

На правах рукописи



СЕРКОВ НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

ТОЧНОСТЬ МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАШИН С ЧПУ: ТЕОРИЯ,  
ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРАКТИКА

Специальности:

05.02.18 – Теория механизмов и машин

05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва  
2017

Работа выполнена в: Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

Научный консультант: доктор технических наук  
**Крупенин Виталий Львович**

Официальные оппоненты: **Жога Виктор Викторович**,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО Волгоградский государственный  
технический университет, г. Волгоград,  
профессор кафедры «Теоретическая механика»

**Лысенко Валерий Григорьевич**,  
доктор технических наук,  
ФГУП ВНИИМС, г. Москва, начальник отдела  
метрологического обеспечения измерений гео-  
метрических параметров

**Утенков Владимир Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный  
технический университет имени Н.Э. Баумана»,  
г. Москва, заведующий кафедрой «Металлоре-  
жущие станки»

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВО «Кубанский государственный тех-  
нологический университет», г. Краснодар

Защита состоится «17» октября 2017 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д.002.059.05 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук по адресу: 101990, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) и на сайте <http://www.imash.ru/>

Автореферат разослан « » 2017 г.

Ваши отзывы и замечания по автореферату (в двух экземплярах), заверенные печатью, просим направлять по адресу ИМАШ РАН: 101990, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4, ученому секретарю диссертационного совета Д.002.059.05

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Бозров Виктор Маирович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В настоящее время остро стоит задача обновления оборудования в машиностроении. Среди приоритетных направлений развития машиностроения, обеспечивающих развитие инновационных технологий, следует выделить:

- оснащение машиностроительного производства инновационным прецизионным оборудованием с высокой степенью концентрации технологических операций, выполняемых по программе от систем ЧПУ;

- повышение уровня автоматизации машиностроительного производства путем применения современных систем CAD-CAM и CIM, интегрирующих в единую систему обрабатывающие центры, промышленные роботы, измерительные машины, лазерные установки, оборудование аддитивной технологии, оборудование микрообработки и др.

Многоцелевые станки, промышленные роботы, измерительные машины, лазерные установки и «3-D принтеры» являются классическими примерами многокоординатных машин с ЧПУ. Несущая система (НС) радиолокаторов, антенн, оптических и радиотелескопов и аналогичного оборудования двойного назначения также является многокоординатной.

Исполнительные органы (ИО) многокоординатной машины с ЧПУ в процессе работы движутся по сложным пространственным траекториям. Требования к точности и скорости движения по этим траекториям постоянно возрастают.

Точность позиционирования современного прецизионного 5 координатного станка по одной координате должна быть на уровне 1мкм. Ещё более высокие требования по точности предъявляются к измерительным машинам, астрономическим приборам и высокоточному вооружению. В целом, это определяет актуальность исследований, направленных на развитие теоретических и экспериментальных основ обеспечения точности многокоординатных машин с ЧПУ.

**Целью работы** является разработка методов и средств анализа и синтеза точности прецизионных многокоординатных машин с ЧПУ.

**Для достижения поставленной цели были рассмотрены и решены следующие задачи:**

1. Развить теорию точности механизмов применительно к точности многокоординатной машины с ЧПУ.

2. Разработать математическую и имитационную модели образования интегральных отклонений ИО многокоординатной машины с ЧПУ.

3. Разработать методику анализа точности многокоординатной машины с ЧПУ методом имитационного моделирования и провести исследование баланса точности конкретного станка мод. МС – 300.

4. Синтезировать алгоритм поиска поправок для модифицированного способа коррекции квазипараллельными вычислительными процессами.

5. Систематизировать и провести анализ эффективности методов и средств измерений первичных и интегральных отклонений механизмов многокоординатных машин с ЧПУ.

6. Разработать метод и создать универсальное приспособление для измерения отклонений пересечения осей вращения в многокоординатных машинах с ЧПУ.

7. Развить способ оценки объёмной точности станка, основанный на измерении «следа» действительной траектории на обработанной поверхности на примере исследования точности станка параллельной структуры (Гексамех-1).

8. Исследовать влияния квазистатических возмущающих факторов (веса, температуры) на первичные отклонения механизмов многокоординатной машины с ЧПУ с целью применения цифровой коррекции.

9. Создать методику исследования влияния инерционных сил на точность воспроизведения пространственной траектории ИО многокоординатной машины с целью повышения динамических свойств НС.

10. Разработать алгоритм калибровки и диагностики точности многокоординатной машины при её сборке.

**Методы исследования.** В работе использованы методы механики и векторной алгебры для построения аналитической модели образования отклонений взаимного положения ИО машины. Для построения имитационной модели образования отклонения взаимного положения ИО машины использована среда математических расчетов “Matlab”. Экспериментальные измерения отклонений движения ИО многокоординатной машины с ЧПУ проводились на современном технологическом оборудовании с использованием современных измерительных средств (лазерный интерферометр ML 10, уровнемер EMP-832P-50-W2, прибор Ballbar QC 10, контурограф MarSurf XC-10 и др.). Для анализа экспериментальных данных использовались прикладные программные продукты соответствующих измерительных средств.

**Научная новизна работы** заключается:

- во введении понятия механизма «управляемый по программе ползун/шарнир», выходное звено которого движется по направляющим (стойке) с 6 первичными отклонениями, описываемыми в функции управляемой координаты;

- в методике построения модели образования интегральных отклонений ИО многокоординатной машины с НС последовательной структуры с кинематическими парами, приводящимися к парам с одной степенью свободы;

- в установлении правила измерений первичных отклонений механизмов;

- в разработанных математической и имитационной моделях образования отклонений ИО многокоординатной машины;
- в разработанной методике анализа точности многокоординатной машины с ЧПУ методом имитационного моделирования;
- в синтезе алгоритма определения корректирующих поправок для модифицированного способа коррекции первичных отклонений квазипараллельными вычислительными процессами;
- в разработанном методе и созданном устройстве для измерения отклонений пересечения осей поворота ИО;
- в динамической модели НС многокоординатной машины с ЧПУ и методике определения динамической податливости НС;
- в методике калибровки и диагностики точности многокоординатной машины при её сборке.

**Достоверность полученных результатов** диссертации подтверждается:

- применением фундаментальных положений механики и метрологии,
- проведением измерений первичных и интегральных отклонений механизмов на современном измерительном оборудовании и современном многокоординатном технологическом оборудовании с ЧПУ,
- сопоставлением результатов проведенного имитационного моделирования с рядом известных частных решений,
- использованием информации о различных методах и средствах измерений из достоверных литературных источников.

**Практическая ценность работы заключается в том, что:**

1) Создана имитационная модель вычисления отклонений ИО по первичным отклонениям звеньев механизмов для 5 координатных машин последовательной структуры, архитектура построения которой может быть положена в основу блока полной коррекции в создаваемых системах ЧПУ. С помощью этой модели могут проводиться исследования точности многокоординатной машины с ЧПУ, в частности, определяться баланс точности и выявляться резервы её повышения.

2) Предложен модифицированный способ коррекции первичных отклонений квазипараллельными вычислительными процессами на основе созданной имитационной модели.

3) Проведенная систематизация методов и средств измерений, первичных и интегральных отклонений многокоординатных машин с ЧПУ существенно облегчает выбор измерительных средств для проведения испытаний машин на точность и указывает направления создания недостающих измерительных средств.

4) Разработанные метод и устройство для измерения отклонений пересечения осей поворота в многокоординатных машинах с ЧПУ позволяют существенно повысить точность юстировки и уменьшить трудоёмкость сборочных работ.

5) Выявленные связи дефектов изготовления станка мод. МС - 300 с первичными отклонениями механизмов позволяют определить скрытые дефекты и причины их возникновения на стадии отладки машины (используется при изготовлении многокоординатных станков и другого технологического оборудования в ОАО НИАТ).

**На защиту выносятся:**

- принцип повышения точности, заключающийся в сочетании конструктивных и технологических методов уменьшения случайной составляющей отклонений и цифровой коррекции, направленной на компенсацию систематической;
- методика построения (синтеза) матричной и имитационной модели образования отклонений ИО многокоординатной машины с ЧПУ;
- метод анализа точности многокоординатных машин с ЧПУ на основе имитационного моделирования отклонений воспроизведения пространственной траектории;
- методика синтеза алгоритма определения корректирующих поправок для модифицированного способа коррекции первичных отклонений квазипараллельными вычислительными процессами;
- правило проведения измерений первичных отклонений и систематизация средств измерения первичных и интегральных отклонений;
- метод и устройство для измерения отклонений пересечения осей поворота для 5 координатных машин с ЧПУ;
- результаты экспериментальных исследований влияния силовых и температурных деформаций НС станка мод. МС - 300 на первичные отклонения и мероприятия по их уменьшению;
- динамическая модель НС многокоординатной машины с ЧПУ и методика определения динамической податливости НС;
- элементы калибровки и диагностики точности многокоординатной машины, базирующихся на выявленных устойчивых связях дефектов изготовления машины с первичными и интегральными отклонениями механизмов (отклонениями позиционирования).

**Реализация результатов работы.** Работы выполнялись в ИМАШ РАН по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2004 - 2012 годы по темам: 3-04 «Разработка основ теории и методов синтеза перспективных механизмов и машин с улучшенными рабочими и эксплуатационными характеристиками», 2-09 «Разработка методов анализа и синтеза многофункциональных механизмов и машин для перспективных технологий» и на 2013 - 2020 годы по теме 1.13. «Разработка методов анализа и синтеза новых классов механизмов и технологических процессов для машин новых поколений», а также в рамках сотрудничества с ОАО НИАТ по линии ЦКП при ИМАШ РАН «Исследование и диагностика точности и жесткости многокоординатных машин».

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и научно-технических симпозиумах: на семинаре «The 5th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar» (Germany, Chemnitz, 2006 г.), на XV Международном Симпозиуме: «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» (Москва-Зеленоград, 2006 г.), на Международной конференции по теории механизмов и механике машин», (г. Краснодар, 2006 г), на Международной конференции по теории механизмов и механике машин», (г. Астрахань, 2007 г), на VIII Международной научно-технической конференции по динамике технологических систем (Ростов-Дон, 2007 г.), на научной конференции «Ориентированные Фундаментальные исследования РФФИ – Федеральные целевые программы, наукоемкое производство» (Москва, 2007 г.), на научной конференции «Ориентированные фундаментальные исследования – новые модели сотрудничества в инновационных процессах» (Москва, 2008 г.), на международной конференции «Проблемы машиноведения» (Москва, 2008 г.), на XVI Международном Симпозиуме: «Динамика виброударных (сильно нелинейных)» (Москва-Зеленоград, 2009 г.), на международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении» (Москва, 2010), на Десятой сессии международной научной школы, посвященной памяти В.П. Булатова «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов», (Санкт-Петербург, 24-28 октября 2011 г.), на II международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (Москва, 2012), на X Международном научно-техническом форуме «ИННОВАЦИЯ, Экология и РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ (ИнЭРТ-2012)» (Ростов н/Д, 2012г.), на Одиннадцатой сессии международной научной школы, посвященной памяти В.П. Булатова «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов», (Санкт-Петербург, 21-25 октября 2013 г.), на международной конференции «МАШИНЫ, ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ», посвященной 75-летию Института машиноведения им. А.А. Благоврава РАН (Москва, 21-22 ноября 2013 г.), на III Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении” FRITME-2014, ИМАШ РАН, Москва, Россия, 13-15 мая 2014 г., на XVIII Международном Симпозиуме «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» - DYVIS-2015, посвященный 100-летию со дня рождения д.т.н., проф. А.Е. Кобринского (Москва – Бекасово, 17-23 мая 2015 г., на International Conference VIBROENGINEERING-2016: DYNAMICS OF STRONGLY NONLINEAR SYSTEMS Moscow, Russia October 4 – 7, 2016.

**Публикации.** Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 38 печатных работах. Из них 18 статей в журналах, указанных в перечне ВАК России, 3 авторских свидетельства, 1 патент на полезную модель и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Формирование общей идеи, постановка научной проблемы, способы решения, основные научные результаты полностью принадлежат автору. Реализация результатов и экспериментальные исследования выполнены на предприятии ОАО НИАТ в рамках научно-исследовательских работ Центра коллективного пользования при ИМАШ РАН «Исследование и диагностика точности и жесткости многокоординатных машин». Акт об использовании результатов докторской диссертационной работы приведён в приложении № 2.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, основных выводов и результатов, списка использованной литературы из 201 наименования. Работа включает в себя 335 страниц текста, в том числе 187 рисунков, 14 таблиц и 6 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований. Отмечена научная новизна и практическая ценность работы. Отражены основные положения, выносимые на защиту.

*В главе I* дан анализ состояния проблемы точности многокоординатных машин с ЧПУ, без решения которой невозможно достижение конкурентоспособности продукции современного машиностроения. Многокоординатные машины с ЧПУ являются основой машиностроительного производства.

Точность машины оценивается отклонениями взаимного положения ИО при выполнении рабочих операций. Чем меньше эти отклонения, тем точнее машина. Точность отработки траектории ИО во многом определяет эффективность работы машины и неуклонно повышается от года к году.

Точность машины в первую очередь определяется точностью механизмов, положенных в основу её НС.

Основы теории точности механизмов были разработаны академиком Н.Г. Бруевичем. Методы расчёта точностных параметров механизмов машин и приборов (включая вероятностные) были развиты Калашниковым Н.А., Колчиным Н.И., Булатовым В. П., Фридлендером И.Г., Сергеевым В.И., Тимофеевым Б.П., Бородачёвым Н.А., Цуккерманом С.Т., Архангельским Л.А, Махровским В.Г., Коченовым М.И., Тайц Б. А., Кайнером Г.Б., Павловым Б.И., Правоторовой Е.А. и др.



Вопросы анализа и синтеза механизмов параллельно - последовательной структуры с позиции обеспечения точностных показателей машин, в частности, роботов и манипуляторов, рассматривались в работах Коловского М.З., Глазунова В.А., Колискова А.Ш., Подураева Ю.В., Корендясева А.И., Саламандры Б.Л., Тывеса Л.И., Ющенко А.С., Медведева В.С., Болотина Л.И. и др.

Повышение точности многокоординатной машины с ЧПУ осуществляется путем совершенствования конструкции НС машины и технологии её изготовления (Решетов Д.Н., Базров Б.М., Портман В.Т. и др.) и/или совершенствованием процесса управления машиной с использованием методов коррекции.

Совершенствование процесса управления машиной с позиций повышения точности её работы связано с измерением отклонений и/или возмущений, действующих на машину, и использованием этой информации в системе ЧПУ для коррекции возникающих первичных и интегральных отклонений.

Большой вклад в развитие этого направления внесли отечественные учёные: Балакшин Б. С., Кобринский А. Е., Соломенцев Ю. М., Колисков А. Ш., Ратмиров В. А., Вульфсон И. А., Шмутер С. А., Базров Б. М., Анисимов Б. В., Тимофеев А.В., Гусев И. Т., Невельсон М. С., Тимирязев В. А. и др.

Первичные отклонения и их связь с точностью движения И О рассматривали: Проников А.С., Каспарайтис А.Ю., Bryan J.B., Schwenke H., Knapp W., McKeown P.A., Donmez M., Hocken R., Zhang G., Soons, J., Spur, G., Sartori S., Trapet E., Schultschik R., Ertl F., V. Bringmann B., Ziegert J., Schmitz T., Balsamo A. и др.

Проблема точности многокоординатных машин с ЧПУ состоит в том, что, при высокой точности отдельных узлов (первичные отклонения малы) «объёмная» точность (интегральные отклонения) машины на 1 - 2 порядка ниже.

Для решения этой проблемы в настоящей работе были разработаны:

- 1) Методы исследования баланса точности.
- 2) Методы синтеза точности многокоординатной машины с ЧПУ.

В основу указанных методик положена разработанная математическая и имитационная модели образования интегрального взаимного отклонения ИО машины с ЧПУ. Для этого было введено новое понятие - «управляемый по программе ползун/шарнир».

Для реализации в практике машиностроения разработанных методов

анализа и синтеза точности многокоординатной машины с ЧПУ также были рассмотрены вопросы: 1) измерение первичных и интегральных отклонений механизмов многокоординатных машин с ЧПУ; 2) влияние квазистатических возмущающих факторов (веса, температуры) на первичные отклонения механизмов многокоординатной машины с ЧПУ; 3) влияние инерционных сил на точность воспроизведения пространственной траектории ИО многокоординатной машины; 4) отработка методики калибровки и диагностики многокоординатной машины в процессе сборки.

### **Глава II. Первичные отклонения звеньев механизмов с поступательными и вращательными парами и правило их измерения**

Аналитическая модель образования интегрального отклонения строится в понятиях теоретической механики, а в качестве исходных данных о первичных отклонениях механизмов позиционирования используются результаты измерения параметров точности реальной машины, в которых отражаются её жесткостные и тепловые свойства. Такой подход позволяет в модели, построенной в понятиях «твердотельной механики», учитывать, наряду с отклонениями (размеров, формы, расположения) изготовления присоединительных поверхностей деталей и узлов, также жесткостные и тепловые свойства машины (температурные деформации).

Для построения искомой модели используются основные положения теории точности механизмов (идеальный механизм, первичные ошибки механизма, ошибки положения ведомого звена механизма, ошибки перемещения ведомого звена механизма и др.). Вместо термина «ошибка» в данной работе используется термин «отклонение», которое, по мнению автора, более полно отражает «природу» дополнительного малого перемещения звена в пространстве. По аналогии с реальным и идеальным механизмом введены понятия реальной и идеальной детали.

Переход из системы координат одного звена в систему координат другого звена может быть описан в матричной форме преобразования координат с учётом первичных отклонений, присущих данной кинематической паре.

На рис. 1, в качестве примера, представлены первичные отклонения стола (ползуна), перемещаемого по программе по прямолинейным направляющим (линейная координата  $X$ ) (обозначения в соответствии с ISO 230-7). Здесь: 1 – ползун (салазки), 2 - отклонения (поворот)  $ЕСХ$  ( $\alpha_z(x_H)$ ) вокруг оси  $Z$ , 3 - линия измерения отклонений  $EZX$  ( $\delta_z(x_H)$ ) от прямолинейности в пл.  $XZ$ , 4 - отклонения (поворот)  $EAX$  ( $\alpha_x(x_H)$ ) вокруг оси  $X$ , 5 - линия измерения отклонений  $EXX$  ( $\delta_x(x_H)$ ) позиционирования вдоль  $X$ , 6 – направляющие, 7 - линия измерения отклонений  $EYX$  ( $\delta_y(x_H)$ ) от прямолинейности в пл.  $XY$ , 8 – отклонения (поворот)  $ЕВХ$  ( $\alpha_y(x_H)$ ) вокруг оси  $Y$ .

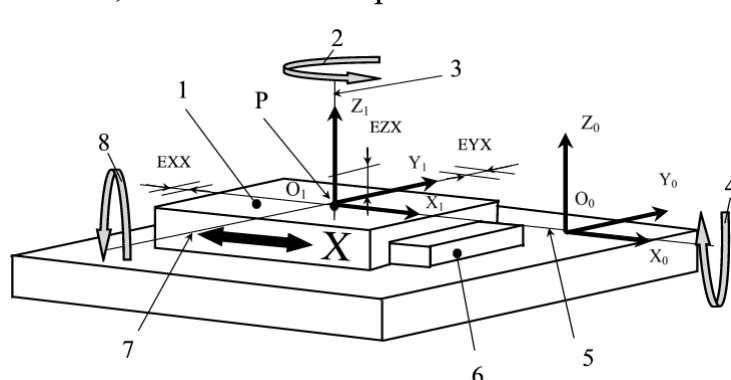


Рис.1.

Для построения модели интегрального отклонения по первичным отклонениям удобно пользоваться уравнениями отклонений  $\delta_x(x_n)$ ,  $\delta_y(x_n)$ ,  $\delta_z(x_n)$ ,  $\alpha_x(x_n)$ ,  $\alpha_y(x_n)$ ,  $\alpha_z(x_n)$  в функции координаты  $x_n$  невозмущенного поступательного движения ползуна относительно неподвижной системы координат, связанной с направляющими 6.

В общем случае движение твердого тела можно рассматривать как состоящее из поступательного движения вместе с полюсом (Р) и сферического движения вокруг полюса Р. Переход тела из одного положения в пространстве в другое (смежное) может быть выполнен при помощи различных поступательных перемещений. Конкретное поступательное перемещение зависит от выбора полюса движения.

Из этого следует, что при конкретном измерении отклонения относятся к определенному полюсу, и нужно:

- измерять положение полюса Р на перемещаемом теле (ползуне),
- проводить все измерения отклонений относительно этого полюса Р

(рис.1).

Полюс Р находится в точке пересечения линий измерения (3, 5, 7). В эту же точку помещается начало  $O_1$  системы координат  $X_1Y_1Z_1$ , связанной с ползуном. При переходе к другому полюсу необходимы новые измерения или полученные результаты измерений должны быть пересчитаны в соответствии с координатами старого и нового полюса и положения осей поворота.

Общее количество первичных отклонений любого звена, входящего в ту или иную кинематическую пару, равно 6 (3 линейных отклонения и 3 угловых отклонения).

Каждое из 6 отклонений является функцией переменных, равных числу степеней свободы кинематической пары.

Построение модели отклонения выходного звена как совокупности всех первичных отклонений звеньев механизма можно осуществлять последовательными переходами от каждого ведущего звена к выходному звену через соответствующие кинематические цепи и соответствующие кинематические пары.

### ***Глава III. Модель отклонения взаимного положения исполнительных органов многокоординатной машины***

Построение модели интегрального отклонения ИО многокоординатной машины рассмотрено на примере станка мод. МС – 300. На рис. 2, а) представлен общий вид станка, являющегося типичным примером многокоординатной машины с НС последовательной структуры, а на рис. 3, б) - структурная схема механизмов его несущей системы.

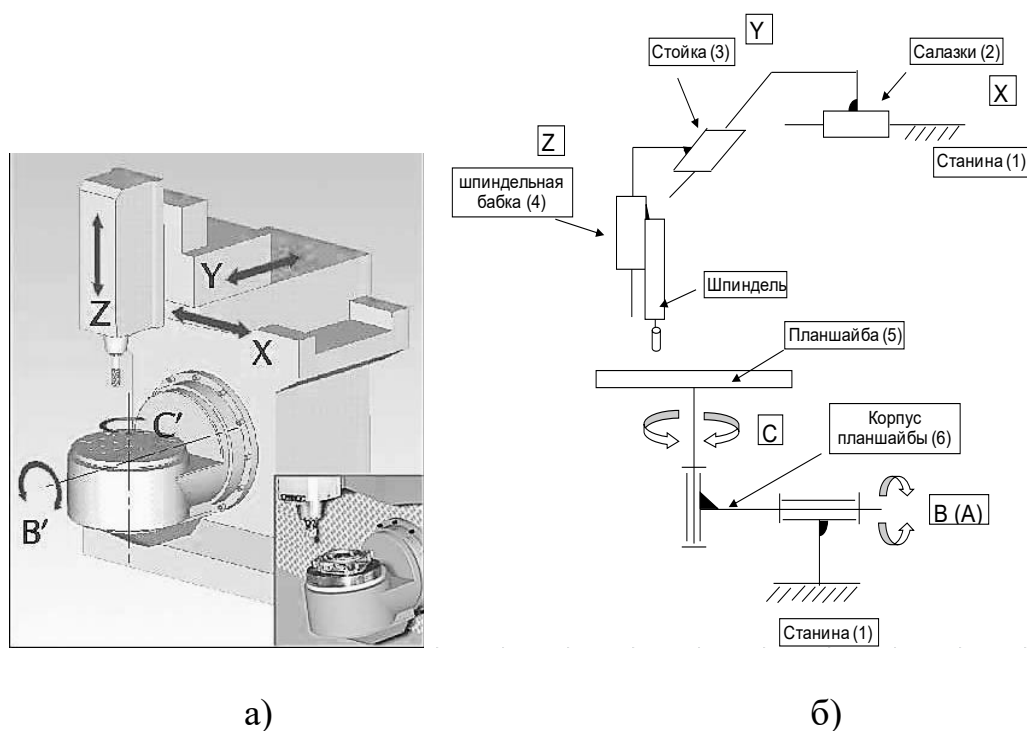


Рис. 2.

ВНС станка используются две группы механизмов. С помощью первой группы «станина (1) → салазки (2) → стойка (3) → шпиндельная бабка (4)» осуществляется перемещение шпинделя по линейным координатам X, Y, Z. С помощью второй группы механизмов «станина (1) → корпус планшайбы (5) → планшайба (6)» осуществляется движение обрабатываемой детали по угловым координатам C, B. В механизмах перемещения шпинделя применяются 3 привода подачи по линейным координатам (3 поступательные пары), а в механизмах поворотного стола – 2 привода угловой координаты (2 вращательные пары).

На рис. 3, а) представлена типичная схема привода подач по линейной координате X. Для решения поставленной задачи создания математической модели интегрального отклонения ИО предлагается рассматривать привод подач, как механизм «управляемый по программе ползун», блок-схема которого представлена на рис. 3, б). Входным звеном будем считать управляющую программу с системой ЧПУ, а выходным звеном являются салазки, перемещающиеся по линейным направляющим. В неидеальном механизме «управляемый по программе ползун» салазки будут находиться в направлении оси X в положении с отклонением  $\delta_x(x) = x_d - x_n$  и с отклонениями по другим 5 координатам (Y, Z, A, B, C) как твердое тело в пространстве.

Аналогичный подход применим к механизму привода подачи по угловой координате.

Используя представленную декомпозицию НС на подсистемы, каждая из которых представляет собой механизм «управляемый по программе ползун/шарнир», можно осуществлять переход из системы координат выходно-

го звена одного механизма к выходному звену другого механизма. Матрица перехода составляется по информации о первичных отклонения выходных звеньев и информации о связи (геометрической) между стойками указанных механизмов.

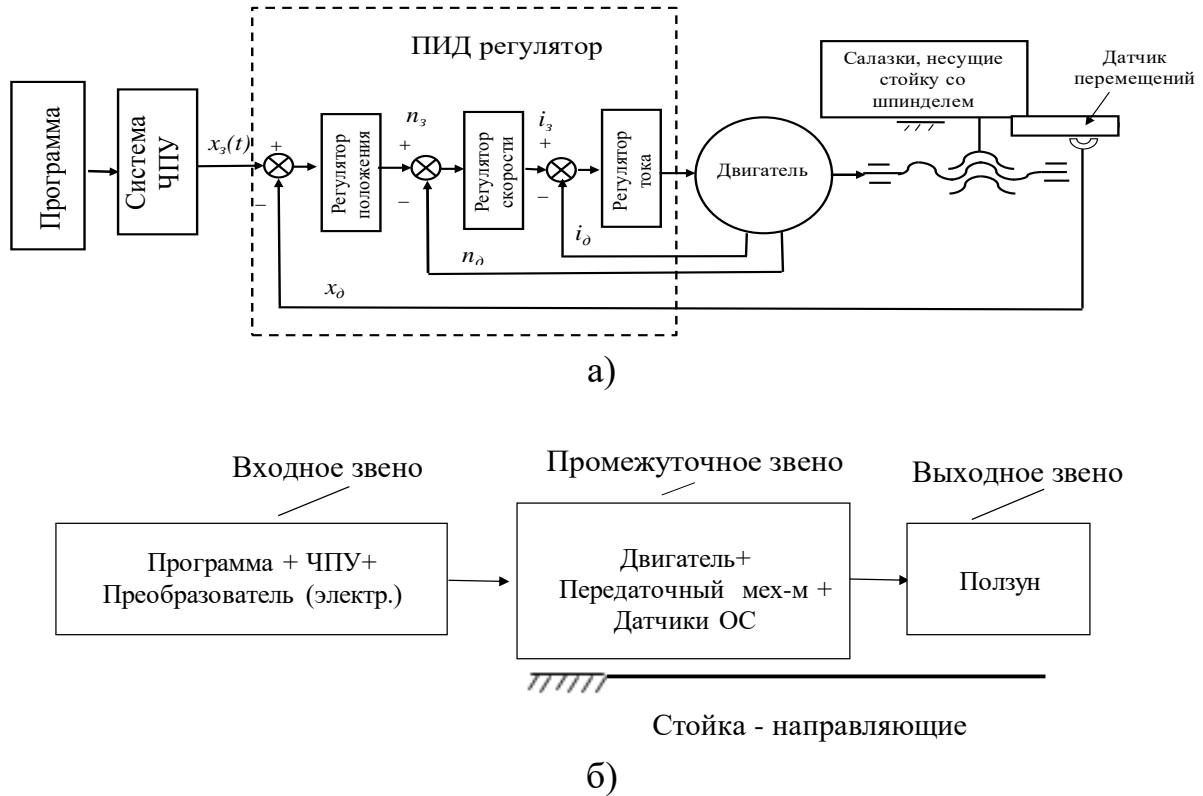


Рис. 3. Механизм «управляемый по программе ползун»: а) Принципиальная схема привода салазок по координате  $X$ , б) Блок-схема механизма «управляемый по программе ползун»

На рис. 4 представлена последовательная кинематическая цепь, составленная из звеньев, имеющих только идеальные вращательные пары.

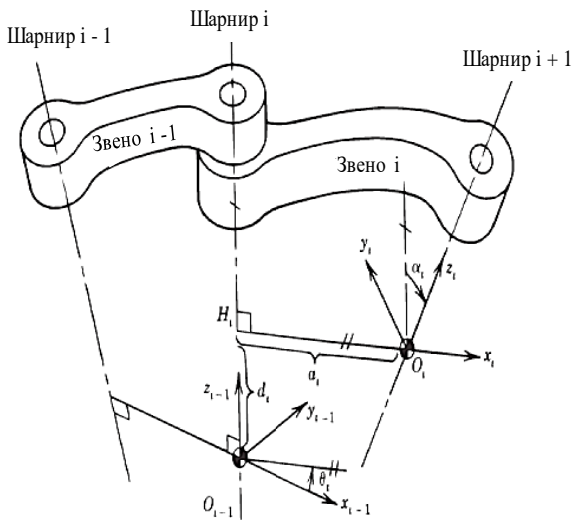


Рис. 4.

Здесь:  $a_i$  – общий перпендикуляр к оси  $i + 1$  и оси  $i$  (наименьшее расстояние между осями  $i$  и  $i + 1$ ),  $d_i$  – расстояние между общими перпендикулярами к трём осям  $i - 1, i, i + 1$ ,  $\alpha_i$  – угол между скрещивающимися осями  $i$  и  $i + 1$ ,  $\theta_i$  – угол между общими перпендикулярами к трём осям  $i - 1, i, i + 1$ .

Заменяем идеальные вращательные пары идеальными механизмами «управляемый по программе шарнир». В этом случае переход из системы координат  $(O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1})$  выходного звена механизма  $i-1$  в систему координат  $(O_iX_iY_iZ_i)$  выходного звена механизма  $i$  осуществляется в соответствии с кинематической моделью, предложенной Denavit and Hartenberg (D-H). Для записи уравнений перехода из одной системы координат в другую и обратно будем использовать следующую форму:

$$\bar{r}_0 = A_{i-1,i} \bar{r}_1, \quad \bar{r}_1 = A_{i-1,i}^{-1} \bar{r}_0, \quad A_{i-1,i}^{-1} = \text{inv} (A_{i-1,i}).$$

Здесь матрица  $A_{i-1,i}$  вычисляется в соответствии с:

$$A_{i-1,i} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Для описания перехода при идеальных шарнирах необходимо знание 4 параметров на один переход от механизма «управляемый по программе шарнир»  $i-1$  к механизму  $i$ :  $\alpha_i$ ,  $a_i$ ,  $\theta_i$ ,  $d_i$ .

Если рассматривается несущая система, состоящая из последовательно соединенных неидеальных механизмов «управляемый по программе шарнир» (неидеальные вращательные пары), то для описания перехода от механизма  $i-1$  к механизму  $i$  необходимо знание 10 параметров:  $\alpha_i$ ,  $a_i$ ,  $\theta_i$ ,  $d_i$  и  $\delta_x(\varphi_H)$ ,  $\delta_y(\varphi_H)$ ,  $\delta_z(\varphi_H)$ ,  $\alpha_x(\varphi_H)$ ,  $\alpha_y(\varphi_H)$ ,  $\alpha_z(\varphi_H)$ . Соответствующая матрица  $A_{i-1,i}$  будет иметь следующий вид:

$$A_{i-1,i} = \begin{pmatrix} 100 & \delta_x(\varphi_H) \\ 010 & \delta_y(\varphi_H) \\ 001 & \delta_z(\varphi_H) \\ 000 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_x(\varphi_H)) & -\sin(\alpha_x(\varphi_H)) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_x(\varphi_H)) & \cos(\alpha_x(\varphi_H)) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \cos(\alpha_y(\varphi_H)) & 0 & \sin(\alpha_y(\varphi_H)) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha_y(\varphi_H)) & 0 & \cos(\alpha_y(\varphi_H)) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\alpha_z(\varphi_H)) & -\sin(\alpha_z(\varphi_H)) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha_z(\varphi_H)) & \cos(\alpha_z(\varphi_H)) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 01 \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Для несущей системы, состоящей из последовательно соединенных *неидеальных* механизмов «управляемый по программе ползун» переход из системы координат выходного звена одного механизма к выходному звену другого последовательно подсоединенного механизма, осуществляется аналогичным образом, только по упрощённой схеме:

1) При переходе от неподвижного звена (станина) к выходному звену (салазкам) механизма «управляемый по программе ползун»:  $\alpha_1 = 0$ ,  $a_1 = 0$ ,  $\theta_1 = 0$ ,  $d_1 = 0$  и остаются 6 параметров перехода:  $\delta_x(x_H)$ ,  $\delta_y(x_H)$ ,  $\delta_z(x_H)$ ,  $\alpha_x(x_H)$ ,  $\alpha_y(x_H)$ ,  $\alpha_z(x_H)$ .

2) При переходе от выходного звена одного механизма «управляемый по программе ползун» к выходному звену другого механизма «управляемый по программе ползун», расположенных в одной плоскости, например XY:  $\alpha_2 = 0$ ,  $a_2 = 0$ ,  $d_3 = 0$  и 7 параметров перехода:  $\theta_2 = \Theta_{xy}$ ,  $\delta_x(y_H)$ ,  $\delta_y(y_H)$ ,  $\delta_z(y_H)$ ,  $\alpha_x(y_H)$ ,  $\alpha_y(y_H)$ ,  $\alpha_z(y_H)$ .

3) При переходе от выходного звена одного механизма «управляемый по программе ползун» к выходному звену другого механизма «управляемый по программе ползун», находящихся в одной плоскости, например, XZ и расположенной перпендикулярно к плоскости, проходящей через направляющие двух предшествующих механизмов (плоскости XY):  $\alpha_2 = 0$ ,  $a_2 = \Theta_{zx}$ ,  $\theta_2 = \Theta_{zy}$ ,  $d_3 = 0$  и 8 параметров перехода:  $a_2 = \Theta_{zx}$ ,  $\theta_2 = \Theta_{zy}$ ,  $\delta_x(y_H)$ ,  $\delta_y(y_H)$ ,  $\delta_z(y_H)$ ,  $\alpha_x(y_H)$ ,  $\alpha_y(y_H)$ ,  $\alpha_z(y_H)$ .

На рис. 5 представлена скелетная схема НС станка, на которой приведены все отклонения от перпендикулярностей и отклонения пересечения осей поворота, необходимые для построения матриц перехода.

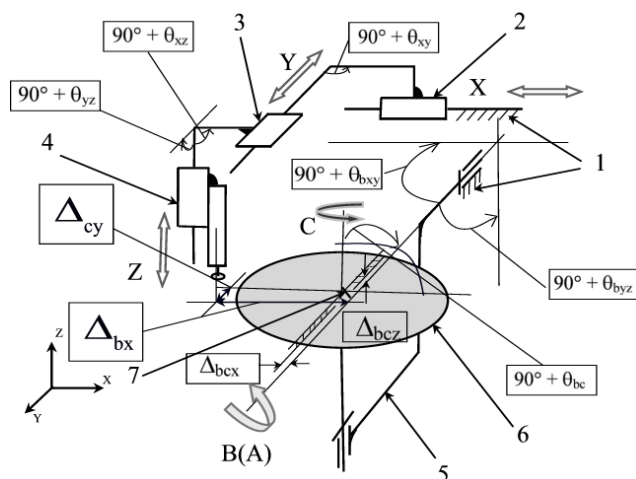


Рис. 5. Скелетная схема: 1 - станина, 2 - салазки, 3 - стойка, 4 - шпиндельная бабка, 5 - корпус планшайбы, 6 - планшайба.

планшайбы как для действительного станка ( $O_0(X_0Y_0Z_0) \rightarrow O_4(X_4Y_4Z_4) \rightarrow O_5(X_5Y_5Z_5)$ ), так и для идеального станка ( $O_0(X_0Y_0Z_0) \rightarrow O'_4(X'_4Y'_4Z'_4) \rightarrow O'_5(X'_5Y'_5Z'_5)$ ).

На рис. 6 представлена схема перехода из системы координат станины в систему координат шпиндельной бабки как для действительного станка ( $O_0(X_0Y_0Z_0) \rightarrow O_1(X_1Y_1Z_1) \rightarrow O_2(X_2Y_2Z_2) \rightarrow O_3(X_3Y_3Z_3)$ ), так и для идеального станка ( $O'_0(X'_0Y'_0Z'_0) \rightarrow O'_1(X'_1Y'_1Z'_1) \rightarrow O'_2(X'_2Y'_2Z'_2) \rightarrow O'_3(X'_3Y'_3Z'_3)$ ). Здесь же приведена схема перехода из системы координат станины в систему координат

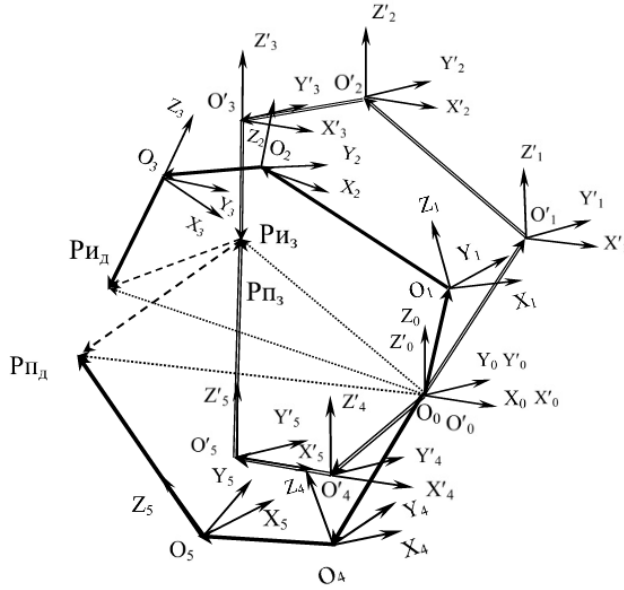


Рис. 6.

Интегральное отклонение позиционирования  $\overline{\delta_{\Sigma 1}}$  в механизме «станина – салазки – стойка – шпиндельная бабка» получается, если предположить, что имеется точка  $P_{И}$ , принадлежащая режущей кромке фрезы, установленной в шпинделе станка. Будем различать  $P_{Ид}$  – точка в случае действительного станка с присущими ему первичными отклонениями и  $P_{И3}$  – точка в случае «идеального» станка с нулевыми первичными отклонениями. Вектор  $\overline{O_0 P_{Ид}}$  определяет точку  $P_{Ид}$  в системе координат станины  $O_0(X_0 Y_0 Z_0)$ , а  $\overline{O_0 P_{И3}}$  опре-

деляет точку  $P_{И3}$  в этой же системе координат. Принимая во внимание, что вектор  $\overline{O'_3 P_{И3}}$  в системе координат  $O'_3(X'_3 Y'_3 Z'_3)$  имеет те же координаты, что и вектор  $\overline{O_3 P_{Ид}}$  в системе координат  $O_3(X_3 Y_3 Z_3)$ , и начала систем координат  $O_0(X_0 Y_0 Z_0)$  и  $O'_0(X'_0 Y'_0 Z'_0)$  совпадают, вектор  $\overline{\delta_{\Sigma 1}}$  можно представить в виде

$$\begin{aligned} \overline{\delta_{\Sigma 1}} &= \overline{P_{И3} P_{Ид}} = \overline{O_0 P_{Ид}} - \overline{O'_0 P_{И3}} = A_{0,3} \overline{O_3 P_{Ид}} - A'_{0,3} \overline{O'_3 P_{И3}} = \\ &= A_{0,3} \overline{O_3 P_{Ид}} - A'_{0,3} \overline{O'_3 P_{И3}} = (A_{0,3} - A'_{0,3}) \overline{O'_3 P_{И3}} \end{aligned}$$

Вектор  $\overline{O'_3 P_{И3}}$  будем считать заданным, а матрицы  $A_{0,3}$ ,  $A'_{0,3}$  вычисляются через первичные отклонения станка.

$$A_{0,3} = A_{0,1} A_{1,2} A_{2,3}; \quad A'_{0,3} = A'_{0,1} A'_{1,2} A'_{2,3}.$$

Аналогично определяется интегральное отклонение позиционирования  $\overline{\delta_{\Sigma 2}}$  в механизме «станина - поворотный стол – планшайба».

$$\begin{aligned} \overline{\delta_{\Sigma 2}} &= \overline{P_{П3} P_{Пд}} = \overline{O_0 P_{Пд}} - \overline{O'_0 P_{П3}} = A_{0,5} \overline{O_5 P_{Пд}} - A'_{0,5} \overline{O'_5 P_{П3}} = \\ &= A_{0,5} \overline{O'_5 P_{П3}} - A'_{0,5} \overline{O'_5 P_{П3}} = (A_{0,5} - A'_{0,5}) \overline{O'_5 P_{П3}} \end{aligned}$$

Вектор  $\overline{O'_5 P_{П3}}$  будем считать заданным, а матрицы  $A_{0,5}$ ,  $A'_{0,5}$  вычисляются через первичные отклонения станка.

$$A_{0,5} = A_{0,4} A_{4,5}; \quad A'_{0,5} = A'_{0,4} A'_{4,5}.$$

Суммарное интегральное отклонение позиционирования  $\overline{\delta_{\Sigma}}$  полностью характеризуется двумя векторами  $\overline{\delta_{\Sigma 1}}$  и  $\overline{\delta_{\Sigma 2}}$ .

$$\begin{aligned} \overline{\delta_{\Sigma}} &= \overline{\delta_{\Sigma 1}} - \overline{\delta_{\Sigma 2}} = \\ &= (A_{0,3} - A'_{0,3}) \overline{O'_3 P_{И3}} - (A_{0,5} - A'_{0,5}) \overline{O'_5 P_{П3}} \end{aligned} \quad (1)$$



Компоненты вектора  $\overline{\delta}_\Sigma = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ , являются линейными корректирующими поправками, которые должны вноситься в траекторию движения шпинделя относительно стола станка.

Интегральные угловые отклонения шпинделя относительно стола для данной схемы 5 координатного станка описываются простыми алгебраическими уравнениями.

$$\begin{aligned}\Delta A &= \alpha_{x\Sigma} = \alpha_{x\Sigma} I + \alpha_{x\Sigma} II, \\ \Delta B &= \alpha_{y\Sigma} = \alpha_{y\Sigma} I + \alpha_{y\Sigma} II, \\ \Delta C &= \alpha_{z\Sigma} = \alpha_{z\Sigma} I + \alpha_{z\Sigma} II.\end{aligned}\quad (2)$$

Следует отметить, что коррекция линейных интегральных отклонений является необходимым и достаточным условием отсутствия методической погрешности формообразования лезвийным «точечным» инструментом при 3 ÷ 5 координатной обработке. При других видах формообразования (развертывании, сверлении, профильном фрезеровании и шлифовании и др.) необходима коррекция не только линейных интегральных отклонений шпинделя относительно стола, но и интегральных угловых отклонений.

Коррекция первичных и интегральных отклонений взаимного положения ИО многокоординатной машины может осуществляться различными способами (рис. 7).

1. Полная коррекция всех (41) первичных отклонений с вычислением (имитационная модель) и обработкой через процедуру интерполирования приводами корректирующих линейных  $\Delta_\Sigma x$ ,  $\Delta_\Sigma y$ ,  $\Delta_\Sigma z$  и угловых  $\Delta_\Sigma A$ ,  $\Delta_\Sigma B$ ,  $\Delta_\Sigma C$  поправок.

2. Коррекция части (14) первичных отклонений механизмов 5 координатных машин последовательной структуры квазипараллельными вычислительными процессами. Способ реализован в современных системах ЧПУ, например, Sinumerik 840 D.

3. Коррекция по результатам измерения интегральных отклонений взаимного положения ИО многокоординатной машины с ЧПУ. Способ связан с получением, обработкой и хранением большого объема информации и с разработкой специальных систем коррекции. Способ применяется в КИМ.

4. Внесение коррекции через изменение параметров кинематической модели  $L_n = (P_n W_n)$ , положенной в основу управления машиной ( $L_n$  – вектор обобщенных координат многокоординатной машины,  $P_n$  – вектор параметров,  $W_n$  – вектор номинальных декартовых координат выходного звена,  $n$  – номер итерации). Способ применяется в многокоординатных машинах с ЧПУ со сложной параллельно-последовательной структурой с различными кинематическими парами, включая сферические.

Уравнения (1) и (2) является основой для создания имитационной модели образования отклонения ИО машины («Программа для расчета сум-

марного отклонения взаимного расположения ИО 5 координатного станка с поворотными столами» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616802, дата регистрации 22 июля 2013).

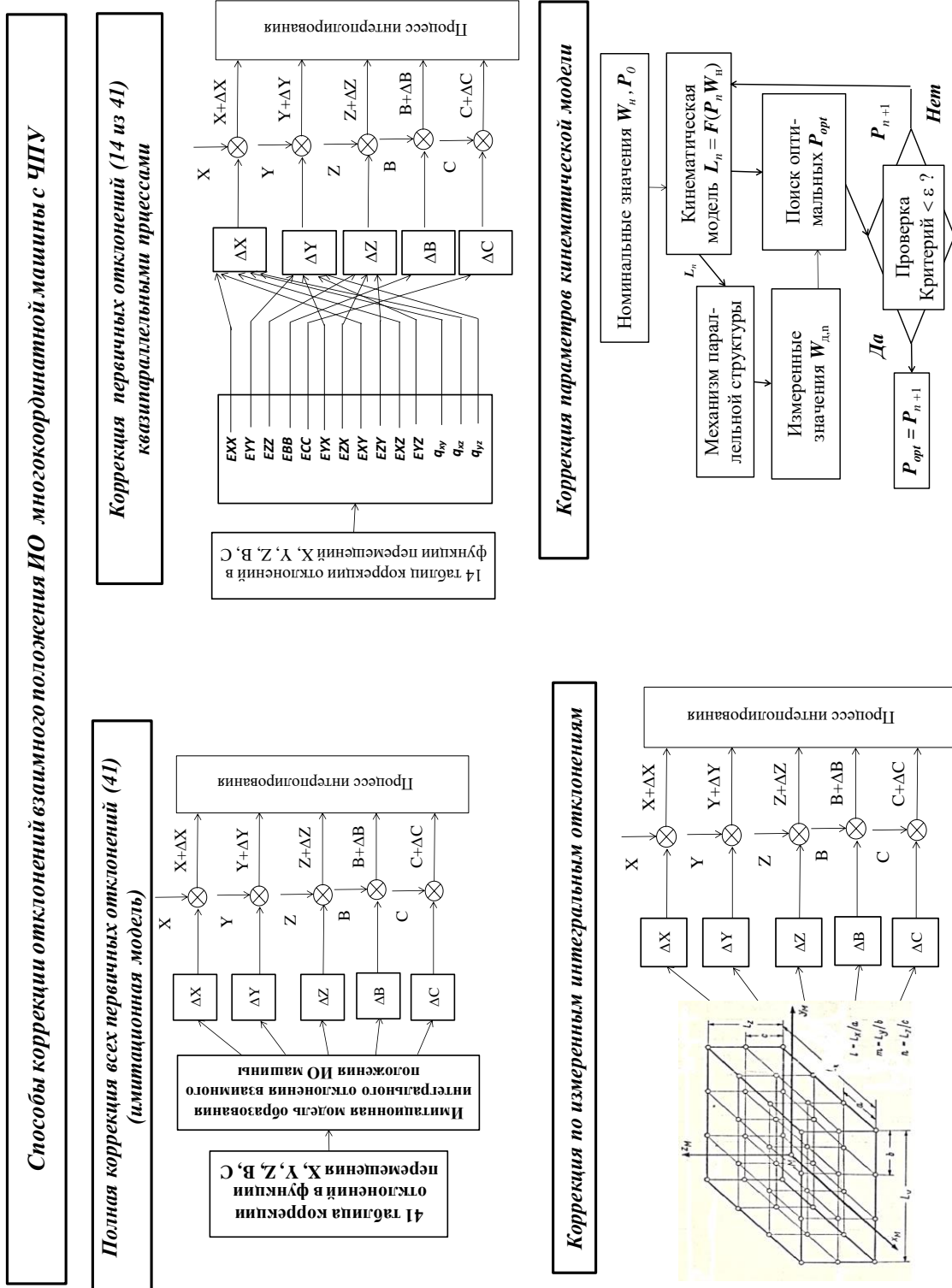


Рис. 7

На рис. 8, а) показано интегральное отклонение 2 от эталонной окружности 1 ( $R = 150$  мм) при отклонении от перпендикулярности  $\theta_{xy} = -100''$ , полученное с помощью модели psd0.m при наличии отклонений позиционирования  $Dx(x)$  и  $Dy(y)$  и отклонений от прямолинейности  $Dy(x)$  и  $Dx(y)$  в соответствии с рис. 8, б).

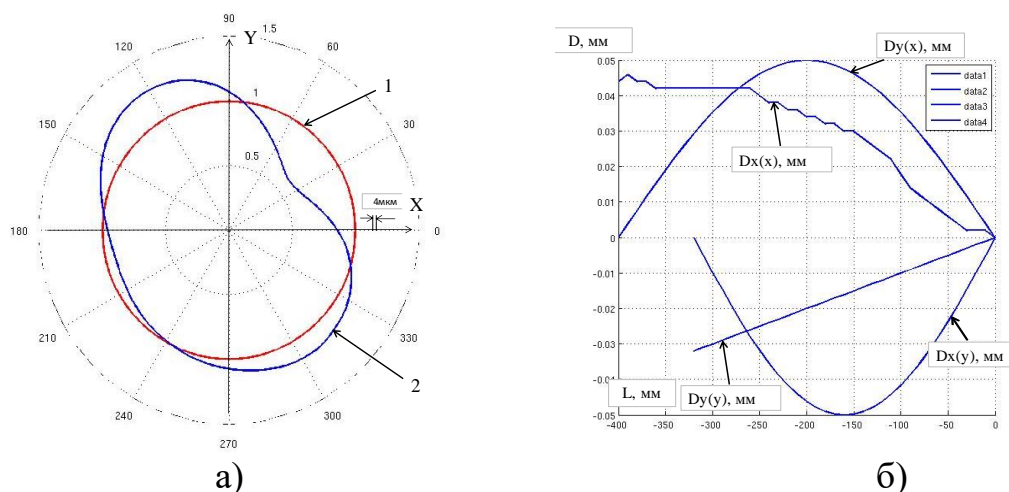


Рис. 8.

В качестве примера на рис. 9 показаны результаты расчёта интегрального отклонения DD с помощью программы psd43.m в контрольных точках рабочего пространства 5 координатного станка при учёте 41 первичного отклонения.

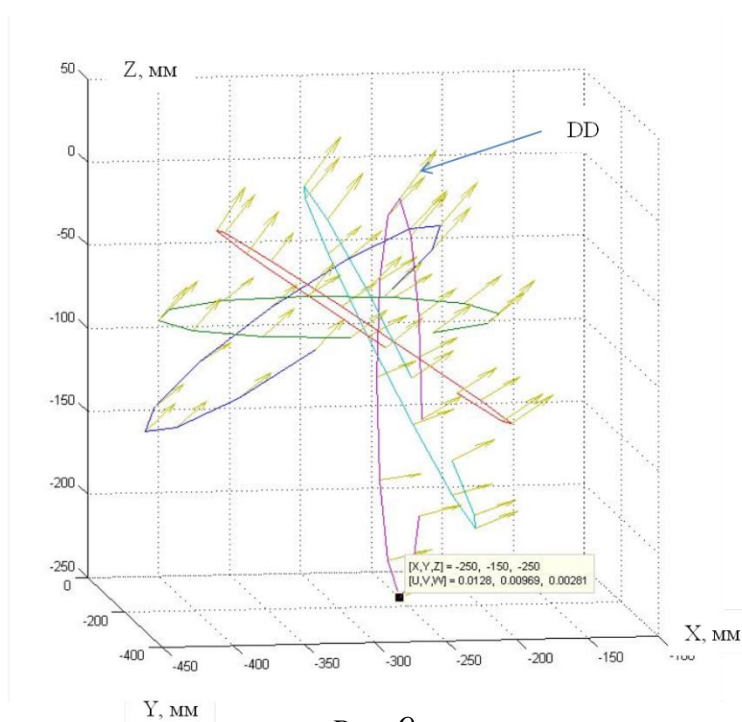


Рис. 9.

В работе разработана методика имитационного моделирования, с помощью которой проводится анализ точности многокоординатной машины (баланс точности), строится матрица чувствительности. С помощью разработанной методики удалось установить, что, выдерживая допуск только по модулю каждого первичного отклонения, мы получаем для каждой конкретной машины своё интегральное отклонение, которое может существенно варьироваться.

Проведённый анализ точности с помощью имитационной модели позволяет предложить новый способ повышения объёмной точности конкретного экземпляра машины. Способ заключается в том, что коррекцию пер-

точках рабочего пространства 5 координатного станка при учёте 41 первичного отклонения. В работе разработана методика имитационного моделирования, с помощью которой проводится анализ точности многокоординатной машины (баланс точности), строится матрица чувствительности. С помощью разработанной методики удалось установить, что, выдерживая допуск только по модулю каждого первичного отклонения, мы получаем для каждой конкретной машины своё интегральное отклонение, которое может существенно варьироваться.

вичных отклонений (14 из 41) проводят не по критерию минимума 14 первичных отклонений, а по критерию минимума параметра оценки объёмной точности, например,  $M$  или  $\Delta$  (максимальное по модулю интегральное отклонение  $M = \max \text{mod}(DD)$  по всем контрольным точкам  $i$ , разность между максимальным и минимальным значениями модуля интегрального отклонения  $\Delta = \max \text{mod}(DD) - \min \text{mod}(DD)$ ). Корректирующие поправки по 14 первичным отклонениям подбираются таким образом, чтобы  $M$  или  $\Delta$  были минимальными. Если ставится задача модернизации данной модели машины (станка) с целью повышения её точностных параметров, то в этом случае проводится исследование баланса точности данной модели машины. Строится матрица чувствительности по критериям  $\text{mean } M$  или  $\text{mean } \Delta$  и вырабатываются мероприятия по уменьшению первичных отклонений, наиболее сильно влияющих на объёмную точность.

#### **Глава IV. Методы и средства измерения первичных отклонений механизмов многокоординатных машин с ЧПУ.**

Для выполнения анализа и синтеза точности многокоординатных машин с ЧПУ необходимы данные о первичных отклонениях.

В работе проведена систематизация средств измерений первичных отклонений, существенно облегчающая выбор средств измерения для исследования и диагностики точности многокоординатных машин с ЧПУ.

Классификация и систематизация средств измерений показала, что наиболее развиты методы и средства измерений для отклонений, относящихся к линейным координатам. Для измерения  $EAB$ ,  $ECB$ ,  $EBC$ ,  $EAC$  — отклонений «покачивания» столов  $B$  и  $C$  в функции угла поворота, универсальных средств нет. Также отсутствуют универсальные средства измерения отклонений от взаимной перпендикулярности осей  $B$  и  $C$ .

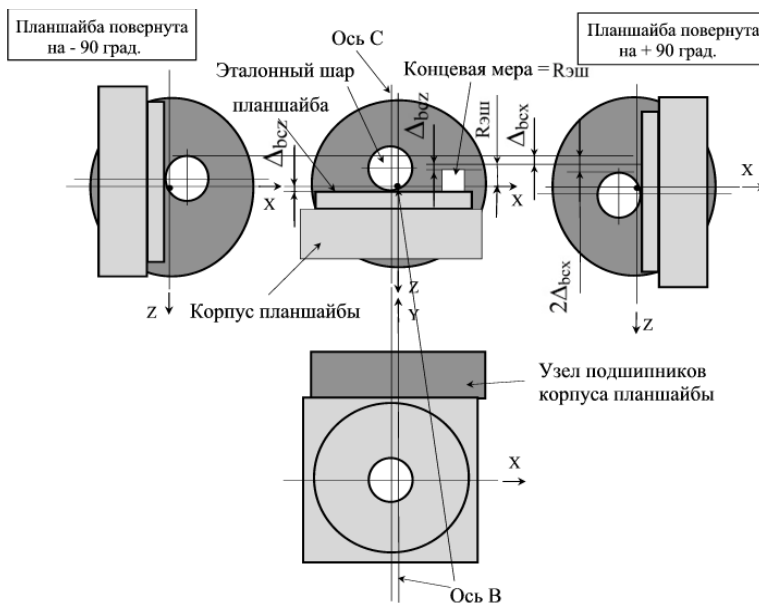


Рис. 10. Схема измерений отклонений  $\Delta_{bcx}$  и  $\Delta_{bcz}$

В ИМАШ РАН совместно с ОАО НИ-АТ было разработано измерительное устройство с образцовым шаром (рис. 10 и рис. 11). Отклонение от пересечения  $\Delta_{bc}$  (позиция 7 на рис. 5) осей  $C$  и  $B$  есть наименьшее расстояние между осями. Требование, чтобы ось  $B$  лежала в плоскости «зеркала» планшайбы, регламентируется отклонением  $\Delta_{bcz}$  — проекцией  $\Delta_{bc}$  на ось  $Z$ .

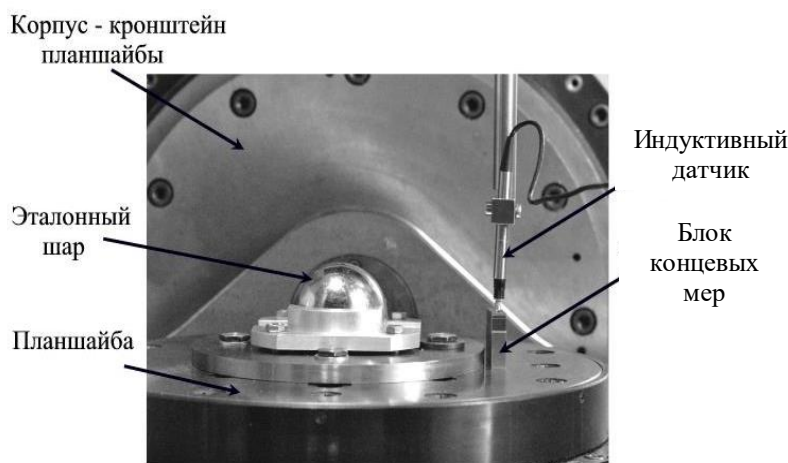


Рис. 11.

300 и мод. МС – 700 (ОАО НИАТ).

Применение разработанной методики и приспособления позволяет добиваться путём юстировки пересечение осей с отклонением  $< 10$  мкм.

#### **Глава V. Методы и средства измерения интегрального отклонения взаимного положения ИО многокоординатной машины с ЧПУ.**

После того, как проведена коррекция первичных отклонений в соответствии с имитационной моделью образования интегрального отклонения положения ИО многокоординатной машины, необходимо проверить (оценить) результаты коррекции.

Эта задача наиболее полно решается методами и средствами измерения «объёмной» точности.

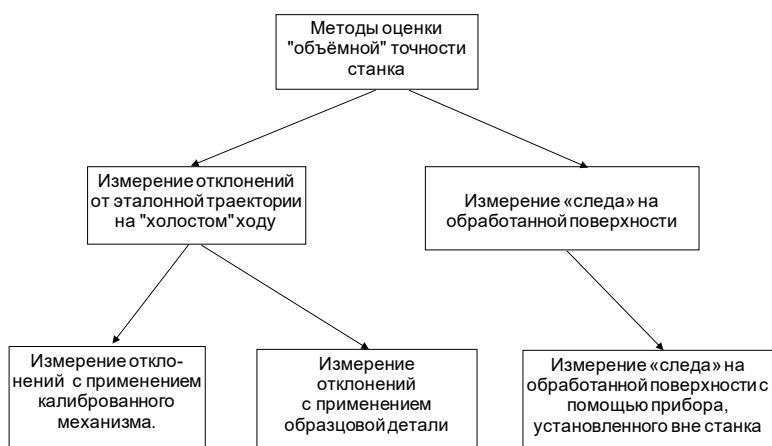


Рис. 12

ка. Этими методами являются: 1) метод измерения отклонений с применением калиброванного механизма (эталонные траектории), 2) метод измерения отклонений с применением образцовой детали. Третий метод основан на измерении «следа» на обработанной поверхности.

В настоящее время в промышленности нашли широкое применение приборы измерения отклонений от эталонной траектории, которые наряду с

Для измерения отклонений  $\Delta_{bcx}$  и  $\Delta_{bcz}$  удобно пользоваться измерительным приспособлением, принцип действия которого основан на свойстве шара – равно удалённости каждой точки его поверхности от центра.

Разработанная методика и приспособление используются для юстировки станков мод. МС –

На рис. 12 представлены методы оценки «объёмной» точности станка.

Два метода оценки «объёмной» точности станка основаны на измерении отклонений действительной траектории от «эталонной» на холостом ходу станка.

измерением медленно меняющихся во времени отклонений позволяют измерять колебания, возникающие при обработке эталонных траекторий.

Хорошей информативностью при высокой точности измерений отличается метод оценки «объёмной» точности станка, основанный на измерении «следа» на обработанной поверхности. Этот способ был развит при исследовании статических и динамических свойств станка «Гексамех-1».

На рис. 13 показан «вибрационный след», оставшийся на поверхности, обработанной на станке «Гексамех-1».

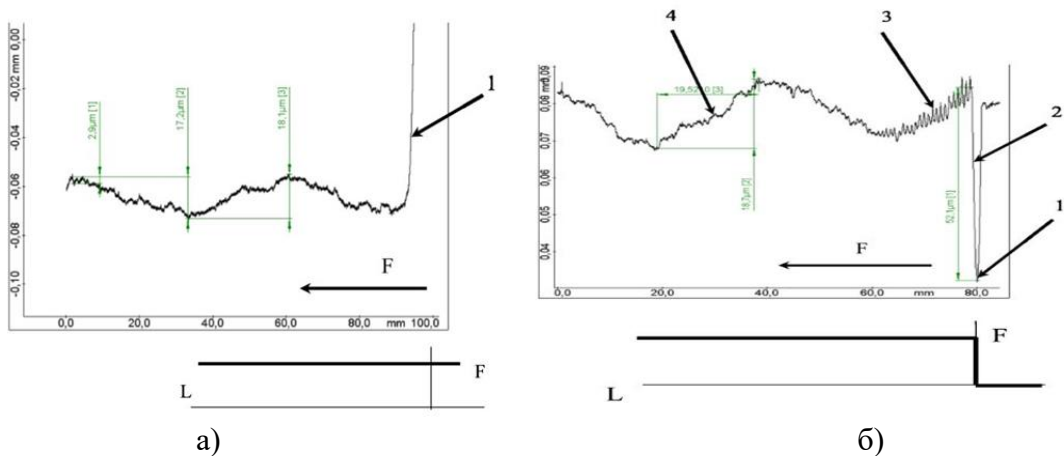


Рис. 13. Профилограмма обработанной поверхности: а)  $F = 540$  мм/мин и  $S = 6000$  об./мин, при «плавном» врезании 1; б)  $F = 720$  мм/мин и  $S = 6000$  об./мин, при «ступенчатом» нарастании подачи 1 - выстой, 2- участок разгона, 3 - участок свободных затухающих колебаний, 4 - участок с установившимся движением.

#### Глава VI. Влияние квазистатических возмущающих факторов (веса и температуры подвижных узлов) на точность движения ИО многокоординатной машины

На точность траектории движения ИО многокоординатной машины с ЧПУ наряду с отклонениями геометрической точности НС машины оказывают существенное влияние силовые и температурные деформации (рис. 14).

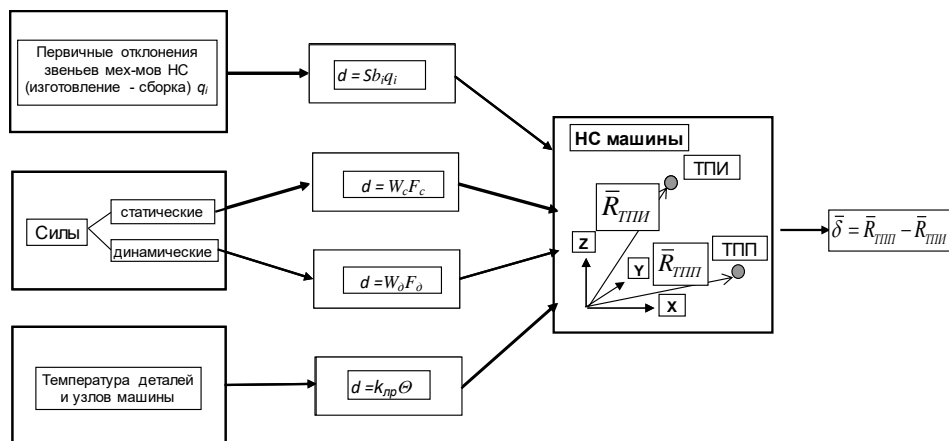


Рис. 14. Основные факторы, влияющие на точность машины

Здесь:  $\delta$  - смещение,  $b_i$  - коэффициент влияния  $i$ -го первичного отклонения  $\Delta q_i$  на отклонение выходного звена,  $F$  – силы различной природы (тяжести, рабочих процессов (резание), трения, инерции, электромагнитных процессов и др.),  $F_c$  – статические (квазистатические),  $F_d$  – динамические,  $W_{ст}$  – коэффициент статической податливости,  $W_d$  – коэффициент динамической податливости,  $\Theta$  - температура детали и узлов НС машины,  $k_{лр}$  – коэффициент линейного расширения.

Связь статической жёсткости с первичными и интегральными отклонениями выявляется при квазистатическом режиме испытаний. Силы, действующие в машине, влияют на первичные и интегральные отклонения через статическую и динамическую жёсткость. Исследование влияния веса подвижных узлов в станке мод. МС – 300 на отклонения позиционирования, на отклонения от прямолинейности и перпендикулярности движения по линейным координатам показало, что это влияние в ряде случаев является существенным.

На рис. 15 показаны отклонения  $EZY$  ( $Dz(y)$ ), вызванные деформациями консоли салазок при перемещении по ним стойки. Эти отклонения яв-

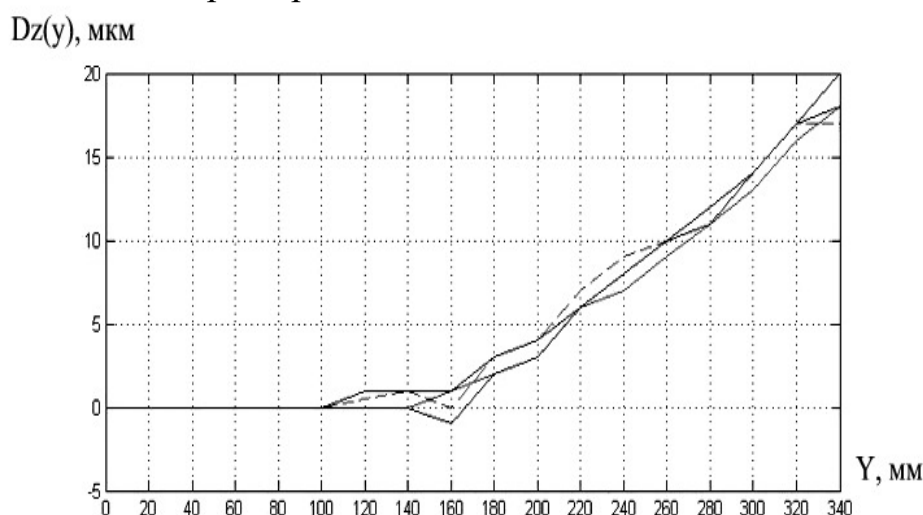


Рис. 15

ляются функцией одной переменной  $Y$  и не зависят от положения салазок по  $X$  и шпиндельной бабки по координате  $Z$ . Они хорошо компенсируются системой коррекции ЧПУ Sinumerik 840 D как отклонение от прямолинейности.

Влияние температурных деформаций на первичные отклонения механизмов НС станка мод. МС - 300 также выявляется при квазистатическом режиме испытаний.

В станке мод. МС – 300 применяется охлаждение электрошпинделя и двигателей (direct-drive) поворота планшайбы и корпуса планшайбы.

Непрерывное выделение большого количества тепла и отвод его в ре-лейном режиме существенно влияет на точностные параметры станка.

На рис. 16 представлены кривые отклонений позиционирования, измеренные при прямом (1) и обратном (2) направлении движения стойки для 2 прогонов в прямом и обратном направлении.

Кривые видоизменяются и смещаются одна относительно другой. Это объясняется тем, что включение/выключение холодильника происходит в разные периоды (начало, середина, конец) измерений. Функциональные отклонения переходят в разряд случайных при вычислении параметров точности позиционирования по ISO 230-7.

Результаты измерения точности позиционирования по координате  $Y$  для 5 станков показали, что уменьшение диапазона регулирования температуры с  $2,0^{\circ}\text{C}$  до  $0,2^{\circ}\text{C}$  существенно уменьшает случайную составляющую (примерно в 2 раза). Функциональная часть отклонения хорошо компенсируется системой коррекции, а дальнейшее уменьшение случайной составляющей возможно при переходе на систему охлаждения другого (непрерывного) типа.

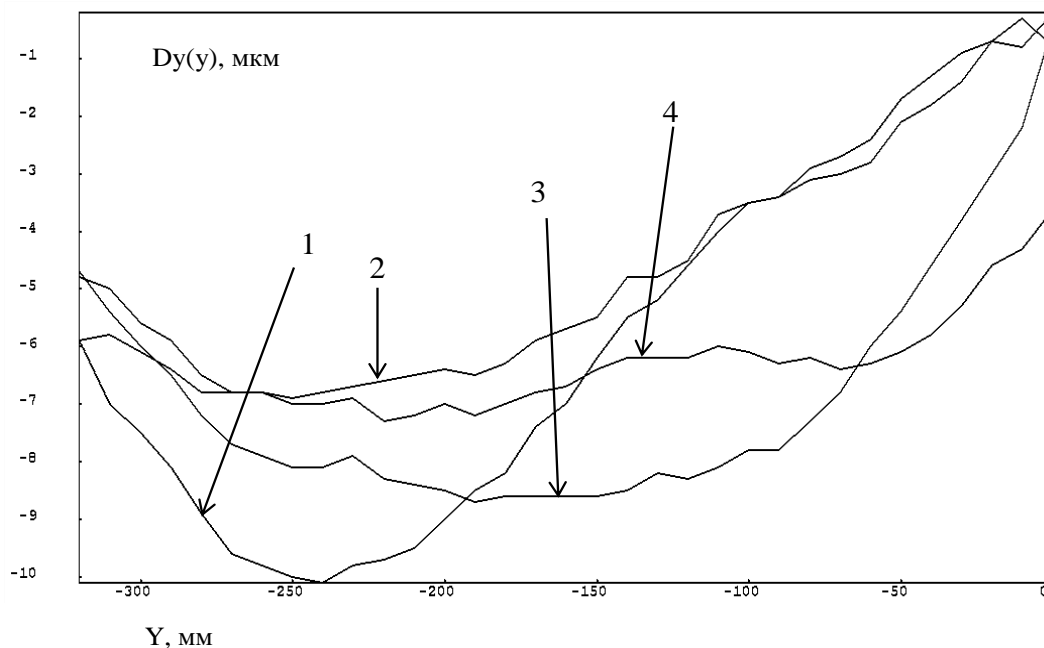


Рис. 16. Кривые точности позиционирования по координате  $Y$ : 1 – прямой ход и 1-й прогон, 2 – обратный ход и 1-й прогон, 3 – прямой ход и 2-й прогон, 4 – обратный ход и 2-й прогон

## **Глава VII. Влияние динамики (сил инерции) на точность воспроизведения траектории движения исполнительных органов многокоординатной машины**

### Динамический режим испытаний на холостом ходу

Многокоординатные машины становятся всё более быстроходными, поэтому является очень важным исследование влияния динамических



свойств НС на точность движения ИО машины, выявления «доли вклада» их в общий баланс точности многокоординатной машины с ЧПУ.

Для решения задач анализа и синтеза точности многокоординатных машин с ЧПУ предлагается НС машины представлять в виде двух взаимосвязанных подсистем I и II (рис. 17). Подсистема I – это часть НС, охваченная обратными связями. Она представляет собой электромеханическую систему (ЭМС), включающую в себя: ПИД регулятор, электродвигатель с электромагнитным полем (ЭМПД) и механическую часть, охваченную обратной связью. В случае станка МС - 300 механическая часть (координата X), охваченная обратной связью, содержит: ротор двигателя, зубчато-ремённую передачу, предохранительную муфту, ШВП и салазки. На блок-схеме механическая часть представлена в виде колебательной системы, состоящей из приведенной массы  $m_1$ , приведенной жесткости  $c_1$  и демпфирования  $d_1$ .

Подсистема II – это механическая часть НС, неохваченная обратными связями. В частности, применительно к НС координаты X – это все механические узлы, расположенные на салазках, а именно, стойка, с расположенной на ней шпиндельной бабкой, не-

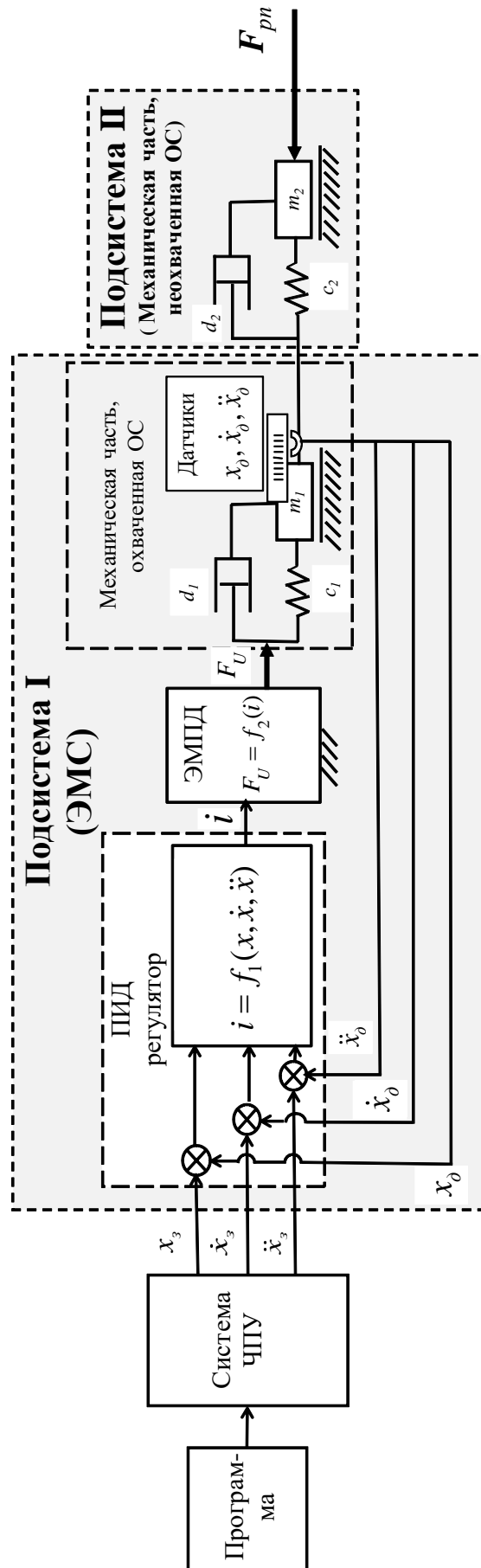


Рис. 17

сущей шпиндель. Это чисто механическая система, которую можно представить в виде колебательной системы, состоящей из приведенной массы  $m_2$ , приведенной жесткости  $c_2$  и демпфирования  $d_2$ .

Данное представление является дальнейшим развитием подхода к исследованию динамики машин, предложенного проф. М. З. Коловским

Представленная блок-схема является основой для исследования поведения НС в различных режимах, среди которых можно выделить следующие:

а) - невозмущенное состояние ( $x_3(t) = 0, \dot{x}_3(t) = 0, \ddot{x}_3(t) = 0, F(t) = 0$ ) (система в покое: отсутствует воздействие на НС со стороны системы ЧПУ и со стороны рабочего процесса);

б) - квазистатическое силовое нагружение при заданном нулевом значении управляемой координаты ( $x_3(t) = 0, F_i \neq 0, i = 1, \dots, n$ ) (измерение статической жесткости);

в) - нагружение НС заданным силовым воздействием, например, ступенчатым силовым воздействием, при заданном нулевом значении управляемой координаты ( $x_3(t) = 0, \dot{x}_3(t) = 0, \ddot{x}_3(t) = 0, F(t) = 500 \text{ Н}$  при  $t < t_0, F(t) = 0$  при  $t \geq t_0$ ) (измерение динамической жесткости по реакции на ступенчатое силовое воздействие);

г) - движение ИО машины при заданном ступенчатом воздействии по управляемой координате и нулевом силовом воздействии ( $x_3(t) = 0$  при  $t < t_0, x_3(t) = X = \text{Const}$  при  $t \geq t_0, F(t) = 0$ ) (изучение реакции привода на ступенчатое изменение управляемой координаты);

д) - движение ИО машины при заданной эталонной траектории и нулевом силовом воздействии ( $x_3(t) = 0$  при  $t < t_0, x_3(t) = \sin(\omega t)$  при  $t \geq t_0, F(t) = 0$ ) (изучение движения ИО машины по эталонным траекториям на холостом ходу (без нагрузки на рабочий орган));

е) - движение ИО машины при заданной эталонной траектории и силовом воздействии, меняющемся во времени ( $x_3(t) = 0$  при  $t < t_0, x_3(t) = \sin(\omega t)$  при  $t \geq t_0, F(t) = \text{Var}$ ) (обработка деталей - образцов);

ж) - движение ИО машины по заданной произвольной траектории и силовом воздействии, меняющемся во времени ( $x_3(t) = \text{Var}, F(t) = \text{Var}$ ) (общий случай изучения движения ИО).

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния динамических свойств НС на точность движения ИО для различных типов многокоординатных машин с ЧПУ при указанных режимах работы.

Влияние квазистатической составляющей инерционных, кориолисовых сил и сил резания на точность воспроизведения заданной траектории в

настоящее время оценивается, в основном, двумя способами: 1) с помощью интегральной статической жесткости НС машины, 2) обработкой деталей - образцов.

На рис. 18 представлены кривые статической жесткости (планшайба – корпус шпинделя) при нагружении вдоль оси  $X$  (показаны результаты трёх прогонов измерений (нагружение – снятие нагрузки)), полученные с помощью устройства, созданного совместно ИМАШ РАН и ОАО НИАТ. Устройство создано на базе датчика силы сжатия-растяжения с цифровым отсчетным устройством, с помощью которого удастся с одной установки измерить жесткость при сжимающих и растягивающих усилиях.

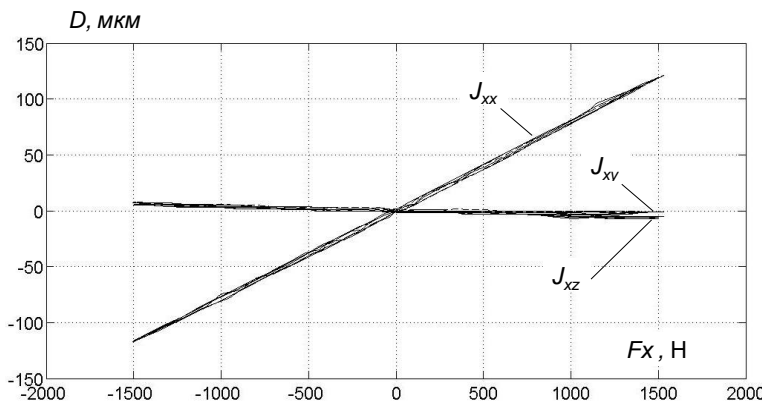


Рис. 18.

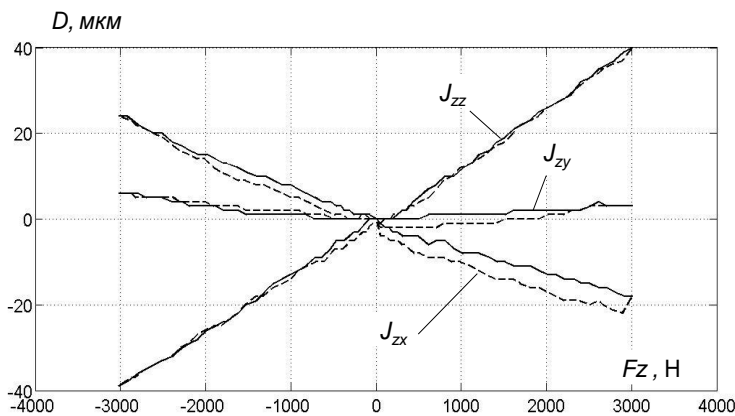


Рис. 19.

При нагружении по координате  $Y$  поведение статической жесткости аналогично, как при нагружении по  $X$ . Совершенно другая картина наблюдается при нагружении по координате  $Z$  (рис. 19).

При воздействии на НС статической силой  $F$  перемещение ИО машины - массы  $m_2$  будет происходить только за счет деформации пружины (жесткости)  $c_2$ . Деформации в механической части 3 ( $c_1$ ) не влияют на перемещение массы  $m_2$  благодаря действию ПИД – регулятора, обеспечивающего  $x_0 = x_3 = 0$ . По характеру

Поведения кривых статической жесткости можно оценивать: 1) насколько сильно деформируется механическая часть II НС от действия на неё квазистатической силы, 2) насколько качественно изготовлена механическая часть II НС машины (форма петли может свидетельствовать о наличии зазоров в подвижных соединениях, демпфирующих свойствах и др.).

По характеру поведения кривых статической жесткости, получаемых по данной методике, ничего нельзя сказать о жесткостных свойствах подсистемы I. О жесткостных и демпфирующих свойствах подсистемы I и всей НС машины в целом можно судить по «отклику» НС на силовое или кинематическое воздействие.

Для изучения динамической податливости НС многокоординатной машины удобно использовать специально разработанную методику, основанную на «ступенчатой разгрузке» НС, реализуемой спусковым механизмом (рис. 20).



Рис. 20.

Нагружение НС станка (корпус шпинделя – стол) осуществляется силой 500 Н через винтовой домкрат и динамометр. Далее, с помощью спускового механизма резко снимается нагрузка. В этот момент НС станка начинает колебаться и перемещения корпуса шпинделя во времени записываются

с помощью лазерного интерферометра ML10. Для расчёта динамической податливости достаточно записать «отклик» НС на ступенчатое силовое воздействие в виде временного сигнала (перемещение – время).

На рис. 21, а) представлена, в качестве примера, кривая динамической

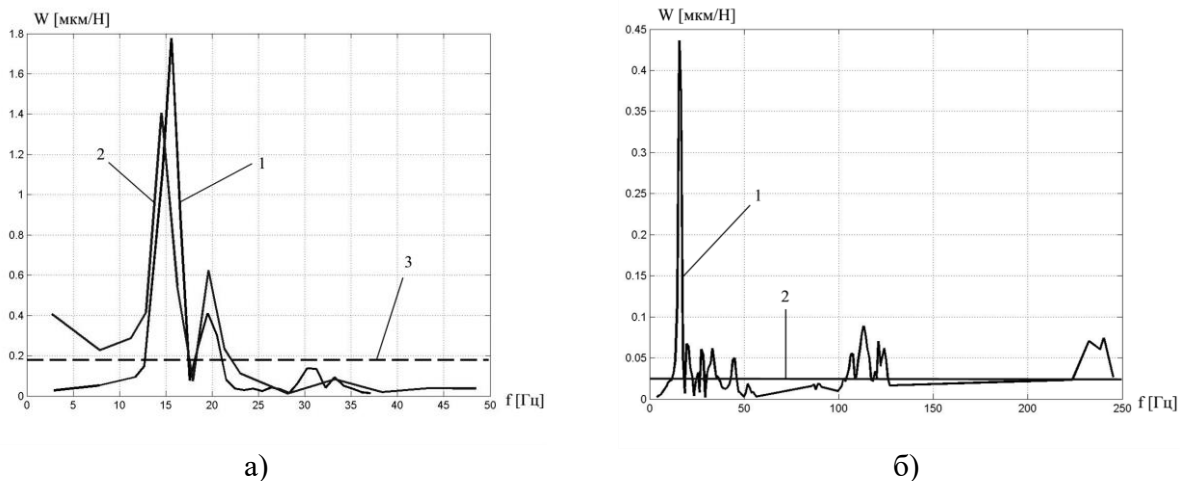


Рис. 21

податливости в направлении действия возбуждающей силы (1- ступенчатое силовое возбуждение, 2 – кинематическое возбуждение, 3 - статическая податливость), на рис. 21, б) кривая динамической податливости в направлении перпендикулярном к направлению действия возбуждающей сил (1 - кривая поперечной динамической податливости  $W_{yx}$ , 2- поперечная статическая податливость).

Собранный и систематизированный экспериментальный материал по испытаниям на холостом ходу является основой для:

- 1) анализа точности многокоординатных машин на повышенных динамических режимах методами моделирования,
- 2) синтеза схем машин повышенной динамической точности,
- 3) совершенствования процедуры калибровки и диагностики точности многокоординатной машины с ЧПУ.

**Приложение №1.** Текст программы psd0.m.

**Приложение №2.** АКТ об использовании результатов докторской диссертационной работы.

**Приложение №3.** Текст программы psd43.m.

**Приложение №4.** Координаты контрольных точек для анализа объёмной точности.

**Приложение №5.** Первичные отклонения.

**Приложение №6.** Матрица чувствительности.

### ***Итоги работы***

1. Развита теория точности механизмов применительно к точности многокоординатной машины с ЧПУ.

2. Сформулирован принцип повышения точности, основанный на сочетании конструкторско-технологических методов уменьшения случайной составляющей отклонений с цифровой коррекцией систематической части.

3. Выявлены способы цифровой коррекции первичных и интегральных отклонений для многокоординатной машины с ЧПУ.

4. Введено понятие механизма «управляемый по программе ползун/шарнир», разработана методика анализа первичных отклонений звеньев механизмов с поступательными и вращательными парами и выработано правило их измерения.

5. Создана методика синтеза математической и имитационной модели образования интегрального отклонения для многокоординатной машины с ЧПУ.

6. Предложен модифицированный способ коррекции первичных отклонений машины с ЧПУ и создана методика анализа и синтеза точности многокоординатной машины с использованием имитационного моделирования.

7. Проведена систематизация средств измерения первичных и интегральных отклонений для многокоординатных машин с ЧПУ и разработаны методика и устройство для измерения отклонений пересечения осей поворота столов.

8. Проведен анализ влияния квазистатических возмущающих факторов (веса и температуры узлов) на первичные и интегральные отклонения.

9. Предложена динамическая модель НС многокоординатной машины с ЧПУ и разработана методика анализа её поведения на различных режимах работы.

10. Проведены эксперименты и систематизирована информация по испытаниям на холостом ходу многоцелевых станков с ЧПУ (МС 300, Гексамех-1, МЦ-1, ФП 17, ФП 27 и др.).

11. Разработаны элементы калибровки и диагностики точности многокоординатной машины при её сборке.

### ***Список основных публикаций по теме диссертации***

#### ***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК***

1. Кобринский А.Е., Левковский Е.И., Серков Н.А. Классификация систем управления станками по информационным признакам // Станки и инструмент - 1971. - № 1. – С. 1-4.

2. Саламандра Б.Л., Серков Н.А. К оценке эффективности систем повышения точности обработки на металлорежущих станках // Машиноведение - 1972. - №5. С. 23-30.

3. Серков Н.А., Пан Е.И. Об одном методе коррекции пространственной конфигурации трубки // Машиноведение - 1985. - №4. С. 42-48.

4. Вайнштейн И.В., Серков Н.А., Сироткин Р.О. Станки для высокоскоростной обработки деталей и перспективы их развития в машиностроении // Авиационная промышленность - 2006. - № 3. - С. 49-55.

5. Вайнштейн И.В., Серков Н.А., Сироткин Р.О. Экспериментальное исследование статической жёсткости 5-ти координатного фрезерного станка с параллельной кинематикой // Проблемы машиностроения и надёжности машин – 2007. - № 5. - С.102-109.

6. Мерзляков А.А., Серков Н.А., Сироткин Р.О. Экспериментальные исследования динамических свойств станка с параллельной кинематикой // Проблемы машиностроения и надёжности машин – 2008. - № 1. - С.98-102.

7. Вайнштейн И.В., Серков Н.А., Сироткин Р.О., Мерзляков А.А. Экспериментальные исследования жесткости 5-ти координатного станка с параллельной кинематикой // СТИН - 2009. - № 1. - С.6-11.

8. Серков Н.А. Основные направления повышения точности металлорежущих станков // Проблемы машиностроения и автоматизации - 2010. - № 2. - С. 26-35.

9. Серков Н.А. Первичные отклонения звеньев механизмов с поступательными и вращательными парами // Проблемы машиностроения и надёжности машин. - 2011. - № 2. - С. 15-21.

10. Серков Н.А. Модель отклонения взаимного положения исполнительных органов многокоординатного станка // Проблемы машиностроения и надёжности машин -2011. - № 3. - С. 68-78.

11. Серков Н.А., Никуличев И.В. Методы и средства измерения первичных отклонений звеньев механизмов несущей системы многокоорди-

натных станков с ЧПУ // Проблемы машиностроения и автоматизации - 2012. - № 2. - С. 43-51.

12. Никуличев И.В., Серков Н.А. Влияние системы охлаждения на точность позиционирования многоцелевого станка модели МС-300М // Вестник МГТУ «Станкин» - 2012 (22). - № 3. -С. 77-82.

13. Серков Н.А. Методы и средства измерения интегрального отклонения взаимного положения рабочих органов многокоординатных станков с ЧПУ // Проблемы машиностроения и автоматизации - 2012. - № 4. - С. 112-124.

14. Никуличев И.В., Серков Н.А., Коваленко А.В., Шлесберг И.С. Влияние охлаждения на точность позиционирования многокоординатного станка МС-300 // Авиационная промышленность - 2013. - № 1. - С. 33-38.

15. Никуличев И.В., Шлесберг И.С., Серков Н.А. Исследование жесткости станков с ЧПУ по отклику на силовое воздействие // «Научное обозрение» - 2013. – № 1. - С. 124 – 129.

16. Серков Н.А., Шлесберг И.С., Мерзляков А. А., Никуличев И. В. Экспериментальные исследования статической жесткости 5 координатного станка с глобусным столом// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 6. С.90-95.

17. Пась О.В., Серков Н.А. Влияние зазора в приводах на точность воспроизведения траектории в многокоординатной машине с ЧПУ// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 5. С.3-10.

18. Pas' O.V. and Serkov N.A. Influence of the Gap and the Friction on Trajectory Reproduction Accuracy in a Multiaxis Machine with CNC//JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEDIA. Oct. 2016, Vol. 8.pp. 483-488.

#### **Авторские свидетельства и патенты**

19. Кобринский А.Е., Серков Н.А., Постонен У.М. Устройство коррекции траектории движения режущего инструмента // А.С. СССР № 312679. - Б.И. - № 26. – 1971.

20. Серков Н.А., Постонен У.М. Устройство коррекции траектории движения режущего инструмента // А.С. СССР 319388 Б.И. N26,1971.

21. Серков Н.А., Пан Е.И. Способ гибки трубок по эталону и стапелю на станках с ЧПУ // А.С. СССР №1250350 - Б.И. - № 30. – 1986.

22. Серков Н. А., Шлесберг И. С. «Программа для расчета суммарного отклонения взаимного расположения исполнительных органов 5 координатного станка с поворотными столами» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616802, дата регистрации 22 июля 2013.

23. Базров Б.М., Алехнович В.И., Серков Н.А. Устройство для измерения нестабильности положения оси вращения детали в сечении перпендикулярном оси вращения. Патент на полезную модель № 165776, опубликовано: 10.11.2016, Патентообладатель: ИМАШ РАН.

### Другие работы

24. Гапшис В.-А.А., Каспарайтис А.Ю., Модестов М.Б., Серков Н.А., Раманаускас В.-З.А., Чудов В.А. Координатные измерительные машины и их применение / - М.: Машиностроение - 1988. – 328 с.

25. Sirotkin R., Serkov N.: Experimental Researches of Accuracy, Rigidity and dynamic Properties – 5-axis Machining Centre Hexamech-1/The 5th Chemnitz Parallel Kinematic Seminar 2006, April 25-26/Conference Proceedings. - Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten. – 2006. pp. 813-827.

26. Мерзляков А.А., Серков Н.А., Сироткин Р.О. Экспериментальные исследования динамических свойств станка с параллельной кинематикой мод. «Гексамех-1»/Сб. трудов XV Симпозиума: «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем под ред. В.К. Асташева, В.Л. Крупенина, Е.Б. Семеновой. - Москва-Звенигород: 2006. – С.195-200.

27. Мерзляков А.А., Серков Н.А., Сироткин Р.О. Экспериментальные исследования влияния статической и динамической жёсткости станка с параллельной кинематикой на точность обработки детали. – В кн. Тезисы докл. «Международная конференция по теории механизмов и механике машин». – Краснодар. 2006. 9-15 октября – С 163-164.

28. Мерзляков А.А., Серков Н.А., Сироткин Р.О. Способы возбуждения колебаний при исследовании динамики механических систем. - В кн. Труды VIII международной научно-технической конференции по динамике технологических систем (в трех томах). Том II. - Ростов-Дон. 2007. - С.194-199.

29. Серков Н. А., Вайнштейн И. В., Мерзляков А. А., Сироткин Р. О. Экспериментальные исследования статических и динамических свойств станка-гексапода / Сб. трудов научной конференции, посвященной 70-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН "Проблемы машиноведения» Москва, 12-14 ноября 2008 г.; М., 2008. С. 467-472.

30. Серков Н.А., Мерзляков А.А., Сироткин Р.О., Орлова Г.Н. Устройство для измерения статической жесткости несущей системы машин-автоматов. - В кн. Сборник научных трудов и инженерных разработок «Ориентированные фундаментальные исследования – новые модели сотрудничества в инновационных процессах» / Под ред. Член-корр. РАН, академика РИА Б.В. Гусева. – М.: Эксподизайн – Холдинг. – 2008. – С. 195-198.

31. Серков Н.А., Мерзляков А.А., Сироткин Р.О. Некоторые результаты экспериментальных исследований платформы Гауфа – Стюарта на примере несущей системы станка «гексамех-1». – В кн. Сб. трудов XVI Симпозиума: «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем под ред. В.К. Асташева, В.Л. Крупенина, Е.Б. Семеновой. - Москва-Звенигород: - 2009. - С. 316-322.

32. Серков Н.А., Шлесберг И.С., Никуличев И.В. Особенности построения 5-ти координатных станков с ЧПУ. – В кн. Научные труды Меж-



дународной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении» - М.: Машиностроение. – 2010. - С. 95-102.

33. Серков Н.А., Мерзляков А.А. Способ оценки динамической податливости несущей системы станка. – В кн. Сб. докладов Десятой сессии международной научной школы, посвященной памяти В.П. Булатова «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов», 24-28 октября 2011 г. Санкт-Петербург. – С. 127-129, [Электронный ресурс] <http://www.ipme.ru/ipme/conf/VPB-11/VPB11.htm> (дата обращения: 30.10.2012).

34. Серков Н.А., Мерзляков, А.А. Никуличев И.В. Исследование и оценка статической и динамической жесткости многокоординатных машин с ЧПУ. – В кн. Сб. трудов X Международного научно-технического форума «ИННОВАЦИЯ, Экология и РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ (ИнЭРТ-2012)», — Ростов н/Д: ИЦ ДГТУ. - 2012. — С. 345-350, [Электронный ресурс] [http://static.donstu.ru/trudi\\_inert\\_2012.pdf](http://static.donstu.ru/trudi_inert_2012.pdf)(дата обращения: 24.14.2012).

35. Серков Н.А. Повышение инструментальной точности многокоординатных машин с ЧПУ методами коррекции первичных отклонений механизмов несущей системы. – В кн. Научные труды II международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», Москва. - 2012. – С. 400-405.

36. Серков Н.А., Мерзляков А.А., Никуличев И.В. Исследование и оценка жесткости многокоординатных машин с ЧПУ по отклику на силовое ступенчатое воздействие. – В кн. Научные труды II международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», Москва. – 2012. – С. 406-411.

37. Серков Н.А., Шлесберг И.С., Мерзляков А.А., Никуличев И.В. Модифицированный способ коррекции первичных отклонений многокоординатной машины с ЧПУ /Научные труды III Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении” FRITME-2014, ИМАШ РАН, Москва, Россия, 13-15 мая 2014 г. С.290-292.

38. Серков Н. А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. -М.: ЛЕНАНД, 2015. - 304 с.