образом, оснащение технологического оборудования специальными системами управления положением отдельных элементов является одним из наиболее эффективных методов повышения точности. Данный метод в особенности актуален для КРС горизонтальной компоновки. Однако использование электроники в промышленных условиях порой приводит к неустойчивой работе системы, которая требует постоянного контроля и дополнительной наладки.

В настоящей работе уделено значительное внимание использованию гидромеханической системы для решения задач повышения точности оборудования.

Выводы по первой главе. Постановка цели и задач исследований

1. На основе предварительного анализа факторов, влияющих на снижение геометрической точности машин, особенно применительно к КРС, силовые деформации упругой системы станков оказывают наиболее существенное влияние на их точность.

2. При оценке погрешности смещения вершины режущего инструмента относительно обрабатываемой заготовки необходимо учитывать не только общие силовые деформации станины, но и контактные взаимодействия в стыке между салазками и направляющими, а так же контактные взаимодействия между салазками и стойкой.

3. При анализе существующих методов расчета точности в настоящей работе было принято решение по использованию метода конечных элементов, который применяется в программном комплексе ANSYS Workbench 14.5.

4. Оснащение технологического оборудования специальными системами управления положением отдельных элементов является одним из наиболее эффективных методов повышения точности. Однако использование электроники в промышленных условиях порой приводит к неустойчивой работе системы, которая требует постоянного контроля и дополнительной наладки.

Цель достигается решением следующих задач:

1. Проведением экспериментальных исследований упругой системы горизонтального КРС, с составлением укрупнённого баланса его точности и выявления элементов упругой системы оказывающих наибольшее влияние на снижение его точности.

2. Разработкой математической модели контактных взаимодействий в стыке подсистемы «салазки – стойка станка», позволяющей оценить сближение контактируемых поверхностей.

3. Разработкой математической модели, описывающей влияние изгибных деформаций станины, контактных взаимодействий в стыках подсистем «салазки - стойка станка» и «салазки - роликовые направляющие станины» на геометрическую точность станка.

4. Разработкой динамической модели стойки с комплексом гидродомкратов горизонтального КРС как объект управления.

5. Разработкой измерительной базы, для контроля силовых деформаций станин, на основе гироскопического эффекта.

6. Разработкой, изготовлением и отладкой экспериментальной опытно-промышленной установки компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС.

7. Выполнили оценки эффективности повышения точности горизонтального КРС путем компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины.

Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ СИЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КООРДИНАТНО-РАСТОЧНОГО СТАНКА МОДЕЛИ 2А459АМФ4

2.1 Изучение общих и контактных взаимодействий несущей системы горизонтального координатно-расточного станка мод. 2А459АМФ4

Экспериментальные исследования выполнены на станке, оснащённом измерительными головками (микрораторами), которые позволили составить баланс упругих перемещений горизонтального КРС с составной конструкцией станины. При этом были учтены деформации в стыках основных элементов станка.

При проведении эксперимента стол заготовки устанавливался в среднее положение на станине, а салазки – в положение начала обработки. На рисунке 2.1 представлено устройство приложения нагрузки КРС. Для передачи нагрузки в шпинделе станка закреплялась оправка 1. Приложение нагрузки осуществлялось с помощью винтового домкрата 3, который был установлен на кронштейн 4. Кронштейн закреплялся на столе 5. Стол крепился на угольнике 6 стола станка.

Для измерения нагрузки использовался динамометр 2, который располагался между винтовым домкратом и оправкой. При повороте стола заготовки изменялось направление действующей силы. При повороте стола заготовки изменялось направление действующей силы. Нагружение станка при эксперименте было выполнено по девяти направлениям (рисунок 2.2), одно из которых усилие, приложенное вдоль оси шпинделя, рассмотренное как операция сверления.

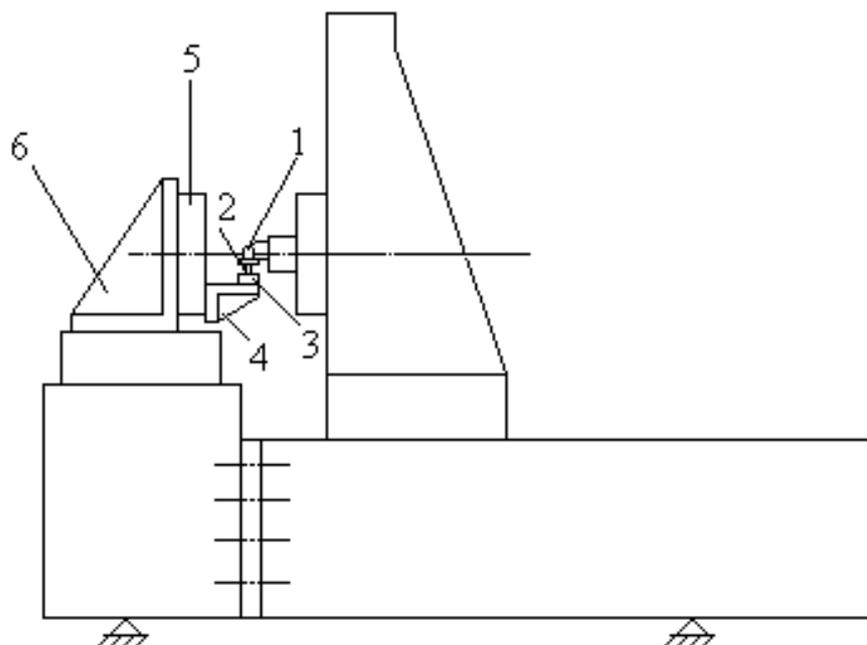


Рисунок 2.1 – Устройство приложения нагрузки КРС:

1 - оправка; 2 - динамометр; 3 - винтовой домкрат; 4 - кронштейн; 5 - стол; 6 - угольник.

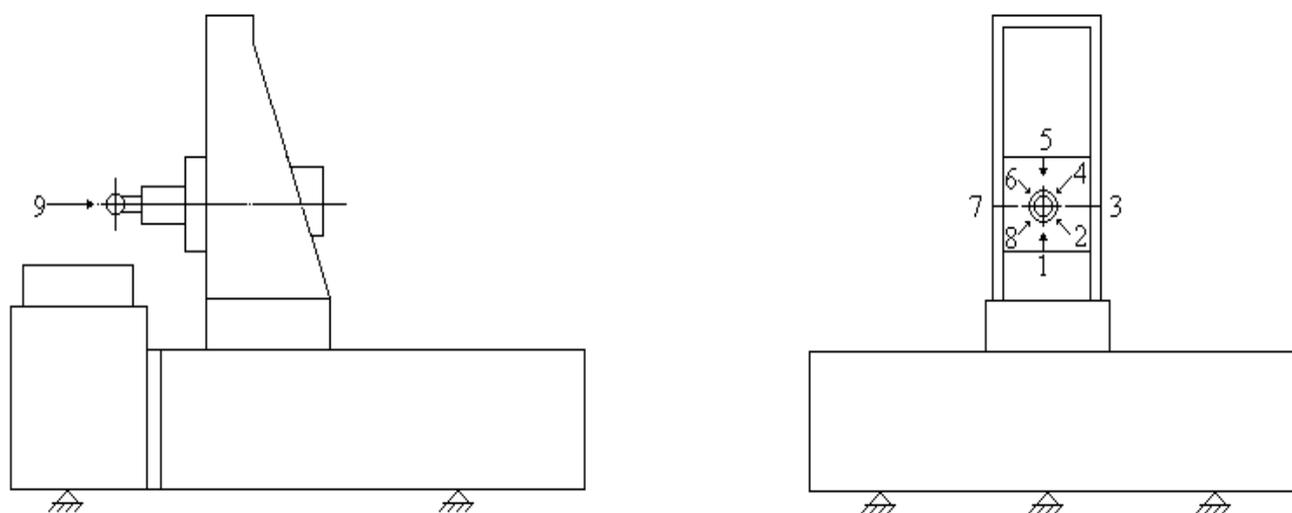


Рисунок 2.2 – Схема приложения нагрузки на упругую систему станка модели 2A459AMФ4

Изменение нагрузки происходило от 0 до 8000 Н с шагом показаний измерительных приборов 500 Н.

Цена деления измерительных приборов (микрокаторов), позволивших составить баланс точности станка составляла 0,2 мкм.

На основе экспериментальных исследований, выполненных в рамках этой работы и Горшкова Б.М. [31] был составлен баланс упругих перемещений горизонтального КРС модели 2А459 АМФ4 при силовом воздействии в 8000 Н (таблица 2.1), а более подробные опытные исследования составляющих упругой системы представлены в таблицах 2.2 2.6.

Таблица 2.1

Баланс упругих перемещений горизонтального
КРС модели 2А459 АМФ4

№ п/п	Детали станка	Изменение деталей станка в мкм			Доля в % в общем балансе		
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	Δx	Δy	Δz
1.	Стык “стол – станина стола”	0,64	0,44	0,59	9,2	2,7	8,6
2.	Стык “шпиндельная бабка – стойка”	0,47	0,45	0,67	6,7	2,8	9,6
3.	Стойка (изгиб)	0,28	0,04	0,36	4,1	0,3	5,1
4.	Стык “салазки – станина стойки”	0,4	0,5	0,5	5,7	3,1	7,1
5.	Станина стойки (изгиб)	1,76	19,0	1,49	25,1	55,0	21,2
6.	Станина стола (изгиб)	1,21	3,4	0,81	17,2	15,7	11,2
7.	Стык “станина стойки – станина стола”	0,04	0,6	0,58	0,5	4,4	8,5
8.	Стык “салазки – стойка станка”	1,06	1,24	1,09	15,1	6,2	15,6
9.	Стык “салазки – роли- ковые направляющие станины”	1,15	2,02	0,92	16,4	9,8	13,1

2.2 Исследование упругих перемещений в стыке подсистемы “стол – станина стола”

Приложение силы горизонтальное при температуре станка $+20,1^\circ \text{C}$ положении стойки на станине среднее.

$k = 1000 \text{ мм}$; $l = 800 \text{ мм}$; $m = 700 \text{ мм}$ (рисунок 2.3).

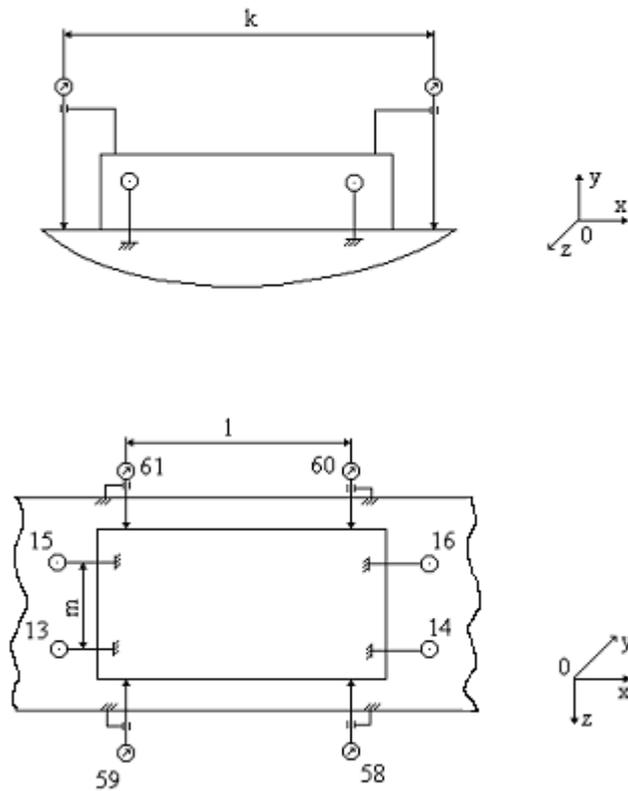


Рисунок 2.3 – Расположение индикаторов

Перемещение OX в XOY :

$$\Sigma y_{164} = \frac{y_{16} + y_{14}}{2}; \quad \Sigma y_{153} = \frac{y_{15} + y_{13}}{2}.$$

Изгиб OX в XOY :

$$\text{tg } \theta_{165} = \frac{y_{16} - y_{15}}{k}; \quad \text{tg } \theta_{143} = \frac{y_{14} - y_{13}}{k}.$$

Угловые перемещения OX в XOY :

$$\operatorname{tg} \theta_{163} = \frac{\Sigma y_{164} - \Sigma y_{153}}{k}.$$

Перемещение OZ для YOZ :

$$\Sigma y_{143} = \frac{y_{14} + y_{13}}{2}; \quad \Sigma y_{165} = \frac{y_{16} + y_{15}}{2}.$$

Изгиб OZ в YOZ :

$$\operatorname{tg} \theta_{164} = \frac{y_{16} - y_{14}}{m}; \quad \operatorname{tg} \theta_{153} = \frac{y_{15} - y_{13}}{m}.$$

Угловые перемещения OZ в YOZ :

$$\operatorname{tg} \theta_{145} = \frac{\Sigma y_{143} - \Sigma y_{165}}{m}.$$

Перемещение OX в XOZ :

$$\Sigma z_{570} = \frac{z_{58} + z_{60}}{2}; \quad \Sigma z_{591} = \frac{z_{59} + z_{61}}{2}.$$

Изгиб OX в XOZ :

$$\operatorname{tg} \theta_{589} = \frac{z_{58} - z_{59}}{l}; \quad \operatorname{tg} \theta_{601} = \frac{z_{60} - z_{61}}{l}.$$

Угловые перемещения OX в XOZ :

$$\operatorname{tg} \theta_{581} = \frac{\Sigma z_{570} - \Sigma z_{591}}{m}.$$

Результаты эксперимента при контактных взаимодействиях в стыке “стол – салазки” приведены в таблице А 2.1 (см. ПРИЛОЖЕНИЕ А).

2.3 Исследование упругих перемещений в стыке подсистемы “шпиндельная бабка – стойка”

Приложение силы вертикальное при температуре станка $+20,1^\circ \text{C}$ положении стойки на станине среднее.

$a = 400 \text{ мм}$; $b = 400 \text{ мм}$; $c = 800 \text{ мм}$; $k = 800 \text{ мм}$ (рисунок 2.4).

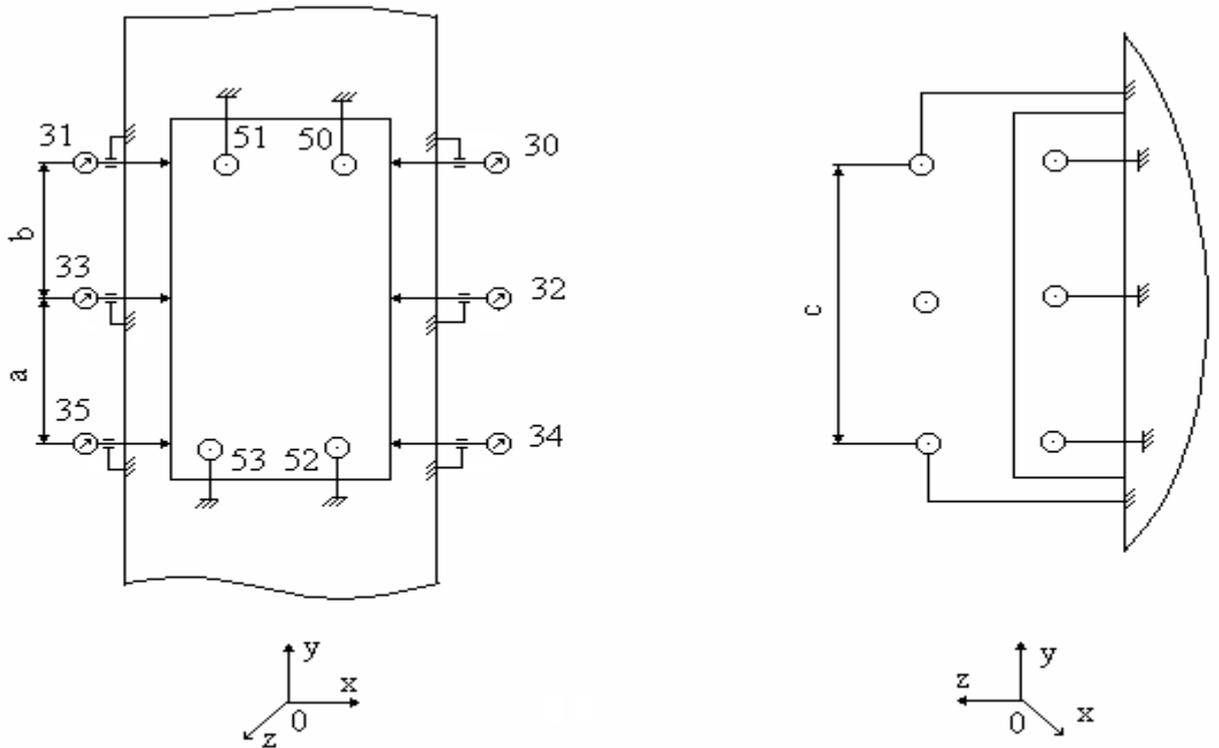


Рисунок 2.4 – Расположение индикаторов

Перемещение OY в XOY :

$$\Sigma x_{354} = \frac{x_{35} + x_{34}}{2}; \Sigma x_{332} = \frac{x_{33} + x_{32}}{2}; \Sigma x_{310} = \frac{x_{31} + x_{30}}{2}.$$

Изгиб OY в XOY :

$$tg \theta_{342} = \frac{x_{34} - x_{32}}{a}; tg \theta_{353} = -\frac{x_{35} - x_{33}}{a};$$

$$tg \theta_{320} = \frac{x_{32} - x_{30}}{b}; tg \theta_{331} = -\frac{x_{33} - x_{31}}{b};$$

$$tg \theta_{340} = \frac{x_{34} - x_{30}}{a + b}; tg \theta_{351} = -\frac{x_{35} - x_{31}}{a + b}.$$

Изгиб OY в XOY :

$$tg \theta_{352} = \frac{\Sigma x_{354} - \Sigma x_{332}}{a}; tg \theta_{330} = \frac{\Sigma x_{332} - \Sigma x_{310}}{b}.$$

Угловые перемещения OY в XOY :

$$tg \theta_{350} = \frac{\Sigma x_{354} - \Sigma x_{310}}{a + b}.$$

Перемещение OY в XOZ :

$$\Sigma z_{501} = \frac{z_{50} + z_{51}}{2}; \Sigma z_{523} = \frac{z_{52} + z_{53}}{2}.$$

Изгиб OY в YOZ :

$$tg \theta_{520} = \frac{z_{52} - z_{50}}{c}; tg \theta_{531} = \frac{z_{53} - z_{51}}{c}.$$

Угловые перемещения OY в YOZ :

$$tg \theta_{503} = \frac{\Sigma z_{501} - \Sigma z_{523}}{a}.$$

Перемещение OX в XOZ :

$$\Sigma z_{520} = \frac{z_{52} + z_{50}}{2}; \Sigma z_{531} = \frac{z_{53} + z_{51}}{2}.$$

Изгиб OX в XOZ :

$$tg \theta_{523} = \frac{z_{52} + z_{50}}{k}; tg \theta_{501} = \frac{z_{50} + z_{51}}{k}.$$

Угловые перемещения OX в XOZ :

$$tg \theta_{521} = \frac{\Sigma z_{520} - \Sigma z_{531}}{k}.$$

Результаты эксперимента при контактных взаимодействиях в стыке “шпиндельная бабка – стойка” приведены в таблице А 2.2 (см. ПРИЛОЖЕНИЕ А).

2.4 Исследование упругих деформаций стойки

Приложение силы горизонтальное при температуре станка $+20,1^\circ \text{C}$ положении стойки на станине среднее.

$a = 300 \text{ мм}; b = 300 \text{ мм}; c = 300 \text{ мм}; d = 300 \text{ мм}$ (рисунок 2.5).

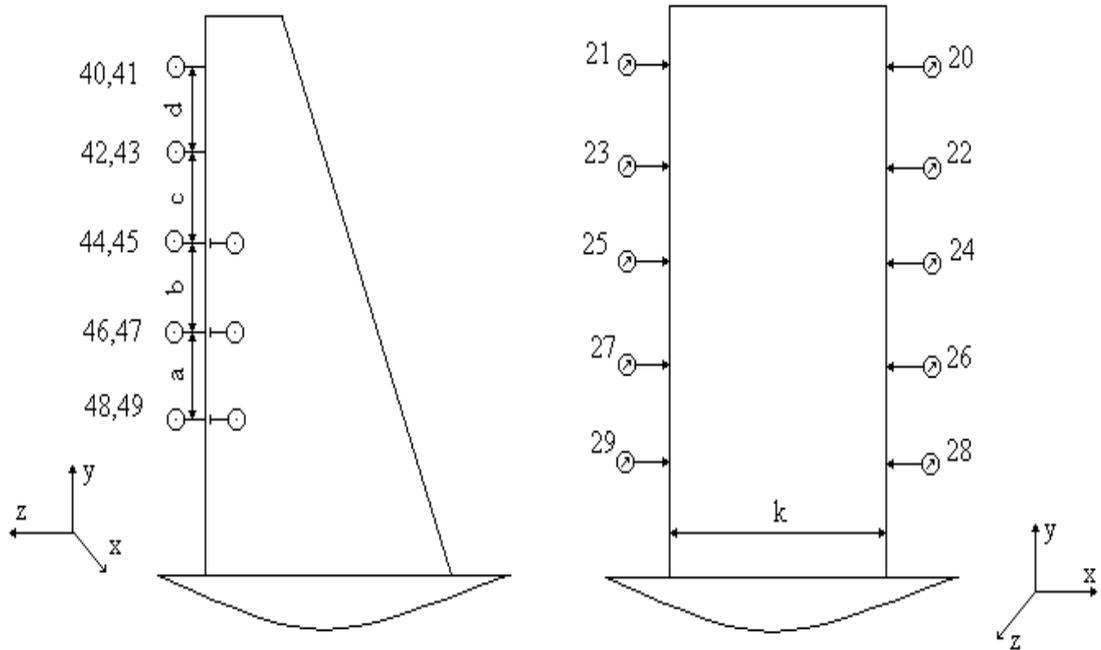


Рисунок 2.5 – Расположение индикаторов

Угловые перемещения правой стороны стойки в YOZ:

$$\operatorname{tg} \theta_{486} = -\frac{z_{48} - z_{46}}{a}; \operatorname{tg} \theta_{464} = -\frac{z_{46} - z_{44}}{b};$$

$$\operatorname{tg} \theta_{442} = -\frac{z_{44} - z_{42}}{c}; \operatorname{tg} \theta_{420} = -\frac{z_{42} - z_{40}}{d}.$$

Угловые перемещения левой стороны стойки в YOZ:

$$\operatorname{tg} \theta_{497} = -\frac{z_{49} - z_{47}}{a}; \operatorname{tg} \theta_{475} = -\frac{z_{47} - z_{45}}{b};$$

$$\operatorname{tg} \theta_{453} = -\frac{z_{45} - z_{43}}{a}; \operatorname{tg} \theta_{431} = -\frac{z_{43} - z_{41}}{d}.$$

Угловые перемещения правой стороны стойки в XOY:

$$\operatorname{tg} \theta_{286} = -\frac{x_{28} - x_{26}}{a}; \operatorname{tg} \theta_{264} = -\frac{x_{26} - x_{24}}{b};$$

$$\operatorname{tg} \theta_{242} = -\frac{x_{24} - x_{22}}{c}; \operatorname{tg} \theta_{220} = -\frac{x_{22} - x_{20}}{d}.$$

Угловые перемещения левой стороны стойки в XOY:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\theta_{297} &= -\frac{x_{29} - x_{27}}{a}; \operatorname{tg}\theta_{275} = -\frac{x_{27} - x_{25}}{b}; \\ \operatorname{tg}\theta_{253} &= -\frac{x_{25} - x_{23}}{c}; \operatorname{tg}\theta_{231} = -\frac{x_{23} - x_{21}}{d}. \end{aligned}$$

Поворот OX в XOZ :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\theta_{498} &= -\frac{z_{49} - z_{48}}{k}; \operatorname{tg}\theta_{476} = -\frac{z_{47} - z_{46}}{k}; \operatorname{tg}\theta_{454} = -\frac{z_{45} - z_{44}}{k}; \operatorname{tg}\theta_{432} = -\frac{z_{43} - z_{42}}{k}; \\ \operatorname{tg}\theta_{410} &= -\frac{z_{41} - z_{40}}{k}. \end{aligned}$$

Перемещение OY в XOY :

$$\begin{aligned} \Sigma x_{298} &= \frac{x_{29} + x_{28}}{2}; \Sigma x_{276} = \frac{x_{27} + x_{26}}{2}; \Sigma x_{254} = \frac{x_{25} + x_{24}}{2}; \Sigma x_{232} = \frac{x_{23} + x_{22}}{2}; \\ \Sigma x_{210} &= \frac{x_{21} + x_{20}}{2}. \end{aligned}$$

Угловые перемещения OY в XOY :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\theta_0 &= \frac{\Sigma x_{298}}{0}; \operatorname{tg}\theta_a = \frac{\Sigma x_{298} - \Sigma x_{276}}{a}; \operatorname{tg}\theta_b = \frac{\Sigma x_{276} - \Sigma x_{254}}{b}; \operatorname{tg}\theta_c = \frac{\Sigma x_{254} - \Sigma x_{232}}{c}; \\ \operatorname{tg}\theta_d &= \frac{\Sigma x_{232} - \Sigma x_{210}}{d}. \end{aligned}$$

Результаты эксперимента при деформации стойки (изгиба) приведены в [30].

2.5 Исследование упругих перемещений в стыке подсистемы “салазки – станина стойки”

Приложение силы горизонтальное при температуре станка $+20,1^\circ \text{C}$ положении стойки на станине среднее.

$k = 900 \text{ мм}$; $l = 800 \text{ мм}$; $m = 1200 \text{ мм}$ (рисунок 2.6).

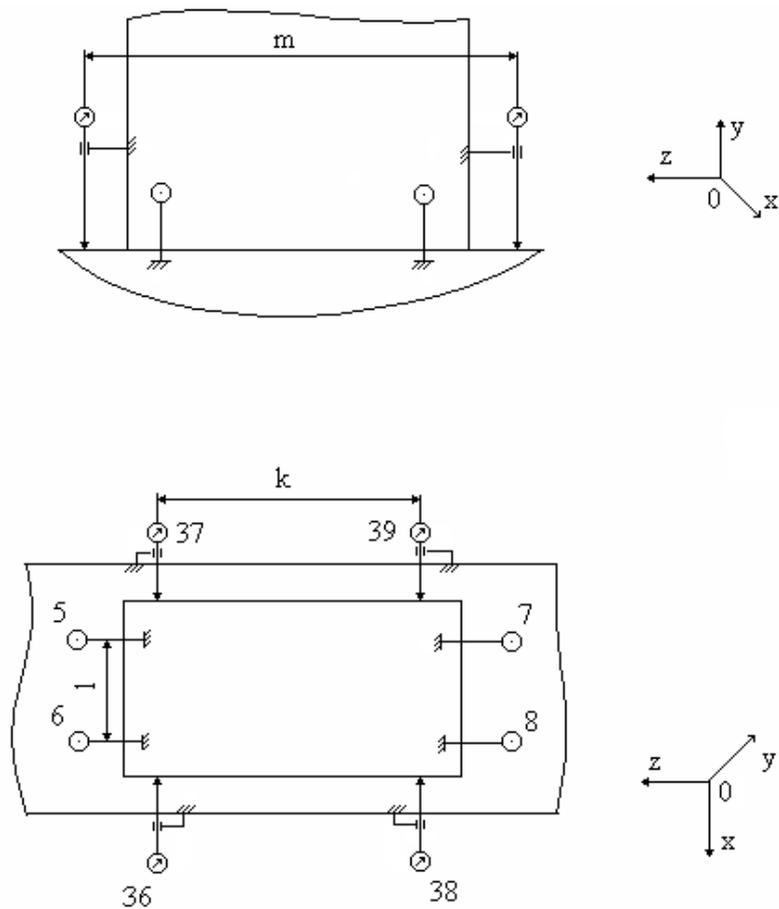


Рисунок 2.6 – Расположение индикаторов

Перемещение поверхностей в XOY :

$$\Sigma y_{056} = \frac{y_5 + y_6}{2}; \Sigma y_{078} = \frac{y_7 + y_8}{2}.$$

Угловые перемещения в XOY :

$$\operatorname{tg} \theta_{056} = \frac{y_5 - y_6}{l}; \operatorname{tg} \theta_{078} = \frac{y_7 - y_8}{l}.$$

Перемещение поверхностей в YOZ :

$$\Sigma y_{075} = \frac{y_7 + y_5}{2}; \Sigma y_{086} = \frac{y_8 + y_6}{2}.$$

Угловые перемещения в YOZ :

$$\operatorname{tg} \theta_{075} = \frac{y_7 - y_5}{m}; \operatorname{tg} \theta_{086} = \frac{y_8 - y_6}{m}.$$

Угловые перемещения OX в XOY :

$$\operatorname{tg} \theta_{085} = \frac{\Sigma y_{086} - \Sigma y_{075}}{l}.$$

Угловые перемещения в YOX :

$$\operatorname{tg} \theta_{076} = \frac{\Sigma y_{078} - \Sigma y_{056}}{m}.$$

Перемещение OZ в XOZ :

$$\Sigma x_{376} = \frac{x_{37} + x_{36}}{2}; \quad \Sigma x_{389} = \frac{x_{38} + x_{39}}{2}.$$

Перемещение поверхностей в XOZ :

$$\operatorname{tg} \theta_{386} = \frac{x_{38} - x_{36}}{k}; \quad \operatorname{tg} \theta_{397} = \frac{x_{39} - x_{37}}{k}.$$

Угловые перемещения OZ в XOZ :

$$\operatorname{tg} \theta_{379} = \frac{\Sigma x_{376} - \Sigma x_{389}}{k}.$$

Результаты эксперимента при контактных взаимодействиях в стыке подсистемы “салазки – станина стойки” приведены в таблице А 2.3 (см. ПРИЛОЖЕНИЕ А).

Выводы по второй главе

1. Для составления баланса точности горизонтального КРС модели 2А459АМФ4 были проведены экспериментальные исследования контактных и изгибных деформаций его несущей системы, выполненных на базе промышленной установки.
2. Нагружение упругой системы станка осуществлялось статически с помощью винтового домкрата сшагом 500Н в диапазоне от 0 до 8000Н.
3. Измерение перемещений осуществлялось микрокаторами с ценой деления 0,2 мкм в направлении осей координатной системы.
4. В результате проведенных исследований выявлено, что наибольшим

силовым деформациям подвержена станина по направляющим которой перемещается стойка. Деформации изгиба и кручения станины приблизительно составляют 55 % в балансе упругих перемещений горизонтального КРС модели 2А459АМФ4.

Глава 3. ТЕОРИТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КООРДИНАТНО-РАСТОЧНЫХ СТАНКОВ С ИХ ТОЧНОСТЬЮ

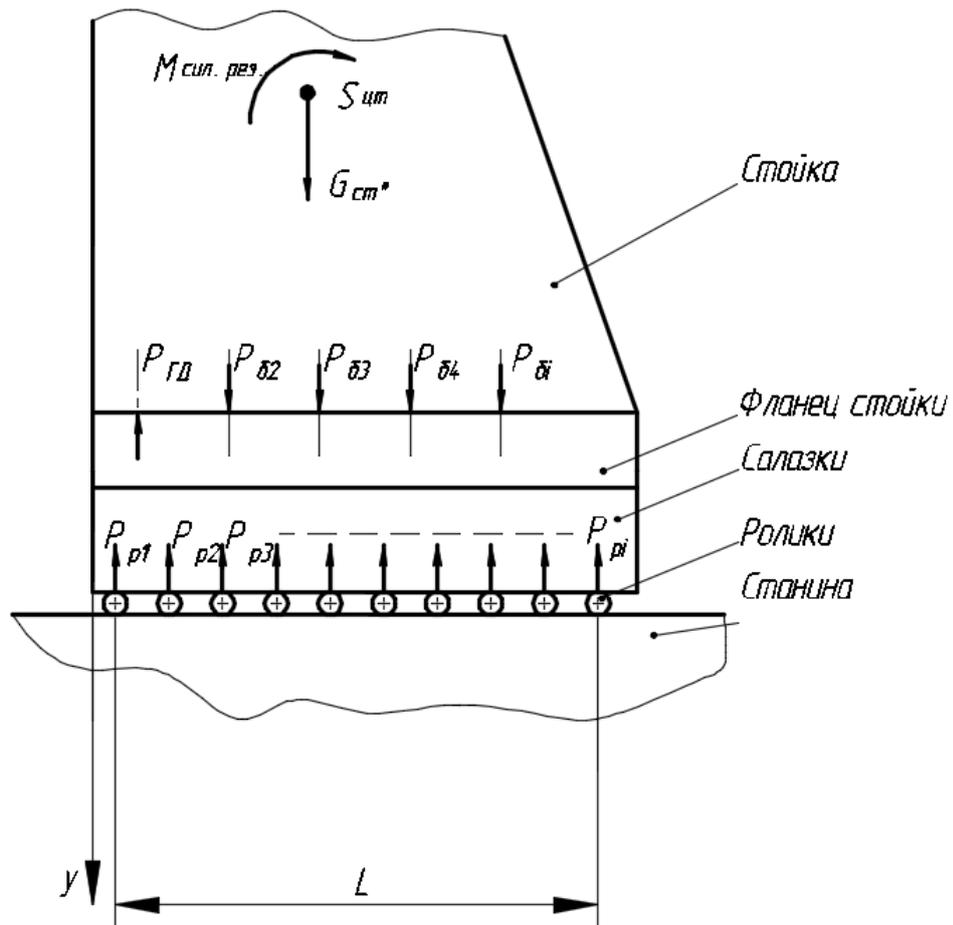
Металлорежущие станки, станины, которых установлены на три опоры, от силы веса подвижных узлов, испытывают наиболее существенные силовые общие (изгиб и кручение) и контактные деформации [29, 32, 76]. Вследствие этого они значительно влияют на геометрическую точность станков. В данной главе исследуется влияние деформаций технологической системы горизонтального КРС на его точность.

Цель настоящей главы – нахождение выражений, которые позволят оценивать точность горизонтального КРС вследствие силовых общих и контактных деформаций несущей системы.

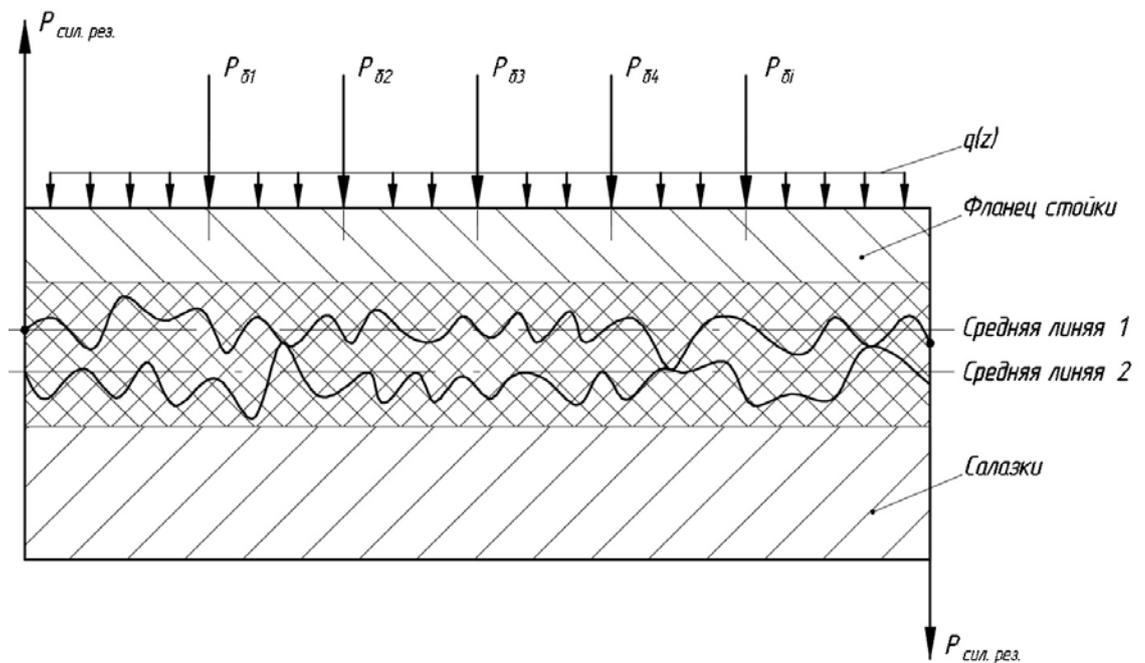
3.1 Математическая модель подсистемы «салазки – стойка станка»

Для моделирования затянутого стыка (рисунок 3.1) между стойкой станка и салазками представим его как балку лежащей на упругом основании, состоящим из двух слоёв. Слой на который установлена балка весьма тонок.

Стойка высокоточной машины устанавливается на салазки станка. При этом поверхность стойки, её фланцевая часть шлифуется и дополнительно подвергается обработке путём шабрения. Ответная часть салазок обрабатывается аналогично, образуя при сборке затянутый стык. Соединение стойки и салазок осуществляется с помощью болтов, развивающих усилие $P_{б1}, P_{б2}, P_{б3}, P_{б4}, \dots, P_{би}$. Сила веса стойки в сборе $G_{ст}^*$, приложена в её центре



а)



б)

Рисунок 3.1 – Модель нагружения: а) стойки станка; б) затянутого стыка под-системы «салазками - стойкой станка» (балка на упругом основании)

тяжести $S_{шт}$. Сила резания создаёт опрокидывающий момент, приложенный к стойке $M_{сил.рез}$. [56]. Таким образом, образовывается затянутый стык подсистемы «салазки - стойка».

При этом были учтены геометрические размеры стыка, отклонения его формы, волнистость и приняты допущения:

- а) закон Гука описывает распрямление волн в стыке [60];
- б) площадь стыковочного фланца стойки определяется как произведение;
- в) затяжка болтов, сила веса стойки в сборе и опрокидывающий момент от сил резания создают силовое воздействие на стык.

На рисунке 3.1а представлена стойка станка в сборе со шпиндельным узлом, установленная на салазки.

Из [42] жесткость затянутого стыка зависит от начальных давлений, создаваемых болтами. Каждый болт развивает осевое усилие $P_{\delta i}$. Так же стоит отметить, что по направляющим станины перемещается стойка, величины порождаемых ею изгибающего, крутящего моментов и сдвигающей силы, зависят от координат её положения [76].

Усреднённое давление, возникающее при действии сил $P_{\delta i}$, развиваемых болтами можно определить по формуле:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} P_{\delta i}}{B \cdot l} \quad (3.1)$$

Распределение сил Q_i по длине балки L определяется величиной колебаний давлений от среднего значения. За начало координат взято такое положение балки, которое она занимает под действием среднего давления σ_{cp} , отсюда следует, что полное давление определяется как

$$\sigma = \sigma_{cp} + \Delta\sigma \quad (3.2)$$

где $\Delta\sigma = C_0 y$ - приращение давления относительно σ_{cp} ; C_0 - коэффициент жесткости упругого основания, который напрямую зависит от вида обработки и

волнистости [42] $\left[\frac{\partial aH}{\text{см}^3} \right]$; y - величина определяющая расстояние от основания до балки.

Найдём упругое сближение в затянутом стыке подсистемы «салазками – стойка» y_2 из зависимостей [42]. Контактные перемещения в плоских стыках характеризуются зависимостью

$$y_2 = C \left[(\sigma_{cp} + \Delta\sigma)^m - \sigma_{cp}^m \right], [\text{мкм}]. \quad (3.3)$$

Здесь $\sigma_{cp}, \Delta\sigma$ в да Н/см^2 .

Продифференцировав выражение (3.6) по $\Delta\sigma$, получим

$$\frac{dy_2}{d(\Delta\sigma)} = Cm(\sigma_{cp} + \Delta\sigma)^{m-1}$$

Далее выразим $dy_2 = Cm(\sigma_{cp} + \Delta\sigma)^{m-1} d(\Delta\sigma)$

При этом, так как значение $\Delta\sigma$ весьма мало по сравнению с σ_{cp} , то выражение $\sigma_{cp} + \Delta\sigma$ можно принять равным σ_{cp} . Тогда

$$dy_2 = Cm\sigma_{cp}^{m-1} d(\Delta\sigma) \text{ или}$$

$$y_2 \approx Cm\sigma_{cp}^{m-1} \Delta\sigma \quad (3.4)$$

Так как $\Delta\sigma = C_0 y_2$, то выражение (3.7) примет вид

$$C_0 = \frac{\sigma_{cp}^{1-m}}{Cm} \quad (3.5)$$

где C - величина, которая зависит от механических характеристик контактируемой поверхности [56];

m - величина степени.

Если $\sigma_{cp} > |\Delta\sigma|$, тогда погонная сила действующая на основание будет равна

$$q_{oc} = -B\sigma = -B(\sigma_{cp} + C_0 y) \quad (3.6)$$

При действии момента изгиба ($M_{изг.} = Pl$) силу развиваемая болтом можно представить как

$$Q_i = P_{\delta i} - C_{\delta i}(y_i - y_{0i}) = P_{\delta i} - \Delta Q_i \quad (3.7)$$

где $C_{\delta i}$ – жесткость i -го болта;

y_{0i} – деформации болта в результате приложения $P_{\delta i}$;

y_i – деформации болта в результате приложения $M_{изг.}$.

ΔQ_i – изменение $P_{\delta i}$ при приложении $M_{изг.}$.

Из зависимостей [60] найдем поперечную силу действующую в различных сечениях

$$Q = \sum_{i=0}^{n-1} Q_i \eta(x - a_i)$$

где $\eta(x)$ – импульсная переменная [33];

a_i – величины положений $P_{\delta i}$.

Найдём погонную силу

$$q = q_{oc} + \frac{dQ}{dx} = -BC_0 y - B\sigma_{cp} + \sum_{i=0}^{n-1} Q_i \delta(x - a_i) \quad (3.8)$$

где $\delta(x)$ – функция Дирака.

Запишем уравнение оси на упругом основании [33]

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = q \quad (3.9)$$

где E – упругость балки;

I – момент инерции балки на упругом основании.

Из выражений (3.8) и (3.9) составим уравнение

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{BC_0 l}{EI} \cdot \left(\frac{y}{l} \right) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{Q_i}{EI l} \delta(t - \bar{a}_i) - \frac{B\sigma_{cp}}{EI} \quad (3.10)$$

где $t = \frac{x}{l}$; $\bar{y} = \frac{y}{l}$; $\bar{a}_i = \frac{a_i}{l}$

Из [33]

$$\eta(x - a_i) = \eta(t - \bar{a}_i)$$

$$\frac{d\eta}{dx} = \frac{1}{l}(t - \bar{a}_i)$$

Тогда уравнение (3.10) примет вид

$$\frac{d^4 \bar{y}}{dt^4} + \frac{BC_0 l^4}{EI} \cdot \bar{y} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{Q_i l^2}{EI} \delta(t - \bar{a}_i) - \frac{B\sigma_{cp} l^3}{EI} \quad (3.11)$$

Из зависимостей [56] безразмерное усилие и приведенное среднее давление равно

$$\frac{Q_i l^2}{EI} = \bar{Q}_i; \quad \frac{B\sigma_{cp} l^3}{EI} = \bar{\sigma}_{cp}$$

Если

$$\frac{BC_0 l^4}{EI} = 4\beta^4$$

То выражение (3.11) можно записать как

$$\frac{d^4 \bar{y}}{dt^4} + 4\beta^4 \cdot \bar{y} = \sum_{i=0}^{n-1} \bar{Q}_i \delta(t - \bar{a}_i) - \bar{\sigma}_{cp} \quad (3.12)$$

Тогда выражение (3.7)

$$\bar{Q}_i = \bar{P}_{\sigma i} + C_{\sigma i} (\bar{y}_{0i} - \bar{y}_i) \quad (3.13)$$

Жесткость отдельного болта равна [56]

$$K_i = \frac{C_{\sigma i} l^3}{EI}$$

С помощью функций [33] представим выражение (3.12) как

$$\begin{aligned} \bar{y}(t) = & \bar{y}(0)K_0(\beta t) + \frac{1}{\beta} \bar{y}'(0)K_1(\beta t) + \frac{1}{\beta^3} \bar{Q}_0 K_3(\beta t) + \sum_{i=1}^{n-1} \bar{Q}_i \frac{\eta(t - \bar{a}_i)}{\beta^3} K_3[\beta(t - \bar{a}_i)] - \\ & - \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{\beta^3} \int_0^t K_3[\beta(t - s)] ds \end{aligned} \quad (3.14)$$

где $\bar{y}(0)$ – безразмерный прогиб;

$\bar{y}'(0)$ – производная безразмерного прогиба.

Из работы [33]

$$K_0(\beta t) = ch\beta t \cos \beta t,$$

$$K_1(\beta t) = \frac{1}{2} (ch\beta t \sin \beta t + sh\beta t \cos \beta t),$$

$$K_3(\beta t) = \frac{1}{4} (ch\beta t \sin \beta c - sh\beta t \cos \beta t).$$

$$\int_0^t K_3[\beta(t-s)] dS = \left| \begin{array}{l} \beta(t-S) = \xi \quad dS = \frac{d\xi}{\beta} \\ \xi = \beta t \text{ при } S = 0 \quad \xi = 0 \text{ при } S = t \end{array} \right| = -\frac{1}{\beta} \int_{\beta t}^0 K_3(\xi) d\xi = \frac{1}{\beta} \int_0^{\beta t} K_3(\xi) d\xi =$$

$$= -\frac{1}{4\beta} K_0(\xi) \Big|_0^{\beta t} = -\frac{K_0(\beta t) - 1}{4\beta}$$

Проинтегрировав, получим

$$\bar{y}(t) = \bar{y}(0)K_0(\beta t) + \frac{1}{\beta} \bar{y}'(0)K_1(\beta t) + \frac{1}{\beta^3} \bar{Q}_0 K_3(\beta t) + \sum_{i=1}^{n-1} \bar{Q}_i \frac{\eta(t-\bar{a}_i)}{\beta^3} K_3[\beta(t-\bar{a}_i)] +$$

$$+ \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{4\beta^4} [K_0(\beta t) - 1] \quad (3.15)$$

Три раза продифференцируем уравнение (3.15)

$$\frac{d\bar{y}}{dt} = -4\beta\bar{y}(0)K_3(\beta t) + \bar{y}'(0)K_0(\beta t) + \frac{\bar{Q}_0}{\beta^2} K_2(\beta t) + \sum_{i=1}^{n-1} \bar{Q}_i \frac{\eta(t-\bar{a}_i)}{\beta^2} K_2[\beta(t-\bar{a}_i)] -$$

$$- \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{\beta^3} K_3(\beta t)$$

$$\frac{d^2\bar{y}}{dt^2} = -4\beta^2\bar{y}(0)K_2(\beta t) - 4\beta\bar{y}'(0)K_3(\beta t) + \frac{\bar{Q}_0}{\beta} K_1(\beta t) + \sum_{i=1}^{n-1} \bar{Q}_i \frac{\eta(t-\bar{a}_i)}{\beta} K_1[\beta(t-\bar{a}_i)] -$$

$$- \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{\beta^2} K_2(\beta t) \quad (3.16)$$

где $\frac{d^2\bar{y}}{dt^2} = \bar{M}$ – безразмерный $M_{изг.}$.

$$\frac{d^3\bar{y}}{dt^3} = -4\beta^3\bar{y}(0)K_1(\beta t) - 4\beta^2\bar{y}'(0)K_2(\beta t) + \bar{Q}_0 K_0(\beta t) + \sum_{i=1}^{n-1} \bar{Q}_i \eta(t-\bar{a}_i) K_0[\beta(t-\bar{a}_i)] -$$

$$- \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{\beta} K_1(\beta t) \quad (3.17)$$

где $\frac{d^3\bar{y}}{dt^3} = \bar{Q}$ – безразмерное усилие.

$y_0 = y_0(t)$ – прогиб при предварительной затяжке болтов. Подставим в выражения (3.18), (3.19), (3.20) $\bar{P}_{\bar{\sigma}i}$, $\bar{y}_0(0)$ вместо \bar{Q}_i . При условии $\bar{Q} = 0$, $\bar{M} = 0$, $t = 1$ найдём $\bar{y}'_0(0)$

$$\begin{cases} 4\beta^2 K_2(\beta)\bar{y}_0(0) + 4\beta K_3(\beta)\bar{y}'_0(0) = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\bar{P}_{\bar{\sigma}i}}{\beta} K_1[\beta(1-\bar{a}_i)] - \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{\beta^2} K_2(\beta), \\ 4\beta^3 K_1(\beta)\bar{y}_0(0) + 4\beta^2 K_2(\beta)\bar{y}'_0(0) = \sum_{i=1}^{n-1} \bar{P}_{\bar{\sigma}i} K_0[\beta(t-\bar{a}_i)] - \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{\beta} K_1(\beta t) \end{cases} \quad (3.19)$$

Далее из уравнения (3.15) найдём \bar{y}_{n0} (то есть \bar{y}_{0i})

$$\begin{aligned} \bar{y}_{n0} = & \bar{y}_0(0)K_0(\beta a_n) + \frac{\bar{y}'_0(0)}{\beta} K_1(\beta a_n) + \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\bar{P}_{\bar{\sigma}i}}{\beta^3} K_3[\beta(1-\bar{a}_i)] \right\} + \\ & + \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{4\beta^4} [K_0(\beta a_n) - 1] \end{aligned} \quad (3.20)$$

Выражение в фигурных скобках при условии $n = 1$ примем за ноль.

Найдём сближение на конце балки на упругом основании при изгибе

$$\bar{y}_0(1) = \bar{y}_0(0)K_0(\beta) + \frac{\bar{y}'_0(0)}{\beta} K_1(\beta) + \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\bar{P}_{\bar{\sigma}i}}{\beta^3} K_3[\beta(1-\bar{a}_i)] \right\} + \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{4\beta^4} [K_0(\beta) - 1] \quad (3.21)$$

При затягивании болтов возникает угол сечения затянутого стыка

$$tg\theta \approx \theta = \bar{y}(1) - \bar{y}(0) \quad (3.22)$$

При воздействии $\bar{M}_{изг.}$ необходимо так же учитывать \bar{Q}_i .

Заменим значение \bar{Q}_i из (3.13) в уравнение (3.15), получим

$$\begin{aligned} \bar{y}(t) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{K_i \bar{y}_i}{\beta^3} \eta(t-\bar{a}_i) K_3[\beta(t-\bar{a}_i)] = & \bar{y}(0)K_0(\beta t) + \frac{1}{\beta} \bar{y}'(0)K_1(\beta t) + \frac{\bar{P}}{\beta^3} K_3(\beta t) + \\ & + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\bar{P}_{\bar{\sigma}i} + K_i \bar{y}_{0i}}{\beta^3} \eta(t-\bar{a}_i) K_3[\beta(t-\bar{a}_i)] + \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{4\beta^4} [K_0(\beta t) - 1] \end{aligned} \quad (3.23)$$

Далее находим сближение $(\bar{y}_j)\bar{y}_n = \bar{y}(\bar{a}_n)$ от воздействия $M_{изг.}$

$$\bar{y}_n + \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \frac{K_i y_i}{\beta^3} K_3[\beta(\bar{a}_n - \bar{a}_i)] \right\} = \bar{y}(0)K_0(\beta \bar{a}_n) + \frac{\bar{y}'(0)}{\beta} K_1(\beta \bar{a}_n) + \frac{\bar{P}}{\beta^3} K_3(\beta \bar{a}_n) +$$

$$+ \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\bar{P}_{\dot{a}i} + K_i \bar{y}_{0i}}{\beta^3} K_3 [\beta(\bar{a}_n - \bar{a}_i)] \right\} + \frac{\bar{\sigma}_{\dot{n}\delta}}{4\beta^4} [K_0(\beta t) - 1] \quad (3.24)$$

где n - число болтов.

Из уравнений (3.16), (3.17) находим $\bar{y}(0)$ и $\bar{y}'(0)$, согласно условию $\bar{Q} = -\bar{P}, \bar{M} = 0$ при $t = 1$.

$$\left\{ \begin{array}{l} 4\beta^2 \bar{y}(0) K_2(\beta) + 4\beta \bar{y}'(0) K_3(\beta) = \frac{\bar{P}}{\beta} K_1(\beta) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\bar{P}_{\dot{a}i} + K_i(\bar{y}_{0i} - \bar{y}_i)}{\beta} K_1[\beta(1 - \bar{a}_i)] - \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{\beta^2} K_2(\beta), \\ 4\beta^3 \bar{y}(0) K_1(\beta) + 4\beta^2 \bar{y}'(0) K_2(\beta) = \bar{P}[K_0(\beta) + 1] + \sum_{i=1}^{n-1} [\bar{P}_{\dot{a}i} + K_i(\bar{y}_{0i} - \bar{y}_i)] K_0[\beta(1 - \bar{a}_i)] - \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{\beta} K_1(\beta) \end{array} \right. \quad (3.25)$$

Далее согласно уравнению (3.23) найдём $\bar{y}(1)$

$$\begin{aligned} \bar{y}(1) = & \bar{y}(0) K_0(\beta) + \frac{\bar{y}'(0)}{\beta} K_1(\beta) + \frac{\bar{P}}{\beta^3} K^3(\beta) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\bar{P}_{\dot{a}i} + K_i(\bar{y}_{0i} - \bar{y}_i)}{\beta^3} K_3[\beta(1 - \bar{a}_i)] + \\ & + \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{4\beta^4} [K_0(\beta - 1)] \end{aligned} \quad (3.26)$$

То относительный угол сечения затянутого стыка и коэффициент контактной податливости стыка

$$tg\theta_0 \approx \theta_0 = \bar{y}(1) - \bar{y}(0) \quad (3.27)$$

$$S_M = \frac{\theta_0}{M_{изг}} = \frac{\bar{y}(1) - \bar{y}(0)}{\bar{M}} \quad (2.28)$$

Таким образом уравнения (3.24), (3.26) дают возможность определить сближение затянутого стыка.

Выполнена оценка адекватности математической модели путем сравнения величин, полученных расчетным и экспериментальными методами. Установлено, что максимальное расхождение составляет около 12%.

3.2 Математическая модель изгибных деформаций станины и контактных взаимодействий стойки, салазок, роликовых направляющих станины

Известно [12, 24, 60, 98, 99, 138 и др.], что контактные взаимодействия и возникающие при этом деформации в стыках машин составляют значительную часть в их балансе точности.

Наличие затянутых и незатянутых (подвижных) стыков, обуславливаются конструктивными особенностями технологического оборудования. При оценке точности станков возникает необходимость учёта контактных взаимодействий в таких подсистемах.

На рисунке 3.2 представлено схематическое изображение расточки отверстия в корпусной заготовке. На рисунке 3.2 а обработка осуществляется на станке с не деформируемой технологической системой (идеальный вариант обработки), а на рисунке 3.2 б при расточке отверстия с реально деформированной технологической системой станка. В этом случае корпусная заготовка поворачивается на угол α_2 , а ось инструмента (борштанга) на угол α_1 .

В работе [30] получены аналитические выражения, описывающие влияние общих силовых деформаций станины на его геометрическую точность. При этом найдено полное вертикальное перемещение вершины инструмента, вследствие деформаций станины

$$y_{ув} = y_1 + L(1 + \cos \alpha) + L_0 \alpha \quad (3.29)$$

где: y_1 – вертикальное перемещение стойки от деформаций изгиба станины;

L_0 – длина борштанги;

L – высота стойки.

Однако стоит отметить, что выражением (3.29) не учитывается влияние упругих деформаций в стыках подсистемы «салазки - стойка» и подвижном стыке подсистемы «салазки – роликовые направляющие станины». Следует вертикальное перемещение стойки разбить на составляющие.

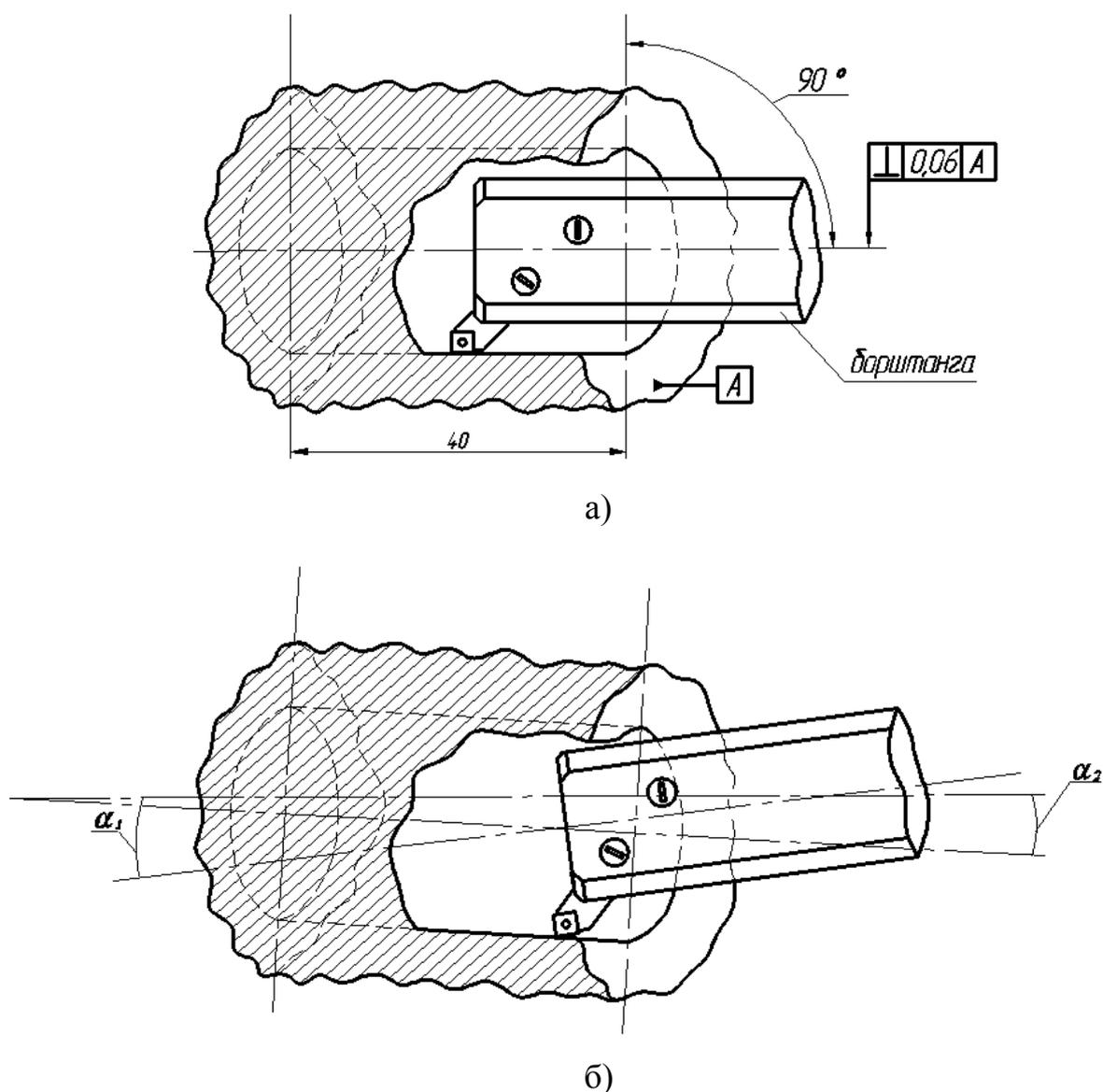


Рисунок 3.2 – Схематическое изображение расточки отверстия в корпусной заготовке, где: а) не деформируемая технологическая система; б) деформируемая технологическая система

Таким образом выражение 3.1 примет следующий вид

$$y_{ув} = y_1 \pm y_2 \pm y_3 + L(1 + \cos \alpha) + L_0 \alpha \quad (3.30)$$

где y_2 – упругое сближение в затянутом стыке подсистемы «салазками – стойка»;

y_3 – упругое сближение подсистемы «салазки – роликовые направляющие станины».

Известно, что горизонтальные перемещения вершины инструмента могут быть определены из работы [30]

$$y_{ин} = L\alpha \quad (3.31)$$

При изменении положения стойки станка станина испытывает силовые деформации кручения и изгиба, вследствие чего вершина режущего инструмента C смещается по вертикали и горизонтали на величины $\Delta y_{и.изг.}$ и $\Delta z_{и.изг.}$ (см. ПРИЛОЖЕНИЕ Б, выражения Б 3.2 и Б3.4) в точку C' (рисунок 3.3).

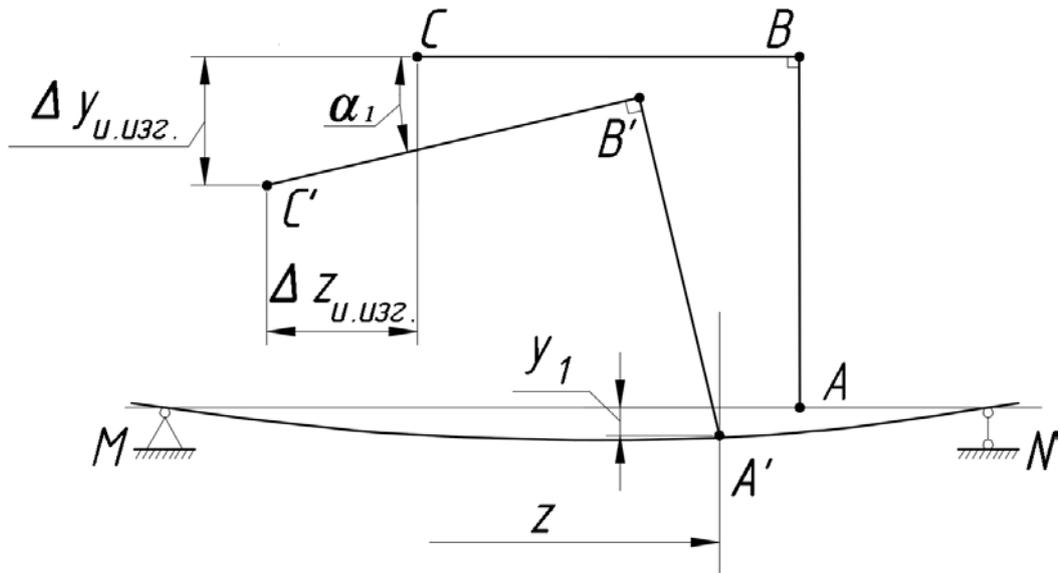


Рисунок 3.3 – Вертикальные перемещения инструмента

Учитывая не большую величину перемещений в стыках, а также их линейность используем принцип суперпозиции. Поэтому рассмотрим отдельно перемещения в стыках подсистем «салазки - стойка» и «салазки – роликовые направляющие станины».

На рисунке 3.4 показано вертикальное и горизонтальное перемещения вершины C с учётом упругих перемещений стыке подсистемы «салазки - стойка» $\Delta y_{и.изг.} \pm \Delta y_{в.к.с.}$ и $\Delta z_{и.изг.} \pm \Delta z_{г.к.с.}$.

На рисунке 3.5 показано вертикальное и горизонтальное перемещение вершины режущего инструмента с учётом деформации в стыках подсистем

«салазки - стойка» и «салазки – роликовые направляющие станины»

$$\Delta y_{u.u.z.g.} \pm \Delta y_{v.k.c.} \pm \Delta y_{v.k.p.n.} \text{ и } \Delta z_{u.u.z.g.} \pm \Delta z_{z.k.c.} \pm \Delta z_{z.k.p.n.} .$$

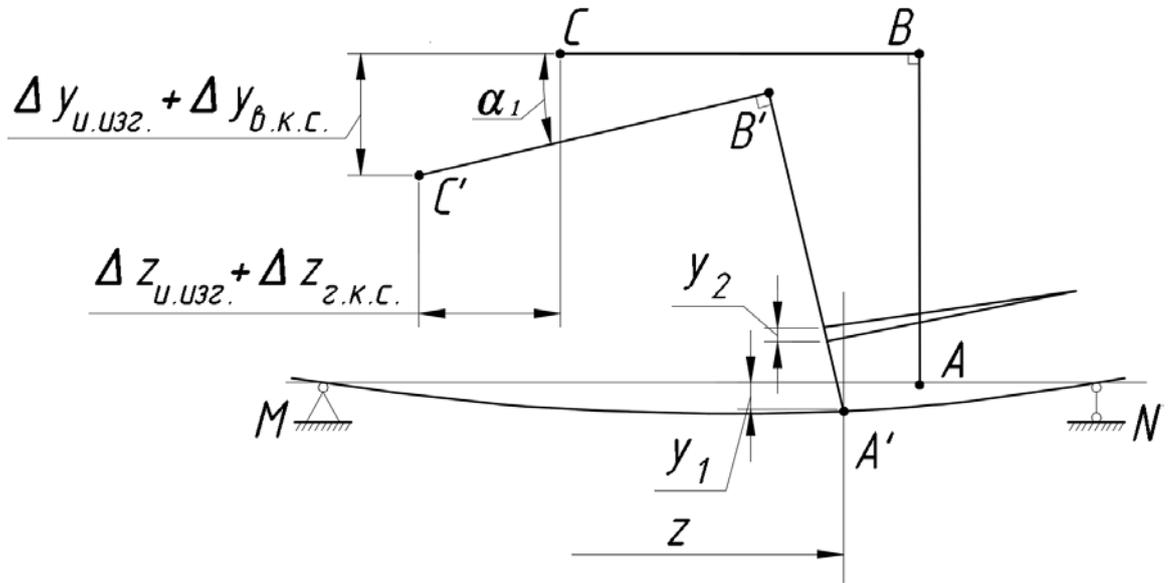


Рисунок 3.4 – Вертикальные перемещения инструмента упругих перемещений в стыке подсистемы «салазки - стойка»

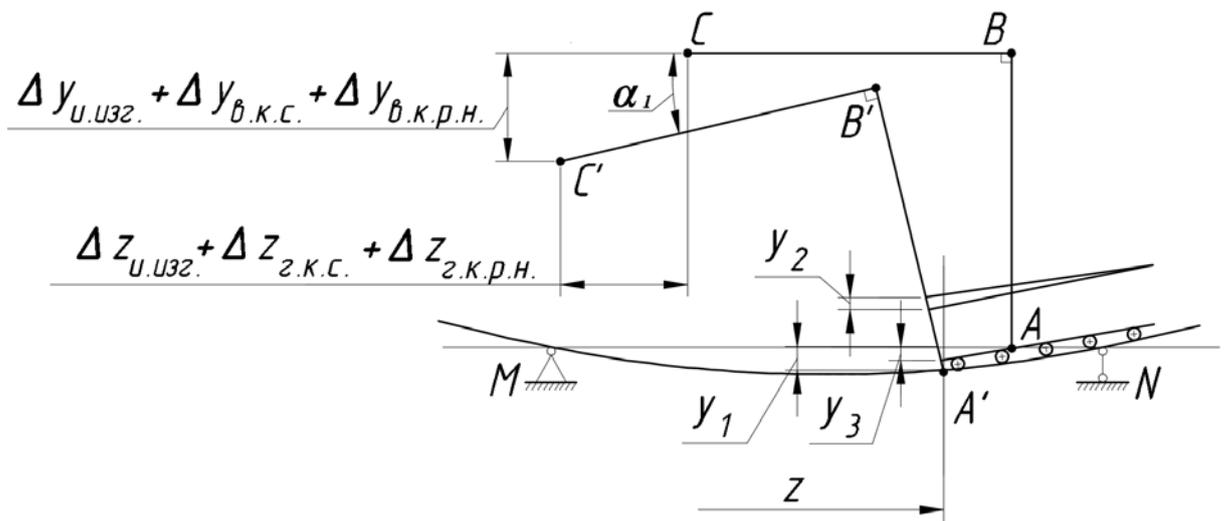


Рисунок 3.5 – Вертикальные перемещения вершины режущего инструмента с учётом деформации в стыках подсистем «салазки - стойка» и «салазки – роликовые направляющие станины»

Запишем суммарные вертикальные и горизонтальные перемещения вершины режущего инструмента

$$\Delta y_{p.k} = \Delta y_{u.изг.} \pm \Delta y_{в.к.с.} \pm \Delta y_{в.к.р.н.} \quad (3.32)$$

$$\Delta z_{p.k} = \Delta z_{u.изг.} \pm \Delta z_{г.к.с.} \pm \Delta z_{г.к.р.н.} \quad (3.33)$$

Для определения упругого сближения подсистемы «салазки – роликовые направляющие станины» y_3 (рисунок 3.6) воспользуемся зависимостью З.М. Левиной, Д.Н. Решетова [60]

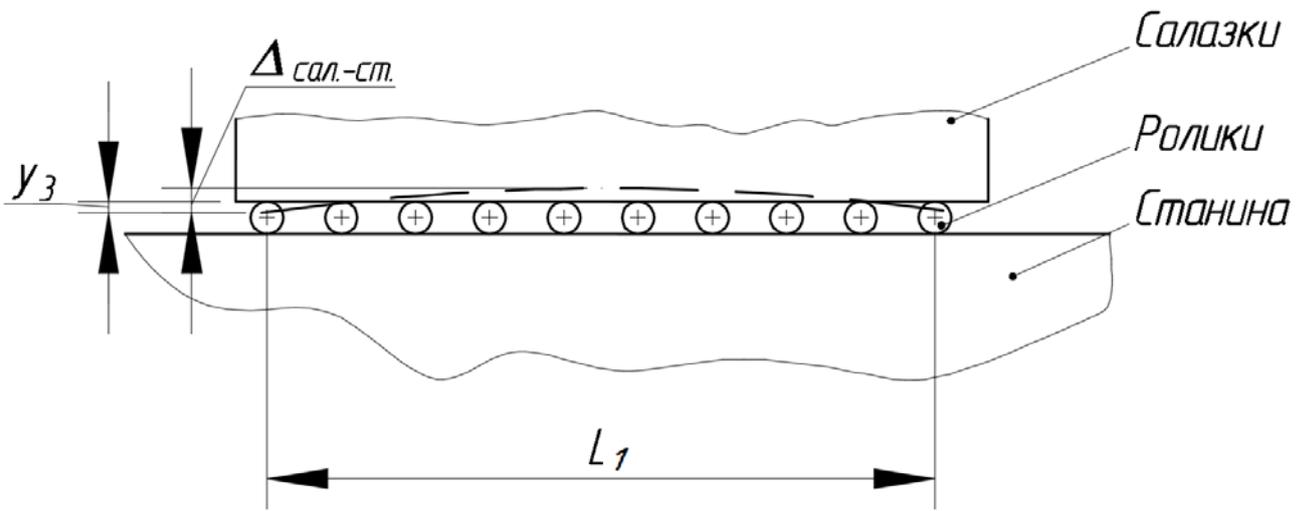


Рисунок 3.6 – Модель подвижного стыка подсистемы «салазки – роликовые направляющие станины»

$$P_p = \frac{y_3 L_1 z}{3c \Delta_{сал.-ст.}} \quad (3.34)$$

P_p – суммарная реакция направляющих;

$\Delta_{сал.-ст.}$ – накопившееся на длине роликов отклонение от параллельности;

z – число роликов;

c – коэффициент, определяемый из известных зависимостей [47] для точечного контакта.

Из выражения (3.34) найдём общее упругое сближение подсистемы «салазки – роликовые направляющие станины»

$$y_3 = \frac{3P_p c \Delta_{\text{cal.-cm}}}{L_1 z} \quad (3.35)$$

На рисунке 3.7 показаны вертикальная и горизонтальная погрешности перемещений осей инструмента и отверстия.

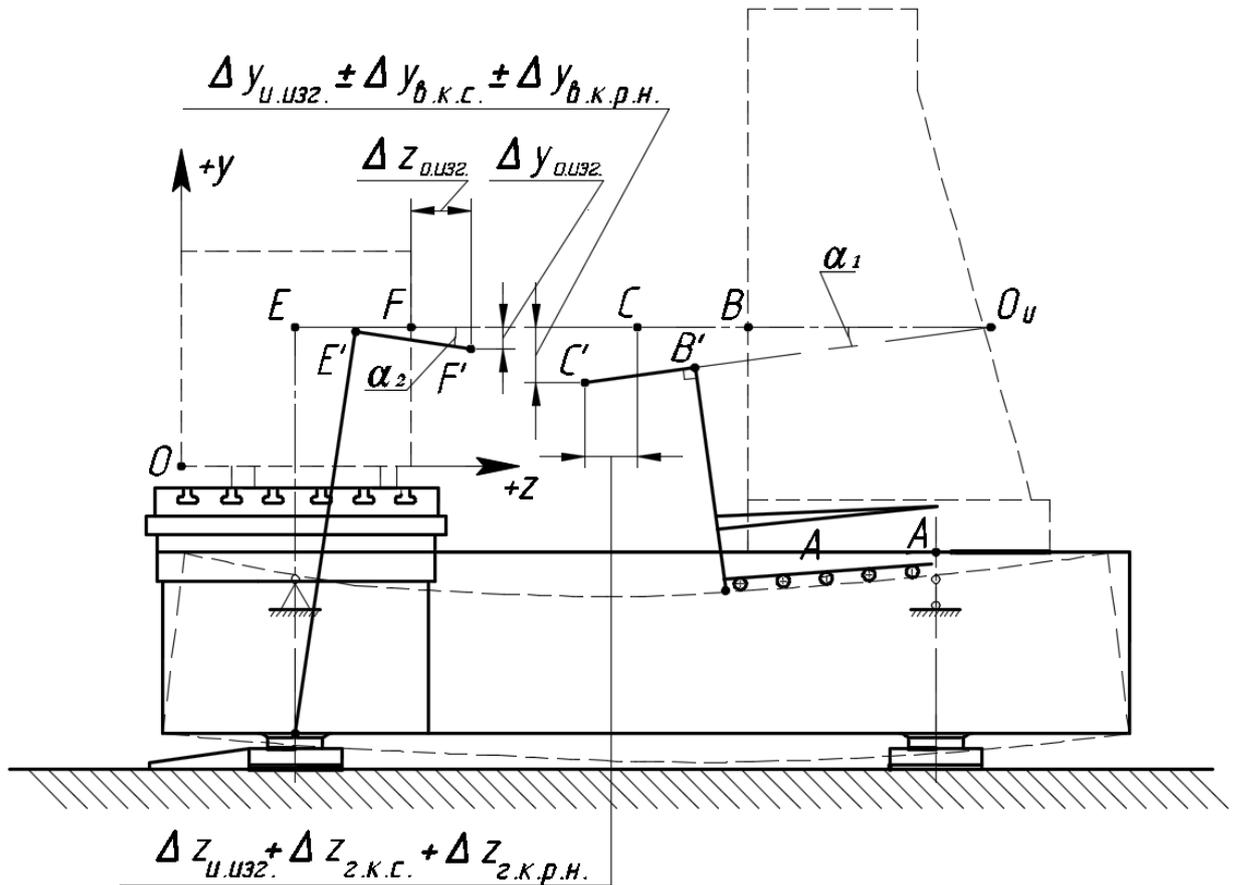


Рисунок 3.7 – Вертикальная и горизонтальная погрешности перемещений осей инструмента и отверстия

При учёте перемещений оси корпусной заготовки (см. ПРИЛОЖЕНИЕ Б, выражения Б 3.1 и Б 3.3) выражения (3.32) и (3.33) примут вид

$$\Delta y_{p.k} = \Delta y_{u.uzg.} \pm \Delta y_{b.k.c.} \pm \Delta y_{b.k.p.n.} - \Delta y_{o.uzg.} \quad (3.36)$$

$$\Delta z_{p.k} = \Delta z_{u.uzg.} \pm \Delta z_{2.k.c.} \pm \Delta z_{2.k.p.n.} - \Delta z_{o.uzg.} \quad (3.37)$$

Результаты аналитических расчётов на основе разработанной модели позволяют оценить геометрические погрешности горизонтального КРС при расточке отверстий. Сравнение результатов расчёта с экспериментальными иссле-

дованиями выявило максимальное расхождение не более 15%, что подтверждает адекватность принятой модели.

3.3 Динамическая модель стойки с системой гидродомкратов горизонтального координатно-расточного станка

Силовые деформации изгиба и кручения станин, горизонтальных КРС возникающие при перемещении стойки станка по станине приводят к смещениям центра обрабатываемого отверстия, например при обработке расточки. Предлагается установить два исполнительных устройства малых вертикальных перемещений в стык между салазками и стойкой станка. Примером таких исполнительных устройств выбраны гидродомкраты. При этом стойка станка с комплексом гидродомкратов, является объектом управления. Изменяя в них давление рабочей жидкости, происходит перемещение переднего края стойки [77, 78].

В работе динамическая модель стойки станка рассматривается как одно-массовая и установленная на три опоры, одна из которых жёсткий опорный элемент шарнирного типа, а две других гидравлические домкраты с коэффициентами жесткости C_1 , C_2 , C_3 и демпфирования β_1 , β_2 и β_3 соответственно (рисунок 3.8).

Воздействие силы резания $P(t)$ (рисунок 3.9) приложенной к стойке станка представляется как $P(t)$ с координатой z_p [91].

Для того, чтобы найти реакции в точках установки гидродомкратов

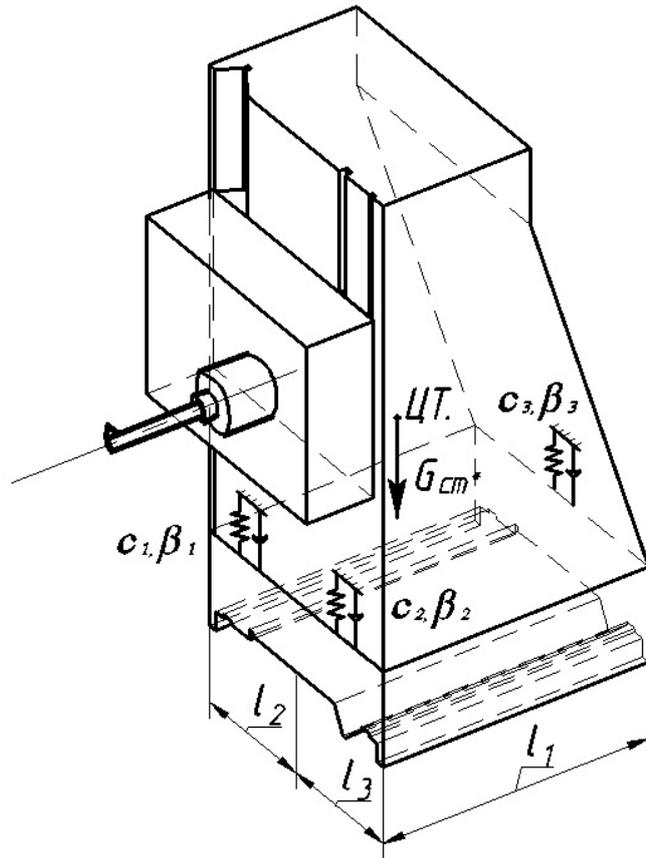


Рисунок 3.8 – Динамическая модель стойки станка

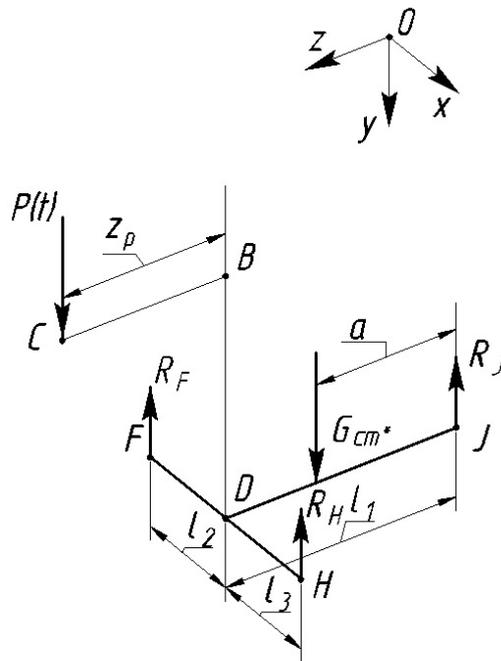


Рисунок 3.9 – Схема определения перемещений стойки в точках установки опор

между стойкой станка и салазками, представим стойку в виде абсолютно жесткой рамы $JFHDCB$ (рисунок 3.9), на которую действуют следующие силы:

- сила веса стойки станка G_{cm^*} ;
- сила резания $P(t)$;
- реакции опор R_J , R_F и R_H .

Так как в точке J перемещения при силовых деформаций станины отсутствуют, опорный элемент принят шарнирного типа. В точках F и H установлены гидродомкраты [77].

Найдём реакции опор R_J , R_F и R_H и определим величины перемещений в точках J , F и H .

$$Y_F = \frac{R_F}{C_1} = \left(1 + \frac{1}{2} G_{cm} - \frac{z_P}{l_1}\right) \frac{P(t)}{C_1} \frac{l_2}{(l_2 + l_3)}; \quad (3.38)$$

$$Y_H = \frac{R_H}{C_2} = \left(1 + \frac{1}{2} G_{cm} - \frac{z_P}{l_1}\right) \frac{P(t)}{C_2} \frac{l_2}{(l_2 + l_3)};$$

$$Y_J = \frac{R_J}{C_3} = \frac{G_{cm}}{2C_3} + \frac{P(t)z_P}{l_1 C_3}.$$

Величина реакций, а, следовательно, и перемещения в точках F , H и J связаны с координатой z_P , к которой приложена $P(t)$. Так как гидродомкраты устанавливаются в точках F и H , то проанализируем их перемещения.

Разобьём перемещения в точке F на составляющие

$$Y_F(t) = Y_f + Y_1(t) + Y_2(t) + Y_3(t) + Y_4(t), \quad (3.39)$$

где $Y_f, Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t)$ и $Y_4(t)$ - перемещения, вызванные: при взаимодействии поверхности и заготовки и инструмента; взаимодействием «основание салазок - опорная часть гидродомкрата»; взаимодействием «опорная часть гидродомкрата - мембрана гидродомкрата»; давлением жидкости в системе; взаимодействием «основание гидродомкрата - основание станины».

В точке H перемещения представим аналогично

$$Y_H(t) = Y_f(t) + Y_5(t) + Y_6(t) + Y_7(t) + Y_8(t),$$

где $Y_5(t), Y_6(t), Y_7(t)$ и $Y_8(t)$ - перемещения, вызванные: при взаимодействии поверхности и заготовки и инструмента; взаимодействием «основание салазок - опорная часть гидродомкрата»; взаимодействием «опорная часть гидродомкрата - мембрана гидродомкрата»; давлением жидкости в системе; взаимодействием «основание гидродомкрата - основание станины».

Составляющие перемещений характеризуются коэффициентами жесткости C_i , демпфирования β_i .

Представим динамическую модель стойки как массу m_{np} по отношению к воздействию P_f (рисунок 3.10).

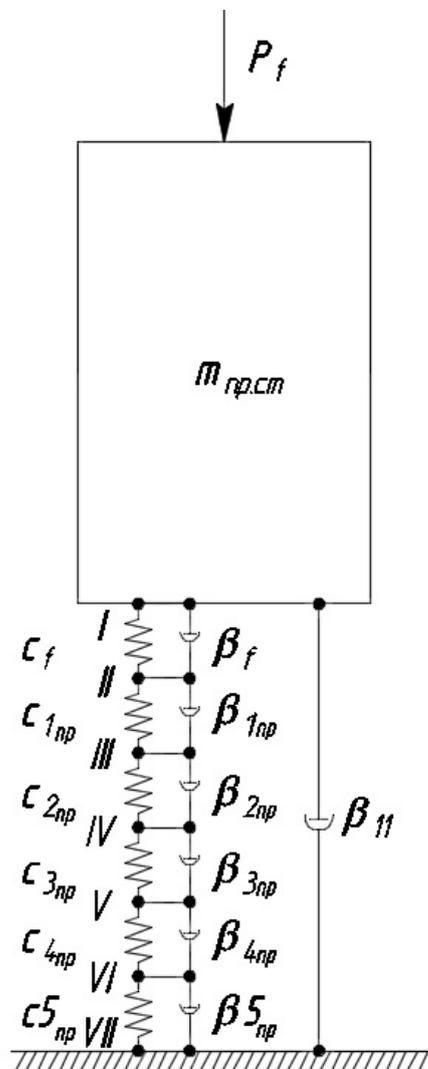


Рисунок 3.10 – Динамическая модель стойки станка с комплексом гидродомкратов

Перемещения точек примем как в линейной постановки

$$\begin{aligned}
 Y_I(t) &= Y_f(t) + Y_{1np}(t) + Y_{2np}(t) + Y_{3np}(t) + Y_{4np}(t) + Y_{5np}(t); \\
 Y_{II}(t) &= Y_{1np}(t) + Y_{2np}(t) + Y_{3np}(t) + Y_{4np}(t) + Y_{5np}(t); \\
 Y_{III}(t) &= Y_{2np}(t) + Y_{3np}(t) + Y_{4np}(t) + Y_{5np}(t); \\
 Y_{IV}(t) &= Y_{3np}(t) + Y_{4np}(t) + Y_{5np}(t); \\
 Y_V(t) &= Y_{4np}(t) + Y_{5np}(t); \\
 Y_{VI}(t) &= Y_{5np}(t).
 \end{aligned} \tag{3.40}$$

где:

$$\begin{aligned}
 Y_{1np}(t) &= Y_1(t) - Y_6(t); \\
 Y_{2np}(t) &= Y_2(t) - Y_7(t); \\
 Y_{3np}(t) &= Y_3(t) - Y_8(t); \\
 Y_{4np}(t) &= Y_4(t) - Y_9(t); \\
 Y_{5np}(t) &= Y_5(t) - Y_{10}(t). \\
 Y_I(t) - Y_{II}(t) &= Y_f(t); \\
 Y_{II}(t) - Y_{III}(t) &= Y_{1np}(t); \\
 Y_{III}(t) - Y_{IV}(t) &= Y_{2np}(t); \\
 Y_{IV}(t) - Y_V(t) &= Y_{3np}(t); \\
 Y_V(t) - Y_{VI}(t) &= Y_{4np}(t); \\
 Y_{VI}(t) &= Y_{5np}.
 \end{aligned}$$

Перемещение точки D стойки можно описать системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
P(t) &= m_{np} \frac{d^2 Y_I}{dt^2} + C_f (Y_I - Y_{II}) + \beta_f \left(\frac{dY_I}{dt} - \frac{dY_{II}}{dt} \right) + \beta_9 \frac{dY_I}{dt}; \\
C_f (Y_I - Y_{II}) + \beta_f \left(\frac{dY_I}{dt} - \frac{dY_{II}}{dt} \right) &= C_{1np} (Y_{II} - Y_{III}) + \beta_{1np} \left(\frac{dY_{II}}{dt} - \frac{dY_{III}}{dt} \right); \\
C_{1np} (Y_{II} - Y_{III}) + \beta_{1np} \left(\frac{dY_{II}}{dt} - \frac{dY_{III}}{dt} \right) &= C_{2np} (Y_{III} - Y_{IV}) + \beta_{2np} \left(\frac{dY_{III}}{dt} - \frac{dY_{IV}}{dt} \right); \\
C_{2np} (Y_{III} - Y_{IV}) + \beta_{2np} \left(\frac{dY_{III}}{dt} - \frac{dY_{IV}}{dt} \right) &= C_{3np} (Y_{IV} - Y_V) + \beta_{3np} \left(\frac{dY_{IV}}{dt} - \frac{dY_V}{dt} \right); \\
C_{3np} (Y_{IV} - Y_V) + \beta_{3np} \left(\frac{dY_{IV}}{dt} - \frac{dY_V}{dt} \right) &= C_{4np} (Y_V - Y_{VI}) + \beta_{4np} \left(\frac{dY_V}{dt} - \frac{dY_{VI}}{dt} \right); \\
C_{4np} (Y_V - Y_{VI}) + \beta_{4np} \left(\frac{dY_V}{dt} - \frac{dY_{VI}}{dt} \right) &= C_{5np} Y_{VI} + \beta_{5np} \frac{dY_{VI}}{dt}.
\end{aligned} \tag{3.41}$$

где $C_{1np}, C_{2np}, C_{3np}, C_{4np}, C_{5np}$ – коэффициенты жесткости: в стыках «основание салазок - опорная часть гидродомкрата», резьбовое соединение «основание гидродомкрата - корпус гидродомкрата», «опорная часть гидродомкрата - прокладка гидродомкрата», давление жидкости и в стыке «основание гидродомкрата - основание станины».

$\beta_{1np}, \beta_{2np}, \beta_{3np}, \beta_{4np}, \beta_{5np}$ – приведенные коэффициенты демпфирования: в стыках «основание салазок - опорная часть гидродомкрата», резьбовое соединение «основание гидродомкрата - корпус гидродомкрата», «опорная часть гидродомкрата - прокладка гидродомкрата», давление жидкости и в стыке «основание гидродомкрата - основание станины».

Для того, чтобы упростить составление уравнений представим точку C как приведенную F и H .

Запишем (3.41) в операторной форме

$$\left. \begin{aligned}
& P(p) - m_{np} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) p^2 - \\
& \beta_{11} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) p = \frac{1}{C_f} (T_f p + 1) Y_f(p); \\
& P(p) - m_{np} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s^2 - \\
& \beta_{11} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s = \frac{1}{C_{1np}} (T_1 p + 1) Y_{1np}(p); \\
& P(p) - m_{np} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s^2 - \\
& \beta_{11} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s = \frac{1}{C_{2np}} (T_2 p + 1) Y_{2np}(p); \\
& P(p) - m_{np} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) p^2 - \\
& \beta_{11} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) p = \frac{1}{C_{3np}} (T_3 p + 1) Y_{3np}(p); \\
& P(p) - m_{np} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) p^2 - \\
& \beta_{11} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) p = \frac{1}{C_{4np}} (T_4 p + 1) Y_{4np}(p); \\
& P(p) - m_{np} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) p^2 - \\
& \beta_{11} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) p = \frac{1}{C_{5np}} (T_4 p + 1) Y_{5np}(p)
\end{aligned} \right\} (3.42)$$

Далее построим структурную схему объекта управления.

Управляемая выходная величина принята за перемещение точки F .

$$Y_{\text{вых}}(t) = Y_f(t) + Y_{1np}(t) + Y_{2np}(t) + Y_{3np}(t) + Y_{4np}(t) + Y_{5np}(t).$$

Отсюда можно найти передаточную функцию

На основании рисунка 3.11 найдем передаточную функцию.

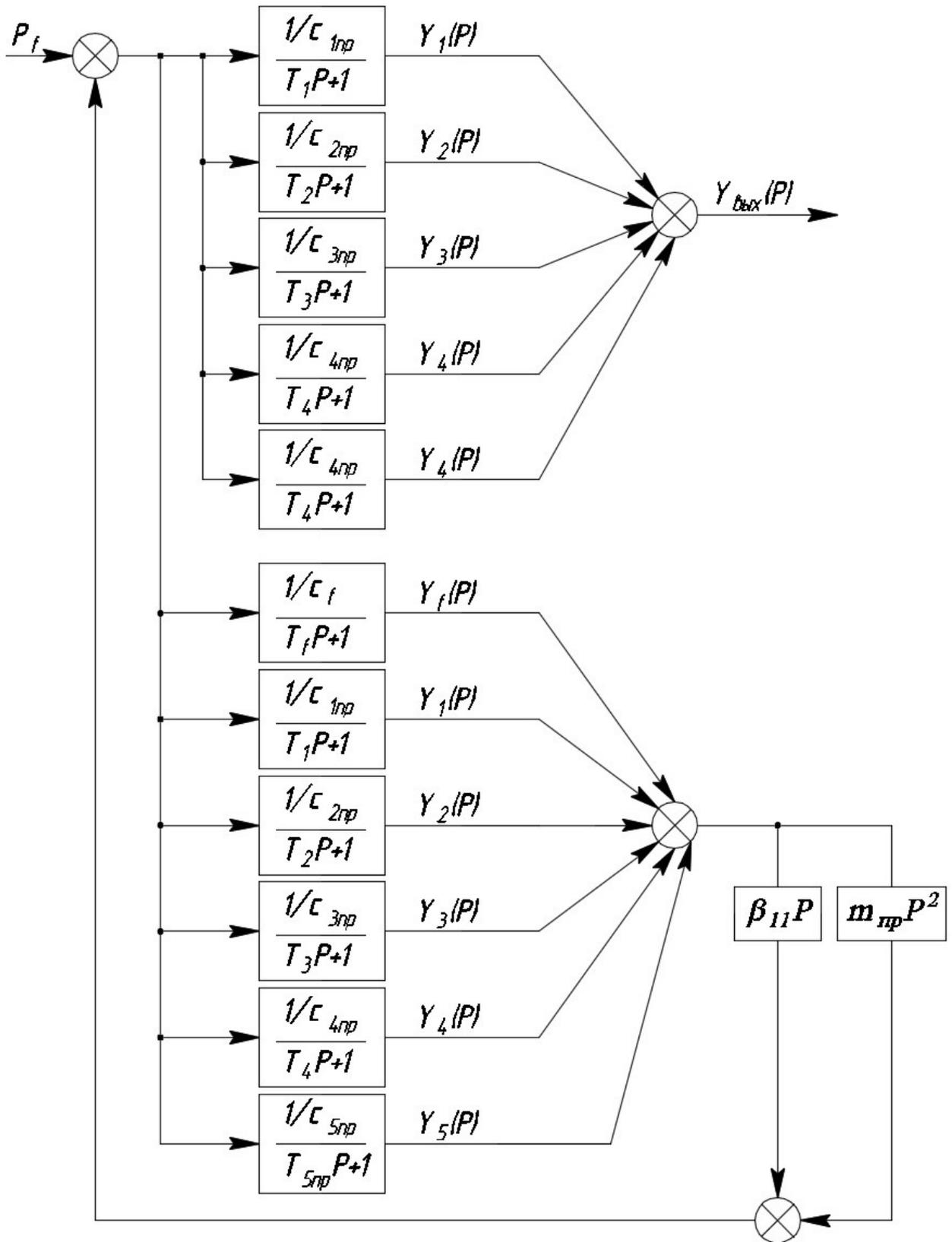


Рисунок 3.11 – Структурная схема объекта управления

$$W_{\text{возм}}(p) = \frac{Y_{\text{вых}}(p)}{P_f(p)} =, \quad (3.43)$$

$$= \frac{\frac{1/C_{1np}}{T_1 p + 1} + \frac{1/C_{2np}}{T_2 p + 1} + \frac{1/C_{3np}}{T_3 p + 1} + \frac{1/C_{4np}}{T_4 p + 1} + \frac{1/C_{5np}}{T_5 p + 1}}{1 + \left[\frac{1/C_f}{T_f p + 1} + \frac{1/C_{1np}}{T_1 p + 1} + \frac{1/C_{2np}}{T_2 p + 1} + \frac{1/C_{3np}}{T_3 p + 1} + \frac{1/C_{4np}}{T_4 p + 1} + \frac{1/C_{5np}}{T_5 p + 1} \right] (\beta_{11} p + m_{np} s^2)}$$

Для учета действия двух гидродомкратов введем коэффициенты $\beta_{11*} = \beta_{11} + \beta_{11np}$ [77].

В качестве управляющего воздействия принята сила прикладываемая гидродомкратом $F_{ГД}$ (рисунок 3.12).

Найдем дифференциальные уравнения движения точки С

$$\left\{ \begin{aligned} F_{ГД}(t) &= C_{11}(Y_{VII} - Y_I) + \beta_{11} \left(\frac{dY_{VII}}{dt} - \frac{dY_I}{dt} \right); \\ C_{11}(Y_{VII} - Y_I) + \beta_{11} \left(\frac{dY_{VII}}{dt} - \frac{dY_I}{dt} \right) &= m_{np} \frac{d^2 Y_I}{dt^2} + C_f(Y_I - Y_{II}) + \beta_f \left(\frac{dY_I}{dt} - \frac{dY_{II}}{dt} \right) + \beta_{11*} \frac{dY_I}{dt}; \\ C_f(Y_I - Y_{II}) + \beta_f \left(\frac{dY_I}{dt} - \frac{dY_{II}}{dt} \right) + \beta_{9*} \frac{dY_I}{dt} &= C_{1np}(Y_{II} - Y_{III}) + \beta_{1np} \left(\frac{dY_{II}}{dt} - \frac{dY_{III}}{dt} \right); \\ C_{1np}(Y_{II} - Y_{III}) + \beta_{1np} \left(\frac{dY_{II}}{dt} - \frac{dY_{III}}{dt} \right) &= C_{2np}(Y_{III} - Y_{IV}) + \beta_{2np} \left(\frac{dY_{III}}{dt} - \frac{dY_{IV}}{dt} \right); \\ C_{2np}(Y_{III} - Y_{IV}) + \beta_{2np} \left(\frac{dY_{III}}{dt} - \frac{dY_{IV}}{dt} \right) &= C_{3np}(Y_{IV} - Y_V) + \beta_{3np} \left(\frac{dY_{IV}}{dt} - \frac{dY_V}{dt} \right); \\ C_{3np}(Y_{IV} - Y_V) + \beta_{3np} \left(\frac{dY_{IV}}{dt} - \frac{dY_V}{dt} \right) &= C_{4np}(Y_V - Y_{VI}) + \beta_{4np} \left(\frac{dY_V}{dt} - \frac{dY_{VI}}{dt} \right); \\ C_{4np}(Y_V - Y_{VI}) + \beta_{4np} \left(\frac{dY_V}{dt} - \frac{dY_{VI}}{dt} \right) &= C_{5np} Y_{VI} + \beta_{5np} \frac{dY_{VI}}{dt}. \end{aligned} \right. \quad (3.44)$$

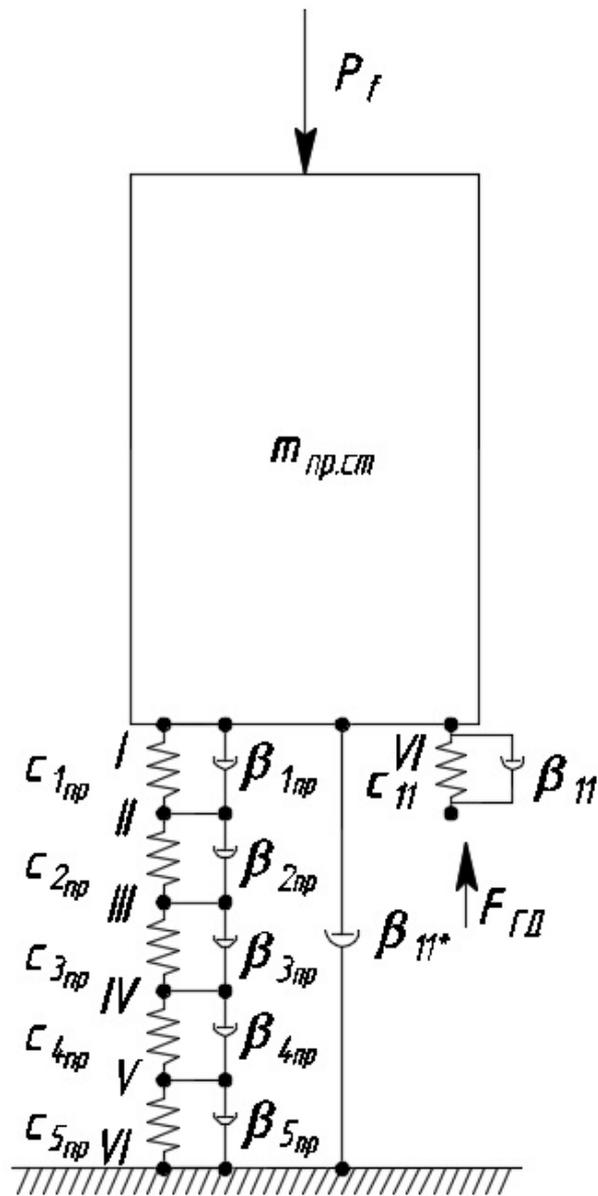


Рисунок 3.12 – Динамическая модель при приложении силы $F_{\text{ГД}}$, развиваемой гидродомкратом

Запишем операторное выражение (3.44)

$$\left. \begin{aligned}
 F_{ГД}(p) &= C_5(T_{ГД}p + 1)Y_{ГД}(p); \\
 F_{ГД}(p) - m_{np}[Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)]p^2 - \\
 - \beta_{11*}[Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)]p &= C_f(T_f p + 1)Y_f(p); \\
 F_{ГД}(p) - m_{np}[Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)]p^2 - \\
 - \beta_{11*}[Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)]p &= C_{1np}(T_1 p + 1)Y_1(p); \\
 F_{ГД}(p) - m_{np}[Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)]p^2 - \\
 - \beta_{11*}[Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)]p &= C_{2np}(T_2 p + 1)Y_2(p); \\
 F_{ГД}(p) - m_{np}[Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)]p^2 - \\
 - \beta_{11*}[Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)]p &= C_{3np}(T_3 p + 1)Y_3(p); \\
 F_{ГД}(p) - m_{np}[Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)]p^2 - \\
 - \beta_{11*}[Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)]p &= C_{4np}(T_4 p + 1)Y_4(p).
 \end{aligned} \right\} (3.45)$$

Из системы (3.45) составим структурную схему объекта управления стойки при приложении силы $F_{ГД}$ (рисунок 3.12).

На основе структурной схемы (рисунок 3.13) составим передаточную функцию

$$W_{YC}(p) = \frac{Y_V(p)}{F_{ГД}(p)} = \frac{\frac{1/C_f}{T_f p + 1} + \frac{1/C_{1np}}{T_1 p + 1} + \frac{1/C_{2np}}{T_2 p + 1} + \frac{1/C_{3np}}{T_3 p + 1} + \frac{1/C_{4np}}{T_4 p + 1} + \frac{1/C_{5np}}{T_5 p + 1}}{1 + \left[\frac{1/C_f}{T_f p + 1} + \frac{1/C_{1np}}{T_1 p + 1} + \frac{1/C_{2np}}{T_2 p + 1} + \frac{1/C_{3np}}{T_3 p + 1} + \frac{1/C_{4np}}{T_4 p + 1} + \frac{1/C_{5np}}{T_5 p + 1} \right] (\beta_{11} p + m_{np} p^2)} + \frac{1/C_{11}}{T_{ГД} p + 1} \quad (3.46)$$

где $Y_V(p)$ – перемещение V точки в операторной форме.

Выполнив необходимые преобразования выражение (3.46) можно представить в виде как

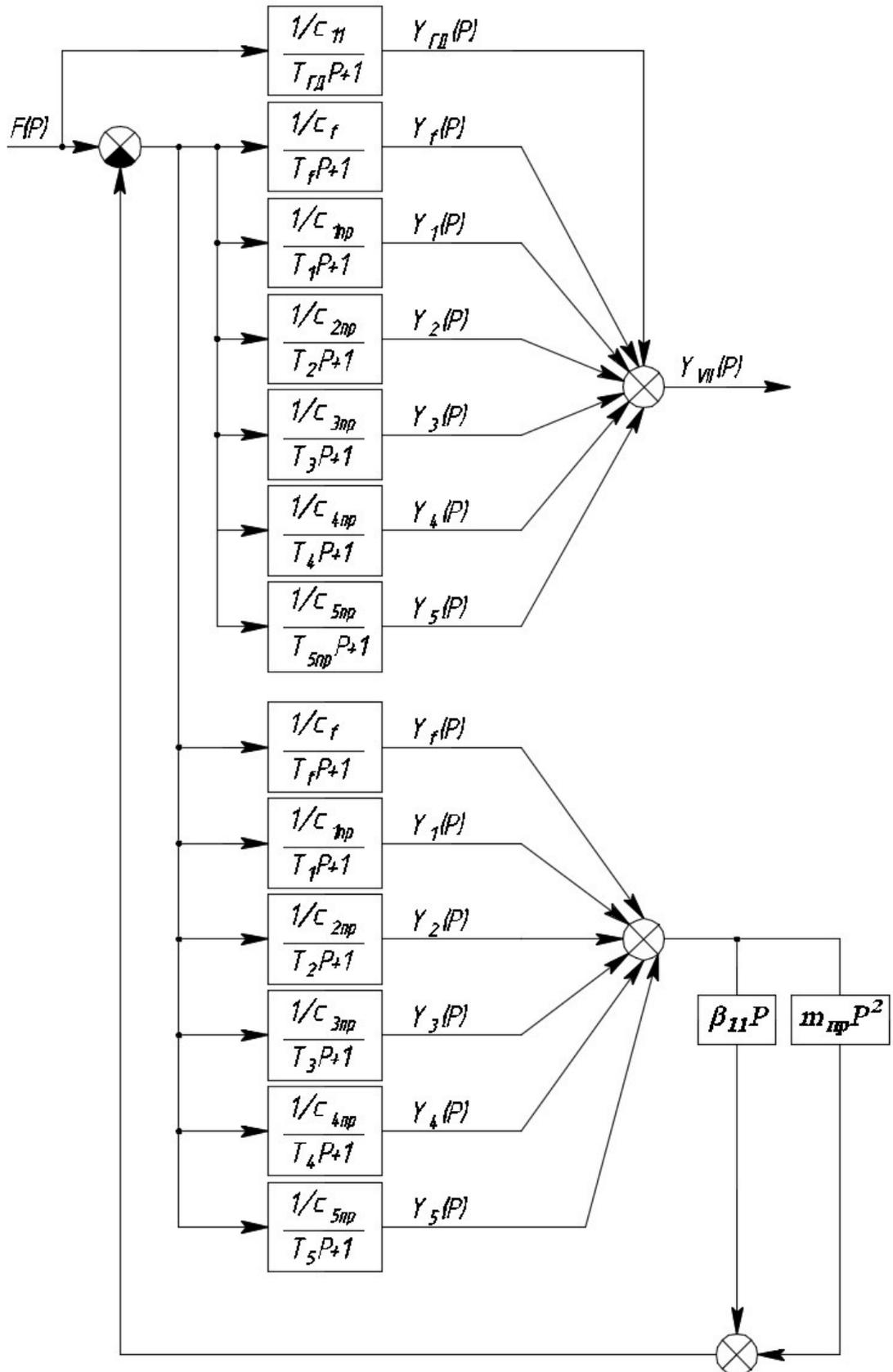


Рисунок 3.13 – Структурная схема объекта управления стойки с комплексом гидродомкратов при действии силы $F_{ГД}$

$$\begin{aligned}
 W_{yc}(p) &= \frac{Y_V(p)}{F_{ГД}(p)} = \\
 &= \frac{1}{C_{11}} [T_{5f}^5 p^5 + T_{4f}^4 p^4 + T_{3f}^3 p^3 + T_{2f}^2 p^2 + T_{1f} p + 1] \\
 &= \frac{(T_{ГД} p + 1)}{(T_{ГД} p + 1)} = \\
 &= \frac{\beta_f (T_{ГД} p + 1) [T_{5Y}^5 p^5 + T_{4Y}^4 p^4 + T_{3Y}^3 p^3 + T_{2Y}^2 p^2 + T_{1Y} p + 1]}{[T_{5f}^5 p^5 + T_{4f}^4 p^4 + T_{3f}^3 p^3 + T_{2f}^2 p^2 + T_{1f} p + 1]}. \quad (3.47)
 \end{aligned}$$

Здесь $\beta_f = 1/C_{1np} + 1/C_{2np} + 1/C_{3np} + 1/C_{4np}$ - коэффициент передачи.

На основе работы [78], запишем уравнения движения объекта по отношению к управляющему воздействию и давлению в гидродомкратах:

$$\begin{aligned}
 Y_{VI}(p) &= \frac{1}{S_{эф} p} \cdot \frac{P(p)e^{-\tau s} - P_{ГД}(p)}{R_{Г}}; \\
 F_{ГД}(p) &= S_{эф} P_{ГД}(p); \\
 W_{YC}(p) &= \frac{Y_{VI}(p)}{F_{ГД}(p)}; \quad (3.48)
 \end{aligned}$$

$$Y_{\text{вых}}(p) = Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p) + Y_5(p) = Y_{ГД}(p) + Y_f(p).$$

где $P_{ГД}$ – давление в гидродомкратах [78];

$R_{Г} = R_{ГР} + R_{ТР}$ – суммарное гидравлическое сопротивление;

$R_{ГР}$ – сопротивление гидропреобразователя;

$R_{ТР}$ – сопротивление трубопроводов;

$S_{эф}$ – эффективная площадь прокладки [113].

На рисунке 3.14 показана схема управления одного гидродомкрата.

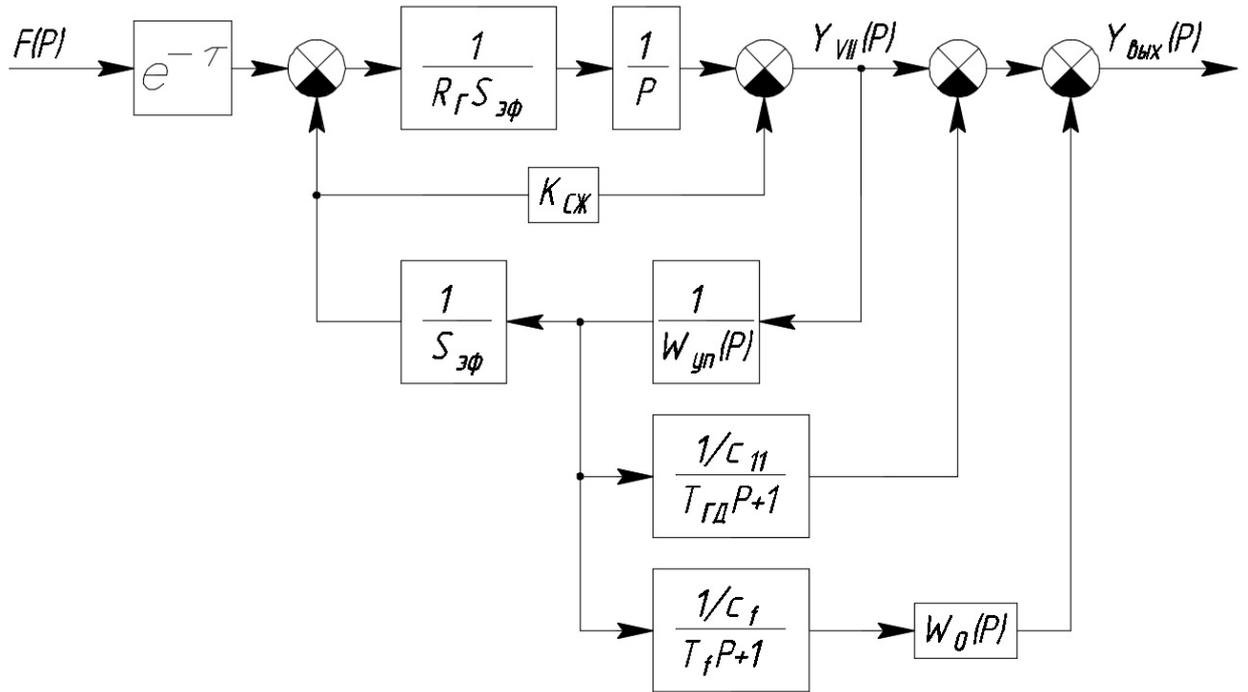


Рисунок 3.14 – Структурная схема каналов по управлению

$$W_0(p) = \frac{1}{1 + \left[\frac{1/c_f}{T_f p + 1} + \frac{1/c_{1np}}{T_1 p + 1} + \frac{1/c_{2np}}{T_2 p + 1} + \frac{1/c_{3np}}{T_3 p + 1} + \frac{1/c_{4np}}{T_4 p + 1} + \frac{1/c_{5np}}{T_5 p + 1} \right]} \times \frac{1}{(\beta_{1*} p + m_{np} p^2)} \quad (3.49)$$

Преобразуя выражение (3.49) получим

$$W_0(p) = \frac{T_5^5 p^5 + T_4^4 p^4 + T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1^{**} p + 1}{T_5^5 p^5 + T_4^4 p^4 + T_3^3 p^3 + T_2^{*2} p^2 + T_1^* p + 1} \quad (3.50)$$

где $T_1^{**} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5$.

Отсюда запишем передаточную функцию объекта по управлению

$$W_Y(p) = \frac{Y_{\text{вых}}(p)}{P(p)} = e^{-\tau s} \frac{\frac{1}{R_{\Gamma} S_{\text{зф}}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{1 + K_{c^*} S_{\text{зф}}} \cdot \frac{1}{W_{\text{YC}}(p)}}{1 + \frac{1}{R_{\Gamma} S_{\text{зф}}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{1 + K_{c^*} S_{\text{зф}}} \cdot \frac{1}{W_{\text{YC}}(p)} \cdot \frac{1}{S_{\text{зф}}} \cdot \frac{1}{W_{\text{YC}}(p)}} \times$$

$$\times \left[1 + \frac{1}{W_{\text{YC}}(p)} \cdot \frac{1/C_9}{T_{\text{ГД}} p + 1} \cdot \frac{1/C_f}{T_f p + 1} \cdot W_0(p) \right], \quad (3.51)$$

где $W_{\text{YC}}(p)$ – передаточная функция, найденная формулы (3.48).

На рисунке 3.15 представлена связь двух гидродомкратов, действующих друг на друга.

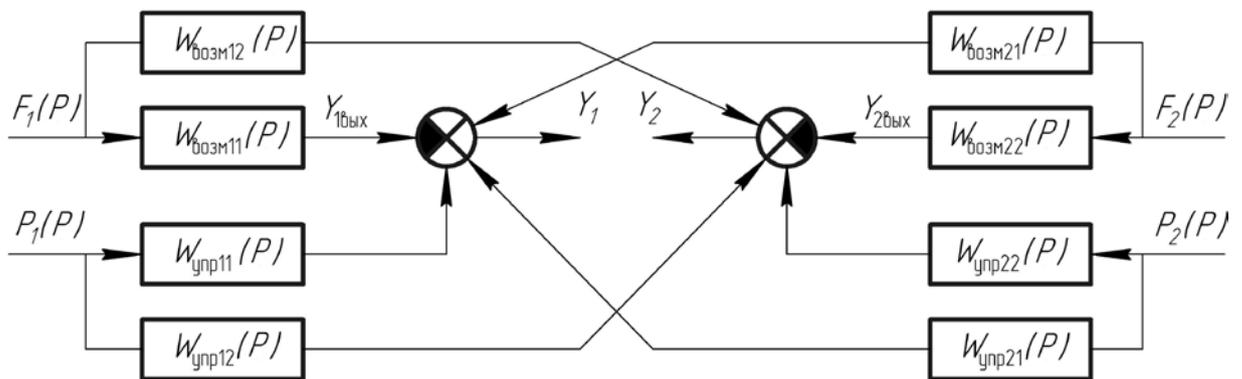


Рисунок 3.15 – Схема связи двух гидродомкратов, действующих друг на друга

Выводы по третьей главе

1. На основе принятых допущений разработана математическая модель контактных взаимодействий в стыке подсистемы «салазки – стойка станка». Выполнена оценка адекватности математической модели путем сравнения величин, полученных расчетным и экспериментальными методами. Установлено, что максимальное расхождение составляет около 12%.

2. Разработана математическая модель описывающая влияние изгибных деформаций станины, контактных взаимодействий в стыках подсистем «салазки – стойка станка» и «салазки – роликовые направляющие станины» на геометрическую точность станка. Установлено, что теоретические и экспериментальные исследования силовых деформаций имеют удовлетворительное совпадение, максимальное расхождение составило около 15%.

3. Разработана динамическая модель стойки горизонтального КРС с системой гидродомкратов в качестве объекта управления.

Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ УСТАНОВКА КОМПЕНСАЦИИ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СТОЙКИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СТАНИНЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КООРДИНАТНО-РАСТОЧНОГО СТАНКА

Силовые деформации станин КРС определяют их выходную точность и, соответственно существенно влияют на точность обработки, выполняемой на них.

Оборудование их системами автоматического регулирования (САР) и управления (САУ) является одним из способов повышения геометрической точности станков [1, 6, 66, 82, 83, 87, 91, 94, 96 и др.].

В данной главе приведена опытно-промышленная установка, с помощью которой можно провести сравнительную оценку эффективных мер повышения её точности за счет оснащения устройством стабилизации положений осей обрабатываемого отверстия и инструмента [120]. Установка выполнена на базе горизонтального КРС модели 2А459АМФ4, выпускаемых Самарским станкостроительным заводом. Установка позволяет провести оценку эффективности за счет оснащения его устройством компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины.

С опытно-промышленной установки были получены данные, представленные во второй главе. С помощью установки была изучена динамика влияния силовых деформаций несущих систем на снижение точности станков, изучена динамика стойки станка с комплексом гидродомкратов, оценена эффективность устройства компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтальных КРС.

4.1 Конструктивно-функциональная схема лабораторной установки

Первым этапом создания опытно-промышленной установки были выполнены работы по разработке схемы лабораторной установки, то есть установки, на которой были опробованы пути решения задачи компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС в изолированных от производства условиях.

На рисунке 4.1. представлен горизонтальный КРС модели 2А459АМФ4 оснащенный устройством компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины. Станина 1 станка установлена на три жестких башмака 2, 3 и 4. Салазки 5 перемещаются со стойкой 6 и шпиндельной бабкой 7, которая содержит шпиндельный узел 8 с закрепленным режущим инструментом, электродвигателем 9 (М). Обрабатываемая на станке корпусная заготовка 10 закреплена на столе 11 станка. Корпусная заготовка устанавливается на установочные опоры. Устройство содержит механизмы малых перемещений 12 и 12', выполненных в виде гидродомкратов. В состав устройства входят двухкоординатные электронные уровни 13, 14, (ЭУ_1 , ЭУ_2), установленные на стойке станка и корпусной заготовке соответственно, датчик перемещения 15, система ЧПУ 16 (CNC), усилители электрических сигналов 17, 17' и электрогидравлические преобразователи 18, 18' (ЭГП).

На рисунке 4.2 представлено устройство гидродомкратов (вид А рисунка 4.4) , вводимых в стыке между салазками и стойкой. Стойка устанавливается на салазки и соединяется с толкателем 19 гидравлической опоры и закрепляется при помощи шпильки 26 с гайкой 27 и шайбой 28. Нижний конец шпильки ввинчивается в резьбовое отверстие толкателя, который неподвижно соединен с жестким центром 20.

Гидродомкрат состоит из корпуса 23, который по упорной резьбе ввинчивается в основание 24. В корпус гидродомкрата 23 через штуцер 25

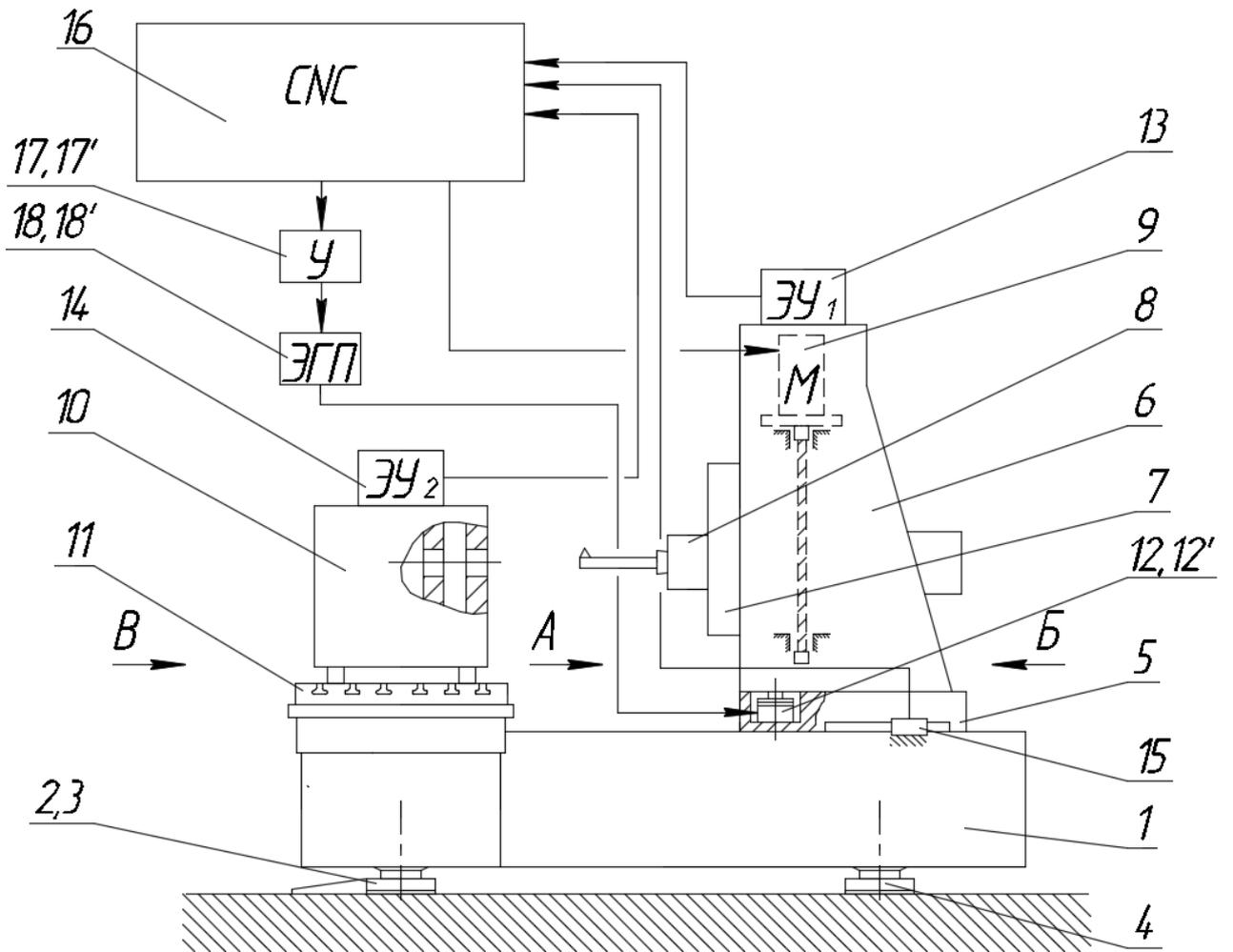


Рисунок 4.1 – Общий вид горизонтального КРС, оснащенного устройством стабилизации положений осей обрабатываемого отверстия и инструмента

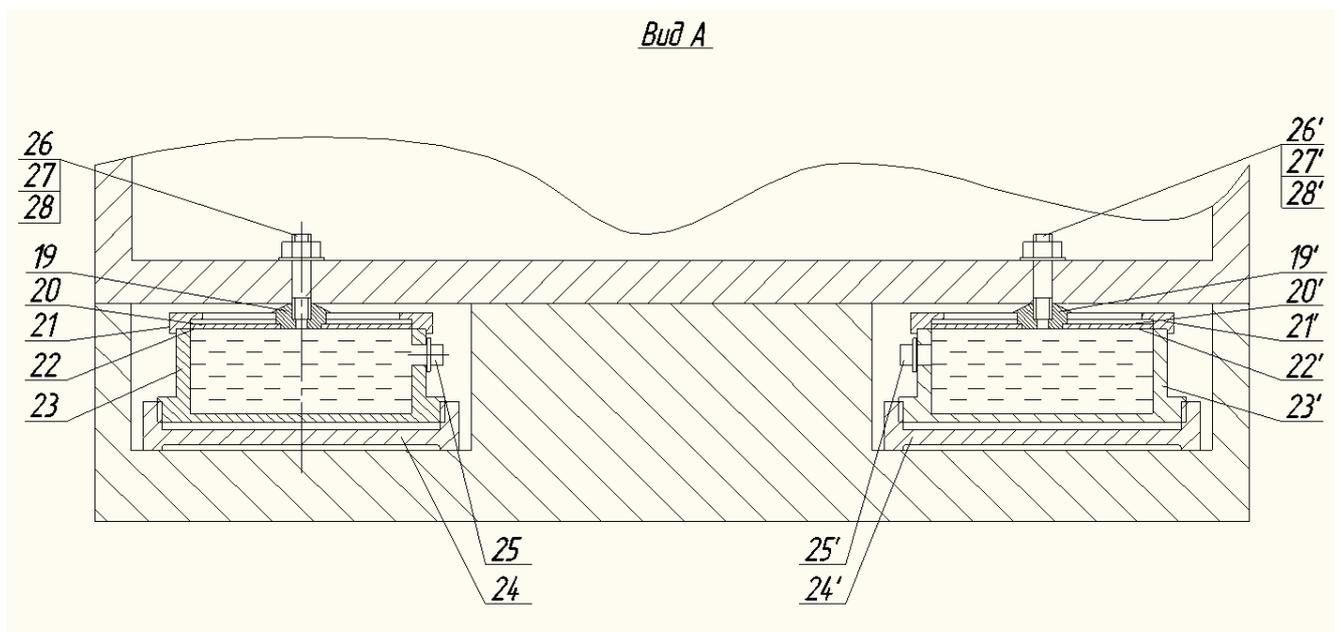


Рисунок 4.2 – Конструкция установленных гидродомкратов

поступает рабочая жидкость. Её давление регулируется в электрогидравлическими преобразователями 18, 18'. Изменяемое давление производит поступательное перемещение жесткого центра 20 помощи мембраны 22 и соответственно происходит угловое перемещение переднего края стойки. Крышка 21 соединяется с корпусом 23 с помощью винтов, прижимая мембрану.

На рисунках 4.3, 4.4 показана геометрия угловых перемещений вследствие деформаций кручения и изгиба станины, возникающих во время движения стойки по направлению к заготовке, которые приводят к потере точности технологической системы станка. В последствии этих деформаций происходит взаимные отклонения осей растачиваемого отверстия и инструмента, вследствие угловых перемещений заготовки и стойки.

Электронные уровни ЭУ₁ и ЭУ₂ определяют углы наклона α_1 , β_1 стойки и углы наклона обрабатываемой заготовки α_2 , β_2 , в следствии деформаций изгиба и кручения станины. Аналоговые выходы электронных уровней подключается к системе ЧПУ.

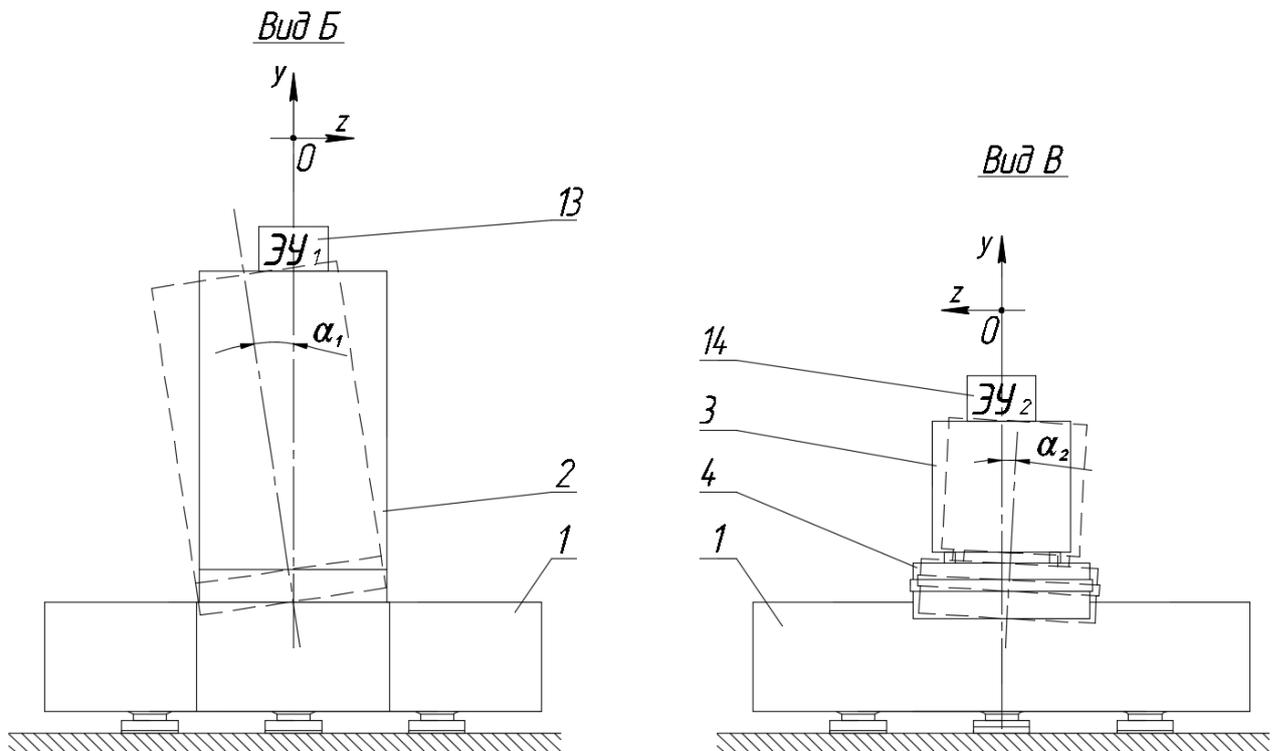


Рисунок 4.3 – Рассматриваемые углы наклона обрабатываемой заготовки и стойки вследствие силовых деформаций кручения станин стойки и стола заготовки

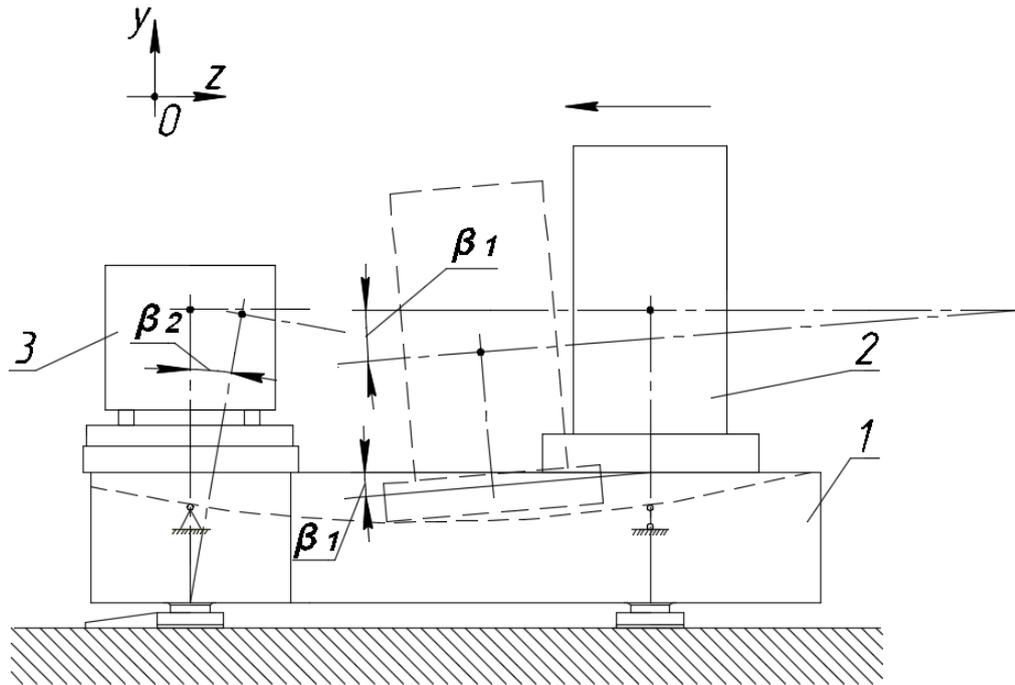


Рисунок 4.4 – Рассматриваемые углы наклона обрабатываемой заготовки и стойки вследствие силовых деформаций изгиба станины стойки

На рисунках 4.5, 4.6 показаны структурные схемы компенсации угловых перемещений стойки при деформациях изгиба и кручения станины.

Где представлены следующие обозначения:

$U_{вх}$ – входной сигнал;

$U_{вых}$ – выходной сигнал;

U – управляющее воздействие;

$\text{ЭУ}_1, \text{ЭУ}_2$ – электронные уровни;

α_1 – угол наклона оси стойки в следствии деформации кручения;

α_2 – угол наклона оси заготовки в следствии деформации кручения;

β_1 – угол наклона оси стойки в следствии деформации изгиба;

β_2 – угол наклона оси заготовки в следствии деформации изгиба;

CNC – система числового программного управления (ЧПУ);

$У$ – усилитель электрического сигнала;

ЭГП – электрогидравлический преобразователь;

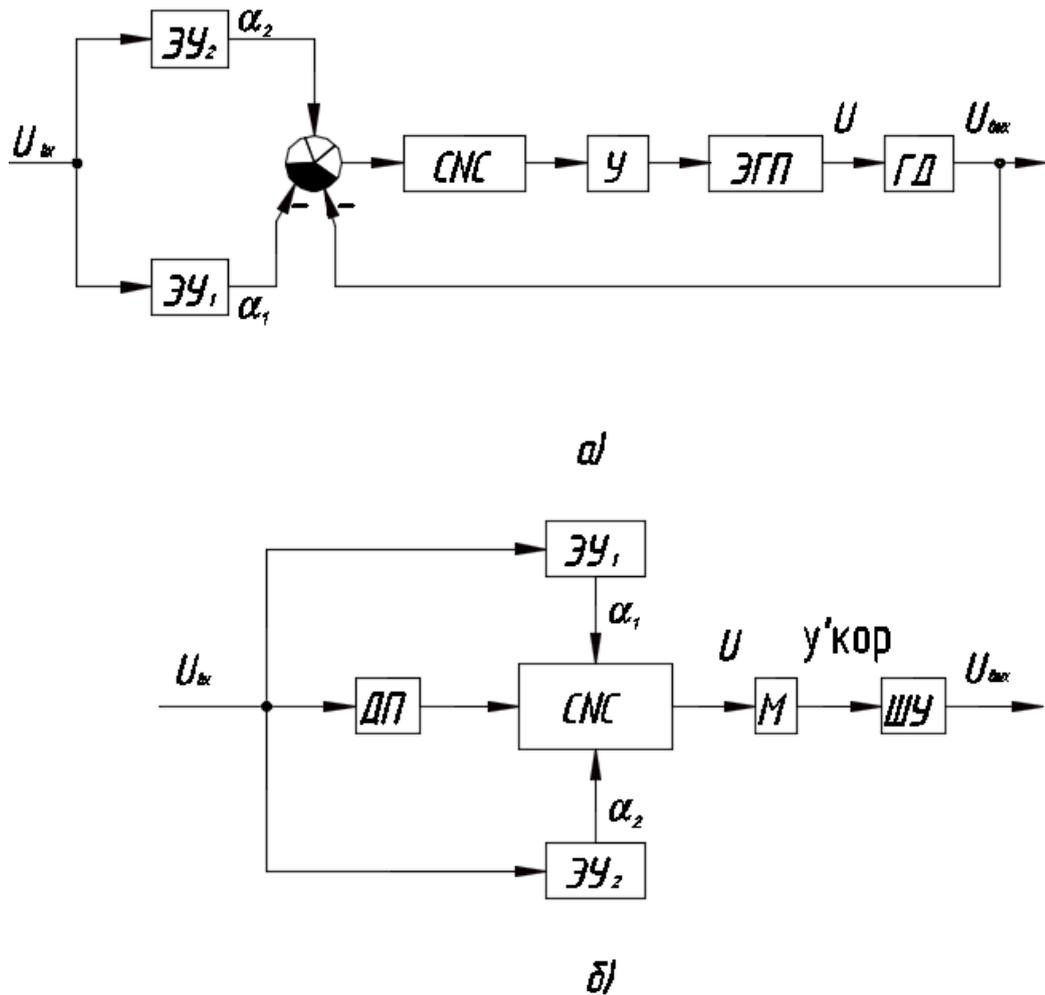


Рисунок 4.5 – Структурные схемы компенсации угловых перемещений стойки при деформации кручения станины, где:

- а) задание параллельности осей инструмента и обрабатываемого отверстия;
 б) задание на коррекцию по вертикали положения осей инструмента и обрабатываемого отверстия.

ГО – гидравлическая опора;

ДП – датчик, определяющий перемещение стойки;

М – электродвигатель, который перемещает шпиндельный узел в вертикальном направлении;

ШУ – шпиндельный узел.

Сигналы $y(\alpha_1)$, и $y(\alpha_2)$ с лазерных датчиков поступают в систему числового программного управления (ЧПУ), где сравниваются между собой и по их разности подается команда коррекции:

$$\Delta y(\alpha) = y(\alpha_2) - y(\alpha_1);$$

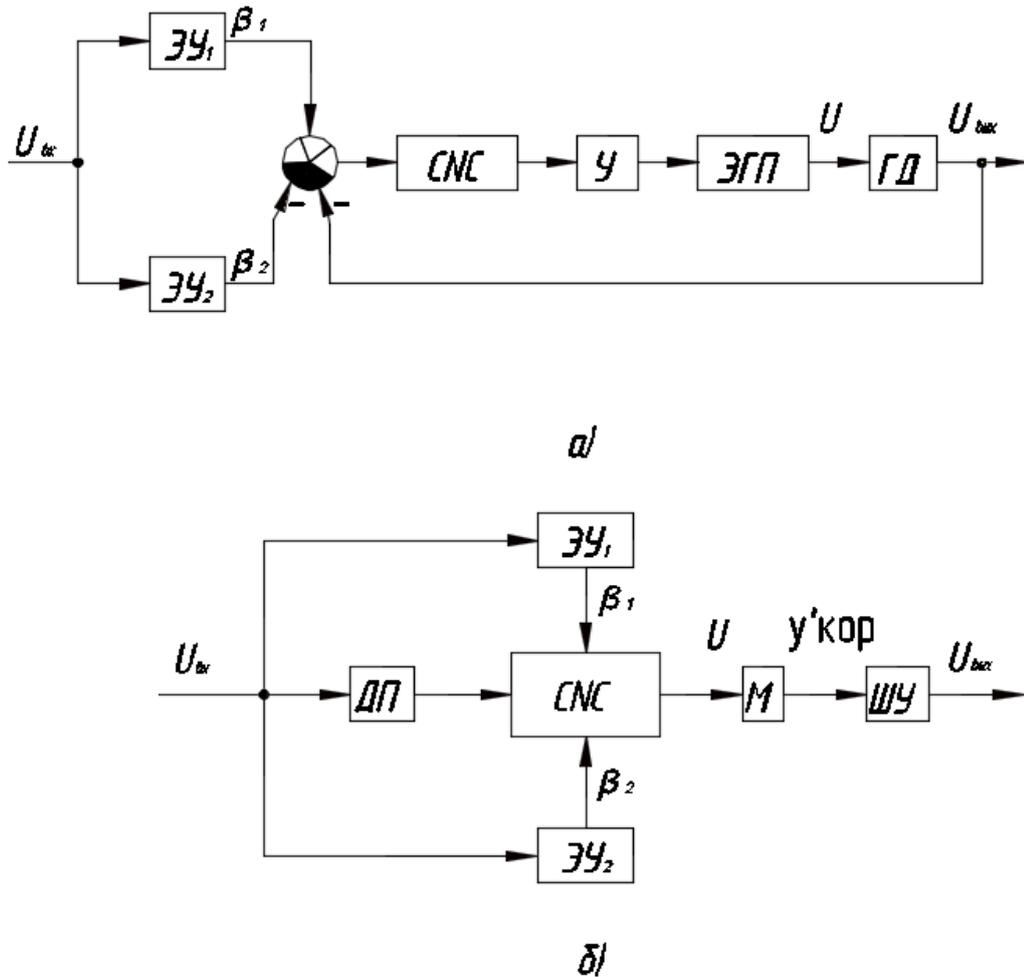


Рисунок 4.6 – Структурные схемы компенсации угловых перемещений стойки при деформации изгиба станины, где:

- а) задание параллельности осей инструмента и обрабатываемого отверстия;
- б) задание на коррекцию по вертикали положения осей инструмента и обрабатываемого отверстия.

Эта команда поступает на электрогидравлические преобразователи, которые регулируют давление рабочей жидкости в гидравлических опорах. Под действием давления рабочей жидкости на толкатели стойка поворачивается на угол $\alpha_2 - \alpha_1$ для стабилизации деформации кручения станины. Стабилизация положения стойки станка вследствие деформаций изгиба происходит аналогичным образом.

Таким образом, оснащение станка предлагаемым устройством позволило существенно снизить влияние упругих деформаций станины на выходную точность станка. Но при этом была выявлена низкая помехозащищенность данного устройства, что привело к выводу о использовании устройства

стабилизации положений осей обрабатываемого отверстия и инструмента только в лабораторных целях.

4.2 Конструктивные особенности измерительных баз

Экспериментальные исследования упругих смещений станины необходимо продолжить путём разработки измерительных баз.

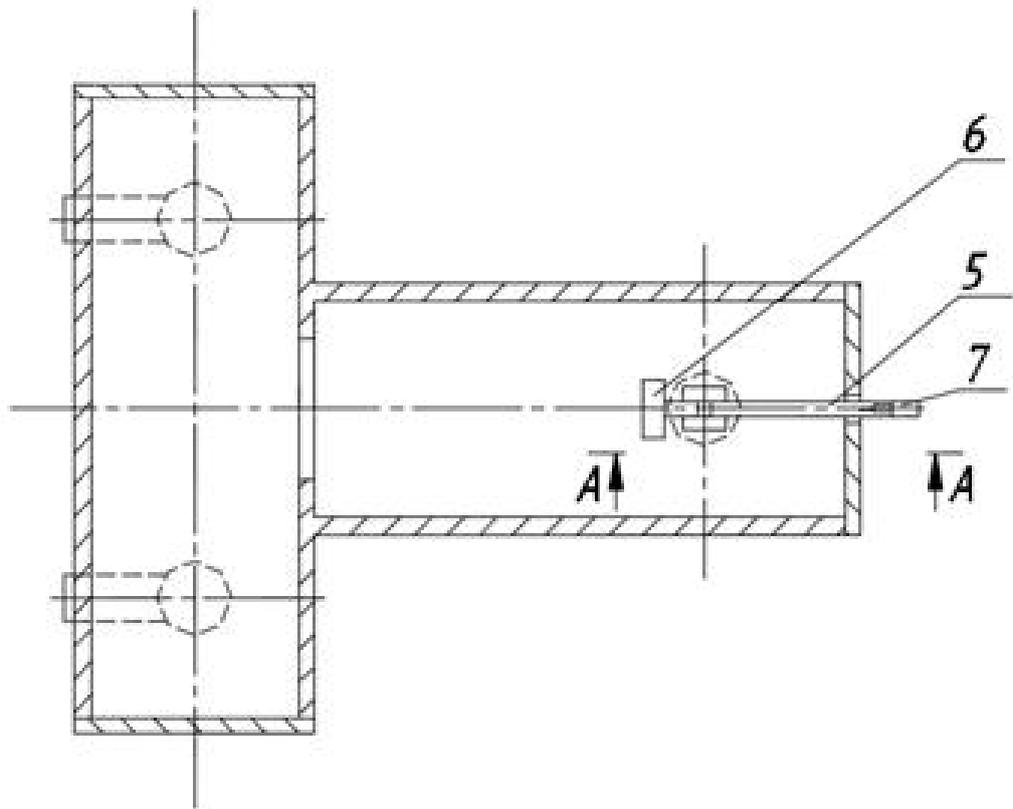
Для экспериментальных исследований весьма важной является надежная измерительная база [30, 36].

К настоящему времени разработано множество измерительных баз [70, 90, 104, 111, 114, 115, 119 и др.].

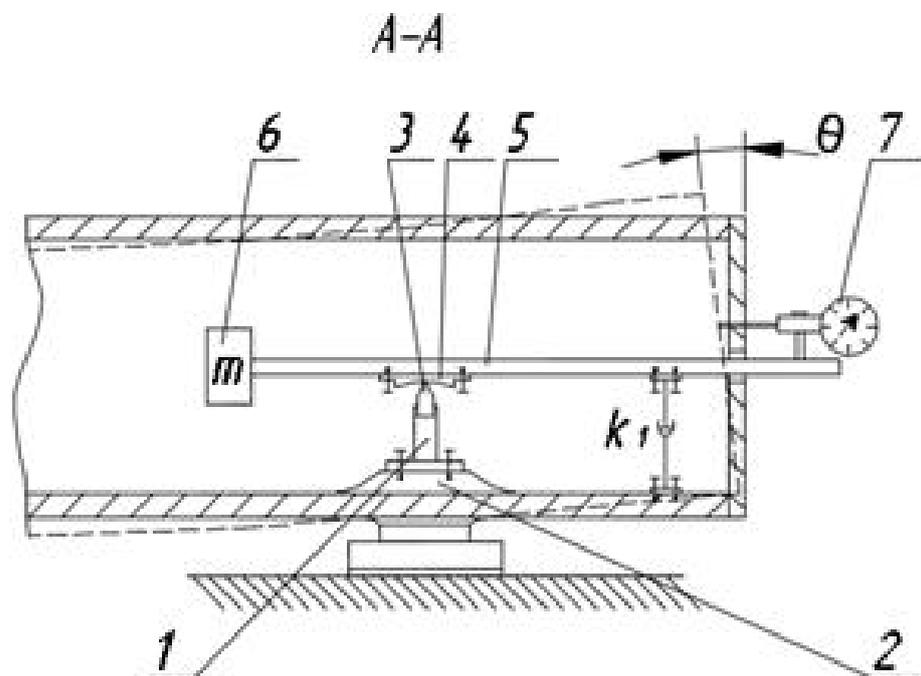
Задание в пространстве плоскости, относительно которой происходят измерения перемещений исследуемых объектов, определяет точность измерений [28, 37, 80, 81, 98, 102, 105, 117, и др.]. Иначе вследствие недостоверности данных возникает вероятность грубой ошибки стабилизации положения исследуемого объекта.

На рисунке 4.7 представлено устройство для контроля силовых деформаций станин КРС [120].

Устройство содержит ножевую опору, состоящей из стойки 1, которая закрепляется в опорной части 2. В стойке установлена закалённая пластина 3, которая контактирует с опорной частью 4. Двуплечая стальная штанга 5 установлена на ножевую опору. На одном из плеч стальной штанги размещен груз 6, а на другом плече, закреплен гидравлический демпфирующий элемент с коэффициентом демпфирования k_1 . Снаружи станины



а)



б)

Рисунок 4.7 – Конструкция устройства для контроля силовых деформаций станин КРС:

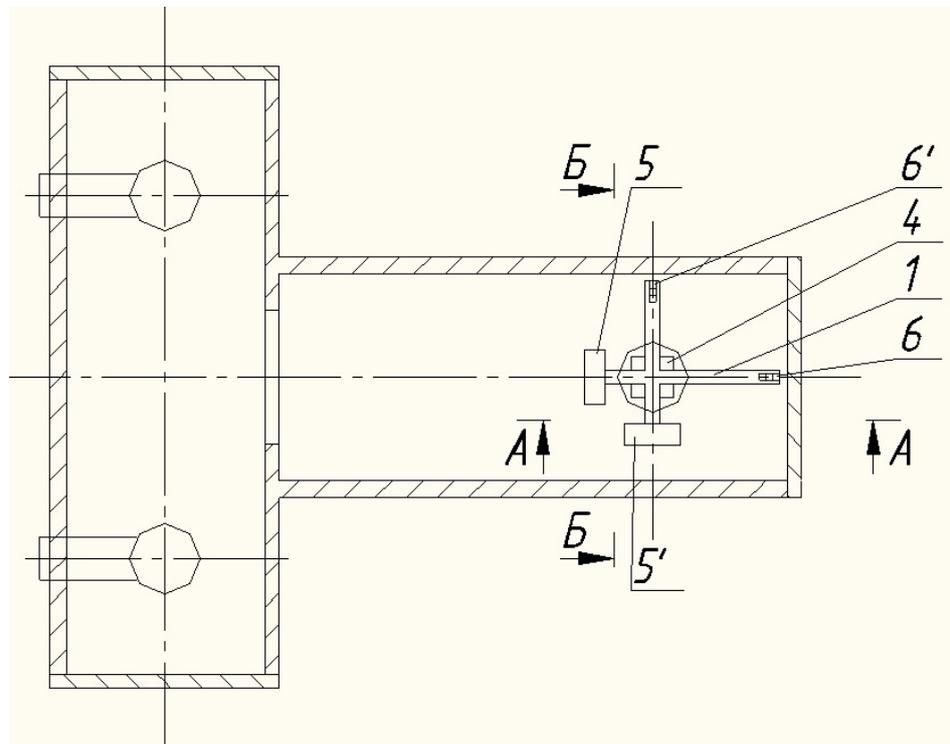
а) вид сверху измерительной базы; б) вид в разрезе измерительной базы.

на двухплечую стальную штангу 5 устанавливается измеритель деформации 7.

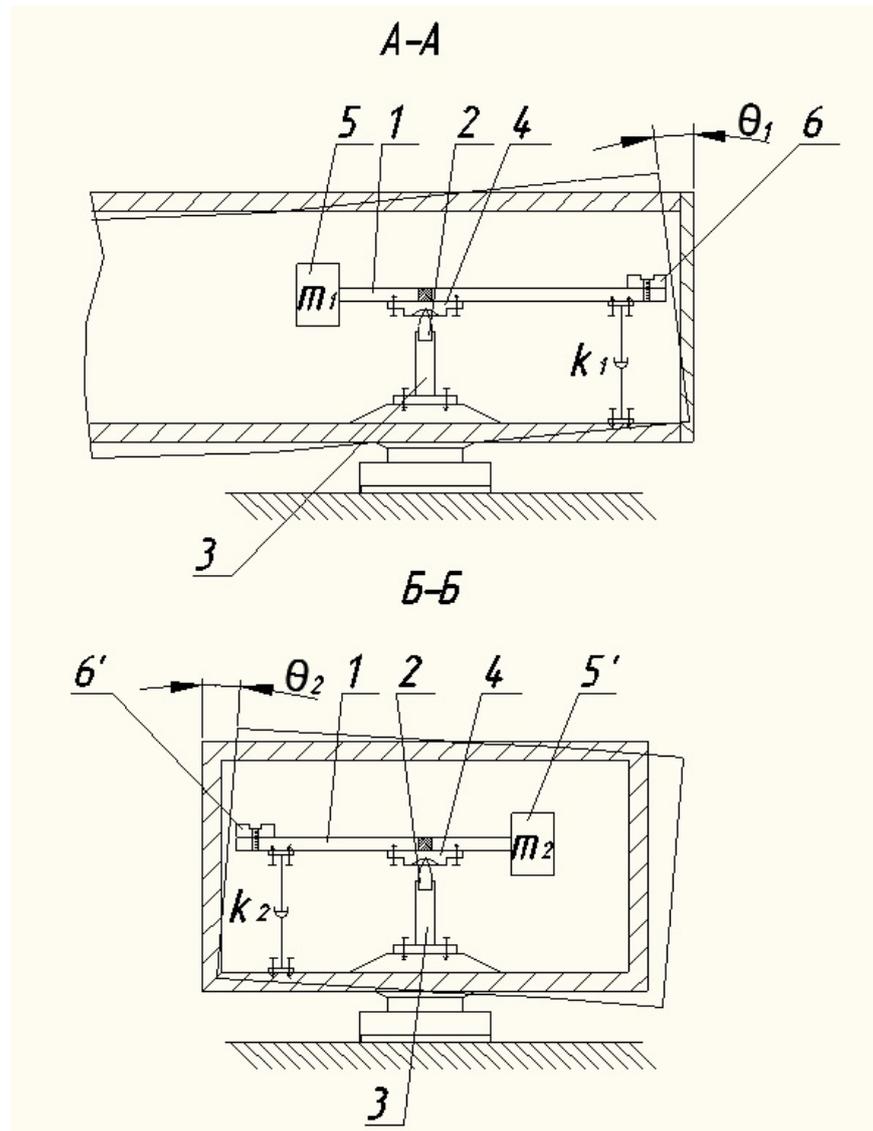
Технический результат состоит в том, что предлагаемое устройство позволяет существенно увеличить точность измерений силовых деформаций при изгибе станины КРС, за счет установленной измерительной базы. Но так как данное устройство не учитывает упругих силовых деформаций станины вследствие кручения, было разработано устройство для измерения силовых деформаций изгиба и кручения станин КРС [121].

Рассмотрим устройство для измерения силовых деформаций изгиба и кручения станин КРС (рисунок 4.8).

Устройство содержит крестообразную измерительную базу 1 установленную на полусферическую опору, состоящую из закалённого керна 2, закреплённого в стойке 3, и термообработанной ответной части 4 полусферической формы. На двух плечах крестообразной измерительной базы установлены уравнивающие грузы 5, 5', а на двух других концах закреплены бесконтактные датчики 6, 6' и гидравлические демпфирующие элементы, установленные между крестообразной измерительной базой 1 и низом станины станка.



а)



б)

Рисунок 4.8 – Конструкция устройства для измерения силовых деформаций изгиба и кручения станин координатно-расточных станков, где а) вид сверху измерительной базы; б) вид в разрезах измерительной базы.

Устройство работает следующим образом.

Станина станка при перемещении салазок со стойкой по направляющим при не симметричном приложении нагрузки на станину, претерпевает деформации изгиба и кручения, что приводит к потере точности координатно-расточного станка. Торцевая поверхность станины поворачиваются на угол θ_1 , а боковая соответственно на угол θ_2 , вследствие деформации изгиба и кручения. Крестообразная измерительная база 1 не меняет положения за счет уравнивания рычагов с помощью грузов 5, 5' и гасящих колебания

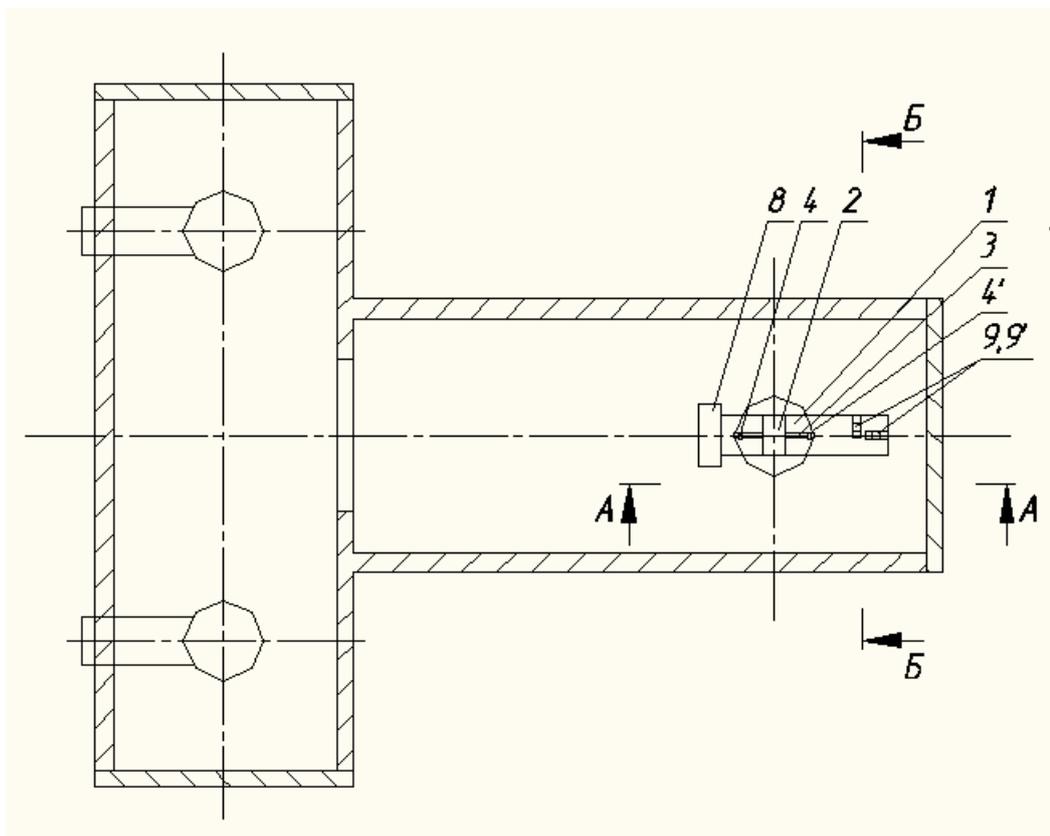
гидравлических демпферов с коэффициентами демпфирования k_1 , k_2 , что позволяет бесконтактным датчикам $б$, $б'$ измерять углы θ_1 , θ_2 .

Таким образом, разработанная измерительная база позволяет измерять силовые деформаций изгиба и кручения станины КРС.

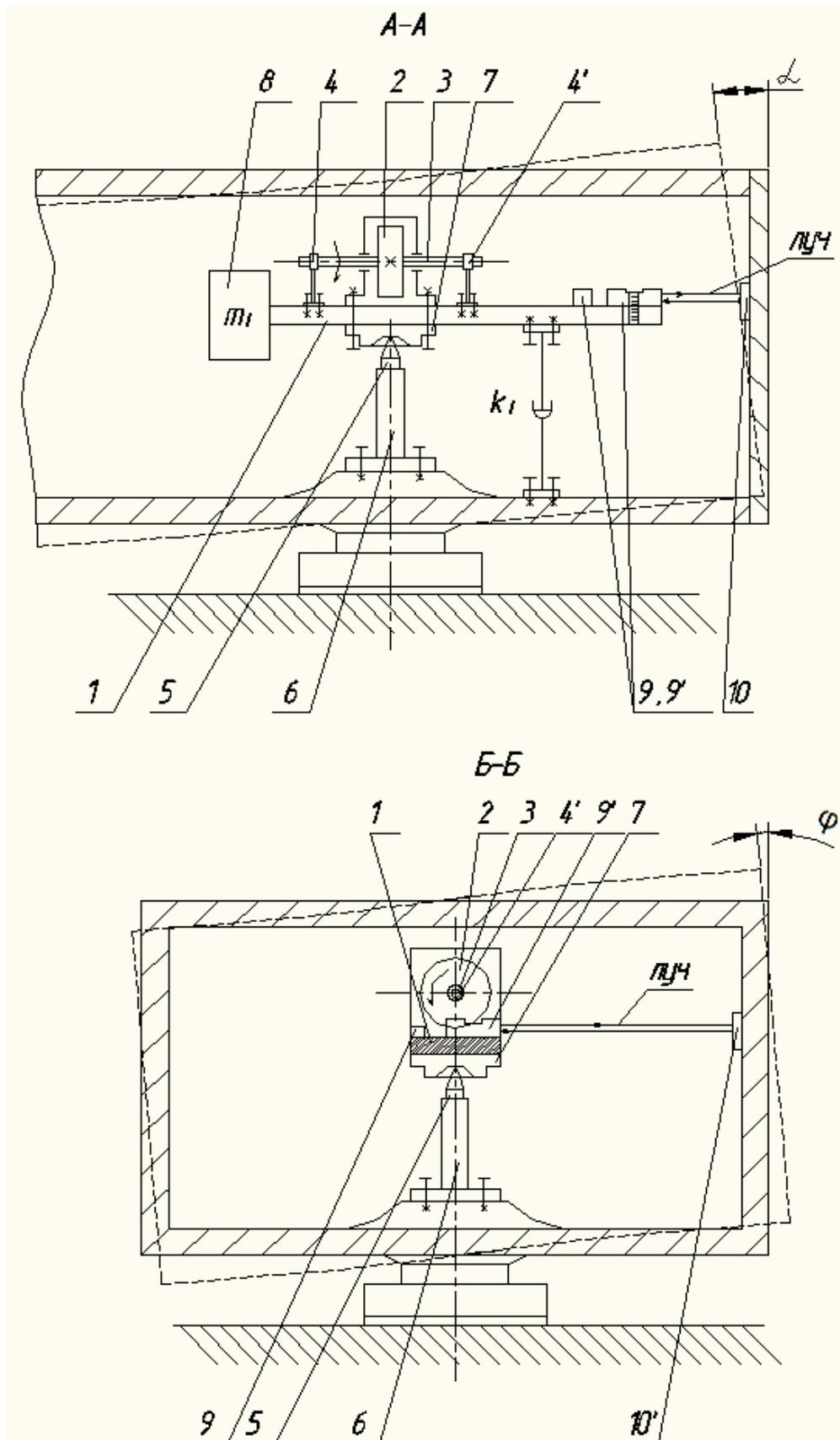
4.3 Измерительной база на основе гироскопического эффекта

При использовании устройства для измерения силовых деформаций изгиба и кручения станин КРС была выявлена его высокая восприимчивость к колебаниям технологической системы станка. По этому использовать устройство в условиях производства не представляется возможным. Для промышленных задач была разработана измерительная база на основе гироскопического эффекта [123].

На рисунке 4.9 представлено устройство для измерения силовых деформаций станины КРС.



а)



б)

Рисунок 4.9 – Конструкция устройства для измерения силовых деформаций станины КРС, где:

а) вид сверху станины в разрезе; б) вид станины стойки в разрезах.

Измерительная база выполнена в виде стальной балки 1. Для стабилизации её положения установлен гироскоп 2. Ось гироскопа 3 скреплена со стальной балкой подшипниками 4, 4'. Стальная балка установлена на полусферическую опору, состоящую из закалённого керна 5, закреплённого в стойке 6, и термообработанной ответной части 7 полусферической формы. На одном конце стальной балки закреплён уравнивающий груз 8, а на другом лазерные датчики 9, 9' и гидравлический демпфирующий элемент с коэффициентом жесткости k_1 , размещённый между стальной балкой 1 и нижней поверхностью станины станка.

Устройство работает следующим образом.

По станине перемещаются салазки со стойкой, шпиндельной бабкой, шпиндельным узлом. При не симметричном приложении нагрузки на станину, она претерпевает деформации изгиба и кручения, что приводит к потере точности КРС. Торцевая поверхность станины, вследствие деформации изгиба поворачиваются на угол α относительно своего первоначального положения, а боковая соответственно на угол φ , вследствие деформации кручения. Стальная балка 1 не меняет положения за счет стабилизации гироскопом 2, уравнивающего груза 8 и гасящих колебания гидравлического демпфирующего элемента, что позволяет лазерным датчикам 9, 9' измерять изменяющиеся расстояния до внутренних стенок станины для возможности оценки углов α и φ .

Таким образом, использование гироскопического эффекта в разработанном устройстве [122] позволило повысить устойчивость измерительной базы путем стабилизации её положения. Это устройство даёт возможность измерять силовые деформации КРС с высокой точностью.

4.4 Экспериментальная опытно-промышленная установка

Горизонтальный КРС модели 2А459АМФ4, был оснащен устройством компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины разработана экспериментальная опытно-промышленная установка (Рисунок 4.10) [124].

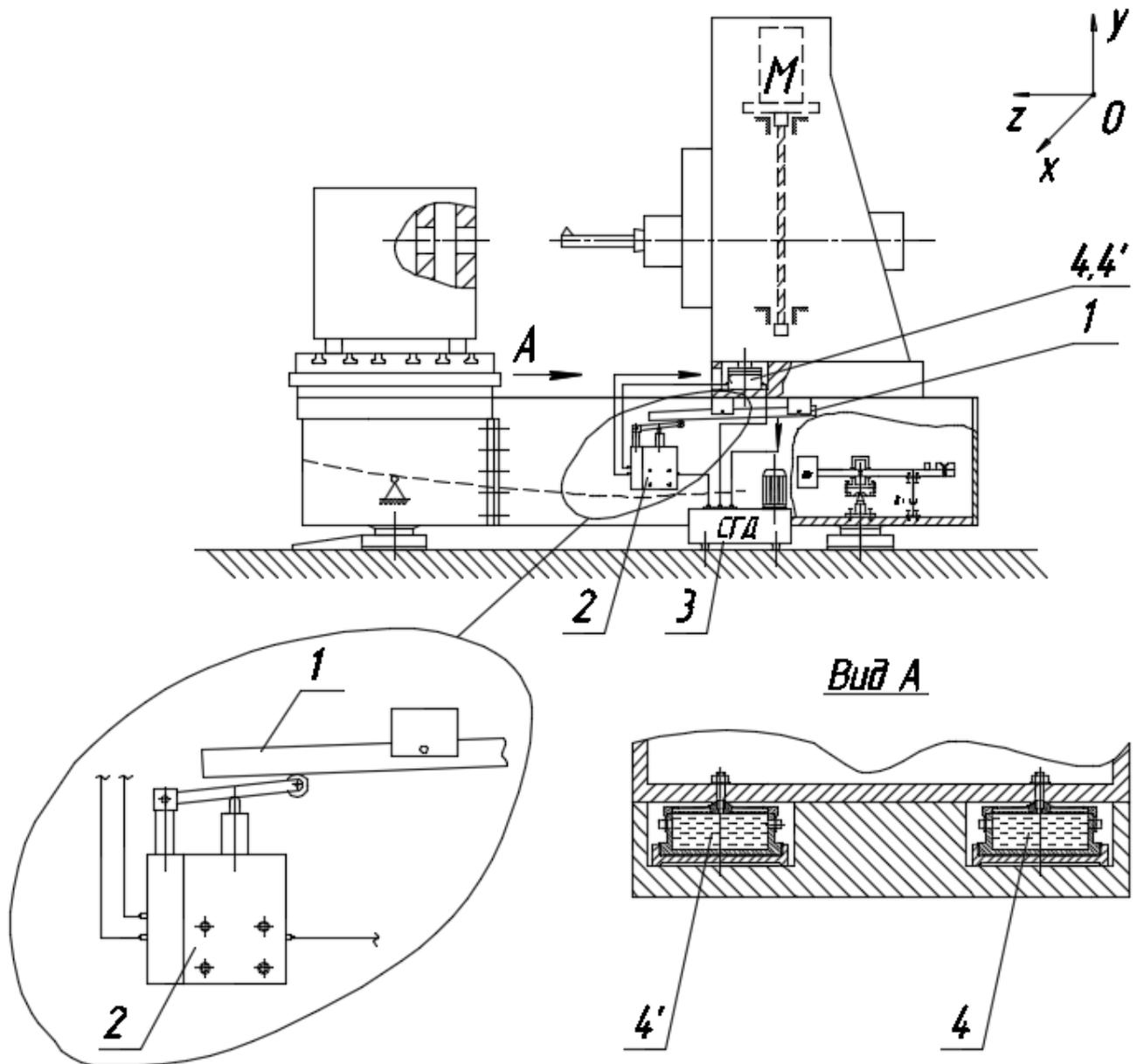


Рисунок 4.10 – Общий вид опытно-промышленной установки:
 1 – рейка-шаблон; 2 – распределительный клапан гидравлического давления;
 3 – станция гидравлического давления; 4, 4' – гидродомкраты.

По станине, установленной на три опоры, относительно фундамента перемещается стойка, от действия веса которой, станина испытывает силовые деформации изгиба и кручения. При этом вершина режущего инструмента отклоняется на некоторые величины Δy и Δx от заданных. Установив в месте соединения салазок и стойки гидродомкраты, позволило с помощью них компенсировать силовые деформации станины и возникшие отклонения инструмента. Компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины осуществляется автоматически. На салазках под некоторым углом закреплена рейка-шаблон 1, величина наклона которой пропорциональна возникающим силовым деформациям станины. Определение угла её установки осуществляется с помощью Лазерный датчик Laser Hologage LGH модели 542-925D (рисунок 4.11), установленных на измерительную базу [123]. Рейка-шаблон, взаимодействует с распределительным клапаном 2 гидравлического давления. Он направляет поток рабочей жидкости от станции гидравлического давления 3 в гидродомкраты 4 и 4'. Вследствие чего гидродомкраты поднимают передний край стойки, компенсируя силовые деформации станины.

Стабилизация положения измерительной базы [122] выполнена с помощью гиростабилизатора модели МС-146. В таблице 4.1 представлены технические характеристики гиростабилизатора.

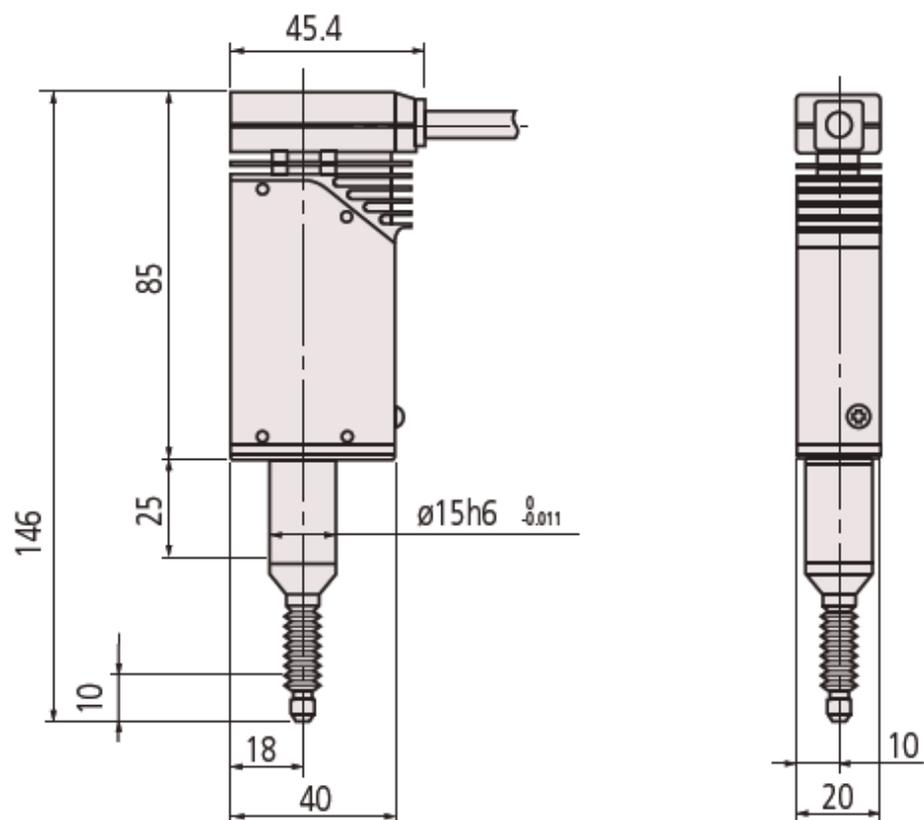
Таблица 4.1

Технические характеристики гиростабилизатора МС-146

№ п/п	Наименование параметра, ед. изм.	Числовое значение
1	Напряжение питания, В	12 - 14
2	Рабочая температура, °С	-40...+100
3	Время включения, с	0,5
4	Вес, кг	0, 15
5	Потребляемый ток, мА	25
6	Габаритные размеры (ШхДхВ), мм	150x150x200



а)



б)

Рисунок 4.11 Лазерный датчик Laser Hologage LGH модели 542-925D, где а) общий вид датчика; б) габаритный чертёж датчика.

В таблице 4.2 представлены технические характеристики лазерных датчиков Laser Hologage LGH модели 542-925D.

Таблица 4.2

Технические характеристики лазерного датчика Laser Hologage
LGH модели 542-925D

№ п/п	Наименование параметра, ед. изм.	Числовое значение
1	Напряжение питания, В	4,5 – 5,2
2	Повторяемость, мкм	0,02
3	Ошибка обратного хода, мкм	0,05
4	Макс скорость отклика, мм/с	250
5	Радиус в точке контакта, мм	R=5 мм из карбида
6	Условия окружающей, °С	+10...+50 (30% до 70% отн.влажности, без конденсата)
7	Диапазон измерения, мм	0 - 10
8	Измерительное усилие, Н	0,45
9	Разрешение, мкм	0,01
10	Диаметр гильзы, мм	15
11	Погрешность, мкм	0,1
12	Масса, кг	0,9

На рисунке 4.12 представлена схема взаимодействия рейки-шаблона с распределительным клапаном.

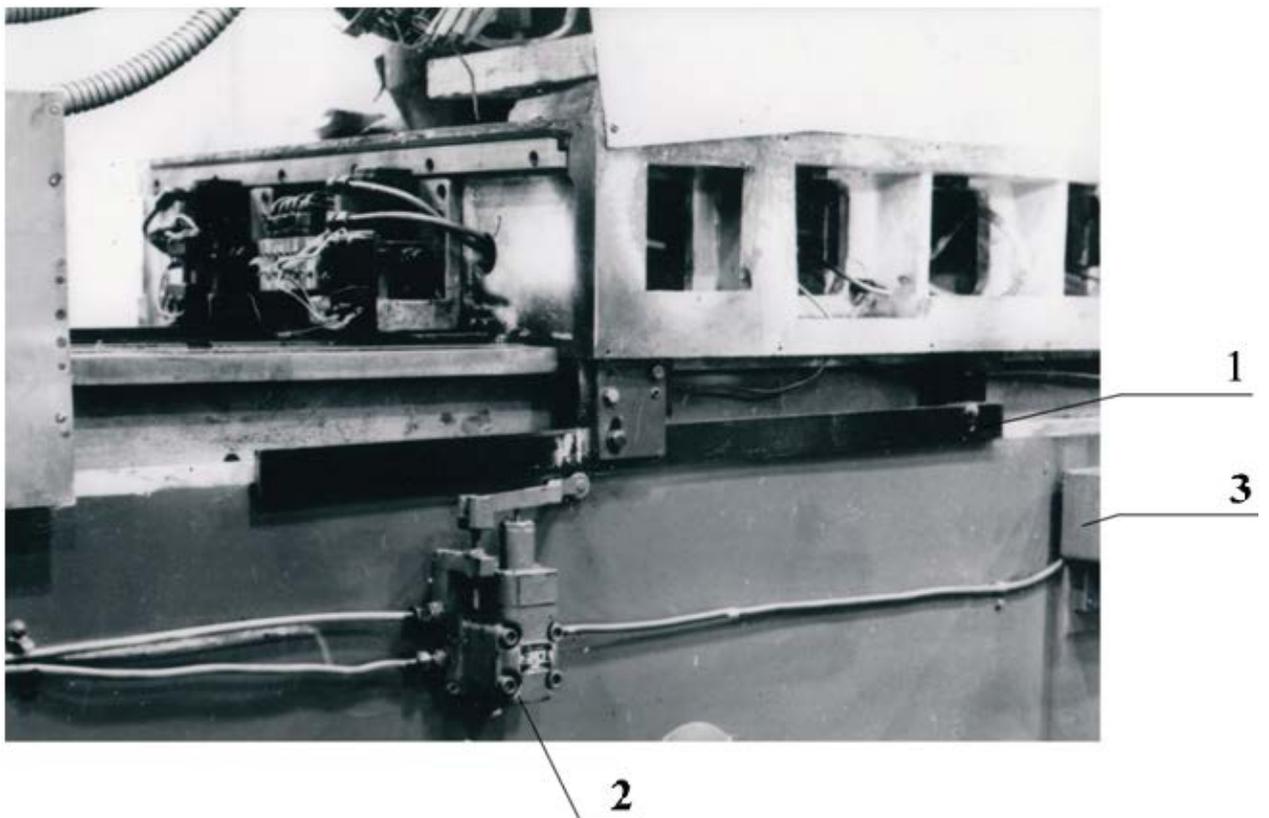


Рисунок 4.12 – Схема взаимодействия рейки-шаблона с распределительным клапаном:

1 – рейка-шаблон; *2* – распределительный клапан гидравлического давления; *3* – станция гидравлического давления.

Таким образом, технический результат состоит в повышении точности горизонтального КРС путем компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины в условиях действующего производства. Выполнено внедрение на Федеральном государственном унитарном предприятии “Научного конструкторско-технологического бюро” «ПАРСЕК» (ПРИЛОЖЕНИЕ Г).

Выводы по четвертой главе

1. Разработана лабораторная установка, смонтированная на горизонтальном КРС мод. 2А459АМФ4, позволяющая проверить результаты теоретических исследований, приведенных в главе 3 (патент РФ на полезную модель № 136380).

2. Разработана измерительная база для контроля силовых деформаций станин КРС, конструктивное исполнение которой обеспечивает возможность измерения силовых деформаций изгиба горизонтального КРС (патент РФ на полезную модель № 142880).

3. Разработана измерительная база для измерения силовых деформаций изгиба и кручения станин КРС (патент РФ на полезную модель № 140823).

4. Разработана измерительная база для измерения силовых деформаций станины КРС на основе использования гироскопического эффекта, конструктивное исполнение которой позволяет повысить устойчивость измерительной базы (патент РФ на изобретение № 2575508).

5. Разработана опытно-промышленная установка, смонтированная на горизонтальном КРС мод. 2А459АМФ4, оснащенная устройством компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины, позволяющая повысить геометрическую точность станка.

Глава 5. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КООРДИНАТНО-РАСТОЧНЫХ СТАНКОВ ПУТЕМ КОМПЕНСАЦИИ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СТОЙКИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СТАНИНЫ

Упругие деформации несущих систем горизонтальных координатно-расточных станков средних габаритных размеров, как правило, установленные на три опоры, оказывают значительное влияние на их выходную (геометрическую) точность. Влиянием деформаций фундамента можно пренебречь, так как проседание одной из опор приводит только к наклону станка относительно фундаментной плиты. Это не оказывает существенного влияния на взаимные перемещения осей подсистемы «режущий инструмент-заготовка».

В настоящей главе приведены результаты исследований упругих деформаций (собственных и контактных) несущей системы, на примере, горизонтального КРС модели 2А459АМФ4. Осуществлена оценка влияния компенсации угловых перемещений стойки, путем автоматического управления её положением относительно салазок стола, на котором она установлена на точность обработки отверстий, выполненных в специальной корпусной заготовке.

5.1 Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований точности отверстий, выполняемых на горизонтальных координатно-расточных станках

В общем виде суммарная погрешность обработки партии деталей определяется следующим выражением [73]:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{сист}} + \frac{1}{K} \sqrt{\Delta_f^2 K_f + \Delta_c^2}, \quad (5.1)$$

где $\Delta_{\text{сист}}$ - систематические погрешности;

Δ_f - функциональные погрешности;

Δ_c - случайные погрешности;

K, K_f - коэффициенты рассеивания.

Для оценки погрешностей было проведено две серии экспериментов, в частности, обработку (расточивание) корпусной заготовки на базовом (без системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины) горизонтальном КРС модели 2А459АМФ4 и на этом станке с системой компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины [124].

Материал заготовки (рисунок 5.1) СЧ 21, твердость НВ 150 – 180. Геометрические размеры 950x950x800 мм. Её вертикальные стороны были размечены под обработку отверстий диаметром $20^{+0,015}$ мм. Установка детали на столе осуществлялась на три опоры. Причем, её положение выверялось электронными уровнями.

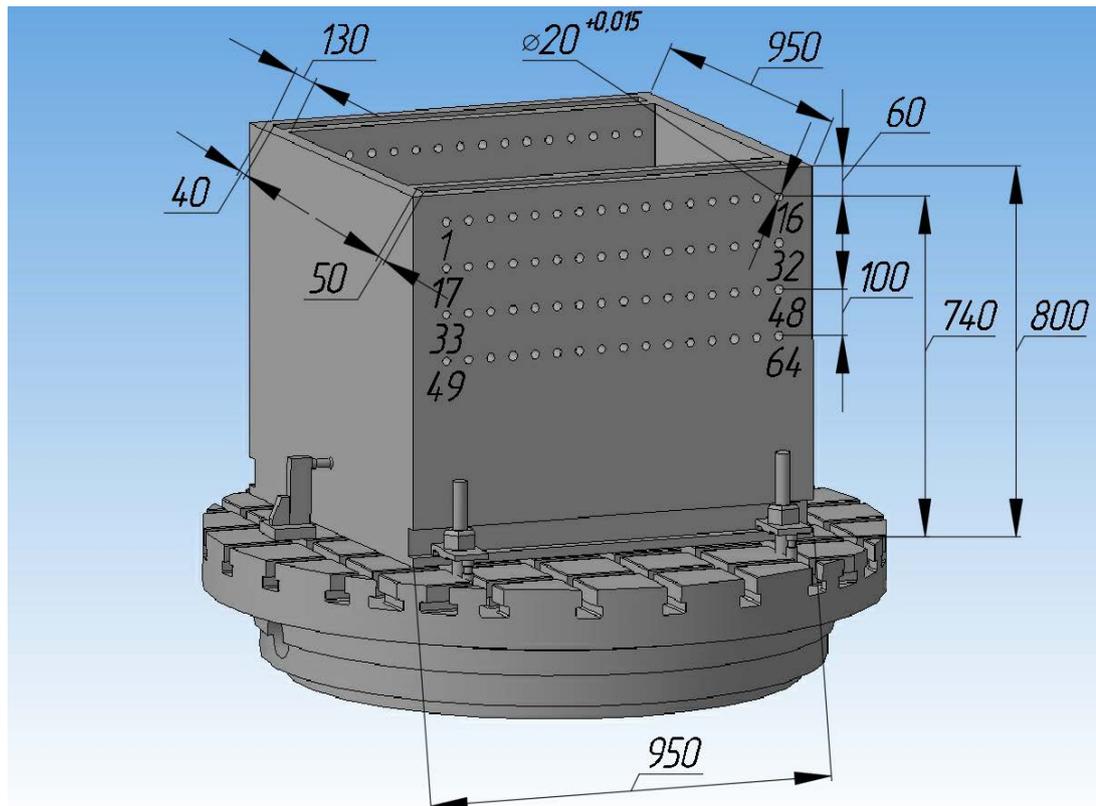


Рисунок 5.1 – Корпусная заготовка

Для проведения статистического анализа результатов экспериментов, определялось количество необходимых отверстий для выполнения операции растачи-

вания. Из достоверной вероятности $\alpha = 0,95$, и точности находилось количество отверстий [95].

Найдём объем выборки n из зависимостей [95]:

$$\varepsilon = q_S \cdot S = 0,2S \quad (5.2)$$

$$K = n - 1 \quad (5.3)$$

Откуда $q_S = 0,2$. По таблице приложения 3 [95] при $q_S = 0,2$ и $\alpha = 0,95$ коэффициент $K = 60$.

Следовательно, $n = K + 1 = 35 + 1 = 61$.

Таким образом, при операции растачивании было выполнено шестьдесят четыре отверстия.

Цилиндричность отверстий и вод оси инструмента определялись в специально проведенных опытах по их контролю [88].

Измерения погрешности обработки отверстий проводились на координатной измерительной машине. Вывод данных был в виде табличных значений (таблица 5.1).

На рисунке 5.2 показана схема измерений растачиваемых отверстий в шести сечениях.

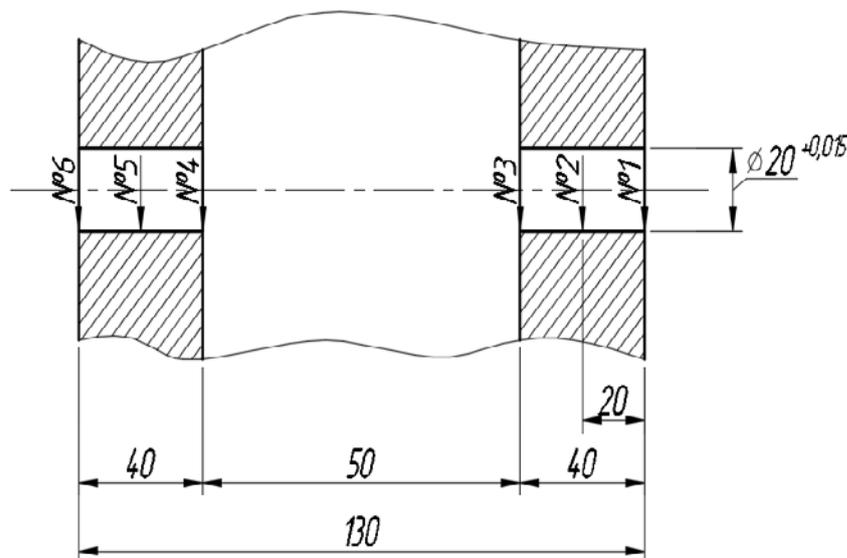


Рисунок 5.2 – Схема измерений растачиваемых отверстий

Результаты измерений отверстий

№ отв/ № сеч		без САУ		с САУ	
		e_1 , МКМ	e_2 , МКМ	e_1 , МКМ	e_2 , МКМ
1	№ 1	12	5	5	5
	№ 2	12	5	5	5
	№ 3	13	5	5	4
	№ 4	13	5	5	5
	№ 5	13	5	5	5
	№ 6	14	5	5	4
4	№ 1	13	5	5	5
	№ 2	14	5	5	5
	№ 3	12	5	4	4
	№ 4	14	5	5	5
	№ 5	13	5	5	5
	№ 6	13	5	4	5
8	№ 1	12	5	4	5
	№ 2	12	5	4	4
	№ 3	13	5	4	5
	№ 4	13	5	4	5
	№ 5	13	5	4	5
	№ 6	14	5	4	5
12	№ 1	14	5	5	5
	№ 2	13	5	5	5
	№ 3	14	5	4	5
	№ 4	12	5	5	5
	№ 5	14	5	4	5
	№ 6	14	5	4	5
16	№ 1	12	4	4	4
	№ 2	13	4	4	4
	№ 3	13	4	4	3
	№ 4	13	4	4	4
	№ 5	14	4	4	4
	№ 6	14	4	4	4
17	№ 1	12	4	5	4
	№ 2	13	5	5	5
	№ 3	13	5	5	4
	№ 4	13	4	5	4
	№ 5	13	4	5	4
	№ 6	13	4	5	4
33	№ 1	12	4	5	4
	№ 2	12	4	5	4
	№ 3	13	5	5	5
	№ 4	13	4	5	4
	№ 5	13	5	5	5
	№ 6	13	5	5	4
49	№ 1	12	5	5	5
	№ 2	12	4	5	4
	№ 3	12	5	5	5
	№ 4	13	5	5	5
	№ 5	13	4	5	4
	№ 6	13	5	5	5
24	№ 1	13	5	4	5
	№ 2	13	4	4	4
	№ 3	13	4	4	4
	№ 4	13	5	4	5
	№ 5	14	5	4	5
	№ 6	14	5	4	5
40	№ 1	13	5	4	5
	№ 2	13	5	4	5
	№ 3	13	5	4	5
	№ 4	13	4	4	4
	№ 5	13	5	4	4
	№ 6	13	5	4	5

Продолжение таблицы 5.1

№ отв/ № сеч	без САУ		с САУ		
	e_1 , МКМ	e_2 , МКМ	e_1 , МКМ	e_2 , МКМ	
56	№ 1	13	5	4	5
	№ 2	12	5	4	4
	№ 3	12	5	4	5
	№ 4	12	4	4	4
	№ 5	13	5	4	5
	№ 6	13	5	4	5
32	№ 1	13	5	4	5
	№ 2	13	5	4	5
	№ 3	13	5	4	5
	№ 4	13	5	4	5
	№ 5	13	4	4	4
	№ 6	13	4	4	4
48	№ 1	12	5	4	5
	№ 2	13	5	4	5
	№ 3	13	5	4	5
	№ 4	13	4	4	4
	№ 5	13	4	4	4
	№ 6	13	4	4	4
64	№ 1	12	6	4	5
	№ 2	12	5	4	5
	№ 3	12	5	4	5
	№ 4	12	4	4	4
	№ 5	12	4	4	4
	№ 6	12	4	4	4

При анализе выполненных измерений, выявилось, что максимальные значения смещений центра обработанного отверстия вследствие силовых деформации изгиба и кручения станины при максимальном расстоянии осей растачиваемых отверстий от стола спутника. Более подробное рассмотрение подлежат отверстия 1, 8 и 16. На рисунке 5.3 для примера представлены круглограммы отверстия 1. Круглограммы отверстий 8 и 16 показаны на рисунках В 5.1, В 5.2 (см. ПРИЛОЖЕНИЕ В.).

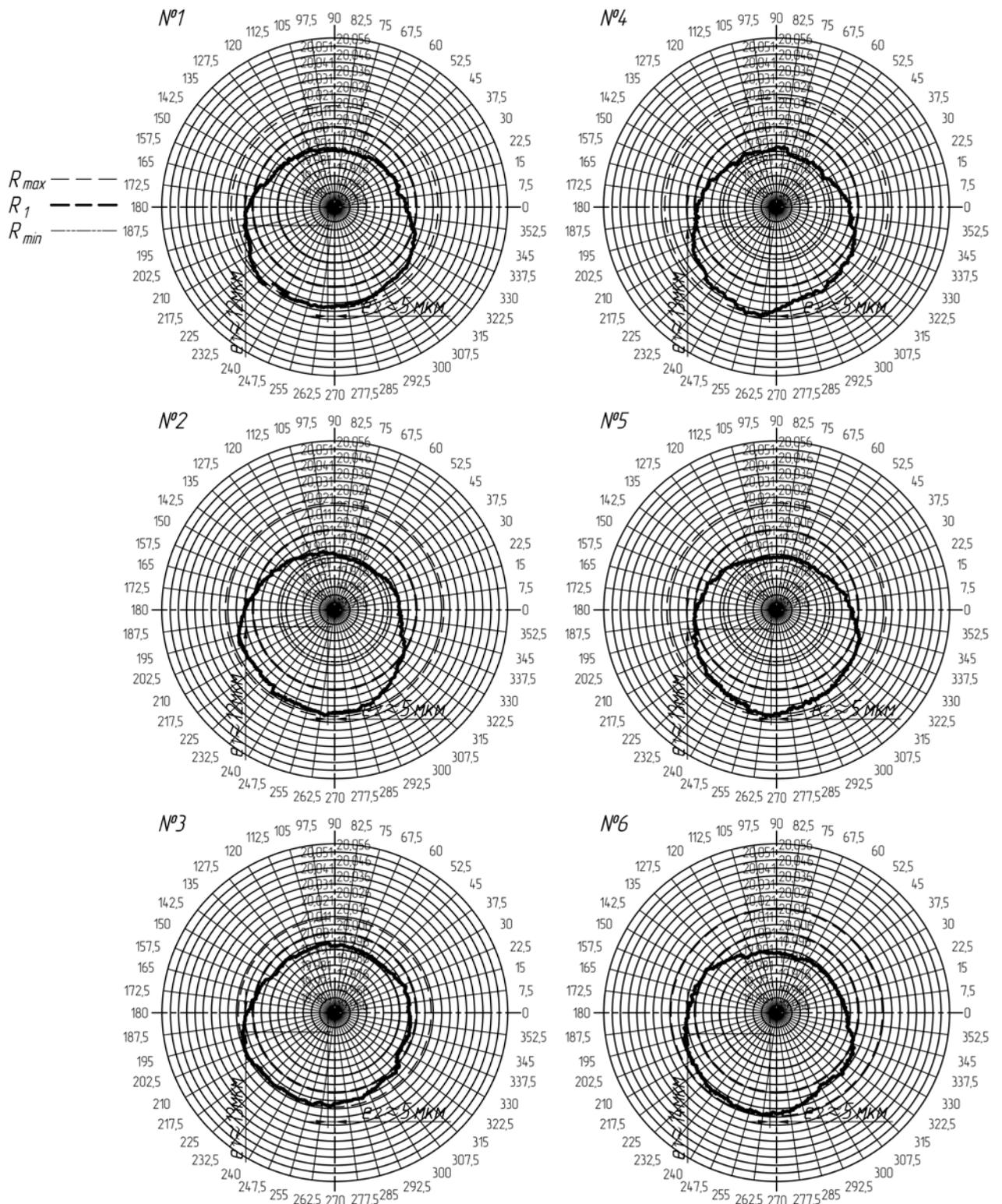


Рисунок 5.3 – Круглограммы отверстия 1, без применения системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС

5.2 Экспериментальные исследования повышения точности горизонтальных координатно-расточных станков, оснащенных устройством компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины

В процессе обработки корпусная заготовка была установлена на три опорные точки относительно зеркала стола.

Обработка корпусной заготовки выполнялась на станке оснащённом системой автоматической настройки технологической системы [123], которая позволила управлять пространственным положением стойки станка с помощью двух гидродомкратов.

На рисунке 5.4 для примера показаны круглограммы отверстия 1, полученные при обработке корпусной заготовки на опытно-промышленной установке, оснащённой системой компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС. Круглограммы отверстий 8 и 16 показаны на рисунках В 5.3, В 5.4 (см. ПРИЛОЖЕНИЕ В).

При анализе круглограмм было выявлено, что при использовании систем компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС смещения вследствие силовых деформаций кручения очень малы.

Далее будет приведен анализ смещения центра отверстий вследствие силовых деформаций несущей системы станка:

– при изгибе рассматриваются отверстия 1, 17, 33, 49; 8, 24, 40, 56; 16, 32, 48, 64 (таблица 5.1);

– при кручении рассматриваются отверстия 1, 4, 8, 12, 16 (таблица 5.1).

5.3 Оценка результатов экспериментальных исследований

При анализе значений представленных в таблице 5.1, видно, что при использовании системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС силовые деформации возникающие: при изгибе (вертикальные) станины (e_1) значительно уменьшаются; а при кручении (горизонтальные) (e_2) – практически исключаются.

В условиях реального производства простым и удобным способом методом статистического анализа обработки выбран метод точечных диаграмм [95]. В данном методе применяются малые текущие выборки.

На рисунках 5.5 – 5.8 показаны диаграммы, на которых видны величины смещений центра обрабатываемых отверстий выборок: – (1, 17, 33, 49); – (8, 24, 40, 56); – (16, 32, 48, 64); – (1, 4, 8, 12, 16).

По оси ординат указывается увод оси инструмента в вертикальном или горизонтальных направлениях, а по оси абсцисс номера сечений.

На рисунках 5.5–5.8 показаны графические изображения, отражающие в равномерной мере происходящие в процессе обработки отверстий, но нестабильный по положению центра отверстия. Обработка происходила без применения системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС.

На рисунках 5.9–5.11 8 показаны графические изображения, отражающие равномерный по рассеиванию процесс обработки. Так же видно, что значительно снизился увод оси инструмента. Обработка происходила с применением системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС

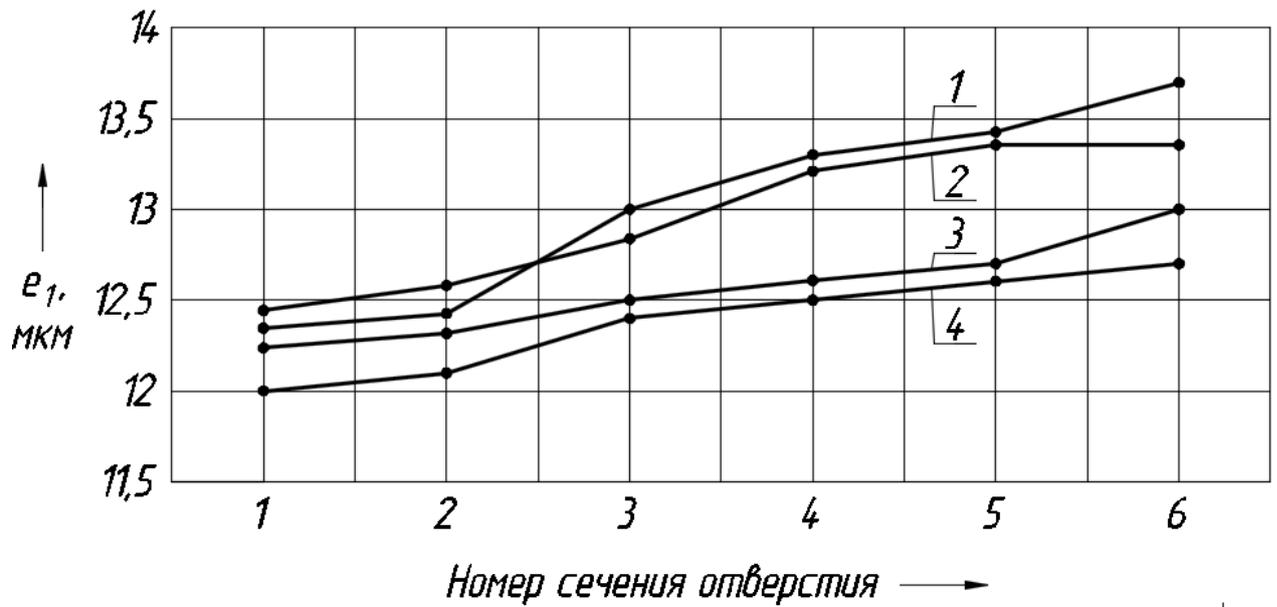


Рисунок 5.5 – Графическое изображение увода центра отверстий от изгибных деформаций станины e_1 , без применения системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС, где: 1 – отверстие №1; 2 – отверстие №17; 3 – отверстие №33; 4 – отверстие №49



Рисунок 5.6 – Графическое изображение увода центра отверстий от изгибных деформаций станины e_1 , без системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС, где: 1 – отверстие №8; 2 – отверстие №24; 3 – отверстие №40; 4 – отверстие №56



Рисунок 5.7 – Графическое изображение увода центра отверстий от изгибных деформаций станины e_1 , без применения системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС, где: 1 – отверстие №16; 2 – отверстие №32; 3 – отверстие №48; 4 – отверстие №64

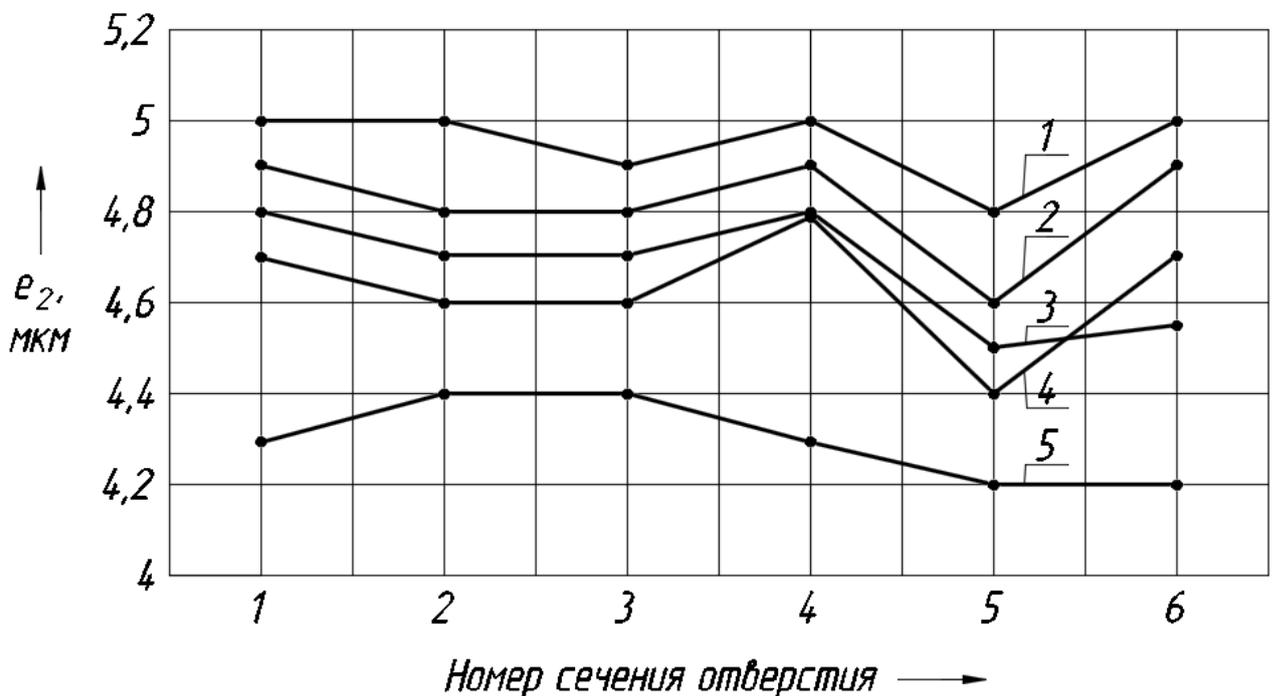


Рисунок 5.8 – Графическое изображение увода оси отверстий №1, 4, 8, 12, 16 от деформации кручения станины e_2 , без применения системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС, где: 1 – отверстие №1; 2 – отверстие №4; 3 – отверстие №8; 4 – отверстие №12; 5 – отверстие №16

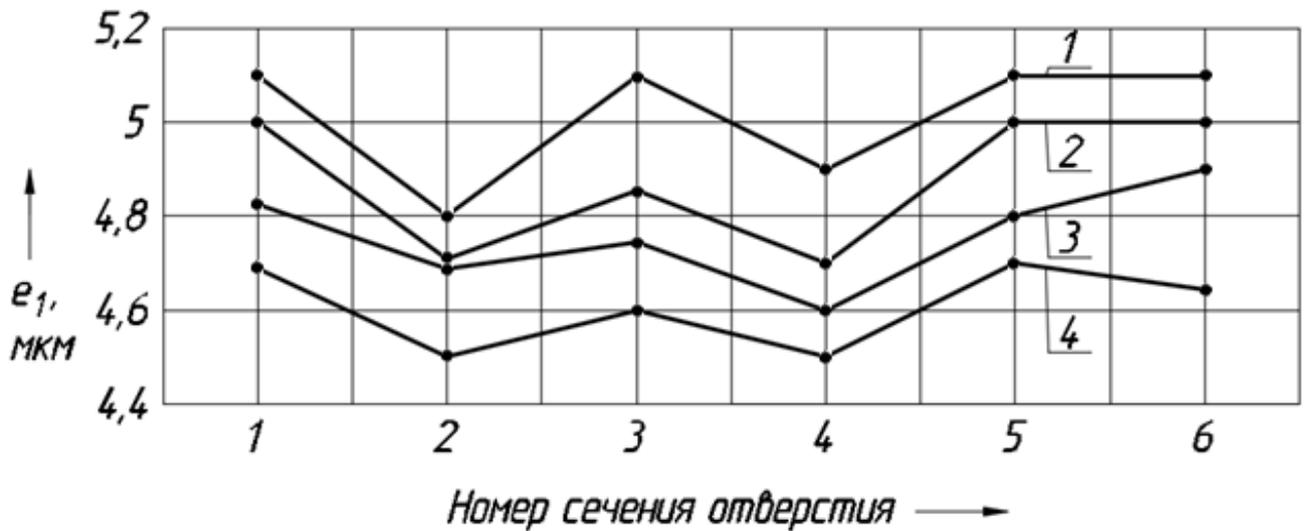


Рисунок 5.9 – Графическое изображение увода центра отверстий от изгибных деформаций станины e_1 , с применением системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС, где: 1 – отверстие №1; 2 – отверстие №17; 3 – отверстие №33; 4 – отверстие №49



Рисунок 5.10 Графическое изображение увода центра отверстий от изгибных деформаций станины e_1 , с применением системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС, где: 1 – отверстие №8; 2 – отверстие №24; 3 – отверстие №40; 4 – отверстие №56

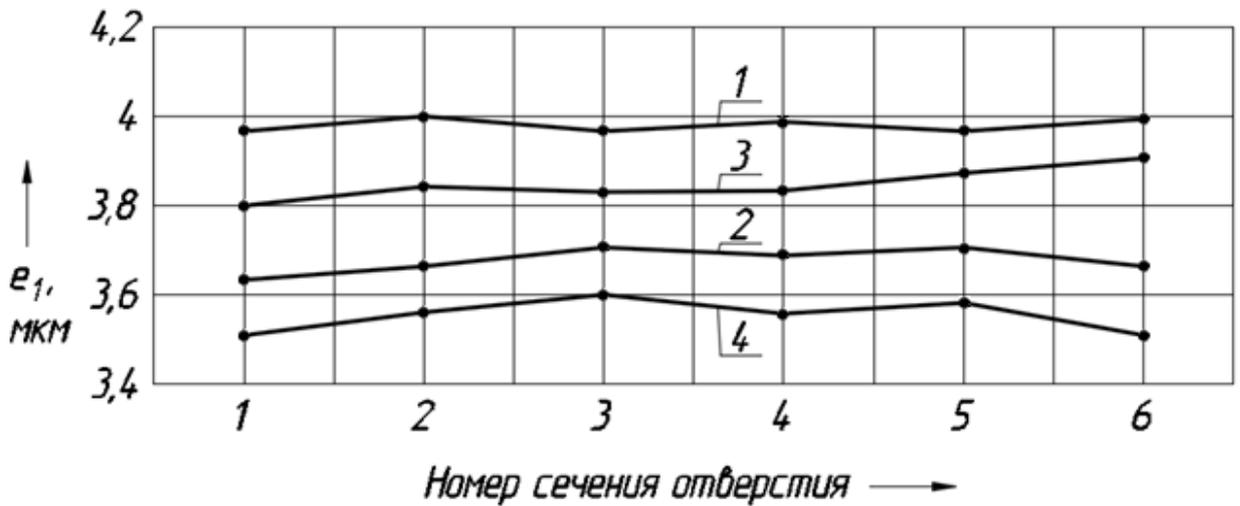


Рисунок 5.11 – Графическое изображение увода центра отверстий от изгибных деформаций станины e_1 , с применением системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС, где: 1 – отверстие №16; 2 – отверстие №32; 3 – отверстие №48; 4 – отверстие №64

На рисунке 5.12 показана графическое изображение смещения центра отверстий при обработке 64-х отверстий с применением и без применения системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС.

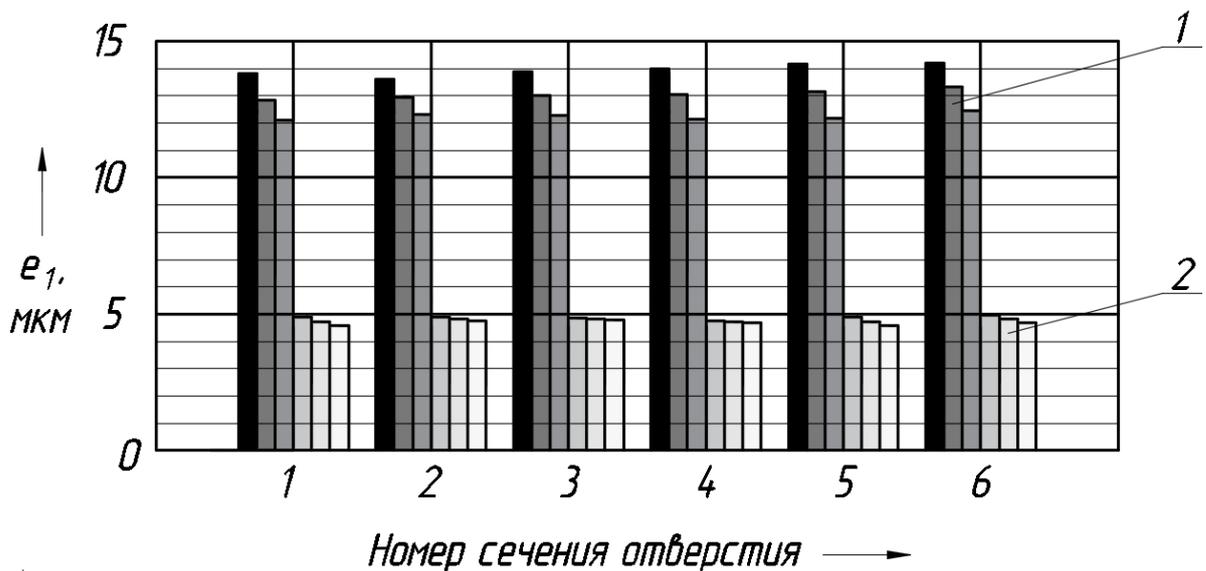


Рисунок 5.12 – Диаграмма увода оси отверстий от деформации изгиба станины e_1 , где: 1 – средняя ось 64-х отверстий, обработанных без применения системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС; 2 – средняя ось 64-х отверстий, обработанных с применением системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС

На диаграмме видно, что увод осей при обработки 64-х отверстий без применения системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС составляет от 13 до 15 мкм, а с применением от 4 до 5 мкм. Таким образом точность обработки повысилась более чем в 2 раза.

Выводы по пятой главе

1. Разработана методика экспериментальных исследований точности обработки на горизонтальных КРС, оснащенных устройством компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины.

2. Проведены экспериментальные исследования эффективности применения компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтальных КРС.

3. По результатам исследований получены точечные диаграммы на которых видно, что устройство компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтально КРС обеспечивает устойчивый и стабильный по рассеиванию процесс обработки и уменьшение величины смещения оси отверстий до 10 мкм.

4. Доказано, что разработанные технические решения, обеспечили: снижение величины увода оси обработанного отверстия от идеального более чем в 2 раза; снижение овальности растачиваемых отверстий примерно на 10%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены экспериментальные исследования упругой системы горизонтального КРС модели 2А459АМФ4, с составлением укрупнённого баланса его точности и выявления элементов упругой системы оказывающих наибольшее влияние на их снижение. Выявлено, что деформации изгиба и кручения станины составляют около 55 % в балансе упругих перемещений станка.

2. На основе принятых допущений разработана математическая модель контактных взаимодействий в стыке подсистемы «салазки – стойка станка». Выполнена оценка адекватности математической модели путем сравнения величин, полученных расчетным и экспериментальными методами. Установлено, что максимальное расхождение составляет около 12%.

3. Разработана математическая модель описывающая влияние изгибных деформаций станины, контактных взаимодействий в стыках подсистем «салазки - стойка станка» и «салазки - роликовые направляющие станины» на геометрическую точность станка. Установлено, что теоретические и экспериментальные исследования силовых деформаций имеют удовлетворительное совпадение, максимальное расхождение составило около 15%.

4. Разработана динамическая модель стойки горизонтального КРС с системой гидродомкратов как объект управления и найдены передаточные функции по отношению к управляющему и возмущающему воздействиям. Получены динамические структуры объекта управления, позволяющие синтезировать регулятор системы управления.

5. Разработана измерительная база «Устройство для контроля силовых деформаций станин КРС», конструктивное исполнение которой обеспечивает возможность измерения силовых деформаций изгиба горизонтального координатно-расточного станка (патент РФ на полезную модель № 142880).

6. Разработана измерительная база «Устройство для измерения силовых деформаций изгиба и кручения станин координатно-расточных станков», конструктивное исполнение которой обеспечивает возможность измерения силовых де-

формаций изгиба и кручения несущей системы горизонтального координатно-расточного станка (патент РФ на полезную модель № 140823).

7. Разработана измерительная база «Устройство для измерения силовых деформаций станины координатно-расточного станка», конструктивное исполнение которой позволяет повысить устойчивость измерительной базы (на основе гироскопического эффекта) для контроля силовых деформаций станин, (патент РФ на изобретение № 2575508).

8. Разработана методика экспериментальных исследований точности обработки на горизонтальных координатно-расточных станках, оснащенных устройством компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины.

9. Разработана опытно-промышленная установка, выполненная на базе горизонтального координатно-расточного станка модели 2А459АМФ4, позволяющая исследовать процесс компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины станка. В результате установлено, что использование упомянутой системы позволяет перевести станок из класса точности В в класс А.

10. Доказано, что разработанные технические решения, обеспечили: снижение величины увода оси обработанного отверстия от идеального более чем в 2 раза; снижение овальности растачиваемых отверстий примерно на 10%.

11. Результаты исследований были внедрены на Федеральном государственном унитарном предприятии «Научного конструкторско-технологического бюро» «ПАРСЕК» в рамках проблемы «Динамика, диагностика и надёжность технологического оборудования».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аверьянов, О.И. Системы автоматической смены инструментов / О.И. Аверьянов, С.И. Ковальцун, Ф.А. Осмоловский // Станки и инструмент. – 1981. - №2. С. 4-8.
2. Азаров, В.А. Исследование динамических характеристик шпинделя особо точного токарного станка / В.А. Азаров и др. // Станки и инструмент. – 2002. - №9. С. 10.
3. Атапин, В. Г. Проектирование несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков с учетом точности, производительности, массы / В. Г. Атапин // Вестник машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 3-6.
4. Атапин, В. Г. Расчет жесткости базовых деталей тяжелых столов при неравномерно распределенной нагрузке / В. Г. Атапин и др.// Вестник машиностроения. – 2000. – № 7. – С. 10-12.
5. Базров, Б.М. Математическое описание механизма образования кинематических погрешностей / Б.М. Базров и др. // В сб.: Вопросы кибернетики.- 1977. - № 97. - С. 44 - 46.
6. Базров, Б. М. Адаптивное управление станками / [Б. М. Базров, Б. С. Балакшин, И. М. Баранчукова и др.]; Под ред. Б. С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1973. – 686, [2] с.: ил.
7. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / Б. М. Базров. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2007. – 736 с. : ил. – ISBN 978-5-217-03374-4.
8. Базров, Б. М. Причины образования погрешностей обработки деталей. Адаптивное управление станками / под ред. Б. С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 3-6.
9. Базров, Б. М. Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 1978. – 216 с.
10. Базров, Б. М. Расчет точности машин на ЭВМ [Текст] / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 1984. – 256 с.

11. Базров, Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 2001. – 368 с.
12. Базров, Б. М. Анализ механизма образования погрешностей координирующих размеров поверхностей детали в процессе ее изготовления / Б. М. Базров, Г.Ш. Умаров // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 9. – С. 14-18.
13. Балакшин, Б. С. Теория и практика технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. В 2 кн. – М.: Машиностроение, 1982 – кн. 1. Технология машиностроения, 1982. – 203 с; кн. 2. Основы технологии машиностроения, 1982. – 367 с.
14. Балонкина, И. И. Точность и производственный контроль в машиностроении: справочник / И. И. Балонкина ; под общ. ред. А. К. Кутая, Б. М. Сорочкина. – Л.: Машиностроение, 1983. – 368 с., ил.
15. Бедняшин, А.Е. Способы повышения точности вращения шпинделей на опорах качения / А.Е. Бедняшин // Станки и инструмент. – 2001. - №4. С. 14.
16. Безъязычный, В.Ф. Обеспечение качества поверхностного слоя и точности деталей при токарной обработке на станках с ЧПУ путем научно обоснованного динамического изменения режимов резания / В.Ф. Безъязычный, В.А. Козлов, А.В. Пудов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. - №11. – С. 13-20.
17. Бендет, Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендет, А. Пирсол. - М.: Мир, 1971. - 408 с.
18. Бржозовский, Б. М. Устойчивость движений механической системы при шлифовании / Б. М. Бржозовский и др. // Автоматизация и современные технологии. – 2003. – №8. – С. 13-15.
19. Бржозовский, Б.М. Повышение точности бесцентрового суперфиниширования / Б. М. Бржозовский и др. // Станки и инструмент. – 2001. - №9. С. 3.
20. Бржозовский, Б. М. Повышение качества процесса внутреннего шлифования за счет обеспечения оптимальных динамических условий обработки / Б. М. Бржозовский и др. // Автоматизация и современные технологии. –2003. – №11. – С. 34-36.

21. Бржозовский, Б.М. Управление точностью настройки размера на токарных станках на основе оптимальной схемы измерения / Б.М. Бржозовский, В. В. Мартынов, О. В. Захаров // СТИН. – 2014. – № 2. – С. 14-16.
22. Бурцев, В. М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / В. М. Бурцев [и др.]; под ред. А. М. Дальского : в 2 т. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. – 564 с.
23. Бушуев, В. В. Компенсация упругих деформаций в станках / В. В. Бушуев // Станки и инструмент. – 1991. – № 3. – С. 42-46.
24. Бушуев, В. В. Жесткость станков / В. В. Бушуев // СТИН. – 1996. – № 8. – С. 26-32; № 9. – С. 17-20.
25. Васильев, А. С. Суммарная погрешность обработки и взаимное влияние ее составляющих / А. С. Васильев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1999. – № 2-3. – С. 89-96.
26. Галицков, С. Я. Исследование системы автоматического управления положением корпусных деталей станков с учетом многосвязности объекта : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Галицков Станислав Яковлевич. – Куйбышев. : КПТИ, 1975.
27. Галицков, С. Я. Методы анализа качества электромеханических систем управления промышленными установками / С. Я. Галицков, В. Е. Лысов, П. Г. Кравцов. – Куйбышев. : КПТИ, 1983. – 99 с.
28. Горшков, Б. М. Повышение точности координатно-расточных станков путем автоматического управления элементами упругих систем / Б. М. Горшков // Автоматизация и современные технологии. – 2003. – № 7 – С. 26-29.
29. Горшков, Б. М. Повышение точности в рабочем пространстве многоцелевых координатно-расточных станков / Б. М. Горшков // Машиностроительная техника и технологии. – 2003. – № 3 – С. 23-25.
30. Горшков, Б. М. Повышение точности прецизионных станков с составными станинами / Б. М. Горшков. – Саратов: Саратов. гос. ун-т, 2004. – 184 с. : ил.
31. Горшков, Б. М. Исследование влияния затянутого стыка составной станины прецизионного станка на уровень относительных колебаний подсистемы

“инструмент-заготовка” / Б. М. Горшков // Наука – Производство. – 2003. – № 11. – С. 25,26.

32. Горшков, Б. М. Экспериментальное исследование влияния упругих перемещений в затянутом стыке составной станины прецизионного координатно-расточного станка на точность обработки / Б. М. Горшков, О. И. Драчев // Металлообработка. – 2004. – № 1 (19). – С. 35-37.

33. Горшков, Б. М. Расчет упругих перемещений в затянутом стыке составной станины прецизионного КРС / Б. М. Горшков // Наука – Производство. – 2004. – № 4. – С. 12-14.

34. Горшков, Б. М. Повышение точности технологических систем с составными станинами методом автоматической компенсации их деформаций: автореф. дис. ...доктора техн. наук : 05.03.01 / Горшков Борис Михайлович. – Тольятти, 2005.

35. Горшков, Б. М. Исследование технологических систем прецизионных горизонтальных координатно-расточных станков методом конечных элементов / Б. М. Горшков, Н. С. Самохина, О. Ю. Ремнева // Металлообработка. – 2013. – № 12354. – С. 12-65.

36. Горшков, Б.М. Опытно-экспериментальная установка для оценки эффективности повышения точности координатно-расточных станков / Б. М. Горшков [и др.] // Вектор науки. – 2011. – № 2 (16). – С.119-122.

37. Горшков, Б.М. Методика исследования обработки на прецизионном технологическом оборудовании / Б.М. Горшков, О.Ю.Ремнева, М.А. Рубцов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2014. – № 4 – С. 149-151.

38. Горшков, Б.М. Методика экспериментального исследования взаимосвязи упругих силовых деформаций несущей системы станка на точности обработки / М.А. Рубцов, Б.М. Горшков, О.Ю. Ремнёва // Сборник научных трудов I международной заочной научно-технической конференции «Технологическое обеспечение машиностроительных производств» – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 392-396.

39. Горшков, Б.М. Система статической настройки прецизионного горизон-

тального координатно-расточного станка / М.А. Рубцов, Б.М. Горшков, О.Ю. Ремнёва // Труды XVII Международного форума по проблемам науки, техники и образования – М.: Академия наук о Земле, 2013. – С. 103-105.

40. Горшков, Б.М. Методика экспериментального исследования взаимосвязи упругих силовых деформаций несущей системы станка на точности обработки / М.А. Рубцов, Б.М. Горшков // Сборник докладов 28-ой международной научной конференции на Машинно-технологическом факультете на ТУ – София «70 years FIT» – Болгария, Созопль, 2015. – С.231-234.

41. Демкин, Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 227 с.

42. Дьяконова, Н. П. Оценка точности металлорежущих станков по характеристикам жесткости / Н. П. Дьяконова // Станки и инструмент. – 1984. – № 9. – С. 6, 7.

43. Егоров, А. И. Основы теории управления / А. И. Егоров. – М. : Физматлит, 2004. – 504 с.

44. Заковоротный, В. Л. Определение оптимальных аттракторов формообразующих движений при обработке глубоких отверстий малого диаметра / В. Л. Заковоротный [и др.] // СТИН. – 2006. – № 1. – С. 2-7.

45. Зибров, П. Ф. Теория смазки микрошероховатых поверхностей скольжения в технологии машиностроения / П. Ф. Зибров. – Тольятти. : ТолПИ, 1999. – 200 с.

46. Иванов, А. С. Совершенствование методики расчета и конструирования резьбовых соединений, нагруженных отрывающей силой и опрокидывающим моментом / А. С. Иванов, Д. Н. Решетов // Вестник машиностроения. – 2001. – № 4. – С. 30–36.

47. Ивахненко, А.Г. Автоматизация проектных работ на стадии структурного синтеза металлорежущих систем / А.Г. Ивахненко // Сб. науч. трудов «Проектирование технологических машин». - М.: МГТУ, Станкин, 1997. – С. 9-14.

48. Исилевич, Г. Б. Концентрация напряжений и деформаций в деталях машин [Текст] / Г. Б. Исилевич. – М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.

49. Каганов, В. С. Математическое моделирование несущей системы станков / В. С. Каганов [и др.] // СТИН. – 2003. – № 3. – С. 6-10.
50. Кирилин, Ю. В. Моделирование подвижного и неподвижного стыков металлорежущего станка / Ю. В. Кирилин, П. Е. Дышловенко, Н. В. Еремин // СТИН. – 2003. – № 9. – С. 22-28.
51. Кирилин, Ю. В. Методика моделирования несущей системы станка / Ю. В. Кирилин, В. П. Табаков, Н. В. Еремин // СТИН. – 2004. – № 6. – С. 13-17.
52. Кирилин, Ю. В. Особенности моделирования стыков базовых деталей станков / Ю. В. Кирилин, Н. В. Еремин // СТИН. – 2007. – № 9. – С. 7-11.
53. Коваль М.И. Некоторые способы повышения точности обработки на станках с ЧПУ / М.И. Коваль, Г.А. Игонин // Станки и инструмент. – 1979. - №2. - С. 10.
54. Косаревский, С. В. Интеграция контроля с помощью измерительно-вычислительных комплексов в современное машиностроение / С. В. Косаревский // Машиностроитель. – 2008. – № 11. – С. 48-51.
55. Косов, М. Г. Моделирование контактной жесткости деталей с учетом рельефа шероховатости их поверхности / М. Г. Косов, А. А. Корзаков // СТИН. – 2003. – № 12. – С. 23-25.
56. Корсаков, В.С. Основы технологии машиностроения /В.М. Кован, В.С. Корсаков, А.Г. Косилова и др.. - М.: Машиностроение, 1977. – С. 416.
57. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
58. Кудинов, А. В. Проблемы моделирования при конструировании сверхточных станков / А. В. Кудинов // СТИН. – 2004. – № 3. – С. 3-9.
59. Куликов, М.Ю. Повышение точности тонкого точения на основе анализа возникающих тепловых деформаций и износа инструмента / М.Ю. Куликов, Н. А. Можин, К. В. Гришин // Вестник машиностроения. - 2006. - №12. - С. 47-49.
60. Левина, З. М. Контактная жесткость машин З. М. Левина, Д. Н. Решетов. – М. : Машиностроение, 1971. – 264 с.
61. Левина, З.М. Расчет статических и динамических характеристик шпин-

дельных узлов методом конечных элементов / З.М. Левина, И.А. Зверев // Станки и инструмент. - 1986. - №8. - С. 6-9.

62. Левина, З.М. Расчетный анализ деформационных, динамических и температурных характеристик шпиндельных узлов при проектировании / З.М. Левина, И.Г. Горелик, И.А. Зверев, А.П. Сегида. - М.: ЭНИМС, 1989. – 64 с.

63. Лизогуб, В.А. Влияние параметров шпиндельного узла станка на точность обработки деталей / В.А. Лизогуб // Станки и инструмент. – 2003. - №3. - С.16.

64. Лучкин, В. К. Привод микроперемещений и микроподач для станков с ЧПУ / В. К. Лучкин // Машиностроитель. – 2007. – № 5. – С. 41-44.

65. Максименко, А. А. Экспериментальный комплекс для исследования контактного взаимодействия в пределах трения покоя / А. А. Максименко, Н. В. Перфильева, Н. В. Котенева // Изв. вузов. Машиностроение. – 2002. – № 4. – С. 3-7.

66. Маркарьян, Ю. А. Управление процессом глубокого сверления / Ю. А. Маркарьян // СТИН. – 2007. – № 6. – С. 5-7.

67. Пахмуров, В. А. Использование метода конечных элементов для анализа конструкции базовых деталей тяжелых станков / В. А. Пахмуров, А. Я. Шалдыбин // Станки и инструмент. – 1992. – № 2. – С. 11-13.

68. Пестов, С. П.О. Точность настройки станков с ЧПУ на обработку отверстий / С. П. Пестов, П. Г. Мазеин // СТИН. – 2006. – № 11. – С. 5-9.

69. Пестунов, В. М. Компенсация упругой деформации технологической системы станков / В.М. Пестунов // СТИН. – 1999. – № 4. – С. 38-42.

70. А. с. 519284 СССР. Прецизионная станина [Текст] / В. Г. Абрамов, С. А. Антонов, Б. Б. Мездрогин (СССР). – 1976. Бюл. № 24.

71. Проников, А.С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем : справочник-учебник в 3 ч. Ч. 1. Проектирование металлорежущих станков / А. С. Проников [и др.]; под общей ред. А. С. Проникова. – М. : Машиностроение, 1994. – 443 с. : ил.

72. Проников, А.С. Проектирование металлорежущих станков и станочных

систем : справочник-учебник в 3 ч. Ч. 2. Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А. С. Проников [и др.]; под общей ред. А. С. Проникова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995. – 320 с.

73. Проников, А.С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем : справочник-учебник в 3 ч. Ч. 3. Проектирование станочных систем / под общей ред. А. С. Проникова – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; изд- во МГТУ “Станкин”, 2000. – 584 с.

74. Прошин, А. А. Оптимизация систем автоматической поднастройки металлорежущих станков в условиях ГПС / А. А. Прошин, В. Е. Алехнович // Станки и инструмент. – № 10. – 1992. – С. 3-6.

75. Пуш, В. Э. Конструирование металлорежущих станков / В. Э. Пуш. – М. : Машиностроение, 1977. – 390, [2] с. : ил.

76. Рава, Ж. С. Новое в повышении точности станков / Ж. С. Равва. – Куйбышев : Куйбыш. кн. изд-во, 1974. – 335 с.

77. Ремнева, О. Ю. Корпусная заготовка с комплексом гидродомкратов как объект управления / О. Ю. Ремнева, Н. С. Самохина, Б. М. Горшков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – № 12354. – С. 12-65.

78. Ремнева, О. Ю. Повышение точности обработки отверстий на горизонтальных координатно-расточных станках путем автоматической стабилизации взаимного расположения их осей с осью инструмента: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.07, 05.13.06 / Ремнёва Оксана Юрьевна. – Саратов : СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2013.

79. Решетов, Д. Н. Исследование демпфирования колебаний в резьбовом соединении / Д. Н. Решетов, Н. В. Палочкина // Изв. вузов. Машиностроение. – 1972. – № 1. – С. 19-23.

80. Решетов, Д. Н. Справочные данные по контактной жесткости плоских стыков / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов // Вестник машиностроения. – 2002. – № 4. – С. 39-45.

81. Рубцов, М.А. Методика анализа силовых деформаций несущих систем станков при контактных взаимодействиях поверхностей / М.А. Рубцов // Вектор

науки Тольяттинского государственного университета. – 2016. – № 1 (35) – С. 35-41.

82. Рубцов, М.А. Стойка горизонтального координатно-расточного станка с комплексом гидродомкратов как объект управления / М.А. Рубцов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2016. – № 2 (36) – С. 59-66.

83. Рубцов, М.А. Пути повышения точности технологических систем / М.А. Рубцов, Б.М. Горшков // Сборник статей VII международной научно-практической конференции «Наука – промышленности и сервису» – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2012. – С. 531-533.

84. Рубцов, М.А. Система статической настройки прецизионного горизонтального координатно-расточного станка / М.А. Рубцов, О.Ю. Ремнёва, Б.М. Горшков // Сборник статей IX международной научно-технической конференции «Проблемы исследования и проектирования машин» – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2013. – С. 64-66.

85. Рубцов, М.А. Расчёт силовых деформаций несущих систем станков при контактных взаимодействиях поверхностей / М.А. Рубцов, Б.М. Горшков // Материалы Всероссийской научно-технической интернет-конференции «Высокие технологии в машиностроении» – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015. – С. 70-72.

86. Рубцов, М.А. Конструктивные особенности измерительных баз технологического оборудования / М.А. Рубцов, Б.М. Горшков // Сборник статей IX международной научно-практической конференции «Наука – промышленности и сервису» – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2014. – С. 318-324.

87. Рубцов, М.А. Повышение точности обработки корпусных заготовок на координатно-расточных станках путём автоматической статической настройки их технологической системы / М.А. Рубцов, Б.М. Горшков // Материалы VIII Международной научно-технической конференции 19-21 мая 2016 г. «Наукоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения» – М.: Техполиграф-центр, 2016 – С. 192-195.

88. Рыжов, Э. В. Качество поверхности и контактирования деталей машин / Э. В. Рыжов, Н. Б. Демкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

89. Салов, И. Д. Контроль выходных параметров точности прецизионных металлорежущих станков / И. Д. Салов // СТИН. – 1994. – № 1. – С. 8-12.
90. Самохина, Н. С. Повышение точности технологических систем горизонтальных координатно-расточных станков методом стабилизации положения их элементов: автореф. дис... канд. техн. наук : 05.03.01, 05.13.06 / Самохина Наталья Станиславовна. – Самара : СГТУ, 2006.
91. Самохина, Н. С. Экспериментальная установка для оценки эффективности повышения точности координатно-расточных станков методом стабилизации положения обрабатываемой заготовки и оси шпиндельного узла / Н. С. Самохина [и др.]. – Самара, Известия СНЦ РАН, 2006. – С. 121-127.
92. Санкин, Ю. Н. Динамика несущих систем металлорежущих станков [Текст] / Ю. Н. Санкин. – М. : Машиностроение, 1986. – 96 с.
93. Серегин, А. А. Определение точности металлорежущих систем / А. А. Серегин // Станки и инструмент. – 1991. – № 1. – С. 29-31.
94. Соломенцев, Ю.М. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов и др. - М.: Машиностроение, 1980. - 536 с.
95. Солонин, И. С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И. С. Солонин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 216с.
96. Стародубов, В. С. Точность металлорежущих станков с ЧПУ и способы ее повышения / В. С. Стародубов // Вестник машиностроения. – 2000. – № 5. – С. 36-40.
97. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.
98. Суслов, А.Г. Качество машин / А. Г. Суслов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1995. – Т.1. – 256 с.
99. Суслов, А. Г. Влияние технологического наследования на качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов, А. С. Васильев, С. О. Сухарев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1999. – № 1. – С. 69-76.

100. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
101. Суслов, А. Г. Обеспечение качества обработанных поверхностей с использованием самообучающейся технологической системы / А. Г. Суслов, Д. И. Петрешин // СТИН. – 2006. – № 1. – С. 21-24.
102. Сысоев, Ю. С. Установка крупногабаритных заготовок при их механической обработке / Ю. С. Сысоев, В. В. Маневич // Вестник машиностроения. – 1998. – № 6. – С. 14-20.
103. Тихомиров, В. П. Имитационное моделирование контактного взаимодействия деталей машин с шероховатыми поверхностями // Трение и износ. – 1990. – Т. 2 – № 4. – С. 607-614.
104. Токарев, Д. Г. Повышение точности технологических систем вертикальных координатно-расточных станков методом коррекции положения корпуса шпиндельной бабки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Токарев Дмитрий Геннадьевич. – Тольятти, 2010.
105. Украженко, К.А. Методика оценки и выбора типа инструментальной системы для многоцелевых станков / К.А. Украженко // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение.- М., 2003. - №4. - С. 96-105.
106. Украженко, К.А. Разработка и исследование методов повышения жесткости и быстросменности инструментальных систем многоцелевых станков: дис. док. техн. наук: 05.03.01 / К.А. Украженко. - М. - 2007. – 435 с.
107. А. с. 791466 СССР. Устройство компенсации силовых деформаций станины прецизионного станка / Ж. С. Равва, Г. В. Дергачев, Б. М. Горшков (СССР). – 1980. Бюл. № 48.
108. А. с. 1014679 СССР. Устройство автоматической компенсации силовых деформаций станины прецизионного станка / Б. М. Горшков, Б. А. Чудинов, Ж. С. Равва, С. Я. Галицков (СССР). – 1983. Бюл. № 16.
109. А. с. 494237 СССР. Устройство для установки высокоточных машин на фундамент / М. К. Варламов М.К., Нижник Е.Г., Китенко Е.А., Чирков В.А. (СССР). – 1975. Бюл. № 45.

110. А.с. № 1276445 СССР, МКИ В 23 В 47/26. Устройство для уравнивания подвижного органа / Б. М. Горшков, Ж. С. Равва, А. В. Осипов, В. Д. Батин (СССР). – № 3891428/25-08; заявл. 05.05.85; опубл. 15.12.86. Бюл. № 46. – 2 с.: ил.

111. Пат. 74839 Российская Федерация, МПК В23В 25/06, В 230 1/02. Устройство стабилизации силовых изгибных деформаций станины горизонтального координатно-расточного станка / Горшков Б. М., Краснов С. В., Самохина Н. С., Лысак Р. М., Вьюнов А. В., Загребин К. В.; заявитель и патентообладатель Волжский университет имени В.Н. Татищева. – № 2007142867/22 ; заявл. 19.11.07 ; опубл. 20.07.08, Бюл. № 20. – 4 с. : ил.

112. Пат. 82440 Российская Федерация, МПК В 23 Q 1/00. Устройство повышения точности прецизионного станка / Вьюнов А. В., Горшков Б. М., Трубачева С. И., Маршанская О. В., Самохина Н. С. ; заявитель и патентообладатель Волжский университет имени В.Н. Татищева. – № 2008149932/22 ; заявл. 04.12.08 ; опубл. 27.04.09, Бюл. № 12. – 14 с.: ил.

113. Пат. 85389 Российская Федерация, МПК В23 Q 23/00. Устройство компенсации взаимных угловых перемещений осей инструмента и растачиваемого отверстия / Самохина Н. С., Горшков Б. М., Денисенко А. Ф., Трубачева С. И., Маршанская О. В., Загребин К. В. ; заявитель и патентообладатель Волжский университет имени В.Н. Татищева. – № 2009101655/22 ; заявл. 19.01.09 ; опубл. 10.08.09, Бюл. № 22. – 7 с. : ил.

114. Пат. 89442 Российская Федерация, МПК В23Q17/24. Оптоэлектронное устройство измерения силовых деформаций станин прецизионных координатно-расточных станков / Горшков Б. М., Ведерников Д. А., Маршанская О. В., Силаева Е. В., Самохина Н. С.: заявитель и патентообладатель Горшков Б. М. [и др.]. – № 2009127028/22; заявл. 14.07.09 ; опубл. 10.12.09, Бюл. № 34. – 10 с. : ил.

115. Пат. 94495 Российская Федерация, МПК В 23 В 47/26. Устройство автоматического управления положением корпуса шпиндельной бабки на вертикальных направляющих стойки станка / Горшков Б. М., Токарев Д. Г., Маршанская О. В., Силаева Е. В., Иванов В. В., Самохина Н. С.; заявители и патентообла-

датели авторы. – № 2010104502/22; заявл. 09.02.10; опубл. 27.05.10, Бюл. № 15. – 3 с.: ил.

116. Пат. 105606 Российская Федерация, МПК В23Q 1/00. Устройство компенсации взаимных перемещений осей инструмента и обрабатываемого отверстия на координатно-расточном станке с горизонтальным расположением шпинделя / Ремнева О.Ю., Вылегжанин Д.В., Горшков Б.М., Самохина Н.С., Маршанская О.В.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный университет сервиса. – № 2011100237/02; заявл. 11.01.11; опубл. 20.06.11, Бюл. № 17. – 9 с.: ил.

117. Пат. 109035 Российская Федерация, МПК В23Q 17/00. Устройство для контроля силовых деформаций станин координатно-расточных станков / Ремнева О. Ю., Вылегжанин Д. В., Горшков Б. М., Самохина Н. С., Маршанская О. В.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный университет сервиса. – № 2011107461/02; заявл. 25.02.2011; опубл. 10.10.11, Бюл. № 28. – 6 с.: ил.

118. Пат. 109036 Российская Федерация, МПК В23Q 23/00. Устройство компенсации угловых смещений осей инструмента и обрабатываемого отверстия / Вылегжанин Д. В., Ремнева О. Ю., Горшков Б. М., Самохина Н. С., Шлегель О. Н.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный университет сервиса. – № 2010153446/02 ; заявл. 27.12.10 ; опубл. 10.10.11, Бюл. № 28. – 4 с. : ил.

119. Пат. 2280543 Российская Федерация, МПК В 23 В 47/26. Устройство управления подвижным узлом станка / Горшков Б. М., Галицков С. Я., Денисенко А. Ф., Токарев Д. Г., Самохина Н. С., Горшков А. Б. ; заявитель и патентообладатель Тольяттинский государственный университет. – № 2003103750/02 ; заявл. 07.02.03 ; опубл. 27.07.06, Бюл. № 21. – 3 с.: ил.

120. Пат. 136380 Российская Федерация, МПК В23Q 23/00. Устройство стабилизации положений осей обрабатываемого отверстия и инструмента / Рубцов М.А., Горшков Б. М., Самохина Н. С., Шлегель О.А., Диков Р.А.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный университет сервиса. – № 2013114036/02; заявл. 28.03.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 7 с.: ил.

121. Пат. 142880 Российская Федерация, МПК В23Q 17/00. Устройство для

контроля силовых деформаций станин координатно-расточных станков / Рубцов М.А., Горшков Б. М., Самохина Н. С.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный университет сервиса. – № 2013143594/02; заявл. 26.09.2013; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19. – 3 с.: ил.

122. Пат. 140823 Российская Федерация, МПК В23Q 17/00. Устройство для измерения силовых деформаций изгиба и кручения станин координатно-расточных станков / Рубцов М.А., Горшков Б. М., Самохина Н. С., Евграфов А.Н.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный университет сервиса. – № 2014102420/02; заявл. 24.01.2014; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14. – 3 с.: ил.

123. Пат. 2575508 Российская Федерация, МПК В23Q 17/00. Устройство для измерения силовых деформаций станины координатно-расточного станка / Рубцов М.А., Горшков Б. М., Самохина Н. С.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный университет сервиса. – № 2014136864/02; заявл. 10.09.2014; опубл. 20.02.2016, Бюл. № 5. – 4 с.: ил.

124. Хомяков, В. С. Оценка влияния стыков на точность станков / В. С. Хомяков, И. В. Тарасов // Станки и инструмент. – 1991. – № 7. – С. 13-17.

125. Хомяков, В.С. Инструментальная оснастка металлообрабатывающих станков / В.С. Хомяков, К. Шереметьев //Техномир. – 2006. - С.10-12.

126. Худобин, Л. В. Базирование заготовок и расчет точности механической обработки / Л. В. Худобин, М. А. Белов, А. Н. Янянин // Ульяновск: Ульяновский политехнический институт. – 1994. –С. 183.

127. Худобин, Л. В. Базирование заготовок при механической обработке / Л. В. Худобин, М. А. Белов, А. Н. Янянин // Старый Оскол: ТНТ. – 2015. –С. 247.

128. Чернянский, П. М. Силовые смещения и жесткость технологической системы / П. М. Чернянский, Н. П. Распопова // СТИН. – 1998. – № 12. – С. 13-17.

129. Эльясберг, М. Е. Автоколебания в металлорежущих станках / М. Е. Эльясберг. – СПб. : ОКБС, 1993. – 180 с.

130. Юркевич, В. В. Автоматизированные системы контроля и управления точностью обработки / В. В. Юркевич // Машиностроитель. – 2009. – № 4. – С. 28-

35.

131. Юркевич, В. В. Испытания, контроль и диагностика технологических систем [Текст] / В. В. Юркевич. – М : МГТУ «СТАНКИН», 2005. – 360 с.

132. Юркевич, В. В. Методы испытаний обрабатывающих станков / В. В. Юркевич // Машиностроитель. – 2006. – № 8. – С. 27-36.

133. Юсубов, Н. Д. Экспериментальное определение статической матричной характеристики податливости технологической системы / Н. Д. Юсубов // Машиностроитель. – 2007. – № 10. – С. 39-41.

134. Alexandr A. Severin, Boris M. Gorshkov, Oleg A. Shlegel The diagnostic set for the force experiences, the diagnostic of motorcar's electric motors. 6th International conference on advanced mechanical engineering & technology “AMTECH 2001”. – Sozopol, Bulgaria, 2001. Vol. 3, P. 64-67.

135. Alexandr A. Severin, Boris M. Gorshkov, Oleg A. Shlegel The computer diagnostic of technical station and forecasting of resource of car's details. 6th International conference on advanced mechanical engineering & technology “AMTECH 2001”. – Sozopol, Bulgaria, 2001. Vol. 3, P. 61-63.

136. A method of trueing up a work piece on a metal cutting machine tool work table and a work table for carrying the method into effect: Пат. 1392244 Великобритании. М. кл. B23Q 1/14 / S.A. Pevzner, V.E. Knore, 1975.

137. A structure for mounting measuring machines and machine tools: Пат. 1384344 Великобритании. М. кл. B23Q1/00 / Franco Sartorio, 1975.

138. Boris M. Gorshkov, Dmitry G. Tokarev Mathematical model of elastic system coordinate machine tool. 6th International conference on advanced mechanical engineering & technology “AMTECH 2001”. – Sozopol, Bulgaria, 2001. Vol. 3, P. 68-73.

139. Burdekin M., Voutsadopoulos C. Efficient axis calibration of coordinate machines. Glasgow, 1978.

140. Figner M., Maier H. Einstieg in CAD. Carl Hauser Verlag. München-Wien, 1985. 396 s.

141. Gravity sag compensation system: Пат. 3827333 США. М. кл. B23/C 1/02 / John E. Hurd, 1974.

142. General concept of accuracy of machine tools. "Specific and Tests Metal Cutt. Mach. Tools. Vol. 1". Manchester, s.a., 7-10.
143. Gorshkov Boris M. The INCREASING of ACCURACY LEVEL of MULTI-PURPOSE TURNING LATHES in the OPERATING SPACE. 7th International conference on advanced mechanical engineering & technology "AMTECH 2003". – Varna, Bulgaria, 2003. Vol. 3, P. 68-71.
144. Hoffer, T.M. Calibration of machine tool laser measurement system. Hewlett – Packard Company, USA.
145. I.Koch, I.Krzyzanowski and W.Scoczynki. Dämpfung in Verbindung stellen von Maschinen gestellen /Konstruktion. 36 (1984). h.1. – S. 23-29.
146. Lange K., Neitzert Th. Einsatzbereiche und Leistungsfähigkeit der Finite-Elemente Methode bei der Konstruktion von Werkzeugmaschinen und Werkzeugen. // "Zeitschrift fuer industriell Fertigung", 1980. № 70.
147. Method of training up heavy workpieces on the table of a Metal-cutting machine and such table for carrying said method into effect: Пат. 3807034 СССР. М. Кл. 90/58 R; 90/58 B / Semen Pevzner , Viktor Koirer., 1974.
148. Milner, D.A. Adaptive control feedrate in the milling process- "International Journal of Machine Tool Design and Research", 1974, 14, № 2, 187-197 p.
149. Moore W.R. One precision accrue pour les machines de domain. – "Mach. Mod.", 1976, № 805, P. 24-27.
150. Naiton H., Tadakuma S. Microprocessor – based Adjustable – speed DC Motor Drivers Using Model Reference Adaptive Control / IEEE Transactions on Industry Applications. 1987. Vol. 19-23. N2. – P. 313-318.
151. Paul G. Ranky. Computer Integrated Manufacturing. An Introduction with Case Studies. Prentice / Hall International, UK, Ltd., 1986. 513 p.
152. Reynolds O. On the Theory of Lubrication. Phil. Trans (A), vol. 197, 1986. – 256 p.
153. Rolf Stain Hilber. Flexible Festigung in den neunziger Jahren. Maschine und Werkzeug, 1990 – 1991, № 2 P. 30-37.

154. Sposob elektrooptycznego wykrywania i pomiaru, deformacje liniowych oraz ukłlad poniarowy do stosowania tegosposobu: Патент ПИР № 64065. М. кл. G01 В 5/30 / Latos Stanislav, Rodzynkiewicz Jerry. (Akademia Gorniczo – Huthicza), 1968.

155. Weck M. Werkzeugmaschinen. Band 2. Konstruktion und Berechnung. Düsseldorf; VDI – Verlag, 1985. 350 s.

156. Weck M. Werkzeugmaschinen. Band 2. Meßtechnische Untersuchung und Beurteilung. Düsseldorf; VDI – Verlag, 1985. 248 s.

ПРИЛОЖЕНИЕ А (Результаты экспериментальных исследований
упругих перемещений)

Результаты экспериментальных исследований упругих перемещений в стыке подсистемы “стол – салазки”

P, Н	y14	y16	y13	y15	z59	z60	z58
	x 10 ⁻³ , мм				x 10 ⁻³ , мм		
0	0	0	0	0	0,2	0,4	0
500	- 0,2	- 0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2
1000	- 0,2	- 0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,4
1500	- 0,4	- 0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2
2000	- 0,4	- 0,4	0,4	0,6	0,6	0,4	0,4
2500	- 0,6	- 0,5	0,4	0,6	0,6	0,4	0,6
3000	- 0,8	- 0,6	0,6	0,8	0,8	0,6	0,6
3500	- 0,8	- 0,8	0,8	0,6	0,8	0,6	0,8
4000	- 0,9	- 0,8	0,8	0,6	0,8	0,6	0,8
4500	- 1,0	- 0,9	1,0	0,8	1,0	0,8	1,0
5000	- 1,1	- 1,0	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
5500	- 1,1	- 1,0	1,2	1,1	1,2	1,0	1,2
6000	- 1,2	- 1,1	1,4	1,2	1,2	1,0	1,2
6500	- 1,4	- 1,3	1,6	1,4	1,4	1,2	1,4
7000	- 1,4	- 1,2	1,8	1,6	1,4	1,2	1,4
7500	- 1,6	- 1,4	1,8	1,8	1,6	1,4	1,6
8000	- 1,8	- 1,8	1,8	1,8	1,6	1,4	1,6
7500	- 1,8	- 1,8	1,6	1,6	1,6	1,4	1,4
7000	- 1,6	- 1,6	1,8	1,7	1,4	1,2	1,4
6500	- 1,6	- 1,4	1,6	1,6	1,4	1,0	1,2
6000	- 1,6	- 1,6	1,8	1,4	1,2	1,0	1,2
5500	- 1,2	- 1,4	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0
5000	- 1,1	- 1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
4500	- 1,0	- 1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	1,0
4000	- 0,9	- 1,0	0,9	0,8	0,8	0,6	0,8
3500	- 0,8	- 0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8
3000	- 0,8	- 0,6	0,8	0,6	0,8	0,6	0,8
2500	- 0,6	- 0,4	0,6	0,6	0,6	0,4	0,6
2000	- 0,4	- 0,4	0,4	0,4	0,6	0,4	0,6
1500	- 0,2	- 0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,4
1000	- 0,2	- 0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,4
500	0	- 0,2	0	0,2	0,2	0,4	0,2

z60	Σy_{164}	Σy_{153}	tg θ_{165}	tg θ_{143}	Σy_{143}	Σy_{165}	tg θ_{164}	tg θ_{153}
	$\times 10^{-3}$, мм		$\times 10^{-6}$, рад		$\times 10^{-3}$, мм		$\times 10^{-6}$, рад	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
- 0,2	- 0,2	0,2	- 0,4	- 0,4	0	0	0	0
- 0,2	- 0,2	0,2	- 0,4	- 0,4	0	0	0	0
0	- 0,3	0,4	- 0,6	- 0,8	0	0,1	0,286	0
- 0,2	- 0,4	0,5	- 1,0	- 0,8	0	0,1	0	0,286
- 0,4	- 0,55	0,5	- 1,1	- 1	- 0,1	0,05	0,143	0,286
- 0,4	- 0,7	0,7	- 1,4	- 1,4	- 0,1	0,1	0,286	0,286
- 0,6	- 0,8	0,7	- 1,4	- 1,6	0	- 0,1	0	- 0,286
- 0,8	- 0,85	0,7	- 1,4	- 1,7	- 0,05	- 0,1	0,143	- 0,286
- 1,0	- 0,95	0,9	- 1,7	- 2	0	- 0,05	0,143	- 0,286
- 0,8	- 1,05	1,1	- 2	- 2,3	0,05	0	0,143	- 0,286
- 1,0	- 1,05	1,15	- 2,1	- 2,3	0,05	0,05	0,143	- 0,143
- 1,2	- 1,15	1,3	- 2,3	- 2,6	0,1	0,05	0,143	- 0,286
- 1,2	- 1,35	1,5	- 2,7	- 3	0,1	0,1	0,143	- 0,286
- 1,2	- 1,3	1,7	- 2,8	- 3,2	0,2	0,2	0,286	- 0,286
- 1,6	- 1,5	1,8	- 3,2	- 3,4	0,1	0	0,286	0
- 1,6	- 1,8	1,8	- 3,6	- 3,6	0	- 0,1	0	0
- 1,4	- 1,8	1,6	- 3,4	- 3,4	- 0,1	0,05	0	0
- 1,4	- 1,6	1,75	- 3,3	- 3,4	0,1	0,05	0	- 0,143
- 1,2	- 1,5	1,6	- 3	- 3,2	0	0,05	0,286	0
- 1,2	- 1,6	1,6	- 3	- 3,4	0,1	- 0,1	0	- 0,571
- 1,0	- 1,3	1,3	- 2,6	- 2,6	0,1	- 0,1	- 0,286	- 0,286
- 1,0	- 1,15	1,2	- 2,4	- 2,3	0,05	0	- 0,143	0
- 0,8	- 1,0	1,0	- 2	- 2	0	0	0	0
- 0,8	- 0,9	0,85	- 1,8	- 1,8	0	- 0,1	- 0,143	- 0,143
- 0,8	- 0,8	0,8	- 1,6	- 1,6	0	0	0	0
- 0,8	- 0,7	0,7	- 1,2	- 1,6	0	0	0,286	- 0,286
- 0,6	- 0,5	0,6	- 1	- 1,2	0	0,1	0,286	0
- 0,6	- 0,4	0,4	- 0,8	- 0,8	0	0	0	0
- 0,4	- 0,2	0,2	- 0,4	- 0,4	0	0	0	0
- 0,2	- 0,2	0,2	- 0,4	- 0,4	0	0	0	0
- 0,2	- 0,1	0,1	- 0,4	0	0	0	- 0,286	0,286

Продолжение таблицы А 2.1

tgθ163	tgθ145	Σz570	Σz591	tgθ589	tgθ601	tgθ581
x 10 ⁻⁶ , рад		x 10 ⁻³ , мм		x 10 ⁻⁶ , рад		
0	0	0	0,3	- 0,25	- 0,5	- 0,428
- 0,4	0	0	0,3	0	- 0,75	- 0,428
- 0,4	0	0,1	0,3	0	- 0,5	- 0,285
- 0,7	- 0,143	0,1	0,3	- 0,25	- 0,25	- 0,285
- 0,9	- 0,143	0,1	0,5	- 0,25	- 0,75	- 0,57
- 1,05	- 0,214	0,1	0,5	0	- 1,0	- 0,57
- 1,4	- 0,286	0,1	0,7	0	- 1,25	- 0,857
- 1,5	0,143	0,1	0,7	0	- 1,5	- 0,857
- 1,55	0,071	0	0,7	0	- 1,75	- 1,0
- 1,85	0,071	0	0,9	0	- 2,25	- 1,28
- 2,15	0,071	0,1	1,0	0	- 2,25	- 1,28
- 2,2	0	0,1	1,1	0	- 2,5	- 1,42
- 2,45	0,071	0	1,1	0	- 2,75	- 1,42
- 2,85	0	0,1	1,3	0	- 3,0	- 1,7
- 3	0	0,1	1,3	0	- 3,0	- 1,7
- 3,3	0,143	0	1,5	0	- 3,75	- 2,14
- 3,6	0,143	0	1,5	0	- 3,75	- 2,14
- 3,4	- 0,214	0	1,5	- 0,25	- 3,5	- 2,14
- 3,35	0,071	0	1,3	0	- 3,25	- 1,857
- 3,1	- 0,071	0	1,1	0	- 2,75	- 1,57
- 3,20	0,286	0	1,1	0	- 2,75	- 1,57
- 2,6	0,286	0	1,0	0	- 2,5	- 1,428
- 2,35	0,071	0	1,0	0	- 2,5	- 1,428
- 2	0	0,1	0,9	0	- 2,0	- 1,142
- 1,75	0,143	0	0,7	0	- 1,75	- 1,0
- 1,6	0	0	0,7	0	- 1,75	- 1,0
- 1,4	0	0	0,7	0	- 1,75	- 1,0
- 1,1	- 0,143	0	0,5	0	- 1,25	- 0,71
- 0,8	0	0	0,5	0	- 1,25	- 0,71
- 0,4	0	0	0,3	0	- 0,75	- 0,428
- 0,4	0	0,1	0,3	0	- 0,5	- 0,285
- 0,2	0	0	0,3	0	- 0,75	- 0,428

Результаты экспериментальных исследований стыка
подсистемы “шпиндельная бабка – стойка”

Р, Н	x30	x32	x34	x31	x33	x35	z50	z52
	$\cdot 10^{-3}$, мм						$\cdot 10^{-3}$, мм	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	0,2	0,4	0,4	- 0,2	- 0,4	- 0,4	0,2	0,2
1000	0,4	0,2	0,4	- 0,4	- 0,4	- 0,4	0,2	0,2
1500	0,4	0,4	0,4	- 0,4	- 0,4	- 0,6	0,2	0,2
2000	0,6	0,6	0,6	- 0,6	- 0,6	- 0,6	0,2	0,2
2500	0,6	0,6	0,6	- 0,6	- 0,6	- 0,8	0,2	0,3
3000	0,6	0,8	0,8	- 0,6	- 0,6	- 0,8	0,4	0,4
3500	0,8	0,8	0,8	- 0,8	- 0,8	- 0,8	0,4	0,4
4000	0,8	0,8	0,8	- 0,8	- 0,8	- 0,8	0,4	0,6
4500	0,8	0,8	0,8	- 1,0	- 1,0	- 1,0	0,6	0,6
5000	1,0	1,0	1,0	- 1,0	- 1,0	- 1,0	0,6	0,8
5500	1,2	1,0	1,0	- 1,4	- 1,2	- 1,0	0,8	0,8
6000	1,2	1,2	1,2	- 1,4	- 1,2	- 1,2	0,8	0,9
6500	1,4	1,4	1,2	- 1,4	- 1,2	- 1,2	1,0	1,0
7000	1,6	1,4	1,4	- 1,4	- 1,4	- 1,4	1,0	1,1
7500	1,8	1,8	1,6	- 1,6	- 1,6	- 1,6	1,0	1,1
8000	1,8	1,8	1,8	- 1,8	- 1,8	- 1,8	1,2	1,2
7500	1,8	1,8	1,8	- 1,6	- 1,8	- 1,8	1,2	1,1
7000	1,6	1,6	1,6	- 1,6	- 1,6	- 1,6	1,0	1,1
6500	1,6	1,6	1,6	- 1,6	- 1,4	- 1,8	1,0	1,0
6000	1,4	1,6	1,4	- 1,4	- 1,4	- 1,4	0,8	1,0
5500	1,4	1,4	1,4	- 1,4	- 1,4	- 1,4	0,8	0,9
5000	1,2	1,2	1,2	- 1,4	- 1,4	- 1,2	0,8	0,8
4500	1,0	1,0	1,0	- 1,0	- 1,0	- 1,0	0,6	0,6
4000	1,0	1,0	1,0	- 1,0	- 1,0	- 1,0	0,6	0,6
3500	0,8	0,8	0,8	- 0,8	- 0,8	- 0,8	0,4	0,4
3000	0,8	0,8	0,8	- 0,6	- 0,6	- 0,6	0,4	0,4
2500	0,6	0,6	0,6	- 0,6	- 0,6	- 0,6	0,2	0,2
2000	0,6	0,6	0,	- 0,6	- 0,8	- 0,6	0,2	0,2
1500	0,4	0,4	0,4	- 0,4	- 0,4	- 0,8	0,2	0,2
1000	0,4	0,4	0,4	- 0,4	- 0,4	- 0,2	0,2	0
500	0,2	0,2	0,2	- 0,4	- 0,2	- 0,4	0	0

Продолжение таблицы А 2.2

z_{51}	z_{53}	Σx_{354}	Σx_{332}	Σx_{310}	$tg\theta_{320}$	$tg\theta_{340}$	$tg\theta_{353}$	$tg\theta_{331}$
$\times 10^{-3}$, мм		$\times 10^{-3}$, мм			$\times 10^{-6}$, рад			
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0,2	0	0	0	0,5	0,25	0	- 0,5
0,2	0,4	0	- 0,1	0	- 0,5	0	0	0
0,2	0,4	- 0,1	0	0	0	0	- 0,5	0
0,2	0,4	0	0	0	0	0	0	0
0,4	0,4	- 0,1	0	0	0	0	- 0,5	0
0,4	0,6	0	0	0	0,5	0,25	- 0,5	0
0,6	0,6	0	0	0	0	0	0	0
0,6	0,7	0	0	0	0	0	0	0
0,8	0,9	- 0,1	- 0,1	- 0,1	0	0	0	0
0,8	0,9	0	0	0	0	0	0	0
0,9	1,0	0	0	- 0,1	- 0,5	- 0,25	0,5	0,5
0,9	1,0	0	0	- 0,1	0	0	0	0,5
1,0	1,1	0	0,1	0	0	- 0,25	0	0,5
1,1	1,2	0	0	0,1	- 0,5	- 0,25	0	0
1,1	1,4	0	0,1	0,1	0	- 0,25	0	0
1,2	1,4	0	0	0	0	0	0	0
1,1	1,2	0	0	0,1	0	0	0	- 0,5
1,1	1,1	0	0	0	0	0	0	0
1,0	1,0	- 0,1	0,1	0	0	0	- 1,0	0,5
0,9	1,0	0	0,1	0	0,5	0	0	0
0,9	0,9	0	0	0	0	0	0	0
0,8	0,8	0	- 0,1	- 0,1	0	0	0,5	0
0,8	0,8	0	0	0	0	0	0	0
0,6	0,6	0	0	0	0	0	0	0
0,6	0,6	0	0	0	0	0	0	0
0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0
0,2	0,4	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0,2	0	- 0,1	0	0	0	0,5	- 0,5
0,2	0,2	- 0,2	0	0	0	0	- 1,0	0
0,2	0,2	0,1	0	0	0	0	0,5	0
0	0,2	- 0,1	0	0	0	0	- 0,5	0,5

Продолжение таблицы А 2.2

tg0351	tg0352	tg0330	tg0350	Σz_{501}	Σz_{523}	tg0520	tg0531	tg0503
$\times 10^{-6}$, рад				$\times 10^{-3}$, мм		$\times 10^{-6}$, рад		
0	0	0	0	0	0	0	0	0
- 0,5	0	0	0	0,2	0,2	0	0	0
0	0,25	-0,125	0	0,2	0,3	0	0,25	- 0,25
- 0,5	- 0,25	0	- 0,125	0,2	0,3	0	0,25	- 0,25
0	0	0	0	0,3	0,3	0	0,25	0
- 0,5	- 0,25	0	- 0,125	0,4	0,35	0,125	0	0,125
- 0,5	0	0	0	0,5	0,5	0	0,25	0
0	0	0	0	0,5	0,5	0	0	0
0	0	0	0	0,7	0,65	0,25	0,125	0,125
0	0	0	0	0,8	0,75	0	0,125	0,125
0	0	0	0	0,85	0,85	0,25	0,125	0
0,5	0	0,125	0,125	0,9	0,85	0	0,125	0,125
0,25	0	0,125	0,125	1,0	0,95	0,125	0,125	0,125
0,25	0,25	0,125	0	1,1	1,05	0	0,125	0,125
0	0	- 0,125	- 0,125	1,1	1,15	0,125	0,125	- 0,125
0	- 0,25	0	- 0,125	1,2	1,25	0,125	0,375	- 0,125
0	0	0	0	1,1	1,3	0	0,25	- 0,5
- 0,25	0	- 0,125	- 0,125	1,1	1,15	- 0,125	0,125	- 0,125
0	0	0	0	1,0	1,1	0,125	0	- 0,25
- 0,25	0	0,125	- 0,125	0,95	1,0	0	0	- 0,125
0	- 0,25	0,125	0	0,9	1,0	0,25	0,125	- 0,25
0	0	0	0	0,8	0,9	0,125	0	- 0,25
0,25	0,25	0	0,125	0,7	0,8	0	0	- 0,25
0	0	0	0	0,6	0,7	0	0	- 0,25
0	0	0	0	0,4	0,6	0	0	- 0,5
0	0	0	0	0,3	0,4	0	0	- 0,25
0	0	0	0	0,2	0,4	0	0	- 0,5
0	0	0	0	0,2	0,2	0	0,25	0
0	0,25	- 0,125	0	0,2	0,2	0	0	0
-0,5	- 0,5	0	- 0,25	0,2	0,2	0	0	0
0,25	0,25	0	0,125	0,1	0,1	- 0,25	0	0
0	- 0,25	0	- 0,125	0	0,1	0	0,25	- 0,25

Продолжение таблицы А 2.2

Σz_{520}	Σz_{531}	tg θ_{523}	tg θ_{501}	tg θ_{521}
$\times 10^{-3}$, мм	$\times 10^{-3}$, мм	$\times 10^{-6}$, рад		
0	0	0	0	0
0,2	0,2	0,5	0,5	0
0,2	0,3	0,5	0,5	- 0,125
0,2	0,3	0,5	0,5	- 0,125
0,2	0,3	0,5	0,5	- 0,125
0,25	0,4	0,625	0,75	- 0,188
0,4	0,5	1	1	- 0,125
0,4	0,6	1	1,25	- 0,25
0,5	0,65	1,25	1,25	- 0,188
0,6	0,85	1,5	1,75	- 0,313
0,7	0,85	1,75	1,75	- 0,188
0,8	0,95	2	2,125	- 0,188
0,85	0,95	2,125	2,125	- 0,125
1,0	1,05	2,5	2,5	- 0,063
1,15	1,15	2,625	2,625	0
1,15	1,25	2,625	2,625	- 0,125
1,2	1,3	3	3	- 0,125
1,15	1,15	2,875	2,875	0
1,05	1,1	2,625	2,625	- 0,063
1,0	1,0	2,5	2,5	0
0,9	0,95	2,25	2,125	- 0,062
0,85	0,9	2,125	2,125	- 0,063
0,8	0,8	2	2	0
0,6	0,8	1,5	1,75	- 0,25
0,6	0,6	1,5	1,5	0
0,4	0,4	1	1,25	0
0,4	0,3	1	1	0,125
0,2	0,2	0,5	0,5	0
0,2	0,2	0,5	0,5	0
0,2	0,2	0,5	0,5	0
0,1	0,2	0,25	0,5	- 0,125
0	0,1	0	0	- 0,125

Результаты экспериментальных исследований упругих перемещений
в стыке подсистемы “салазки – станина стойки”

Р, Н	x36	x 38	x37	x39	y6	y8	y5	y7
	x 10 ⁻³ , мм				x 10 ⁻³ , мм			
0	2,5	4,5	1,5	2,5	0	0	0	0
500	2,7	4,3	1,3	2,7	0,2	0	0,2	0,2
1000	2,8	4,2	1,2	2,8	0,2	0	0,2	0,2
1500	3,0	4,0	1,0	2,9	0,2	0,2	0,2	0,4
2000	3,2	4,0	1,0	2,9	0,2	0,4	0,2	0,4
2500	3,4	3,8	0,8	3,1	0,2	0,4	0,4	0,4
3000	3,4	3,8	0,8	3,2	0,4	0,6	0,4	0,4
3500	3,6	3,7	0,7	3,4	0,4	0,6	0,4	0,5
4000	3,6	3,6	0,6	3,4	0,5	0,8	0,4	0,6
4500	3,6	3,7	0,7	3,3	0,6	0,8	0,6	0,6
5000	3,7	3,6	0,6	3,4	0,6	0,8	0,6	0,8
5500	3,8	3,5	0,5	3,5	0,8	0,8	0,8	0,8
6000	3,8	3,4	0,4	3,6	1,0	1,0	1,0	1,0
6500	4,0	3,2	0,2	3,8	1,0	1,2	1,0	1,2
7000	4,0	3,2	0,2	3,8	1,0	1,2	1,2	1,2
7500	4,1	3,2	0,2	3,8	1,2	1,2	1,4	1,3
8000	4,2	3,1	0,1	3,9	1,6	1,4	1,6	1,4
7500	4,2	3,1	0,1	3,9	1,2	1,2	1,2	1,3
7000	4,0	3,1	0,1	3,9	1,0	1,0	1,0	1,2
6500	4,0	3,1	0,1	3,9	1,0	1,0	1,0	1,0
6000	3,8	3,4	0,4	3,6	0,8	0,8	0,8	1,0
5500	3,8	3,5	0,5	3,5	0,8	0,8	0,8	1,0
5000	3,7	3,6	0,6	3,4	0,6	0,6	0,6	0,8
4500	3,6	3,6	0,6	3,4	0,4	0,4	0,6	0,8
4000	3,5	3,7	0,7	3,3	0,4	0,4	0,4	0,6
3500	3,4	3,8	0,8	3,2	0,2	0,2	0,4	0,4
3000	3,4	3,8	0,8	3,2	0,2	0,2	0,4	0,4
2500	3,4	3,8	0,8	3,2	0	0,2	0,2	0,2
2000	3,2	4,0	1,0	3,1	0	0,2	0,2	0,2
1500	3,0	4,0	1,0	3,0	0	0	0,2	0,2
1000	2,9	4,1	1,1	3,0	0	0	0	0
500	2,8	4,2	1,2	2,8	0	0	0	0

Продолжение таблицы А 2.3

Σx_{376}	Σx_{389}	tg θ_{076}	tg θ_{386}	tg θ_{397}	tg θ_{379}
$\times 10^{-3}$, мм		$\times 10^{-6}$, рад			
2,0	3,5	0	2,2	1,1	
2,0	3,5	0,333	1,8	1,55	- 1,66
2,0	3,5	0,333	1,55	1,77	- 1,66
2,0	3,45	0,417	1,1	2,1	- 1,6
2,1	3,45	0,5	0,88	2,1	- 1,5
2,1	3,45	0,583	0,4	2,55	- 1,5
2,1	3,5	0,75	0,44	2,66	- 1,55
2,15	3,55	0,833	0,1	3,0	- 1,55
2,1	3,5	1	0	3,1	- 1,55
2,15	3,5	1,25	0,1	2,88	- 1,5
2,15	3,5	1,417	- 0,1	3,1	- 1,5
2,15	3,5	1,75	- 0,3	3,3	- 1,5
2,1	3,5	2,083	- 0,44	3,55	- 1,55
2,1	3,5	2,5	- 0,88	4,0	- 1,55
2,1	3,5	3	- 0,88	4,0	- 1,55
2,15	3,5	3,25	- 1,0	4,0	- 1,5
2,15	3,5	3,75	- 1,2	4,2	- 1,5
2,15	3,5	3,417	- 1,2	4,2	- 1,5
2,05	3,5	3,167	- 1,0	4,2	- 1,6
2,05	3,5	2,833	- 1,0	4,2	- 1,6
2,1	3,5	2,583	- 0,44	3,55	- 1,55
2,15	3,5	2,333	- 0,3	3,3	- 1,5
2,15	3,5	1,917	- 0,1	3,1	- 1,5
2,1	3,5	1,542	0	3,1	- 1,55
2,1	3,5	1,25	0,2	2,88	- 1,55
2,1	3,5	0,917	0,4	2,66	- 1,55
2,1	3,5	0,75	0,44	2,66	- 1,55
2,1	3,5	0,542	0,44	2,66	- 1,55
2,1	3,55	0,333	0,88	3,3	- 1,6
2,0	3,5	0,333	1,1	2,22	- 1,66
2,0	3,55	0,25	1,3	2,1	- 1,7
2,0	3,5	0,083	1,6	1,77	- 1,66

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (Математическое описание воздействия силовых деформаций несущей системы станка на его геометрическую точность)

Математическое описание воздействия силовых деформаций несущей системы станка на его геометрическую точность

Металлорежущие станки занимают основное положение в машиностроительном производстве. Обеспечение высокой точности металлорежущего оборудования очень важно, так как от этого зависит качество выпускаемых деталей [10, 13, 16, 25, 26, 38, 39, 43, 49 и др.]. Основным фактором влияющим на точность обработки являются силовые деформации несущих систем технологического оборудования [12, 14, 30, 72].

На рисунке Б 3.1 изображены перемещения вершины режущего инструмента точки C и точки F места касания инструмента и корпусной заготовки при условии, что станина занимает идеальное недеформированное состояние. Смещение при силовых деформациях кручения и изгиба станины стойки в плоскостях YOZ и YOX отмечаются углами α_1, φ_1 .

При изменении положения стойки станка станина испытывает силовые деформации кручения и изгиба, вследствие чего ось инструмента смещается на углы α_1, φ_2 . Силовые деформации изгиба и кручения станины, приводят к снижению точности станка.

Для представления перемещений станин стола и стойки станка, разложим их на составляющие изгиба и кручения станин в плоскостях YOZ и YOX (рисунок Б 3.2).

Плоскость заготовки YOZ принята как находящаяся в плоскости симметрии станка. Точки приложения реакций опор обозначены как O_1, O_2 и O_3 . Точка D расположена на одном уровне с O_2, O_3 , но в то же время равноудалена от них и находится в плоскости YOZ . Отсюда следует, что R_D является равнодействующей реакцией опор O_2 и O_3 . Точка A – точка пересечения сосредоточенной силы от объемной нагрузки, которая прикладывается подвижной стойкой, с поверхностью направляющих станины. Точка G является точкой приложения реакции установочной опоры заготовки, а R_G реакция в ней. S_1 и S_2

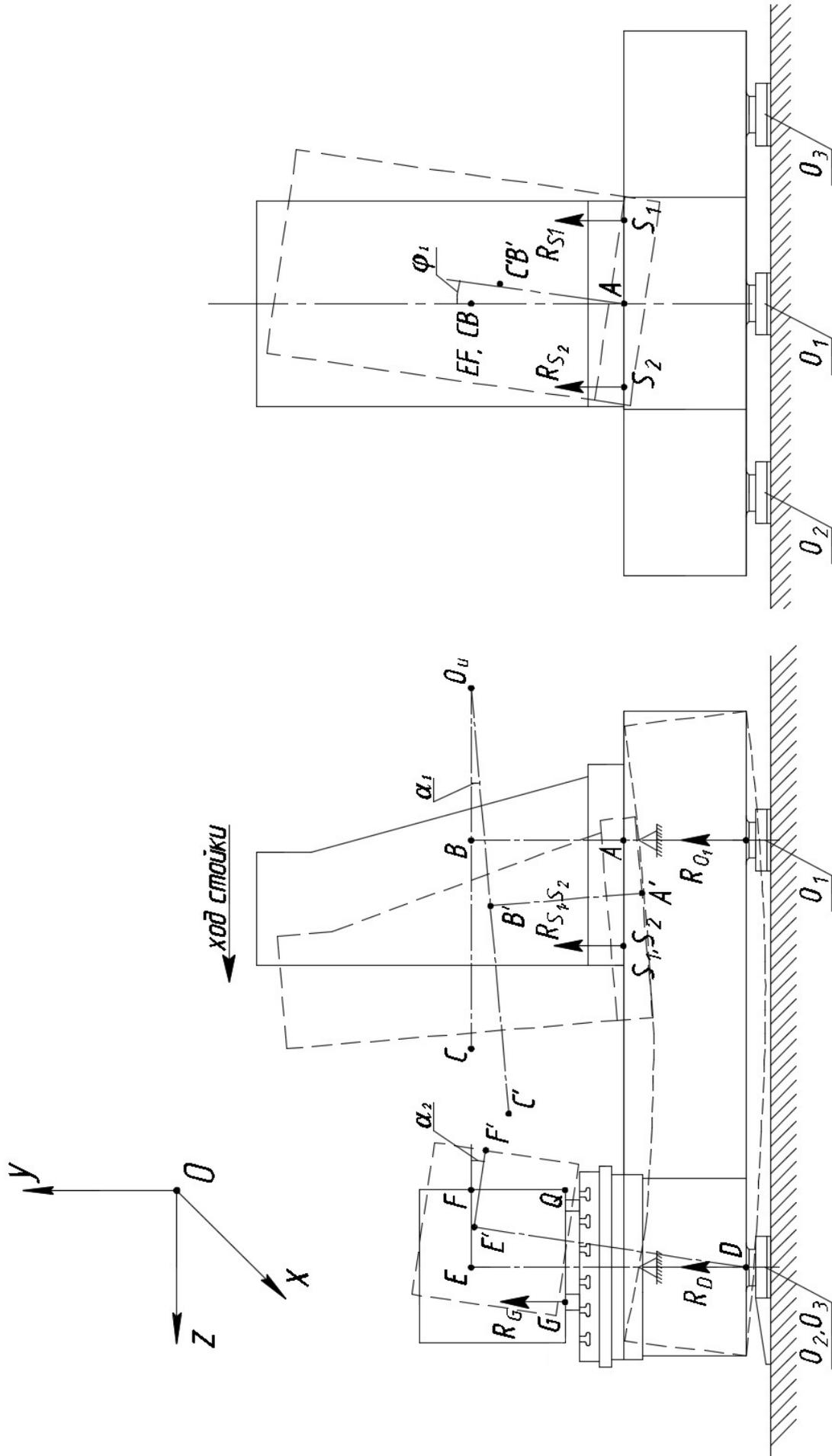


Рисунок Б 3.1 – Схема перемещений вершины режущего инструмента и оси обрабатываемого отверстия

приняты как точки приложения реакций гидродомкратов $12, 12'$, а R_{S1} и R_{S2} соответственно реакции в них. Точка Q – это точка пересечения передней грани заготовки с гранью основания. Пересечение оси инструмента и поверхности заготовки в плоскости YOX в начале обработки обозначается точкой F . Пересечение оси точки F с продолжением равнодействующей реакции R_D принята точка E . Соответственно точка пересечения оси инструмента с продолжением реакции R_{O1} принята как точка B .

Смещение оси инструмента от оси OY относительно точки A характеризует отрезок CB и обозначается углом α_1 , а отрезок EF характеризует смещение заготовки на угол α_2 от оси OY относительно точки D . Точки со штрихами означают положение после взаимных угловых перемещений.

Отрезок AA' (рисунок Б 3.2, б) определяет смещение стойки станка на угол α_1 относительно оси OZ . На рисунке Б 3.2, а показана проекция перемещения точки F на угол α_2 после силовых деформаций изгиба станины стойки и обозначается как $\Delta y_{o.изг.}$. Перемещение вершины обрабатываемой кромки инструмента в точку C обозначается как $\Delta y_{u.изг.}$ (рисунок Б 3.2, б). При стабилизации параллельности осей обрабатываемого отверстия и инструмента передний край стойки поднимается на угол $(\alpha_1 + \alpha_2)$ (см. рисунок Б 3.2, в). На рисунке Б 3.2, г показаны перемещение точки C' вершины обрабатываемого инструмента в точку C'' . Здесь $y_{o.ст.}$ – проекция углового перемещения точки C' .

Проекции перемещений по оси OZ представлены на рисунке Б 3.3.

На рисунке А 3.4, а показаны проекции угловых перемещений по координатным осям OY и OZ , где Δy_0 обозначается как проекция углового перемещения точки F в точку F'' по оси OY , а Δz_0 соответственно - проекция по оси OZ .

Для того, чтобы компенсировать изгибные перемещений, так же нужно проделать вертикальную коррекцию инструмента.

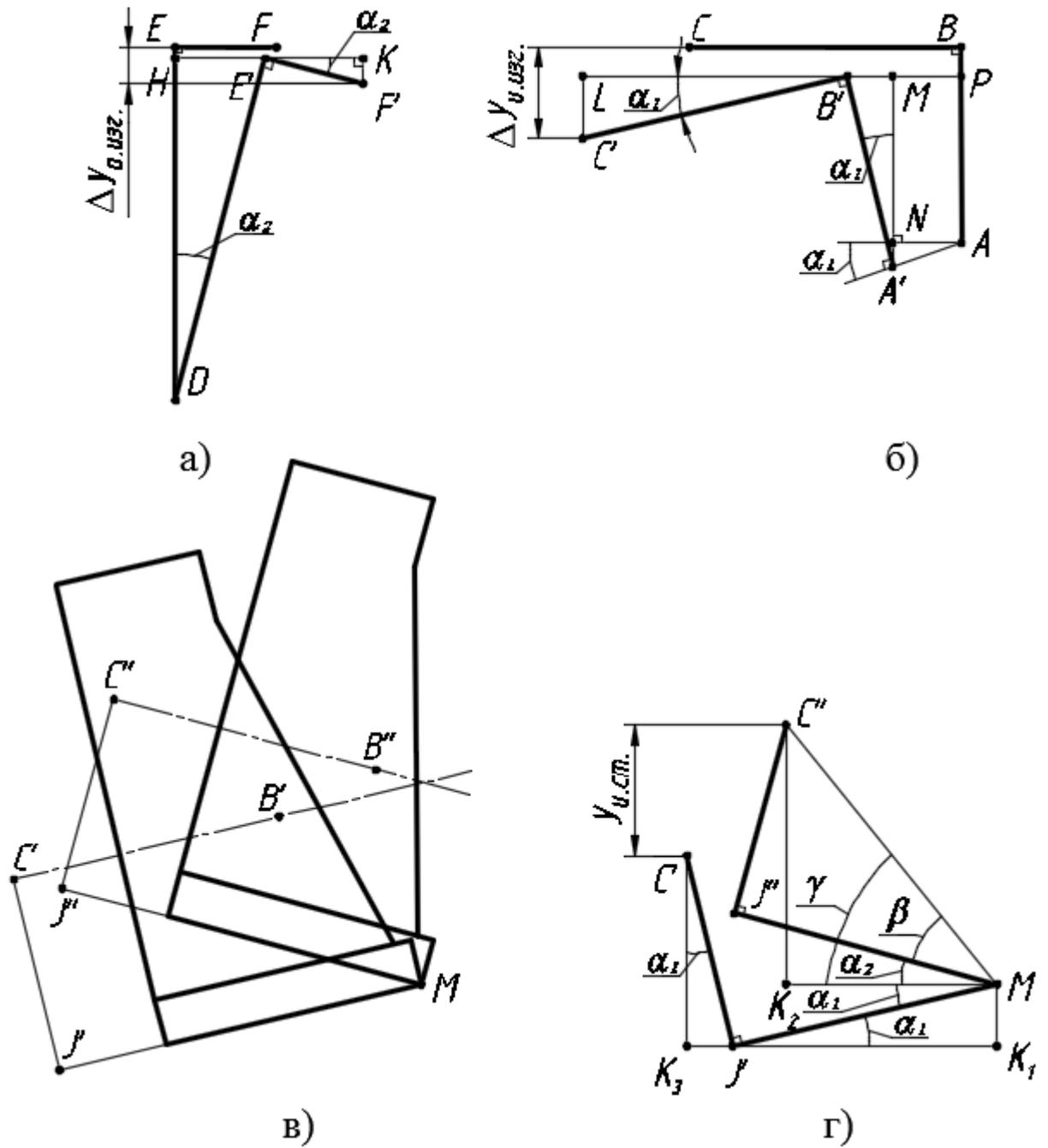


Рисунок Б 3.2 – Проекция угловых перемещений по оси OY :

- а) перемещение точки F после прогиба станины;
 б) перемещение точки C после прогиба станины; в) перемещение точки C' после стабилизации параллельности осей;
 г) перемещение точки C' оси инструмента в точку C'' после стабилизации параллельности осей.

DE – известно (исходные данные);

$$DE = DE', \quad EF = E'F'$$

$$\Delta y_{o.u3z.} = EH + KF';$$

$$EH = DE - HD;$$

$$HD = DE' \cdot \cos \alpha_2$$

$$KF' = E'F' \cdot \sin \alpha_2$$

$$\Delta y_{o.u3z.} = DE - DE' \cdot \cos \alpha_2 + E'F' \cdot \sin \alpha_2 \quad . \quad (\text{Б 3.1})$$

AB – известно (исходные данные)

$$AB = A'B', \quad CB = C'B'$$

$$\Delta y_{u.u3z.} = LC' + PB$$

$$LC' = C'B' \cdot \sin \alpha_1$$

$$PB = AB - AP$$

$$AP = MA' - NA'$$

$$MA' = A'B' \cdot \cos \alpha_1$$

$$NA' = AA' \cdot \sin \alpha_1$$

$$\Delta y_{u.u3z.} = C'B' \cdot \sin \alpha_1 + AB - A'B' \cdot \cos \alpha_1 + AA' \cdot \sin \alpha_1 \quad (\text{Б 3.2})$$

CJ – известно (исходные данные)

$$CJ = C'J' = C''J''$$

$$JM = J'M = J''M$$

$$y_{u.cm} = C''K_2 - C'K_3 + MK_1$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{C'K_3}{C'J'}$$

$$C'K_3 = C'J' \cos \alpha_1$$

$$MK_1 = \sin \alpha_1 J'M$$

$$C''M = \frac{J''C''}{\sin \beta}$$

$$\gamma = \alpha_2 + \beta$$

$$C''K_2 = \sin \gamma C''M$$

$$y_{u.cm} = \sin \gamma C''M + \sin \alpha_1 J'M - C'J' \cos \alpha_1$$

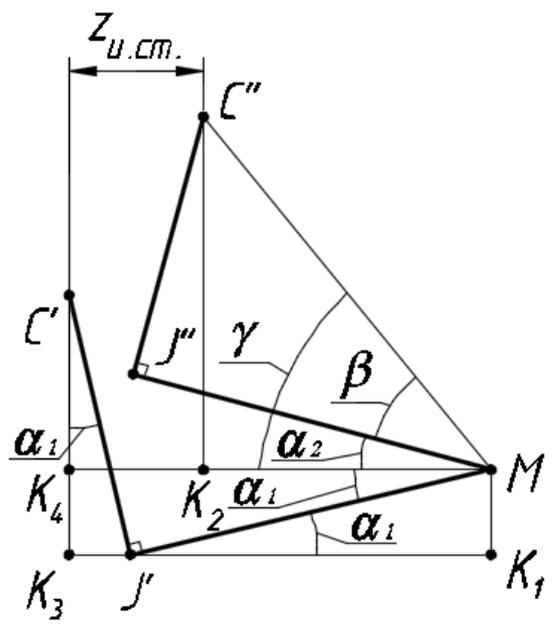
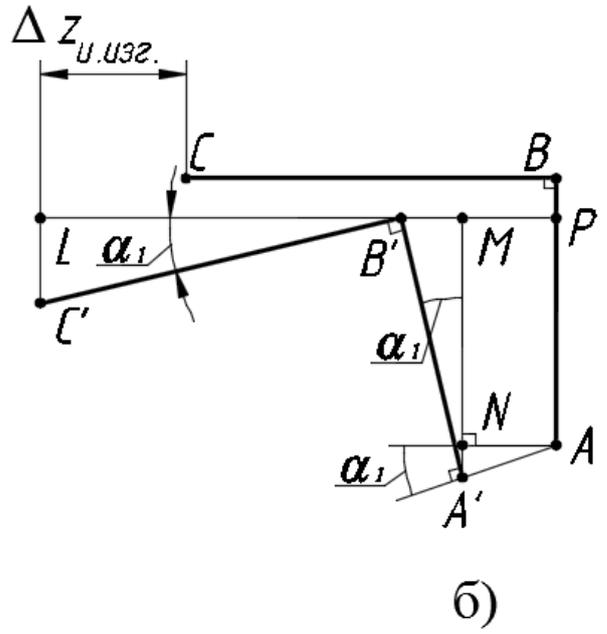
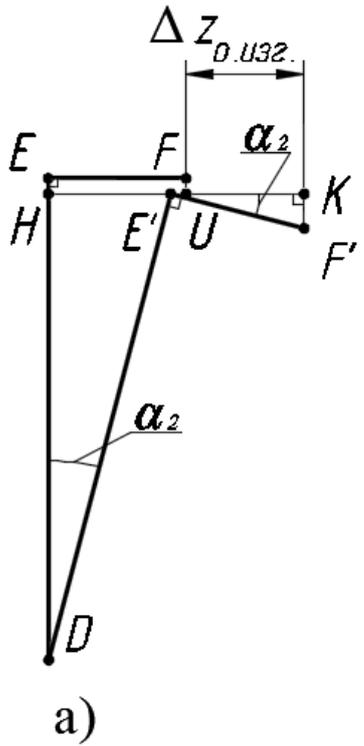


Рисунок Б 3.3 – Проекции угловых перемещений по оси OZ:

- а) перемещение точки F после прогиба станины;
- б) перемещение точки C ; в) перемещение точки C' оси инструмента в точку C'' после стабилизации параллельности осей.

$$\Delta z_{0.u32.} = UK$$

$$UK = E'K - E'U$$

$$E'K = E'F' \cdot \cos \alpha_2$$

$$E'U = HU - HE'$$

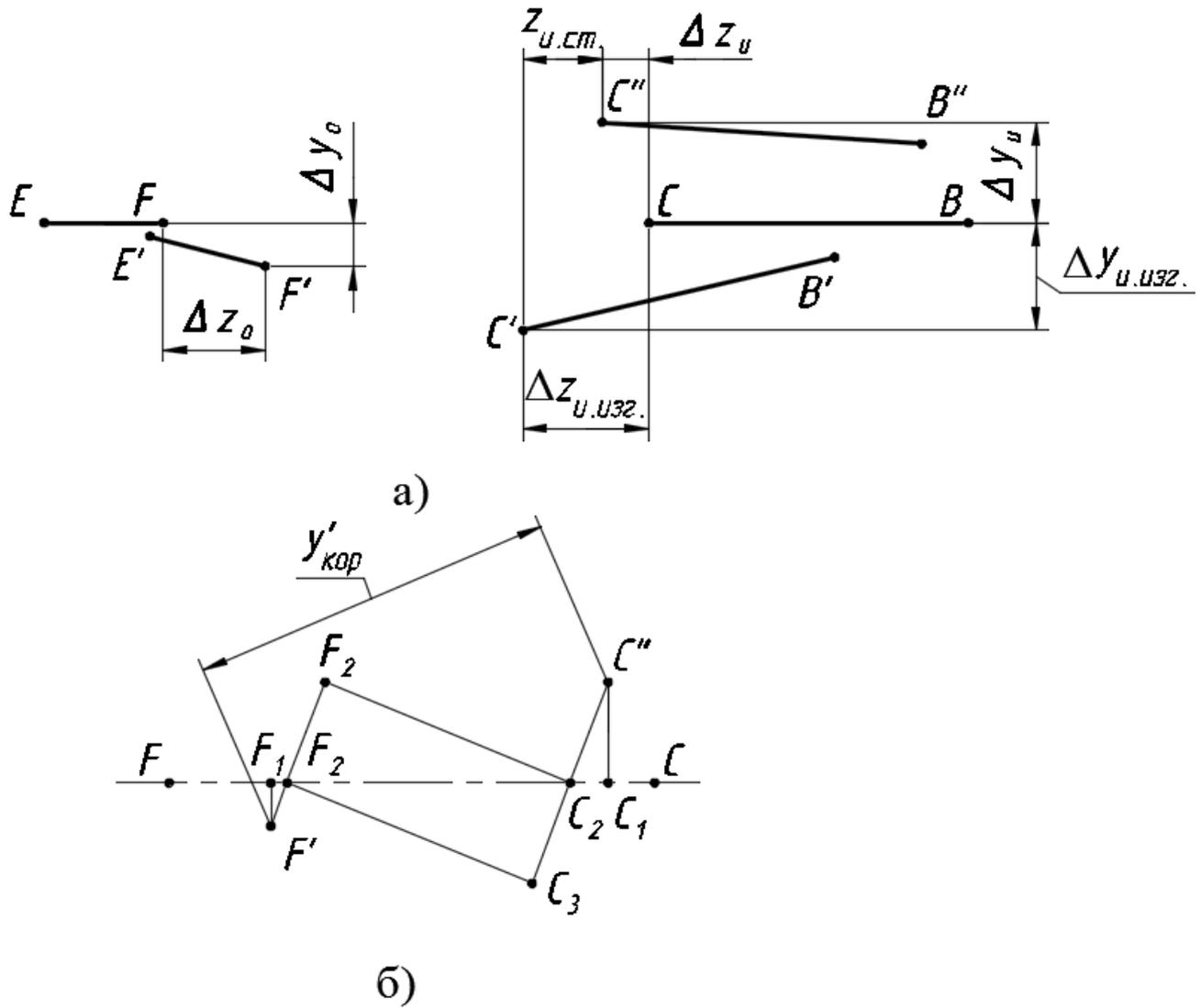


Рисунок Б 3.4 – Вертикальная и горизонтальная коррекция оси инструмента:
 а) составляющие угловых перемещений в проекциях по осям OY и OZ при изгибе станины; б) составляющие вертикальной коррекции.

$$HU = EF$$

$$E'U = EF - HE'$$

$$HE' = DE' \cdot \sin \alpha_2$$

$$\Delta z_{o.u32.} = E'F' \cdot \cos \alpha_2 - EF + DE' \cdot \sin \alpha_2 \quad (\text{Б 3.3})$$

CB – известно (исходные данные)

$$\Delta z_{u.u3z} = LP - CB$$

$$LP = LB' + B'M + MP$$

$$LB' = C'B' \cdot \cos \alpha_1$$

$$B'M = A'B' \cdot \sin \alpha_1$$

$$MP = NA = A'A \cdot \cos \alpha_1$$

$$\Delta z_{u.u3z} = C'B' \cdot \cos \alpha_1 + A'B' \cdot \sin \alpha_1 + A'A \cdot \cos \alpha_1 - CB \quad (\text{Б 3.4})$$

$$z_{u.cm} = J'T_1 + J'T_2 - MK_2$$

$$J'K_1 = J'M \cos \alpha_1$$

$$J'K_3 = C'J' \sin \alpha_1$$

$$\gamma = \alpha_2 + \beta$$

$$MK_2 = C''M \cos \gamma$$

$$z_{u.cm} = J'M \cos \alpha_1 + C'J' \sin \alpha_1 - C''M \cos \gamma$$

$$y_{кор} = C''C_2 + C_2C_3$$

$$\Delta y_u = C''C_1$$

$$\Delta y_u = y_{u.cm} - y_{u.u3z}$$

$$C''C_2 = \frac{C''C_1}{\cos \alpha_1}$$

$$FC = FC - FF_1 - F_1F_2 - C_2C_1 - C_1C$$

$$C_1C = \Delta Z_u$$

$$\Delta Z_u = Z_{u.u3z} - Z_{u.cm}$$

$$F_1F_2 = y_{o.u3z} \operatorname{tg} \alpha_1$$

$$C_2C_1 = \Delta y_u \operatorname{tg} \alpha_1$$

$$y_{o.u3z} = F_1F'$$

$$\Delta y_u = C''C_1$$

$$FF_1 = Z_{o.u3z}$$

Деформации станины в плоскости YOX .

Отрезок EF характеризует отклонение оси обрабатываемого отверстия смещается на угол φ_2 . В свою очередь отрезок CB показывает отклонение оси инструмента относительно точки A от оси OY на угол φ_1 (рисунок Б 3.5).

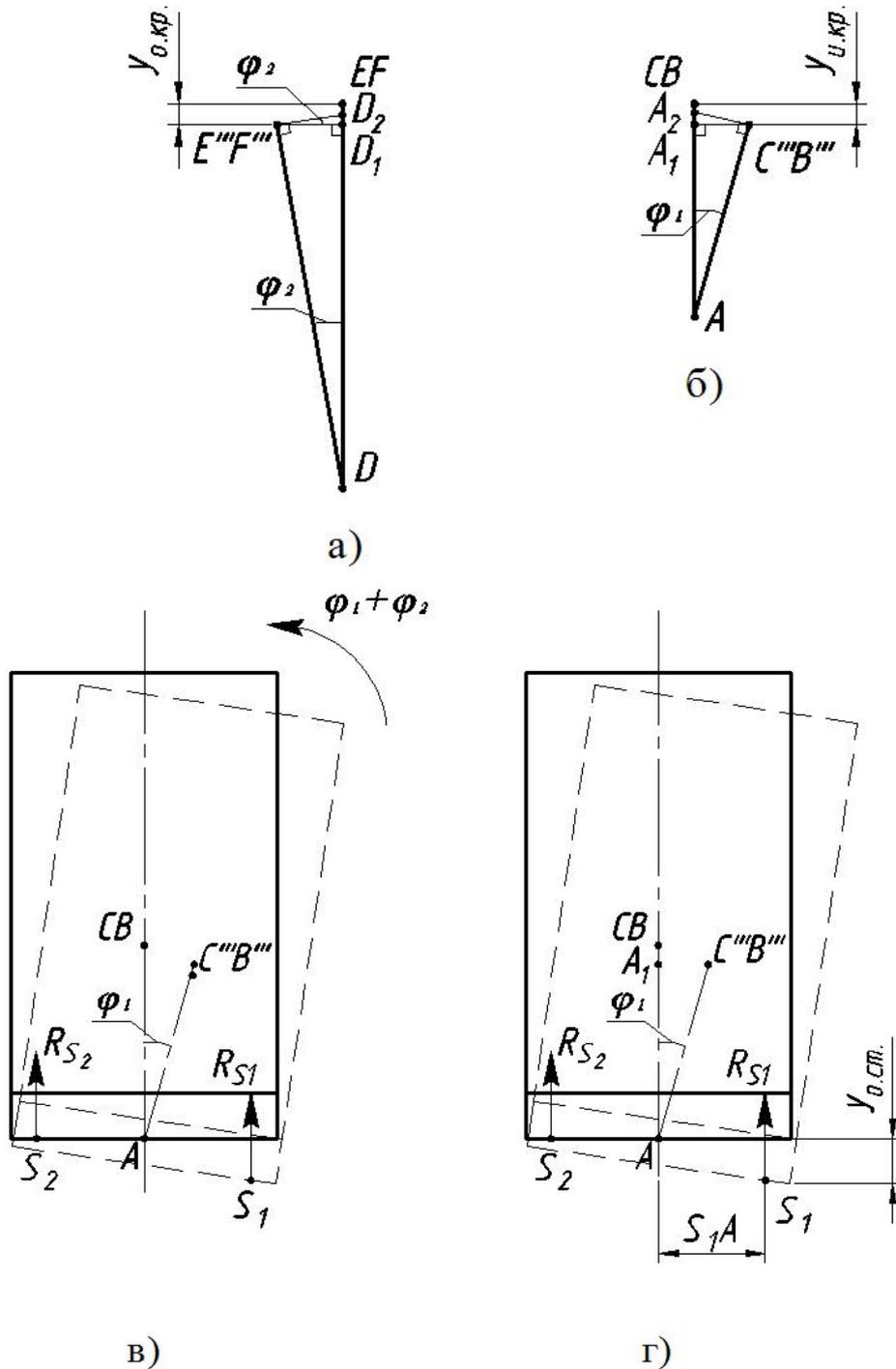


Рисунок Б 3.5 – Проекция угловых перемещений по оси OY :
 а) перемещение точки F после изгиба станины; б) перемещение точки C после изгиба станины; в) перемещение точки C' после стабилизации параллельности осей; г) перемещение CB оси инструмента в точку C'' после стабилизации параллельности осей.

При силовых деформациях изгиба станины возникающих при перемещении стойки точка С перемещается в точку С''', а точка В в точку В''' соответственно. На рисунке А 3.5, б показана проекция углового перемещения отрезка СВ и обозначается как $y_{u.кр.}$, а $y_{o.кр.}$ соответственно проекция.

При стабилизации параллельности осей стойка поворачивается вокруг точки А от деформированного до идеального на угол $\varphi_1 + \varphi_2$ (рисунок Б 3.5, в).

$$ACB = AC'''B'''$$

$$y_{u.кр.} = A_1CB$$

$$A_1CB = A_1A_2 + A_2CB$$

$$A_1A_2 = C'''B'''A_2 \cdot \sin \varphi_1$$

$$C'''B'''A_2 = AC'''B''' \cdot \text{tg} \varphi_1$$

$$A_2CB = ACB - AA_2$$

$$AA_2 = \frac{C'''B'''A_1}{\cos \varphi_1}$$

$$C'''B'''A_1 = \sqrt{(C'''B'''A_2)^2 + (A_1A_2)^2}$$

$$y_{u.кр.} = AC'''B''' \cdot \text{tg} \varphi_1 \cdot \sin \varphi_1 + ACB - \frac{\sqrt{(AC'''B''' \cdot \text{tg} \varphi_1)^2 + (A_1A_2)^2}}{\cos \varphi_1} \quad (\text{Б } 3.5)$$

Так как заготовка находится в равновесии, параметром $y_{o.кр.}$ можно пренебречь.

Вычислим величину перемещения вершины режущего инструмента от реального до идеального по пропорции.

$$C'''B'''A_1 - y_{u.кр.}$$

$$S_1A - y_{u.см.}$$

$$y_{u.см.} = \frac{S_1A \cdot y_{u.кр.}}{C'''B'''A_1}$$

S_1A – известно

$$y_{u.см.} = \frac{S_1A \cdot y_{u.кр.}}{\sqrt{(AC'''B''' \cdot \text{tg} \varphi_1)^2 + (A_1A_2)^2}} \quad (\text{Б } 3.6)$$

На основе данной методики можно выполнять расчет перемещений стойки и обрабатываемой заготовки на величину необходимую для компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС.

ПРИЛОЖЕНИЕ В (Сравнительные результаты расточки отверстий в
виде круглограмм)

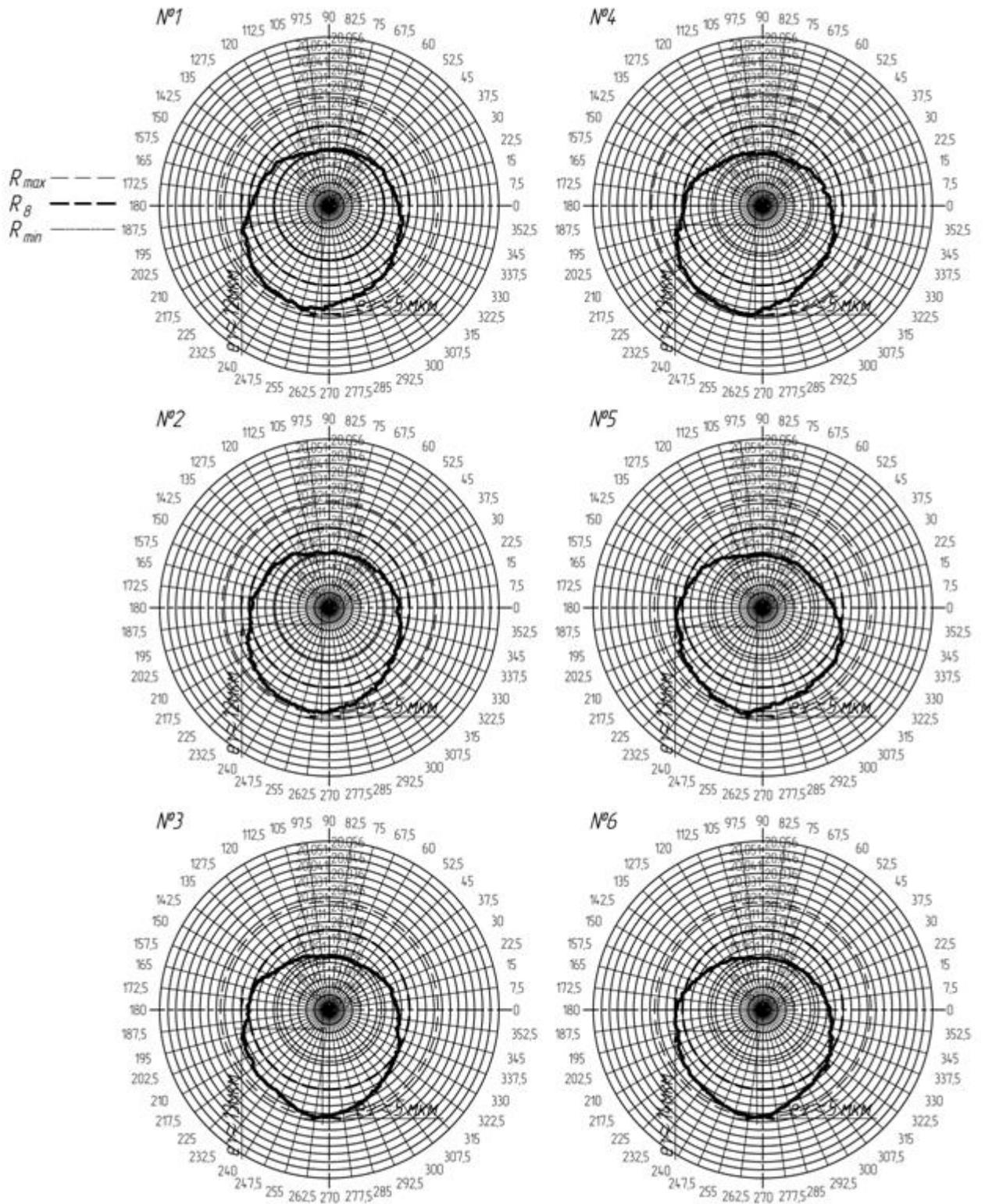


Рисунок В 5.1 – Круглограммы отверстия 8, без применения системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС

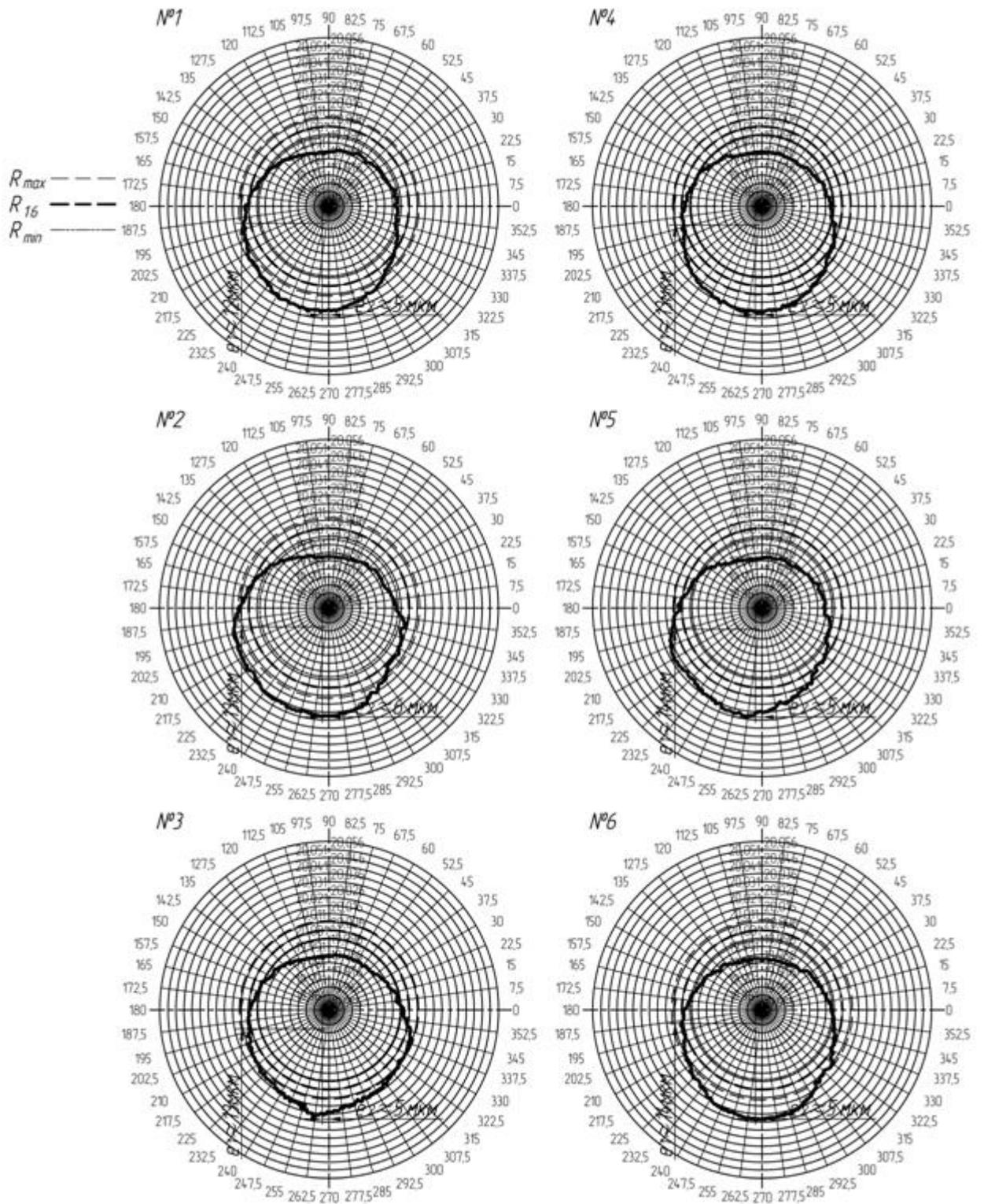


Рисунок В 5.2 – Круглограммы отверстия 16, без применения системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС

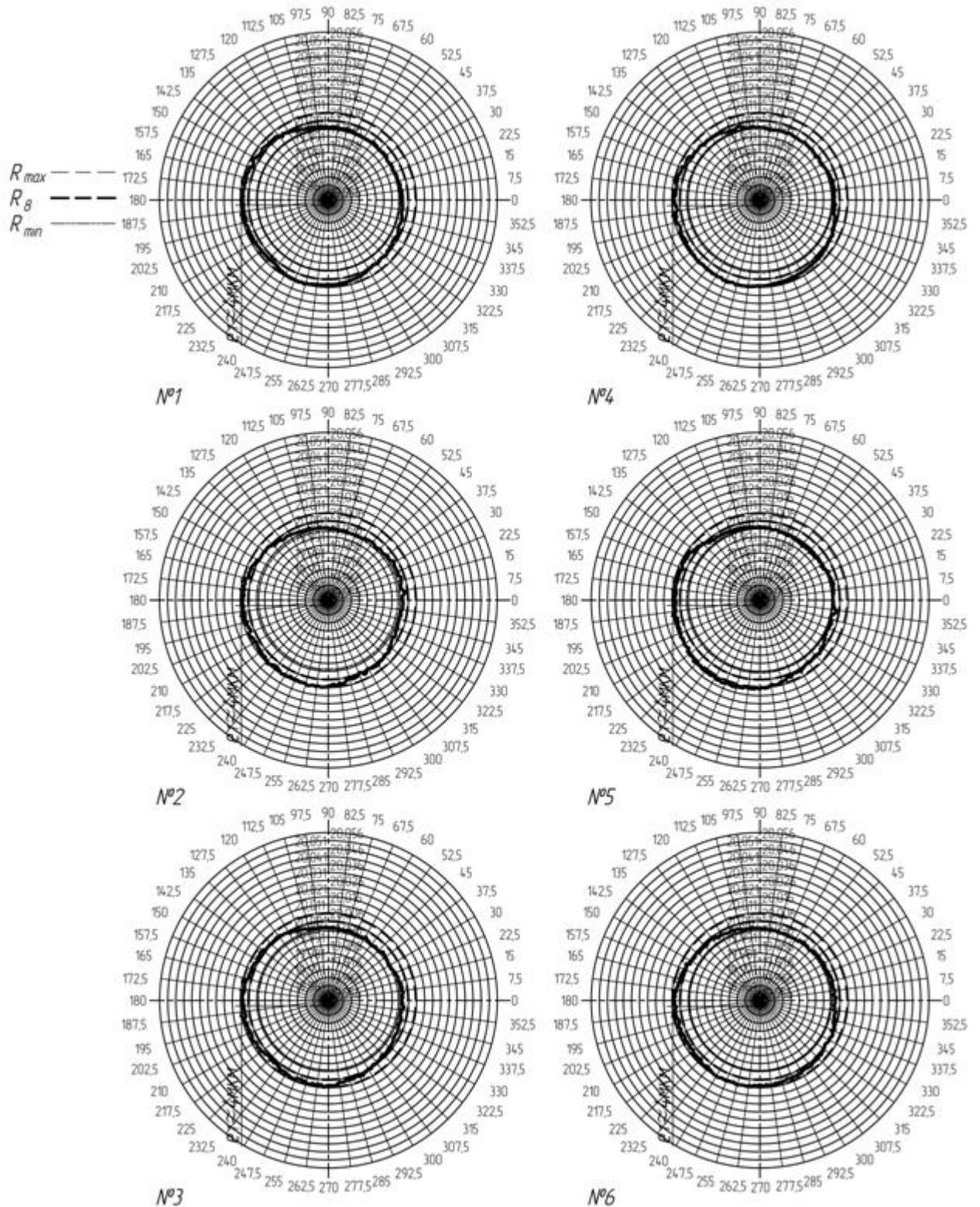
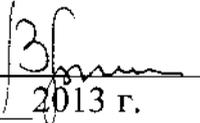


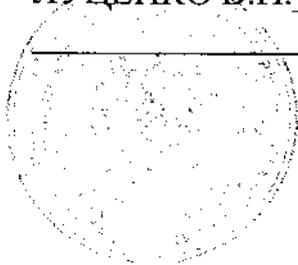
Рисунок В 5.3 – Круглограммы отверстия 8, с применением системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС

ПРИЛОЖЕНИЕ Г (Акты внедрения результатов НИР)

“УТВЕРЖДАЮ”

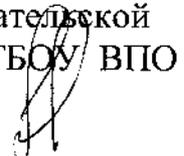
Гл. инженер ФГУП
НКТБ «ПАРСЕК»
ЛУЦЕНКО В.Н.


2013 г.



“УТВЕРЖДАЮ”

Проректор по инновационной и
научно-исследовательской
деятельности ФГБОУ ВПО
«ПВГУС»
ЯКУНИН В.Н.


18 ОКТ 2013

2013 г.



АКТ

Внедрения результатов НИР, выполненных на кафедре “Сервис технических и технологических систем” ПВГУС в рамках проблемы “Динамика, диагностика и надежность технологического оборудования”.

18 октября 2013 г. комиссия в составе представителей Федерального государственного унитарного предприятия “Научного конструкторско-технологического бюро” «ПАРСЕК» Министерства образования и науки РФ (ФГУП НКТБ «ПАРСЕК»): гл. конструктора ПО НИКИТИНА О.Л., нач. отдела РЕДЬКИНА С.В., вед. конструктора, к.т.н. БРЕДИХИНА Б.В. и Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения ВПО Поволжского государственного университета сервиса (ФГБОУ ВПО ПВГУС): д.т.н., доцента ГОШКОВА Б.М., к.т.н. ЧЕРНЯВСКОГО Н.И. и аспиранта РУБЦОВА М.А., составила настоящий акт о том, что в Федеральном государственном унитарном предприятии «ПАРСЕК» внедрен комплекс инженерных методик оценки точности обработки поверхностей на прецизионных горизонтальных координатно-расточных станках.

1. В процессе внедрения выполнены следующие работы:

1.1. Разработана методика оценки влияния деформаций упругой системы прецизионных горизонтальных координатно-расточных станков (в статике) на точность обработки поверхностей.

1.2. Математическое описание технологической системы горизонтального координатно-расточного станка с помощью метода конечных элементов с установлением закономерностей влияния силовых деформаций несущей системы станка на его точность.

1.3. Методика исследований перемещения стойки горизонтального координатно-расточного станка с комплексом гидродомкратов как объект управления.

2. Техничко-экономические показатели опытно-промышленной проверки внедрения: экономический эффект от внедрения комплекса инженерных методик расчета точности обработки поверхностей входит составной частью в эффект от повышения точности горизонтальных координатно-расточных станков методом автоматической статической настройки их технологической системы.

3. Работы, выполненные в полном соответствии с техническими условиями и планом внедрения.

4. Замечаний нет.

5. Работу по внедрению считать законченной.

Представители ФГУП НКТЬ

«ПАРСЕК»



НИКИТИН О.Л.



РЕДЬКИН С.В.



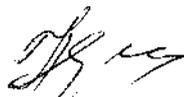
БРЕДИХИН Б.В.

Представители ФГБОУ ВПО

«ЛВГУС»



ГОРШКОВ Б.М.



ЧЕРНЯВСКИЙ Н.И.



РУБЦОВ М.А.

“УТВЕРЖДАЮ”

Гл. инженер ФГУП

НКТБ «ПАРСЕК»

ЛУЦЕНКО В.Н.




2013 г.

“УТВЕРЖДАЮ”

Проректор по инновационной и

научно-исследовательской

деятельности ФГБОУ ВПО



ПВГУС

ЯКУНИЦ В.Н.

23 ОКТ 2013

2013 г.

АКТ

Внедрения результатов НИР, выполненных на кафедре “Сервис технических и технологических систем” ПВГУС в рамках проблемы “Динамика, диагностика и надежность технологического оборудования”.

23 октября 2013 г. комиссия в составе представителей Федерального государственного унитарного предприятия “Научного конструкторско-технологического бюро” «ПАРСЕК» Министерства образования и науки РФ (ФГУП НКТБ «ПАРСЕК»): гл. конструктора ПО НИКИТИНА О.Л., нач. отдела РЕДЬКИНА С.В., вед. конструктора, к.т.н. БРЕДИХИНА Б.В. и Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения ВПО Поволжского государственного университета сервиса (ФГБОУ ВПО ПВГУС): д.т.н., доцента ГОРШКОВА Б.М., к.т.н. ЧЕРНЯВСКОГО Н.И. и аспиранта РУБЦОВА М.А., составила настоящий акт о том, что в опытном производстве ФГУП НКТБ «ПАРСЕК» внедрено устройство повышения точности прецизионных горизонтальных координатно-расточных станков путем автоматической статической настройки их технологической системы.

В процессе внедрения выполнены следующие работы:

1.1. Проведен анализ экспериментальных исследований прецизионного горизонтального координатно-расточного станка модели 2А459 СФ4 и составлен баланс его точности.

1.2. Разработано, смонтировано и отлажено устройство автоматической статической настройки технологической системы горизонтального координатно-расточного станка.

1.4. Разработано и прошло испытания в условиях близких к промышленным устройство автоматической статической настройки технологической системы горизонтального координатно-расточного станка модели 2А459 СФ4.

2. Техничко-экономические показатели опытно-промышленной проверки внедрения: экономический эффект от внедрения устройства автоматической статической настройки технологической системы горизонтального координатно-расточного станка модели 2А459 СФ4, составил восемьсот пятьдесят пять тысяч рублей (855 тысяч руб.) на один станок.

3. Работы, выполненные в полном соответствии с техническими условиями и планом внедрения.

4. Замечаний нет.

5. Работу по внедрению считать законченной.

Представители ФГУП НКТБ

«ПАРСЕК»

НИКИТИН О.Л.

РЕДЬКИН С.В.

БРЕДИХИН Б.В.

Представители ФГБОУ ВПО

«ПВГУС»

ГОРШКОВ Б.М.

ЧЕРНЯВСКИЙ Н.И.

РУБЦОВ М.А.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Рубцова Михаила Анатольевича, аспиранта четвертого года обучения Поволжского государственного университета сервиса, представившего диссертационную работу на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07. - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, на тему «Повышение точности горизонтальных координатно-расточных станков путём компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины»

Результаты диссертационной работы внедрены в практику деятельности ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса» (ФГБОУ ВО «ПВГУС»). В частности:

– в виде рекомендаций к выполнению серии лабораторно-исследовательских работ по учебным курсам «Основы технологии машиностроения», «Технология производства БМП» (ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса»);

– при подготовке лекций по дисциплине «Автоматические линии, оборудование, ГПС» (ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса»).

Проректор по научной и
инновационной деятельности
ФГБОУ ВО «ПВГУС»
д.и.н., профессор



В.Н. Якунин