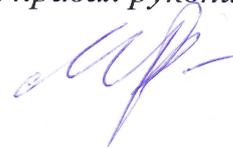


*На правах рукописи*



Рубцов Михаил Анатольевич

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

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

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Ульяновск, 2016

Работа выполнена на кафедре «Сервис технических и технологических систем» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет сервиса» (ФГБОУ ВО «ПВГУС»).

Научный руководитель: Горшков Борис Михайлович,  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Базров Борис Мухтарбекович,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБУН «Институт машиноведения  
имени А.А. Благонравова РАН»,  
заведующий лабораторией «Теории  
модульной технологии»

Казакова Ольга Юрьевна,  
кандидат технических наук,  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет», доцент кафедры  
«Автоматизированные станочные и  
инструментальные системы»

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Саратовский государственный  
технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Защита диссертации состоится «27» декабря 2016 г. в «11:00» на заседании объединённого диссертационного совета Д 999.003.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», (почтовый адрес: 432027, ГСП, г. Ульяновск, ул. Северный венец, 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445020, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Белорусская, 14) по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, 3, первый корпус, аудитория 117.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «УлГТУ».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент



Веткасов Николай Иванович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** 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.

**Степень разработанности.** Значительный вклад в оценке точности технологического оборудования и разработке эффективных путей её повышения внесли отечественные и зарубежные ученые: Б.М. Базров, Б.М., Б.С. Балакшин, А.Г. Суслов, А.М. Дальский, В.Г. Митрофанов, Д.Н. Решетов, Ю.М., Н. Blok, F.P. Bowden, D. Tabor и др. Классические методы повышения точности, 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.

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 точности станка.

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.

**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.

**Теоретическая и практическая значимость 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. № 19; № 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.

**Методология и методы исследований.** Методологической основой исследования служат теоретические исследования, выполненные на основе методов 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.

**Положения, выносимые на защиту:**

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.

**Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность изложенных в работе результатов обеспечивается: корректностью поставленной задачи; корректным использованием применяемого математического аппарата и вводимых допущений и гипотез; сравнением данных численного расчета с известными аналитическими методами для подтверждения точности результатов вычислений; качественным согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований.

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 НКТЬ “ПАРСЕК”, г.о. Тольятти);

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

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

– 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 НКТБ “ПАРСЕК”, г.о. Тольятти);

– при подготовке лекций по дисциплине «Автоматические линии, оборудование, ГПС» (ФГБОУ ВО «ПВГУС»).

О внедрении результатов диссертационной работы свидетельствуют соответствующие акты.

Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались:

– на 6 Международных научно-технической конференциях “Наука - промышленности и сервису” (Тольятти, 2012, 2014), “Проблемы исследования и проектирования машин” (Пенза, 2013), “Технологическое обеспечение машиностроительных производств” (Челябинск, 2013), “70 years FIT” (Болгария, Созопл, 2015), “Наукоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения” (Москва, 2016);

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

– на Всероссийской научно-технической конференции “Высокие технологии в машиностроении” (Самара, 2015).

**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.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка используемых источников из 156 наименований. Работа изложена на 165 страницах, содержит 64 рисунка, 7 таблиц.

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

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

**В первой главе** осуществлен 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, что оказывает существенное влияние на качество выпускаемой продукции.

Одним из наиболее перспективных путей повышения геометрической точности станков является оснащение их устройствами компенсации силовых деформаций станины.

Наличие подвижных узлов, например стойки, заготовок различной массы, приводят к силовым деформациям станины (изгиб, кручение и контактные взаимодействия). В результате этого происходит потеря геометрической точности станка (рис. 1).

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.

На основе проведенного анализа факторов и конструктивных особенностей, влияющих на точность машин, была сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена экспериментальным исследованиям силовых деформаций несущей системы на примере прецизионного горизонтального КРС и составления его баланса точности. Эти исследования позволили осуществить оценку влияния упругих перемещений отдельных элементов несущей системы и, в частности, стыков на его геометрическую точность станка.

Для испытаний стол заготовки устанавливался в среднее положение на направляющих станины, а салазки – в положение начала обработки. В шпинделе станка закреплялась специальная оправка с шариком в центре для передачи нагрузки. Нагрузка создавалась винтовым домкратом, укрепленным в кронштейне на поворотном столе. Поворотный стол крепился в угольнике на столе станка.

Величина нагрузки измерялась динамометром камертонного типа, расположенным между оправкой и винтовым домкратом. Направление действия силы из-

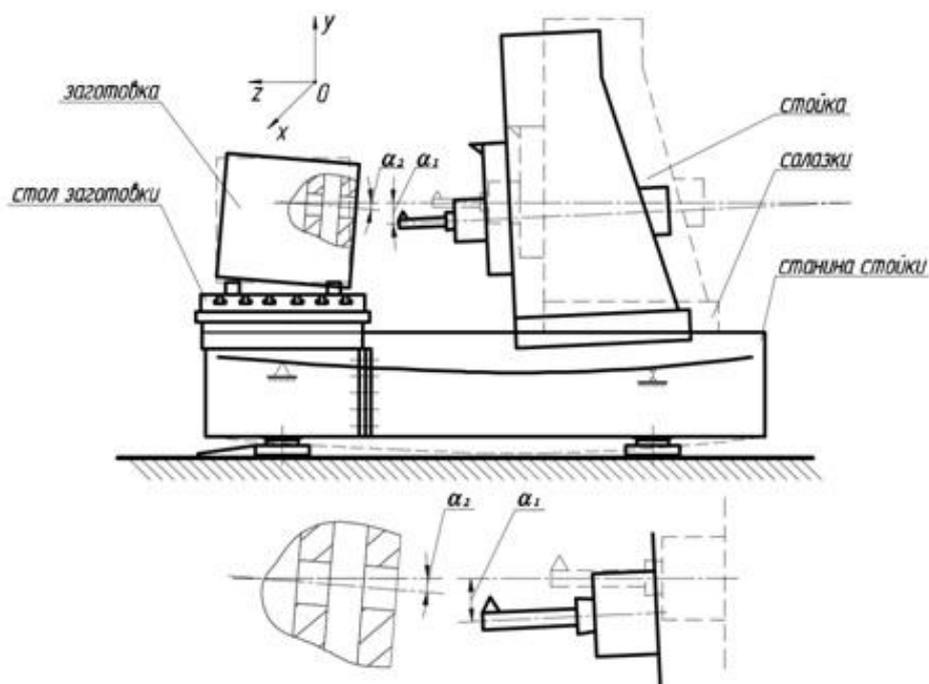


Рис. 1. Схема образования силовых деформаций прецизионного горизонтального КРС

менялось путем вращения поворотного стола с кронштейном. Поскольку виды работ, выполняемых на КРС, отличаются большим разнообразием, а при расточных операциях сила резания меняет направление в пространстве, предполагалось нагружение станка осуществлять по девяти направлениям. Усилие действующее вдоль оси шпинделя может моделировать операцию сверления.

Величину нагрузочного усилия изменяли от 0 до 8000 Н. Показания измерительных приборов снимали через каждые 500 Н нагрузки.

Для составления баланса упругих перемещений измерительные приборы (микрокаторы с ценой деления 0,2 мкм) расставляли так, чтобы была обеспечена возможность определения составляющих смещения точки приложения силы от перемещений каждого элемента, образующего упругую систему станка.

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 прецизионного горизонтального КРС модели 2А459АМФ4.

**В третьей главе** приведены теоретические исследования снижения точности КРС.

На рисунке 2 представлено схематическое изображение расточки отверстия в корпусной заготовке. На рисунке 2 а обработка осуществляется на станке с не деформируемой технологической системой (идеальный вариант обработки), а на рисунке 2 б при расточке отверстия с реально деформированной технологической системой станка. В этом случае корпусная заготовка поворачивается на угол  $\alpha_2$ , а ось инструмента (борштанга) на угол  $\alpha_1$ .

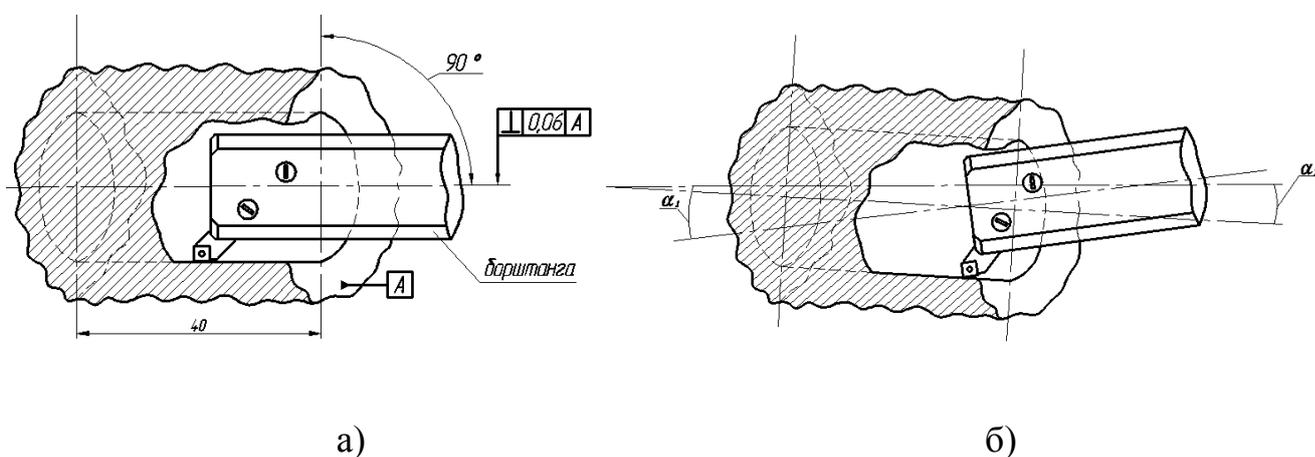


Рис. 2 – Схематическое изображение расточки отверстия в корпусной заготовке, где: а) не деформируемая технологическая система; б) деформируемая технологическая система

Разработана математическая модель контактных взаимодействий в стыке подсистемы «салазки – стойка станка» и найдено уравнение сближения в затянутом стыке.

$$\begin{aligned}
\frac{d^4 \bar{y}}{dt^4} + \frac{BC_0 l^4}{EI} \cdot \bar{y} &= \sum_{j=0}^{n-1} \frac{Q_j l^2}{EI} \delta(t - \bar{a}_j) - \frac{B\sigma_{\bar{n}\delta} l^3}{EI} \\
\bar{y}_n + \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \frac{K_i y_i}{\beta^3} K_3 [\beta(\bar{a}_n - \bar{a}_i)] \right\} &= \bar{y}(0) K_0(\beta \bar{a}_n) + \frac{\bar{y}'(0)}{\beta} K_1(\beta \bar{a}_n) + \frac{\bar{P}}{\beta^3} K_3(\beta \bar{a}_n) + \\
&+ \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\bar{P}_{\bar{a}i} + K_i \bar{y}_{0i}}{\beta^3} K_3 [\beta(\bar{a}_n - \bar{a}_i)] \right\} + \frac{\bar{\sigma}_{\bar{n}\delta}}{4\beta^4} [K_0(\beta t) - 1] \\
\bar{y}(1) &= \bar{y}(0) K_0(\beta) + \frac{\bar{y}'(0)}{\beta} K_1(\beta) + \frac{\bar{P}}{\beta^3} K_3(\beta) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\bar{P}_{\bar{a}i} + K_i (\bar{y}_{0i} - \bar{y}_i)}{\beta^3} K_3 [\beta(1 - \bar{a}_i)] + \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{4\beta^4} [K_0(\beta - 1)] \\
tg \theta_0 &\approx \theta_0 = \bar{y}(1) - \bar{y}(0)
\end{aligned}$$

где:  $P_{\bar{a}i}$  – осевое усилие развиваемое одним болтом;  $\bar{y}(0)$  – безразмерный прогиб;  $\bar{y}'(0)$  – производная безразмерного прогиба;  $n$  – число болтов;  $K_i$  – жёсткость отдельного болта равна;  $\bar{y}_{0i}$  – безразмерные деформации болта в результате приложения;  $\bar{y}_i$  – деформации болта в результате приложения изгибающего момента;  $\bar{a}_i$  – величины положений  $P_{\bar{a}i}$ ;  $\bar{\sigma}_{cp}$  – усреднённое давление, возникающее при действии сил  $P_{\bar{a}i}$ .

Найдены вертикальные и горизонтальные погрешности обработки вследствие взаимных наклонов стойки и заготовки.

$$\begin{aligned}
\Delta y_{p.k} &= \Delta y_{u.uzg.} \pm \Delta y_{v.k.c.} \pm \Delta y_{v.k.p.n.} - \Delta y_{o.uzg.} \\
\Delta z_{p.k} &= \Delta z_{u.uzg.} \pm \Delta z_{z.k.c.} \pm \Delta z_{z.k.p.n.} - \Delta z_{o.uzg.}
\end{aligned}$$

Выполнено математическое описание влияния силовых деформаций упругой системы горизонтального КРС на его точность, позволяющее выполнять расчет перемещений стойки и обрабатываемой заготовки, необходимых для стабилизации силовых деформаций изгиба и кручения станины станка. Выведены аналитические зависимости по определению величин перемещений осей инструмента и отверстия. Вычисленные значения поправок записываются в систему числового программного управления, где происходит их обработка и выдача соответственного управляющего сигнала.

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

Разработана динамическая модель стойки прецизионного горизонтального КРС с комплексом гидродомкратов как объект управления (рис.3), что позволило, найти передаточные функции по отношению к управляющему и возмущающему воздействиям. Получены динамические структуры объекта управления, позволяющие синтезировать регулятор системы управления.

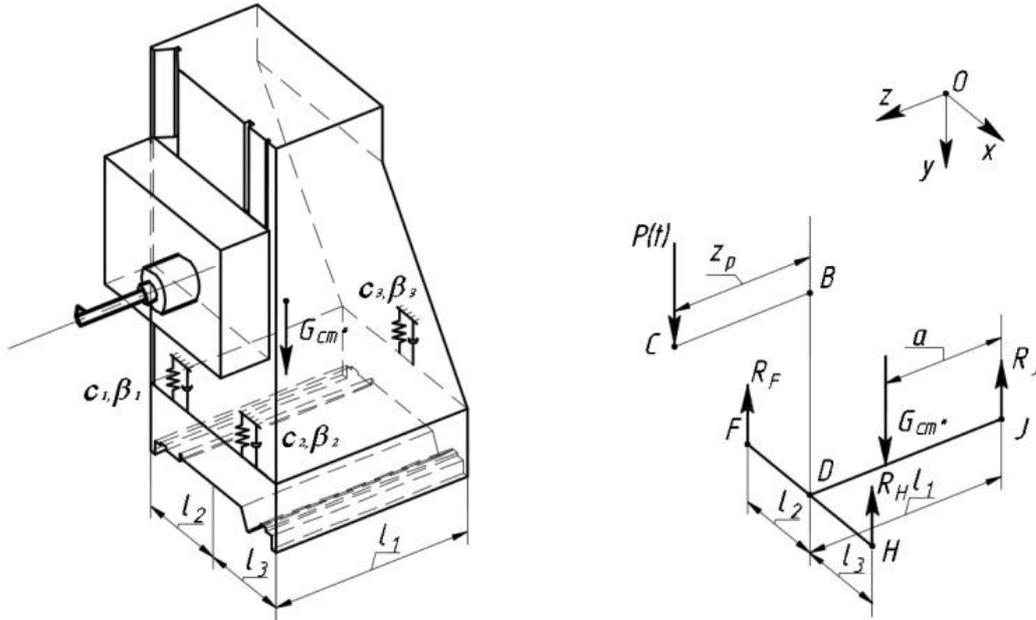


Рис. 3.  
Динамическая  
модель  
стойки станка

Передаточные функция по отношению к управляющему воздействию имеет вид:

$$W_{yc}(p) = \frac{Y_V(p)}{F_{ГД}(p)} = \frac{1}{C_{11}} \frac{[T_{5f}^5 p^5 + T_{4f}^4 p^4 + T_{3f}^3 p^3 + T_{2f}^2 p^2 + T_{1f} p + 1]}{(T_{ГД} p + 1)} =$$

$$= \frac{\beta_f (T_{ГД} p + 1) [T_{5Y}^5 p^5 + T_{4Y}^4 p^4 + T_{3Y}^3 p^3 + T_{2Y}^2 p^2 + T_{1Y} p + 1]}{[T_{5f}^5 p^5 + T_{4f}^4 p^4 + T_{3f}^3 p^3 + T_{2f}^2 p^2 + T_{1f} p + 1]}.$$

Здесь  $F_{ГД}(p)$  – сила развиваемая гидродомкратом в операторной форме;

$\beta_f = 1/C_{1np} + 1/C_{2np} + 1/C_{3np} + 1/C_{4np} + 1/C_{5np}$  – коэффициент передачи.

**Четвертая глава** посвящена описанию разработанной экспериментальной опытно-промышленной установки, выполненной на базе прецизионного горизонтального КРС модели 2А459АМФ4 (рис. 4).

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 кручения и изгиба станины на точность технологической системы станка за счет стабилизации положений осей обрабатываемого отверстия и инструмента. 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 перспективной измерительной базы, а именно устройство для измерения силовых деформаций станины прецизионного КРС (патент РФ на изобретение № 2575508), использующее гироскопический эффект (рис.5).

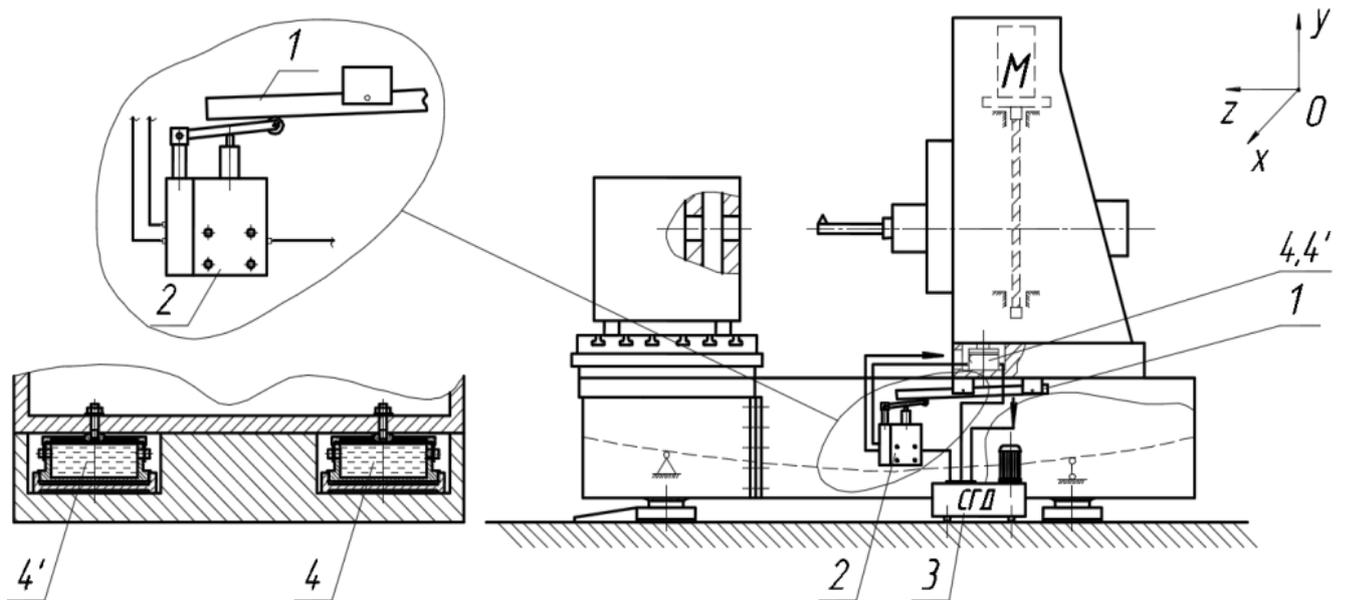


Рис. 4 – Общий вид опытно-промышленной установки

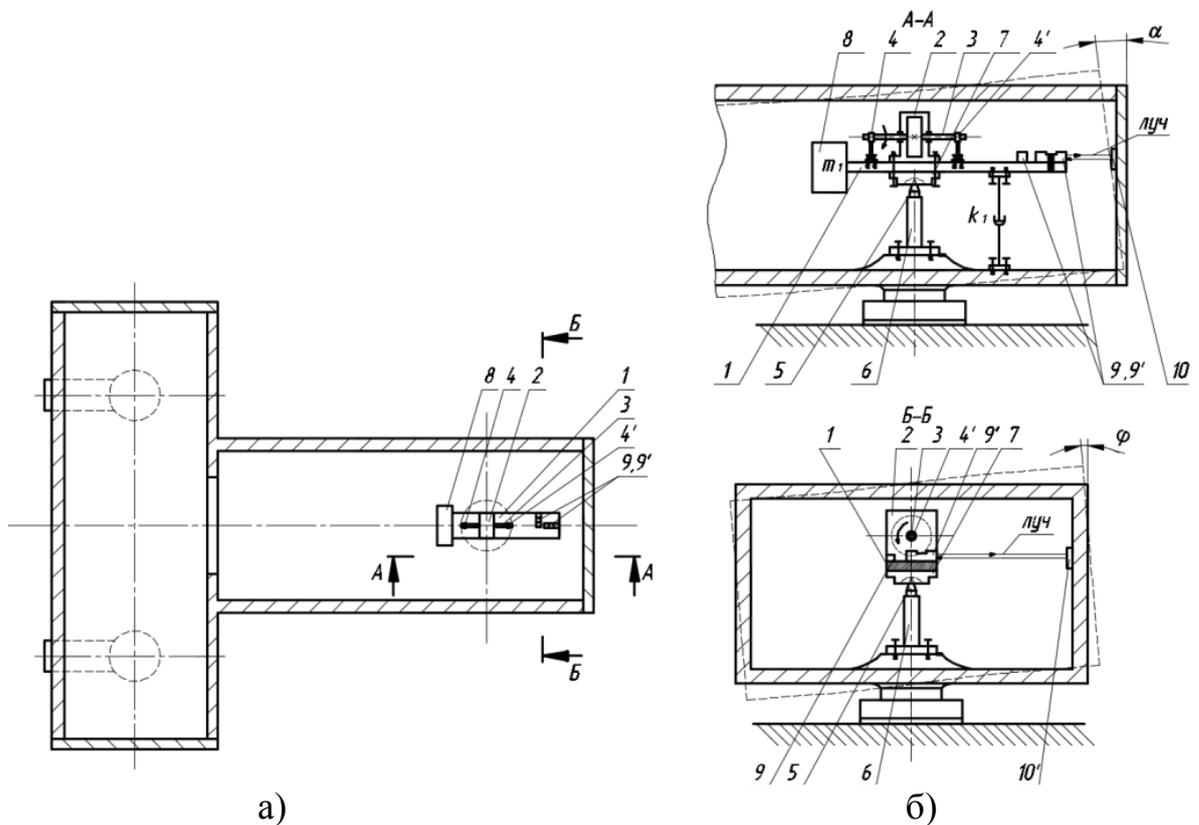


Рис. 5 – Схема устройства для измерения силовых деформаций станины КРС, где:

а) вид сверху измерительной базы; б) вид в разрезах измерительной базы

Измерительная база выполнена в виде стальной балки 1 с установленным на неё гироскопом 2 для стабилизации положения. Ось гироскопа 3, которого установлена в подшипниках 4, 4'. Стальная балка закреплена на полусферической опоре, состоящей 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. Так же напротив лазерных датчиков 9, 9' на внутренних стенках станины установлены отражающие пластины 10, 10'.

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.

Опытно-промышленная установка (рис. 4) позволяет 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. На салазках под некоторым углом закреплена рейка-шаблон 1, величина наклона которой пропорциональна возникающим силовым деформациям станины. 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.

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 эффективности повышения точности обработки на горизонтальном КРС, оснащённым устройством компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины.

В ходе исследования погрешности обработки отверстий была произведена последовательная расточка отверстия диаметра  $\varnothing 20^{+0,015}$  в заготовке (рис. 6) на горизонтальном КРС модели 2А459АМФ4. Измерения погрешности обработки отверстий проводились на координатной измерительной машине.

В качестве наиболее характерного вида обработки на станке выбрана расточка отверстий в корпусных заготовках. Для проведения статистического анализа результатов экспериментов, было подготовлено шестьдесят четыре отверстия (необходимое количество определили, исходя из достоверной вероятности и точности).

Обработка заготовки выполнена на следующих режимах:

- сверление (12 IT, Ra 6,3), инструмент – спиральное сверло 2301-3689-А1 ГОСТ 10903-77 ( $D = 20$  мм, подача  $S = 0,5$  мм/об, скорость резания  $V = 17,3$  м/мин, частота вращения шпинделя  $n = 275$  об/мин);

- чистовое растачивание (9 IT, Ra 3,2), инструмент – расточной резец ГОСТ 18882-73 с твердосплавной пластиной ВК60М на специальной оправке (глубина резания  $t = 0,05$  мм, подача  $S = 0,45$  мм/об, скорость резания  $V = 75,4$  м/мин, частота вращения шпинделя  $n = 1200$  об/мин);

- тонкое растачивание (6 IT, Ra 1,6), инструмент – расточной резец ГОСТ 18882-73 с твердосплавной

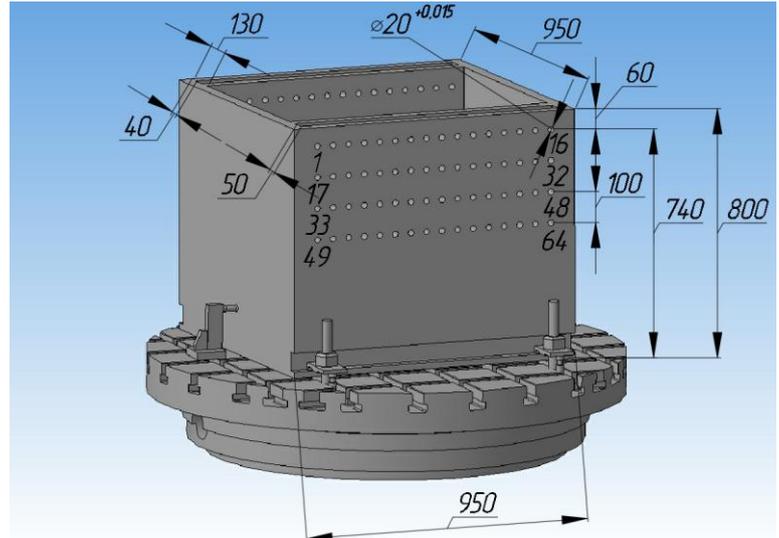


Рис. 6. Корпусная заготовка

пластиной ВК60М на специальной оправке (глубина резания  $t = 0,05$  мм, подача  $S = 0,25$  мм/об, скорость резания  $V = 138$  м/мин, частота вращения шпинделя  $n = 2200$  об/мин).

Результаты измерений после статистической обработки были представлены в виде круглограмм.

По числовым значениям полученным с координатной измерительной машины были построены точечные диаграммы отклонения осей отверстий без применения системы автоматической компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС и с применением системы.

На рисунке 7 показана диаграмма отклонения осей отверстий при обработке 64-х отверстий с применением и без применения системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины горизонтального КРС.

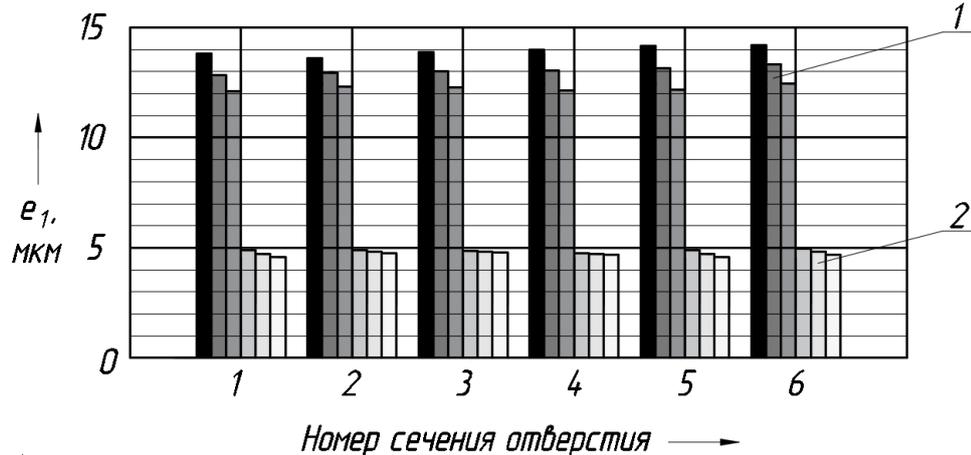


Рис. 7. Диаграмма отклонения осей отверстий от деформации изгиба станины вследствие влияния веса стойки в сборе, где:

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

Подводя итог экспериментальному исследованию точности обработки на горизонтальном КРС, можно утверждать, что внедрение системы компенсации угловых перемещений стойки при деформации станины станка обеспечило: снижение величины увода оси обработанного отверстия более чем в 2 раза; снижение овальности растачиваемых отверстий примерно на 10%.

В результате установлено, что использование упомянутой системы позволяет перевести станок из класса точности В в класс А.

## ОБЩИЕ 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 снижение точности станка. 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 результаты теоретических и экспериментальных 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 деформаций 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 гиро-

скопического эффекта) для контроля силовых деформаций станин, (патент РФ на изобретение № 2575508).

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

9. Разработана опытно-промышленная установка, выполненная на базе горизонтального КРС 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».

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и патенты

1. 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.

2. 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.

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

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Пат. 2575508 Российская Федерация, МПК В23Q 17/00. Устройство для измерения силовых деформаций станины координатно-расточного станка / Горшков Б.М., Рубцов М.А., 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.

### Публикации в других изданиях

8. 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.

9. 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.

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

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

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

13. 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.

14. 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.

15. 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. «Научноёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения» – М.: Техполиграф-центр, 2016 – С. 192-195.

*Автореферат*

Рубцов Михаил Анатольевич

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

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.2016. Формат 60x84 1/16.

Усл. Печ. Л. \_\_\_\_\_. Тираж 120 экз. Заказ \_\_\_\_\_.

ФГБОУ ВО «УлГТУ», 432027, Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.