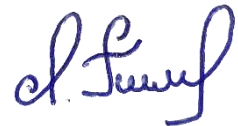


На правах рукописи



Пимушкин Ярослав Игоревич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ОБЪЁМНОЙ ТОЧНОСТИ
МНОГОКООРДИНАТНОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ КОРРЕКЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
РАБОЧИХ ОРГАНОВ

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 2023 г.

Работа выполнена на кафедре высокоэффективных технологий обработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Научный руководитель:	Стебулянин Михаил Михайлович , доктор технических наук, доцент, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва
Официальные оппоненты:	Серков Николай Алексеевич доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела «Механики машин и управления машинами» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва
	Сальников Владимир Сергеевич доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электро- и нанотехнологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула
Ведущая организация	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», г. Москва

Защита состоится 26 декабря 2023 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте: <https://stankin.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.332.01, к.т.н.



Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Многокоординатные металлорежущие станки с числовым программным управлением являются одними из наиболее важных компонентов оборудования современных производственных предприятий, при этом разработка метода повышения объёмной точности перемещений их рабочих органов является актуальной проблемой.

Основными источниками погрешностей многокоординатного технологического оборудования являются:

- $\Delta \varepsilon_y$ – погрешности установки заготовки в приспособление;
- Δ_y – колебания упругих деформаций динамической системы станка;
- Δ_n – погрешность наладки технологической системы;
- Δ_i – погрешность в результате износа режущего инструмента;
- $\sum \Delta_{ст}$ – геометрические погрешности станка;
- $\sum \Delta_t$ – колебания температурных деформаций.

Геометрические погрешности многокоординатных систем, таких как, например, обрабатывающие центры с кинематикой транспортных степеней подвижности телескопического типа, вызваны в основном дефектами производства или сборки, неправильным расположением осей движения и отклонениями позиционирования и прямолинейности каждой оси. Они оказывают существенное влияние как на точность обработки, так и на точность измерений в технологических процессах современного машиностроения.

Погрешности привода, оси или сборки машины являются в некоторой степени случайными, геометрические погрешности имеют как систематическую, так и случайную составляющие.

Случайная составляющая объёмных погрешностей в настоящее время мало изучена. Это объясняется отчасти тем, что успешное построение теории случайных погрешностей многокоординатных станков возможно на надёжном фундаменте результатов предварительных исследований систематических погрешностей, в области которых остаются востребованными решения задач моделирования и анализа их распределения в рабочем пространстве для создания эффективных алгоритмов числового программного управления станками.

Таким образом, в настоящее время актуальной является, в том числе задача разработки метода повышения объёмной точности на основе цифровой коррекции перемещений рабочих органов многокоординатных станков в условиях систематических геометрических погрешностей.

Степень разработанности темы. Проблемы, связанные с повышением точности многокоординатных технологических систем, рассмотрены в трудах Балакшина Б. С., Проникова А. С., Кобринского А. Е., Соломенцева Ю. М., Ратмирова В. А., Вульфсона И. А., Шмутера С. А., Базрова Б. М., Анисимова Б. В., Тимофеева А. В., Гусева И. Т., Невельсона М. С., Решетова Д. Н., Портмана В. Т., Тимирязева В. А., Серкова Н. А., Телешевского В.И., Кузнецова А. П., Мастеренко Д. А., Молодцова В. В., Бушуева В. В., Соколова В. А.

Продолжаются работы по созданию системных представлений о точности станков и методах их оценки, моделированию объёмных геометрических и тепловых погрешностей на основе различных математических методов.

Наибольший вклад в развитие знаний в этой области применительно к металлорежущим станкам внесли: 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., Bringmann B., Ziegert J., Schmitz T., Balsamo A., Fu G., Fu J., Xu Y., Chen Z., Moon S. K., Moon Y. M., Kota S., J. R. R. Mayer, Xing K., Rimpault X., Mayer J. R. R., Chatelain J.-F., Achiche S. и др.

Однако, несмотря на значительные достижения в данной области, остаются востребованные разработки методов построения наиболее адекватной и точной геометрической модели погрешностей станка, основанные на преобразовании исходных данных, полученных путём экспериментальных измерений элементарных геометрических составляющих структуры погрешностей положения и ориентирования рабочего органа станка, а также путём их моделирования.

Объектом исследования являются трёхкоординатные обрабатывающие центры со схемами прямолинейных движений в транспортных степенях подвижности, как наиболее распространёнными в станочных комплексах механообработки.

Предметом исследования являются методы повышения геометрической точности позиционирования рабочих органов многокоординатных металлорежущих станков в условиях систематических погрешностей.

Цель работы состоит в повышении точности перемещений рабочих органов многокоординатного металлорежущего оборудования на основе методов дифференциальной геометрии.

Для достижения поставленной цели необходимо **решить следующие научные задачи.**

1. Построить модель распределения объёмных геометрических погрешностей в рабочем пространстве трёхкоординатных обрабатывающих центров.

2. Разработать алгоритмы повышения объёмной точности на основе решения обратной задачи кинематики (ОЗК) рабочего органа станка в условиях дифференциально-геометрического подхода к оценке распределения объёмной погрешности в рабочем пространстве с учётом специфики используемой лазерной измерительной системы.

3. Провести необходимые работы на лабораторном оборудовании для создания числовой экспериментальной базы аналитического исследования.

4. Провести вычислительный и натурный эксперименты с целью параметрического синтеза алгоритма повышения объёмной точности многокоординатного обрабатывающего центра в рабочем пространстве с заданной сеткой распределения погрешностей.

Научная новизна работы состоит в следующих результатах.

1. Разработан метод повышения геометрической точности станка на основе математической процедуры калибровки его кинематики с помощью лазерного трекера в условиях дифференциального подхода к оцениванию направлений перемещения в рабочем пространстве.

2. На базе теории конечных поворотов разработана математическая модель объёмной точности станка на сетке параметрических погрешностей, оцениваемых способом лазерной интерферометрии.

3. На основе модели объёмной точности разработан метод коррекции трёхкоординатных движений обрабатывающего центра путём нового решения обратной задачи кинематики в криволинейной системе координат его исполнительного привода.

Теоретическая значимость работы определяется следующим.

1. Математическая модель объёмной точности станка построена как нелинейная 2-го порядка, что позволяет аналитически обосновать допустимый порядок малости учитываемых функций базисных погрешностей в вычислительных задачах в области объёмной точности технологического оборудования.

2. Разработаны методы решения обратной задачи кинематики в криволинейной системе координат, учитывающие специфику лазерных измерительных систем в составе многокоординатных обрабатывающих центров.

Практическая значимость работы обусловлена следующим:

1. Обоснованно упрощена процедура решения задач вычисления объёмных погрешностей в рабочем пространстве металлорежущего станка.

2. Предложен инженерный, т.е. не требующий значительных вычислительных мощностей, метод снижения геометрических погрешностей трёхкоординатных обрабатывающих центров на основе калибровки их кинематики с помощью лазерного трекера.

3. Разработана программа решения обратной задачи трёхкоординатной кинематики металлорежущих станков в системе физических осей движения, которая может быть положена в основу функционирования постпроцессора с контролем лазерного интерферометра в условиях высокоточного позиционирования.

На защиту выносятся следующие положения:

- Квадратичная модель объёмной погрешности трёхкоординатного обрабатывающего центра, полученная с помощью теории конечных поворотов на сетке базисных параметрических погрешностей, задаваемых независимым образом в точках каждой физической оси движения.

- Расчёт целевой позиции перемещения рабочего органа многокоординатного станка в рамках дифференциально-геометрической концепции его рабочего пространства, основанный на вычислении криволинейного интеграла.

- Метод решения обратной задачи трёхкоординатной кинематики металлорежущих станков в криволинейной системе координат, построенный на основе закона астатического управления перемещениями механической системы

в целевую позицию рабочего пространства с заданной моделью распределения объёмных погрешностей.

Методы исследования. В работе использованы методы матричных преобразований координат и аналитической геометрии, теория конечных поворотов, теория астатического управления механическим движением. Математическое моделирование выполнено в программных средах Mathcad Prime 8.0, Microsoft Excel.

Степень достоверности полученных результатов исследования определяется корректным использованием общепринятого математического аппарата аналитической геометрии, интегрального исчисления и теории автоматического управления, а также согласованностью результатов теории, компьютерного моделирования и физического эксперимента. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, подкреплены фактическими данными, представленными в приведенных рисунках и таблицах.

Апробация работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект No FSFS-2021-0003).

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, общероссийских, региональных и межвузовских научно-технических конференциях:

- на всероссийской научной конференции «Цифровая экономика: Оборудование, управление, человеческий капитал», секция «Управление», в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва 2017 г.;

- на международной научно-технической конференции «Метрология, стандартизация, качество: теория и практика», секция «Аттестация методик измерений и калибровка средств измерений» в ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск 2017 г.;

- на XVII-й Международной научно-практической конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2017)», Институт проблем упр. им. В.А. Трапезникова, г. Москва, 2017 г.;

- на международной научно-технической конференции «Метрология, стандартизация, качество: теория и практика», секция «Аттестация методик измерений и калибровка средств измерений» в ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск 2019 г.;

- на всероссийской научной конференции «Цифровая экономика: Оборудование, управление, человеческий капитал», секция «Управление», в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва 2020 г.;

- на международной научной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем», в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва 2020 г.;

- на международной научной конференции «MIST: Aerospace-V-2023: Передовые технологии в аэрокосмической отрасли, машиностроении и

автоматизации», в Красноярском краевом Доме науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных объединений, г. Красноярск, 2023 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 статей, в том числе 6 статей в изданиях, включённых в перечень ВАК, 3 статьи – в изданиях, индексируемых в базах данных SCOPUS.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части п. 1 (Теория и практика проектирования, монтажа и эксплуатации станков, станочных комплексов, в том числе автоматизированных цехов и заводов, автоматических линий, а также их компонентов (приспособлений, гидравлических узлов и т. д.), оптимизация компоновки, состава комплектующего оборудования и его параметров, включая использование современных методов информационных технологий) и п. 4 (Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров рабочего инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки) ее паспорта.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, списка использованной литературы и 5-ти приложений. Содержит 178 страниц машинописного текста, в том числе 165 страниц основного текста, 69 рисунков, 43 таблицы и список литературы из 119 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена проблематике измерения и коррекции объёмных погрешностей технологических машин, под которыми в работе в основном понимаются многокоординатные обрабатывающие центры. Приводится обобщённая схема движения рабочего органа трёхкоординатного обрабатывающего центра, как объекта дальнейшего исследования. Данная схема справедлива для 24 компоновок обрабатывающих центров из ГОСТ Р ИСО 10791-1-2009 «Центры обрабатывающие. Часть 1: Контроль геометрической точности обрабатывающих центров с горизонтальным шпинделем и дополнительными шпиндельными головками (горизонтальная ось Z)» и ГОСТ ISO 10791-2-2013 «Центры обрабатывающие. Часть 2: Контроль геометрической точности станков с вертикальным шпинделем и дополнительными шпиндельными головками (вертикальная ось Z)».

В результате проведённого обзора установлены факторы, влияющие на точность позиционирования технологической машины, такие как точность её компонентов, несоблюдение принципа Аббе, статическая и динамическая

жёсткость движущихся компонентов системы и способы её управления, факторы окружающей среды и т.д.

В работе отмечается, что проблема повышения объёмной точности технологического оборудования становится предметом всестороннего изучения и обсуждения специалистами многих стран и научных организаций, институтов, в том числе и в РФ. При этом общность и различие в методах коррекции, математических моделях описания погрешности говорит лишь о том, что данный вопрос до конца не разрешен, и требуется поиск новых путей, позволяющих повысить точность работы современных технологических систем.

На основе проведённого анализа все способы коррекции объёмных погрешностей технологического оборудования разделены на три группы:

- конструктивное усовершенствование несущей системы многокоординатного станочного комплекса, технологии его изготовления, сборки;
- модификация процесса управления технологической машиной методами коррекции целевых позиций движения её рабочего органа на основе информации о распределении погрешностей в операционном пространстве;
- комплексный подход, включающий методы как первой, так и второй группы.

К методам уменьшения погрешностей машин и станков относят:

- улучшение техпроцесса изготовления кинематических элементов, что позволяет уменьшить влияние так называемых первичных отклонений узлов на работу станка в целом (геометрические параметры отклонений, зависящие от самой конструкции кинематической пары или звена, его геометрии и материала, выбора предельных допускаемых отклонений при изготовлении);
- увеличение жесткости несущих элементов и повышение их виброустойчивости, устойчивости к температурным деформациям.

Проведённый обзор методов коррекции показал, что усовершенствование технологий проектирования и конструкций станков должно приводить к уменьшению систематической составляющей объёмной погрешности, которую впоследствии следует подвергнуть программной коррекции.

Автор приходит к выводу, что алгоритмы такой коррекции во всем объёме большого числа исходных данных весьма затруднительны как с измерительно-информационной, так и с вычислительной точек зрения. Поэтому практический интерес представляют «первые приближения» решения задачи повышения объёмной точности многокоординатных металлорежущих станков, основанные на некоторых допущениях распределения объёмных погрешностей в рабочем пространстве. При этом необходима экспериментальная проверка каждого такого решения, как инструмент его обоснования и возможного совершенствования.

Во второй главе проводится разработка и апробация методов повышения геометрической точности станков на основе математической процедуры калибровки их кинематики с помощью лазерного трекера.

Сформулирована проблематика возникновения погрешности технологических машин, которая заключается в несовпадении системы

физического движения (СФД), реализуемого приводами, и измерительной системы (ИС/система ЧПУ). Существующие способы коррекции регламентированы ГОСТ ISO/TR 16907-2017 «Станки металлорежущие. Коррекция геометрических погрешностей с помощью ЧПУ». Разработанные в данном диссертационном исследовании методы расширяют данный нормативный документ, предлагая новые способы коррекции. Все разработанные методы повышения объёмной точности в главе называются тангенциальными.

Под **тангенциальным методом** в работе понимается метод повышения объёмной геометрической точности перемещения материальной точки, направления движений которой в системе физического движения задаются касательными (тангенциальными) векторами к реальным линиям осей, в общем случае не являющимися прямыми. Для повышения геометрической объёмной точности в рамках этого метода необходимо иметь картину поля тангенциальных направлений рабочего пространства трёхкоординатного обрабатывающего центра.

Для этого в работе предлагается применять лазерные трекеры (laser tracker), имеющие свою систему координат, принимаемую за идеальную.

В диссертации разработаны три тангенциальных метода.

1. Тангенциальный статический метод – это метод цифровой коррекции, для которого матрица направляющих косинусов осей движения \mathbf{G} постоянна для всех точек рабочего пространства. Для её построения достаточно измерить 6 точек, по 2 на каждую ось движения привода станка, при этом оси физической системы рассматриваются, как *прямолинейные* оси косоугольной системы координат со смещенным центром (рисунок 1).

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \cos(0_1A, 0x) & \cos(0_1B, 0x) & \cos(0_1C, 0x) \\ \cos(0_1A, 0y) & \cos(0_1B, 0y) & \cos(0_1C, 0y) \\ \cos(0_1A, 0z) & \cos(0_1B, 0z) & \cos(0_1C, 0z) \end{bmatrix} = const$$

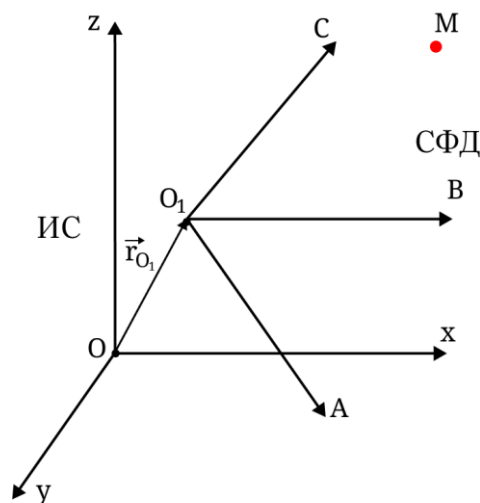


Рис. 1. Системы измерительных и физических осей станка при статическом методе

В работе рассматривается способ вычисления данной матрицы.

Обобщённые координаты по физическим осям при движении в целевую точку выражаются уравнением:

$$\mathbf{q} = \mathbf{G}^{-1} \Delta \mathbf{r} = \mathbf{G}^{-1} (\mathbf{r}_M - \mathbf{r}_{O_1}) \quad (1)$$

где \mathbf{G}^{-1} – матрица обратная к \mathbf{G} , \mathbf{r}_M – радиус-вектор целевой точки M , $\mathbf{r}_{O_1} = [r_{01x}, r_{01y}, r_{01z}]^T$ – вектор, определяющий в измерительной системе $Oxyz$ точку начала осей физической системы O_1ABC .

2. Тангенциальный интервальный метод. В реальных условиях концепция постоянства матрицы \mathbf{G} во всем пространстве движения не позволяет достичь одинаково эффективного повышения объёмной точности во всех рабочих точках этого пространства.

Развитием статического метода в работе стал интервальный метод, для которого матрица \mathbf{G} и вектор \mathbf{r}_{O_1} рассчитываются по методике, изложенной в диссертации, в каждом интервале предварительного разбиения осей движения на совокупность интервалов. Соответственно, точки для проведения экспериментов выбираются внутри каждого такого интервала. При этом величины \mathbf{G} , \mathbf{r}_{O_1} рассматриваются на них как кусочно-постоянные. В зависимости от того, в какие интервалы осей проецируется целевая точка движения, формула (1) используется со своими значениями \mathbf{G} и \mathbf{r}_{O_1} (рисунок 2).

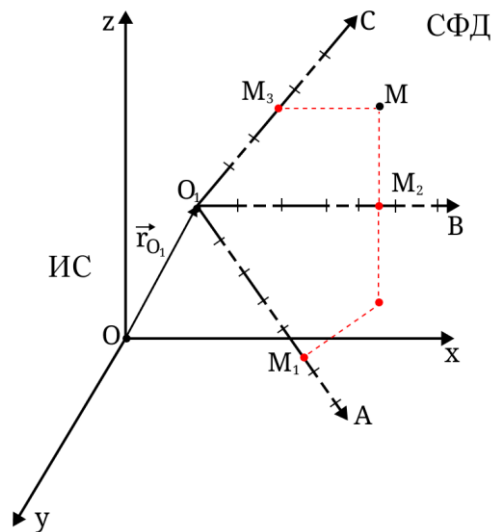


Рис. 2. Системы измерительных и физических осей станка при интервальном методе

3. Тангенциальный квазидифференциальный метод. Следующим шагом на пути повышения объёмной точности является переход к рассмотрению физической системы координат станка как криволинейной. Матрица \mathbf{G} становится переменной, изменяющейся от точки к точке. Решение обратной задачи кинематики в этом случае сводится к вычислению криволинейного интеграла вида:

$$\mathbf{r}_N(\tau) = \mathbf{r}_{O_1} + \int_0^\tau [\mathbf{Q}_1(q_1)\dot{q}_1(\tau) + \mathbf{Q}_2(q_1, q_2)\dot{q}_2(\tau) + \mathbf{Q}_3(q_1, q_2, q_3)\dot{q}_3(\tau)]d\tau$$

где $\dot{q}_i(\tau) = \frac{dq_i}{d\tau}$, $\mathbf{Q}_{1,2,3} = \begin{bmatrix} \cos(\mathbf{S}_{1,2,3}, Ox) \\ \cos(\mathbf{S}_{1,2,3}, Oy) \\ \cos(\mathbf{S}_{1,2,3}, Oz) \end{bmatrix}$ – направляющие косинусы

тангенциальных векторов $\mathbf{S}_{1,2,3}$ осей соответственно O_1A , O_1B , O_1C в текущих точках $q_{1,2,3}(\tau)$ по отношению к осям измерительной СК.

Вычисление данного интеграла предполагает решение для матрицы Якоби. Однако, на практике вычислить матрицу Якоби в каждой точке рабочего пространства невозможно, поэтому должна быть построена сетка соответствующей размерности, в узлах которой по результатам измерений вычисляются компоненты матрицы Якоби, а вместо интегралов должны вычисляться конечные суммы. На рис.3 u_1, u_2, u_3 – величины шагов разбиения по осям.

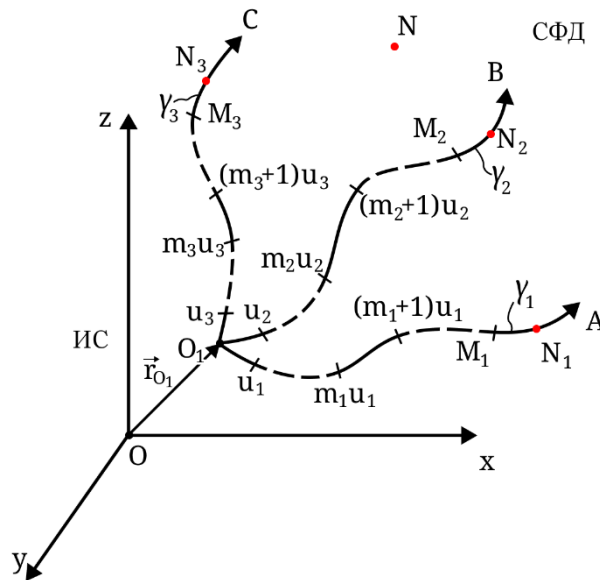


Рис. 3. Системы измерительных и физических осей станка при квазидифференциальном методе

Первым приближением применения дифференциального метода является рассмотрение матрицы \mathbf{G} как кусочно-постоянной. Криволинейный интеграл заменяется на сумму:

$$\begin{aligned} R_{Ox,Oy,Oz} &= r_{O1x,y,z} \\ &+ u_1 \sum_{i=1}^{M_1} \cos_i(\mathbf{S}_1; Ox, Oy, Oz) \\ &+ u_2 \sum_{j=1}^{M_2} \cos_j(\mathbf{S}_2; Ox, Oy, Oz) + u_3 \sum_{k=1}^{M_3} \cos_k(\mathbf{S}_3; Ox, Oy, Oz) \end{aligned}$$

где M_1, M_2, M_3 – номера интервалов по осям Ox, Oy, Oz соответственно, внутри которых расположена целевая точка N .

Решение обратной задачи кинематики при таком подходе для повышения объёмной точности станка выражается формулой (2). Данный метод учитывает движение приводов станка к целевой точке r_N .

$$q = G_M^{-1}(r_N - R) + [u_1 M_1, u_2 M_2, u_3 M_3]^T \quad (2)$$

Для верификации разработанных подходов были проведены многократные натурные эксперименты.

Эксперименты коррекции вектора объёмной точности многокоординатного металлорежущего станка по тангенциальным методам были проведены на пятикоординатном фрезерном обрабатывающем центре СТАН S500 «Графит», находящемся в лаборатории Технологического полигона ИЦ "Цифровые технологии машиностроения" ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», оснащённого системой ЧПУ «Перспектива».

Данный обрабатывающий центр представляет собой многокоординатную технологическую машину. Поворотные оси стола были не задействованы в экспериментах, обрабатывающий центр рассматривался как трёхкоординатный.

В работе применялся лазерный трекер Leica Tracker LTD800. Во всем рабочем пространстве, согласно калибровочному сертификату, погрешность не превышает 15 мкм.

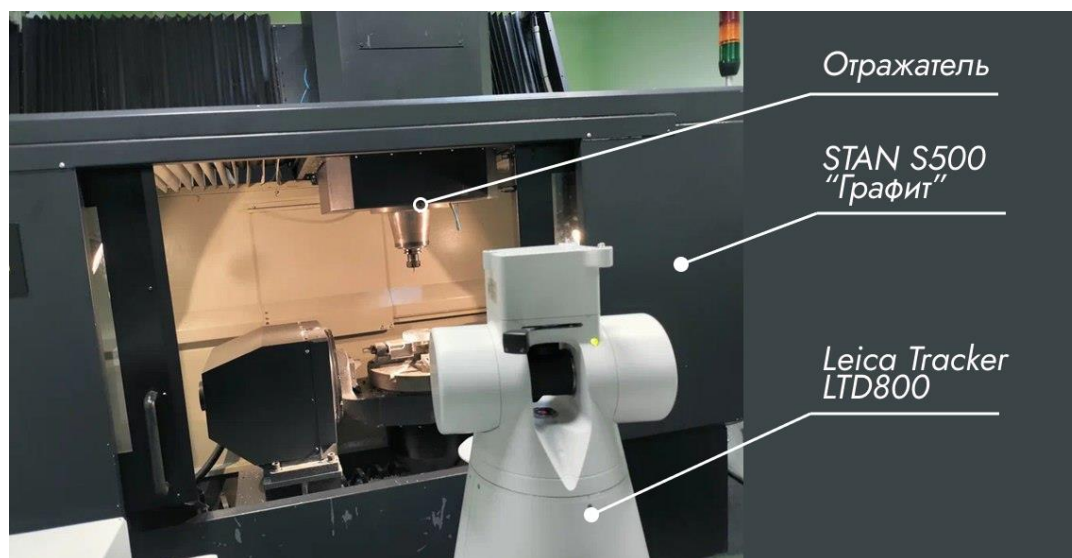


Рис. 4. Оборудование эксперимента

Были написаны программы в среде Mathcad Prime 8.0, листинги представлены в приложениях к диссертации. Эксперименты проводились за один день: станок реферировался, снимались координаты сетки по осям, загружались в программы и для целевых точек, полученных решением обратной задачи кинематики, вводились в ЧПУ станка и фиксировались лазерным трекером.

В результате экспериментов было установлено, что шаг для реализации сетки тангенциальных направлений величиной должен быть не менее 10 мм и не должен быть кратен шагу ходовых винтов станка. При меньших шагах эффективность метода снижается.

В рабочем пространстве станка для определения объёмной точности был выбран наиболее часто используемый при работе на данном станке участок $315 \times 315 \times 315$ мм.

Каждая целевая точка снималась лазерным трекером по 12 раз и результаты съёмки усреднялись для борьбы со случайной составляющей погрешности измерений.

Для анализа объёмной точности был произведен последовательный обход рабочей области с шагом в 15 мм по трём осям. На каждом интервале разбиения осей вычислялись калибровочные матрицы G .

Оценка работы методов путём сравнения осуществлялась по следующей формуле:

$$\Delta = \sqrt{(x_d - x_{tr})^2 + (y_d - y_{tr})^2 + (z_d - z_{tr})^2}$$

где x_d, y_d, z_d – целевые значения точки движения x_{tr}, y_{tr}, z_{tr} – реальные показатели, снимаемые с трекера.

В таблице 1: Δ_n – результат движения без коррекции обрабатываемого центра, Δ_s – результат с коррекцией по статическому методу, Δ_{ik} – результат с коррекцией по интервальному методу; Δ_{dg} – результат с коррекцией по квазидифференциальному методу.

Таблица 1. Обработка экспериментальных данных

$x_d/y_d/z_d$	Δ_n	Δ_s	Δ_{ik}	Δ_{dg}
230/230/230	0,414	0,175	0,132	0,077
110/170/185	0,342	0,205	0,139	0,138
170/125/200	0,294	0,135	0,087	0,066
198/196/140	0,436	0,247	0,201	0,168
130/140/106	0,289	0,168	0,120	0,101
50/50/50	0,132	0,085	0,079	0,044
133/198/176	0,377	0,211	0,151	0,134
80/112/118	0,240	0,095	0,082	0,042
162/168/210	0,294	0,124	0,111	0,044
108/136/168	0,282	0,134	0,075	0,052
$\Sigma\Delta$	3,100	1,579	1,177	0,866

В главе проведены несколько подобных экспериментов, получены схожие результаты и дана оценка: при применении статического метода коррекции движения объёмная точность станка по совокупности результатов в выбранных контрольных точках повысилась на 49 %, при применении интервального метода – 62 %, при применении квазидифференциального метода – 72 %.

В работе отмечается, что разработанные тангенциальные методы повышения объёмной геометрической точности технологического оборудования имеют практическую значимость ввиду своей инженерной основы в смысле отсутствия необходимости реализации сложных математических процедур, при котором, тем не менее, получаются значимые результаты по повышению объёмной точности.

В третьей главе проведено моделирование объёмной точности трёхкоординатного обрабатывающего центра на основе метода параметрических погрешностей и теории конечных поворотов.

Автором отмечается, что несмотря на инженерные достоинства тангенциального метода, его применение обоснованно только там, где задачу повышения объёмной геометрической точности движений станка можно свести к задаче точности перемещения материальной точки, для этого достаточно привязать к ней поле касательных направлений, т.е. привязать экспериментальные измерения именно к позициям этой точки.

Однако, это не всегда просто сделать относительно так называемого вынесенного центра измерений, например, некоторой точки инструмента, находящейся на радиус-центре (векторе) относительно точки крепления инструмента в фиксирующем устройстве (шпинделе станка, например). В процессе выполнения технологической операции технологом могут задаваться множественные изменения этого вектора, вполне определенные относительно фиксирующего устройства и необходимые с точки зрения выполнения самой операции.

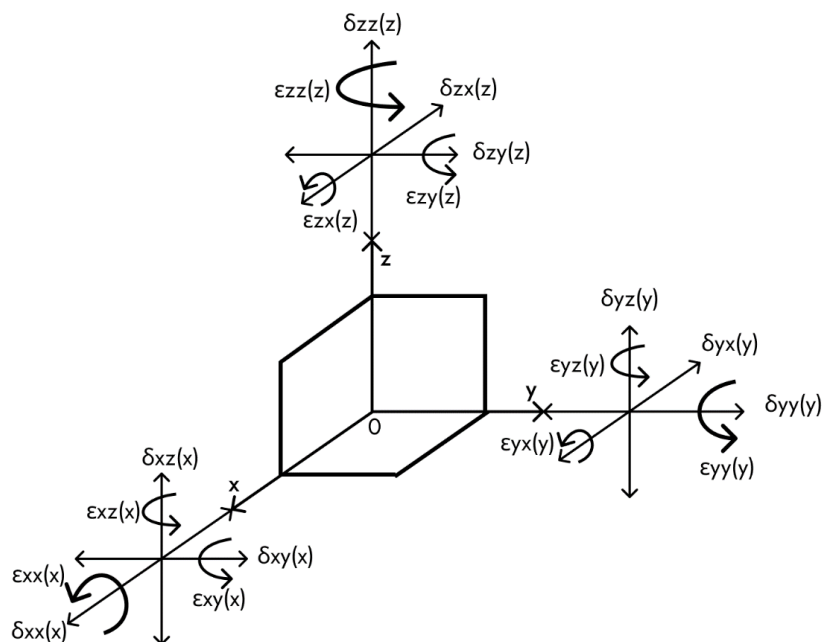


Рис. 5. Обозначение погрешностей трёхкоординатного обрабатывающего центра

Для решения этой проблемы в работе применяется концепция распределения погрешностей в рабочем пространстве станка (см. рис. 5). Согласно этой концепции, рабочий орган станка находится под действием трёх

векторов конечных поворотов, каждый из которых задается разложением в своем декартовом триэдре осей, и трех векторов линейных смещений, задаваемых в указанных выше триэдрах относительно их начала. Таким образом, для каждого триэдра вводятся 6 погрешностей: три угловых и три линейных. Данные погрешности приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметрические погрешности трёхкоординатного обрабатывающего центра

наименование		обозначение	средство измерения
русское	международное		
смещение оси O _x	scale error of X	$\delta_{xx}(X)$	линейный интерферометр
прямолинейность оси O _x в направлении оси O _y	Y straightness of X	$\delta_{xy}(X)$	интерферометр для измерения прямолинейности
прямолинейность оси O _x в направлении оси O _z	Z straightness of X	$\delta_{xz}(X)$	интерферометр для измерения прямолинейности
крен оси O _x	roll error of X	$\varepsilon_{xx}(X)$	электронные уровни (нивелиры)
тангаж оси O _x	pitch error of X	$\varepsilon_{xy}(X)$	угловой интерферометр
рыскание оси O _x	yaw error of X	$\varepsilon_{xz}(X)$	угловой интерферометр
смещение оси O _y	scale error of Y	$\delta_{yy}(Y)$	линейный интерферометр
прямолинейность оси O _y в направлении оси O _x	X straightness of Y	$\delta_{yx}(Y)$	интерферометр для измерения прямолинейности
прямолинейность оси O _y в направлении оси O _z	Z straightness of Y	$\delta_{yz}(Y)$	интерферометр для измерения прямолинейности
крен оси O _y	roll error of Y	$\varepsilon_{yy}(Y)$	электронные уровни (нивелиры)
тангаж оси O _y	pitch error of Y	$\varepsilon_{yx}(Y)$	угловой интерферометр
рыскание оси O _y	yaw error of Y	$\varepsilon_{yz}(Y)$	угловой интерферометр
смещение оси O _z	scale error of Z	$\delta_{zz}(Z)$	линейный интерферометр
прямолинейность оси O _z в направлении оси O _x	X straightness of Z	$\delta_{zx}(Z)$	интерферометр для измерения прямолинейности
прямолинейность оси O _z в направлении оси O _y	Y straightness of Z	$\delta_{zy}(Z)$	интерферометр для измерения прямолинейности
крен оси O _z	roll error of Z	$\varepsilon_{zz}(Z)$	электронные уровни (нивелиры)
тангаж оси O _z	pitch error of Z	$\varepsilon_{zx}(Z)$	угловой интерферометр
рыскание оси O _z	yaw error of Z	$\varepsilon_{zy}(Z)$	угловой интерферометр
перпендикулярность осей O _x и O _y	Y squareness of X	α_{xy}	линейный интерферометр
перпендикулярность осей O _y и O _z	Z squareness of Y	α_{yz}	линейный интерферометр
перпендикулярность осей O _z и O _x	Z squareness of X	α_{zx}	линейный интерферометр

Была построена модель распределения параметрических погрешностей центра СТАН S500 с применением метода, описанного в ранних работах автора (см. рис. 6).

В качестве средства измерения для построения модели была выбрана многофункциональная сертифицированная лазерная интерференционная измерительная система (ЛИИС) Renishaw XL 80, входящая в поверочную схему, и способная измерять 21 пространственную функцию в таблице 2.

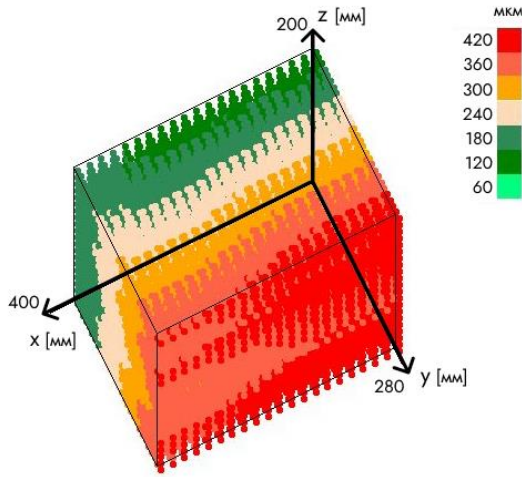


Рис. 6. Распределение значений модуля объёмной погрешности (ОП) в рабочем пространстве станка СТАН S 500 «Графит». Шкала в мкм

На основе теории конечных поворотов были разработаны две модели распределения объёмной точности: первого (линейная) и второго (квадратичная) порядков малости.

Для первого порядка малости вектор объёмной погрешности позиции полюса эффектора станка, задаваемого вектором \mathbf{r} в системе координат инструмента, начало которой есть некоторая точка рабочего пространства станка, определяемая вектором обобщённых координат \mathbf{Q} в физической системе координат, причём для этой точки известна таблица 2, полученная с помощью лазерного интерферометра, находится по формуле:

$$\begin{aligned} \delta(\mathbf{Q}, \mathbf{r}) = & [s(Br_3 - Cr_2) + (\rho_{xx} + \rho_{xy} + \rho_{xz})] \mathbf{i} \\ & + [s(Cr_1 - Ar_3) + (\rho_{yy} + \rho_{yx} + \rho_{yz})] \mathbf{j} \\ & + [s(Ar_2 - Br_1) + (\rho_{zz} + \rho_{zx} + \rho_{zy})] \mathbf{k} \end{aligned} \quad (3)$$

где $A = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yx} + \varepsilon_{zx}$, $B = \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zy}$, $C = \varepsilon_{xz} + \varepsilon_{yz} + \varepsilon_{zz}$, $s = 1$.

Модель объёмной точности станка с учётом сверхмалых величин (величин 2-го порядка малости) приводит к использованию математического аппарата векторных интервальных чисел дискретного типа и арифметики Каухера:

$$\begin{aligned} \delta(\mathbf{Q}, \mathbf{r}) = & [s(Br_3 - Cr_2 + 0.5B(Ar_2 - Br_1) - 0.5C(Cr_1 - Ar_3)) \\ & + (\rho_{xx} + \rho_{xy} + \rho_{xz})] \mathbf{i} \\ & + [s(Cr_1 - Ar_3 + 0.5C(Br_3 - Cr_2) - 0.5A(Ar_2 - Br_1)) \\ & + (\rho_{yy} + \rho_{yx} + \rho_{yz})] \mathbf{j} \\ & + [s(Ar_2 - Br_1 + 0.5A(Cr_1 - Ar_3) - 0.5B(Br_3 - Cr_2)) \\ & + (\rho_{zz} + \rho_{zx} + \rho_{zy})] \mathbf{k} \end{aligned} \quad (4)$$

где интервальные числа A , B , C определяются равенствами:

$$\begin{aligned} A = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yx} + \varepsilon_{zx} + 0.5(\pm \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \pm \varepsilon_{xz} \varepsilon_{yy} \pm \varepsilon_{xy} \varepsilon_{zz} \pm \varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} \pm \varepsilon_{xz} \varepsilon_{zy} \pm \\ \pm \varepsilon_{yz} \varepsilon_{zy} \pm \varepsilon_{xy} \varepsilon_{xz} \pm \varepsilon_{yy} \varepsilon_{yz} \pm \varepsilon_{zy} \varepsilon_{zz}) \end{aligned}$$

$$B = \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zy} + 0.5(\pm\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yz} \pm \varepsilon_{xz}\varepsilon_{yx} \pm \varepsilon_{xx}\varepsilon_{zz} \pm \varepsilon_{yx}\varepsilon_{zz} \pm \varepsilon_{xz}\varepsilon_{zx} \pm \\ \pm\varepsilon_{xz}\varepsilon_{zy} \pm \varepsilon_{xx}\varepsilon_{xz} \pm \varepsilon_{yx}\varepsilon_{yz} \pm \varepsilon_{zx}\varepsilon_{zz})$$

$$C = \varepsilon_{xz} + \varepsilon_{yz} + \varepsilon_{zz} + 0.5(\pm\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} \pm \varepsilon_{xy}\varepsilon_{yx} \pm \varepsilon_{xx}\varepsilon_{zy} \pm \varepsilon_{yx}\varepsilon_{zy} \pm \varepsilon_{xy}\varepsilon_{zx} \pm \\ \pm\varepsilon_{yy}\varepsilon_{zx} \pm \varepsilon_{xx}\varepsilon_{xy} \pm \varepsilon_{yx}\varepsilon_{yy} \pm \varepsilon_{zx}\varepsilon_{zy}),$$

а s – находится по формуле Родрига:

$$(1 + 0.25((\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yx} + \varepsilon_{zx})^2 + (\varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zy})^2 + \\ + (\varepsilon_{xz} + \varepsilon_{yz} + \varepsilon_{zz})^2))^{-1} = s$$

Было проведено сравнение моделей первого и второго порядков малости. Результаты сравнения представлены в таблицы 3: δ_+ , δ_- – значения ОП при соответственно положительных и отрицательных значениях интервальных чисел с точностью до второго порядка малости, рассчитанных по формуле (4); δ – значения ОП с точностью до первого порядка малости, рассчитанных по формуле (3).

Таблица 3. Анализ объёмной погрешности СТАН S500

$n_x/n_y/n_z$	$X/Y/Z$ (мм)	δ_+ , мкм	δ_- , мкм	δ , мкм	$\frac{\delta_+}{\delta}$, %	$\frac{\delta_-}{\delta}$, %
3/5/5	60/50/50	28.449109	28.449111	28.449118	$3 \cdot 10^{-5}$	$20 \cdot 10^{-6}$
6/17/19	120/170/190	53.955309	53.95532	53.955318	$1.7 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{-6}$
9/13/20	180/130/200	49.983661	49.983672	49.983674	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$4.1 \cdot 10^{-6}$
7/14/11	140/140/110	49.419014	49.419023	49.419024	$1.96 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$
10/20/14	200/200/140	64.809708	64.809723	64.809725	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$2.65 \cdot 10^{-6}$
4/11/12	80/110/120	39.485267	39.485272	39.485271	$1.13 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-6}$

Как видно из таблицы 3 разница в первом и втором порядках малости при вычислении вектора объёмной погрешности в условии модели рис. 6 крайне мала и находится в пределах $10^{-5}\%$. В работе был введен масштабирующий коэффициент k , который искусственно увеличивает угловые составляющие объёмной погрешности для определения области целесообразности применения квадратичной модели.

Таблица 4. Анализ объёмной погрешности СТАН S500 при $k = 1000$

$n_x/n_y/n_z$	$X/Y/Z$ (мм)	δ_+ , мкм	δ_- , мкм	δ , мкм	$\frac{\delta_+}{\delta}$, %	$\frac{\delta_-}{\delta}$, %
3/5/5	60/50/50	517.530078	524.862639	521.793105	0.817	0.588
6/17/19	120/170/190	475.646964	496.68112	486.839523	2.299	2.022
9/13/20	180/130/200	431.566307	451.695328	442.758356	2.528	2.018
7/14/11	140/140/110	455.011516	474.508707	465.605871	2.275	1.912
10/20/14	200/200/140	555.782144	585.310912	572.045132	2.843	2.843
4/11/12	80/110/120	431.729067	444.850595	438.680522	1.585	1.407

Исходя из вычислительного эксперимента, при значениях $k = 1000$ разница в значениях объёмной погрешности при разных порядках малости составила более 1%, при меньших значениях влияние 2-го порядка малости модели ничтожно.

Для апробации полученных результатов в работе были рассмотрены две гипотетические точки (M_{max} , и M_{min}) в рабочем пространстве станка, состоящие из максимальных и минимальных параметрических составляющих погрешностей ОП соответственно.

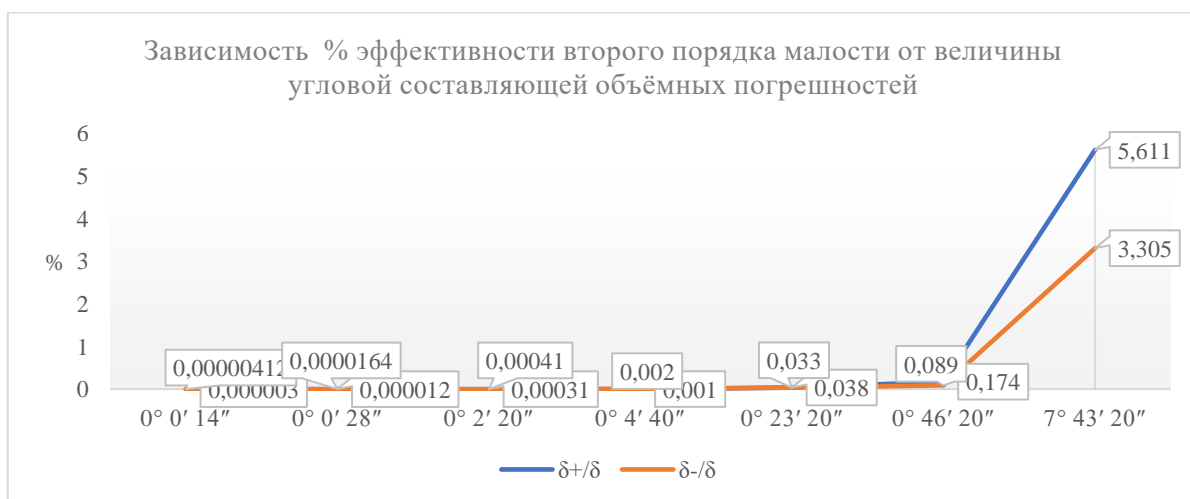


Рис. 7. Сравнение вычислительной точности моделей первого и второго порядков малости в точке M_{max}

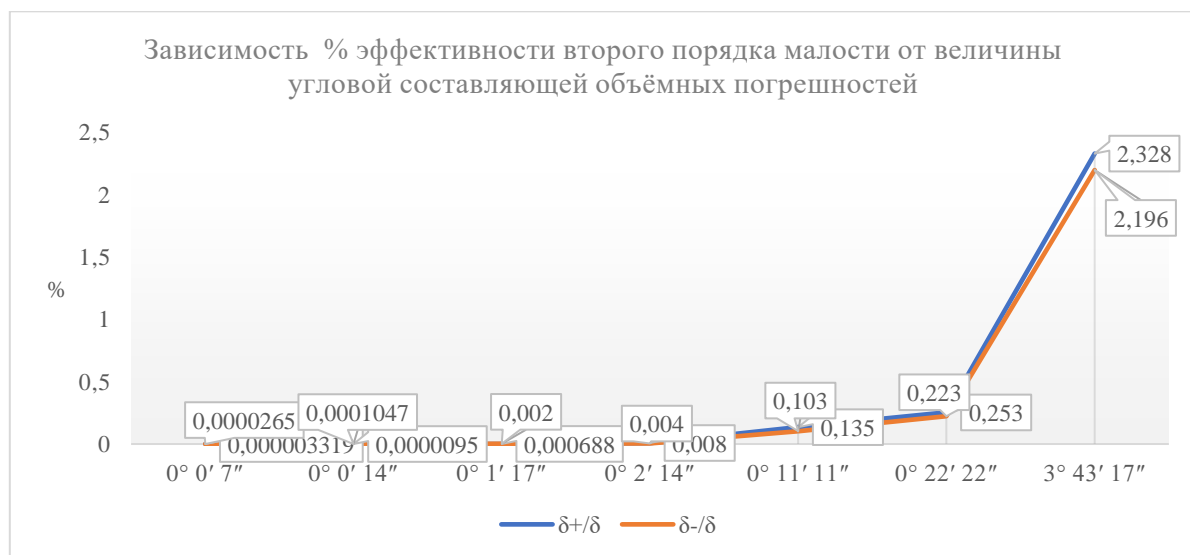


Рис. 8. Сравнение вычислительной точности методов сверхмалых и малых величин в точке M_{min}

На основании анализа рис. 7 и 8 автор пришел к следующему выводу: в диапазоне угловых погрешностей до 2,5 угловых минут учёт квадратичных членов модели не дает результатов, что позволяет ограничиться в задачах прецизионной объёмной точности металлорежущих станков рассмотрением величин погрешностей не выше 1-ого порядка малости.

В четвёртой главе представлено развитие теории квазидифференциального метода цифровой коррекции перемещений рабочих органов трёхкоординатных обрабатывающих центров.

На основе объединения тангенциального квазидифференциального метода с моделью распределения объёмных погрешностей 1-ого порядка малости автором разработан квазидифференциальный метод повышения точности на основе таблиц параметрических погрешностей (КМТПП). На рис.9 представлена визуализация разработанного метода на обрабатывающем центре СТАН S500, с разбиением рабочего пространства.

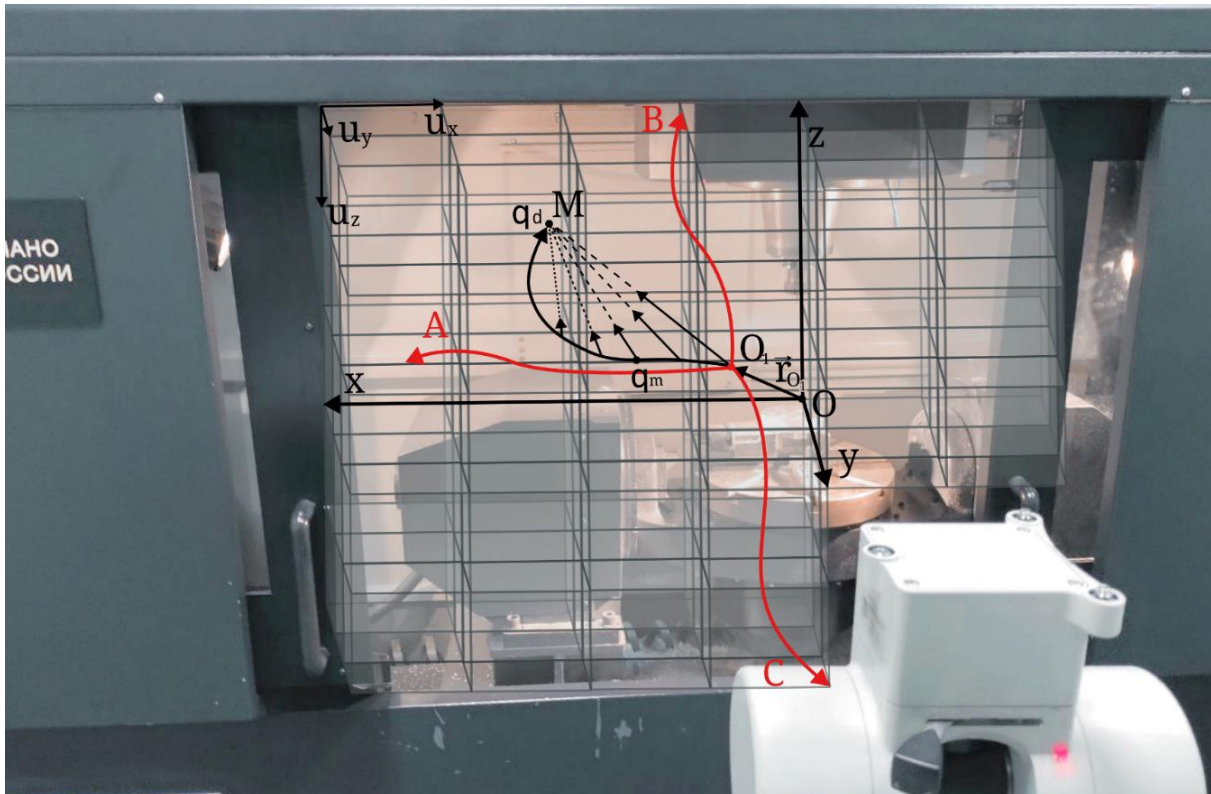


Рис. 9. Реализация КМТПП на СТАН S500

Данный метод работает с применением астатического закона управления механическим движением, при котором вектор обобщённой скорости формируется пропорционально вектору ошибки по положению:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}}_m &= -K(\mathbf{q}_m - \mathbf{q}_d) \\ \mathbf{q}_{m+1} &= \mathbf{q}_m + l \cdot \dot{\mathbf{q}}_m \end{aligned} \quad (3)$$

где \mathbf{q}_m – вектор обобщённых координат в текущей позиции движения, $\dot{\mathbf{q}}_m$ – вектор обобщённой скорости в данной позиции, \mathbf{q}_d – вектор обобщённых координат целевой точки.

В работе отмечается, что закон движения (3) является двухпараметрическим, его эффективность зависит от коэффициента скорости K и шага сетки интегрирования по модельному времени l . Кроме этого на точность работы метода влияет первоначальное разбиение рабочего пространства станка. Было выявлено, что чем больше удалена точка от начала координат и чем дальше

она от «узловых» точек, тем меньше эта точность. В главе проведено исследование по увеличению точности путем уменьшения шага разбиения сетки рабочего пространства. Для данного метода был выбран оптимальный шаг равный $u_x = u_y = u_z = 2$ мм.

В отличие от тангенциального квазидифференциального метода матрица направляющих косинусов в КМТПП находится с помощью параметров Родрига-Гамильтона.

В главе, на основании разработанного метода КМТПП, был предложен и реализован алгоритм, представленный на рис. 10, в среде математического моделирования Mathcad Prime 8.0. Алгоритм выполняется до тех пор, пока разность текущего положения точки с номинальным будет меньше либо равна шагам разбиению рабочего пространства одновременно, после чего выполняется решение ОЗК при последнем значении матрицы G . В главе приводится подробное описание работы алгоритма.

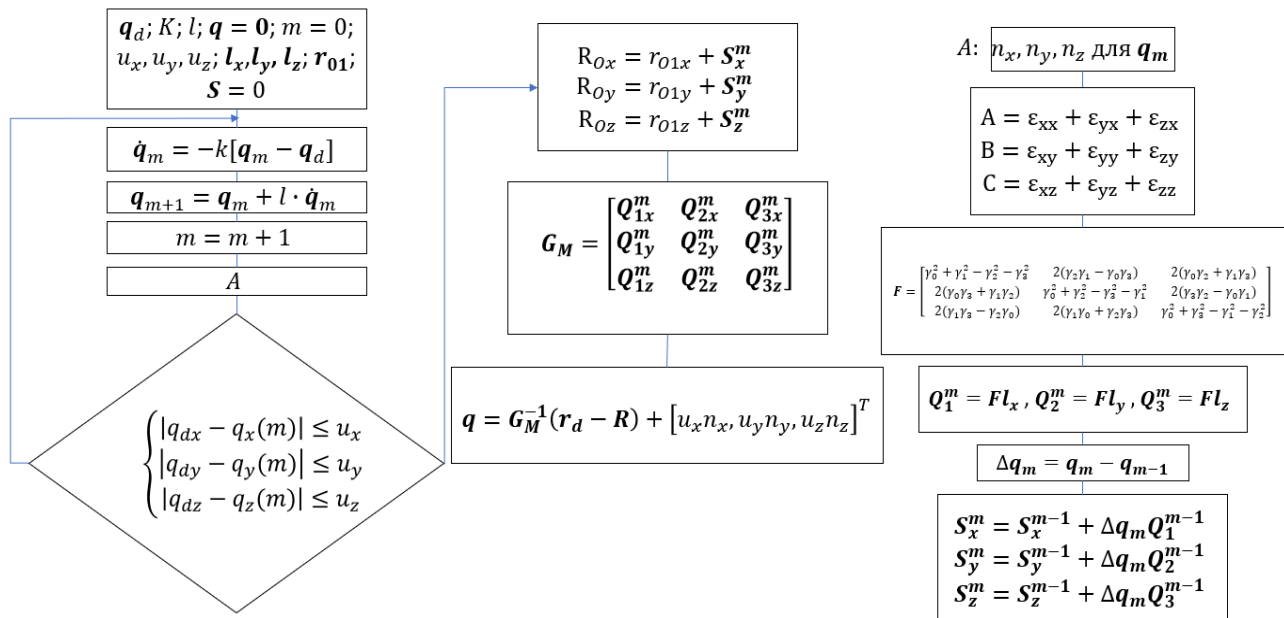


Рис. 10. Алгоритм КМТПП

В работе проведена настройка параметров астатического закона. Оптимальные параметры, полученные в результате экспериментальных исследований, составили $l = 0,1$, для $K = 1,5$.

Верификация разработанного метода проводилась по семи целевым точкам. Полученные значения обобщённых координат были загружены в управляющие программы, проведены движения станка, и перемещения измерены с помощью лазерного трекера. При этом проведено сравнение алгоритмов движения, показанное в таблице 5: Δ_n – результат движения без коррекции обрабатывающего центра, Δ_{dg} – результат с коррекцией по тангенциальному квазидифференциальному методу, Δ_{kd} – результат по квазидифференциальному методу повышения точности на основе таблиц параметрических погрешностей.

Таблица 5. Обработка экспериментальных данных

$x_d/y_d/z_d$	Δ_n	Δ_{dg}	Δ_{kd}
110/170/185	0,342	0,138	0,036
198/196/140	0,436	0,168	0,041
130/140/106	0,289	0,101	0,029
50/50/50	0,132	0,044	0,015
133/198/176	0,377	0,134	0,042
80/112/118	0,240	0,042	0,019
108/136/168	0,282	0,052	0,026
$\Sigma\Delta$	2,098	0,679	0,208

Автор приходит к выводу, что при применении тангенциального квазидифференциального метода коррекции перемещений рабочих органов объёмная точность станка по совокупности результатов в выбранных контрольных точках повысилась на 67,6 %; при применении квазидифференциального метода повышения точности на основе таблиц параметрических погрешностей – на 90,1 %.

В заключении изложены итоги выполненных исследований.

В приложения вынесены результаты реализации алгоритмов тангенциального статического, интервального, квазидифференциального методов цифровой коррекции, а также реализация алгоритма оценки объёмной точности трёхкоординатных обрабатывающих центров средствами теории поворотов с учетом сверхмалых величин.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Для дальнейшего совершенствования и расширения функциональных возможностей многокоординатных металлорежущих станков в цифровом машиностроении необходимо достижение требований прецизионной точности позиционирования рабочих органов в технологических процессах обработки и контроля. Большинство многокоординатных обрабатывающих центров современного машиностроения имеют кинематику транспортных степеней подвижности телескопического типа (портальную кинематику), в которой система физических осей движения не является идеальной системой взаимно ортогональных прямолинейных осей. При управлении перемещением рабочего органа станка это приводит к появлению неконтролируемых погрешностей и, как следствие, уменьшению точности выхода в целевые позиции. Для контроля погрешностей в целях их коррекции в современных условиях, когда процессы изготовления станков достигают пределов своих ресурсов по совершенствованию собственно производственных технологий, необходима разработка соответствующих методов и алгоритмов по повышению объёмной точности станков средствами цифровой коррекции.

1. Выполнена научно-квалификационная работа, в которой предложено решение актуальной для современных технологий машиностроения задачи повышения объёмной точности многокоординатного технологического

оборудования, расширяющее функциональные возможности в области повышения качества и снижения трудоемкости изготовления продукции.

2. На базе теории конечных поворотов разработана нелинейная 2-го порядка математическая модель объёмной точности трёхкоординатного обрабатывающего центра, построенная на сетке параметрических погрешностей, оцениваемых способом лазерной интерферометрии. Данная математическая модель позволила аналитически обосновать допустимый порядок малости учитываемых функций базисных погрешностей в вычислительных задачах в области объёмной точности многокоординатных систем.

3. Подтверждением этому служит проведённый эксперимент по анализу объёмной точности комплекса СТАН S500, в котором было обоснованно показано, что в диапазоне угловых погрешностей до 2,5 угловых минут учёт квадратичных членов модели не дает результатов. Это позволяет ограничиться в вычислительных задачах прецизионной объёмной точности металлорежущих станков в производственных процессах рассмотрением величин погрешностей не выше 1-ого порядка малости без последующего оценивания величины вычислительной ошибки, что существенно уменьшает трудоемкость проектных процедур подготовки производства.

4. В условиях дифференциальной концепции траекторий в рабочем пространстве станка разработан метод повышения геометрической точности перемещений его рабочего органа, основанный на математической процедуре калибровки кинематики с помощью лазерного трекера. Разработанный метод имеет практическую значимость ввиду отсутствия необходимости реализации сложных математических процедур, при котором, тем не менее, получаются значимые результаты по повышению объёмной точности.

5. Разработаны методы решения обратной задачи кинематики в криволинейной системе координат, учитывающие специфику лазерных измерительных систем, используемых в составе обрабатывающих центров. Экспериментальные исследования показали эффективность разработанных методов: наибольшую эффективность имеет квазидифференциальный метод на основе таблиц параметрических погрешностей в рабочем пространстве станка, основанный на численном вычислении криволинейных интегралов при астатическом законе управления движением. Как показал эксперимент на обрабатывающем центре СТАН S500, применение данного метода позволяет достичь повышения объёмной точности многокоординатного обрабатывающего центра до 90 % и даже выше.

6. Разработана программа решения обратной задачи кинематики в криволинейной системе координат, моделирующей систему физических осей движения многокоординатного технологического оборудования. При проектировании нового оборудования цифрового машиностроения данная программа может быть положена в основу функционирования постпроцессора управления современными станками, робототехнологическими и контрольно-измерительными комплексами в условиях высокоточного позиционирования в сложных производственных процессах обработки и контроля продукции.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в научных изданиях, включенных в библиографическую базу данных Scopus:

1. Teleshevskii, V.I. Accuracy Improvement of Multi-Axis Systems Based on Laser Correction of Volumetric Geometric Errors / V.I. Teleshevskii, V.A. Sokolov, **Y.I. Pimushkin** // Journal of Physics: Conference Series – 2018. – № 998(1). – 012034.
2. Teleshevskii, V.I. On the problem of laser error correction of multi-axis influence of loading on laser accuracy correction of multi-axis systems / V.I. Teleshevskii, V.A. Sokolov, **Y.I. Pimushkin** // Journal of Physics: Conference Series – 2019. – № 1260(3). – 032038.
3. Teleshevskii, V.I. Null-Point Migration of a Multicoordinate System under a Static Load / V.I. Teleshevskii, **Y.I. Pimushkin**, V.A. Sokolov // Russian Engineering Research. – 2019. – № 39(12). – P. 1077–1079.

в научных изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. **Пимушкин, Я.И.** Коррекция объёмной точности порталной системы с помощью лазерного трекера / **Я.И. Пимушкин**, М.М. Стебулянин // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2023. – № 1(64). – С. 80-86.
2. **Пимушкин, Я.И.** Сравнительный анализ подходов коррекции объёмной точности машин с порталной кинематикой / **Я.И. Пимушкин**, М.М. Стебулянин, М.А. Харьков // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2023. – № 3(66). – С. 95-102.
3. Стебулянин, М.М. Решение уравнения Родрига в задачах моделирования объёмной геометрической точности многокоординатных технологических и измерительных систем / М.М. Стебулянин, **Я.И. Пимушкин** // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2021. – № 3(58). – С. 49-55.
4. Телешевский, В.И. Влияние нагрузок на лазерную коррекцию объёмной точности многокоординатных технологических и измерительных системы / В.И. Телешевский, В.А. Соколов, **Я.И. Пимушкин** // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2020. – № 2(53). – С. 8-13.
5. Телешевский, В.И. Лазерное исследование миграции «нулевой точки» многокоординатных систем под воздействием статической нагрузки / В.И. Телешевский, В.А. Соколов, **Я.И. Пимушкин** // СТИН. – 2019. – № 7. – С. 25-28.
6. Телешевский, В.И. Повышение точности многокоординатных технологических и измерительных систем на основе лазерной коррекции объёмных геометрических погрешностей / В.И. Телешевский, В.А. Соколов, **Я.И. Пимушкин** // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2018. – № 4. – С. 99-104

в других изданиях:

1. Телешевский, В.И. К проблеме лазерной коррекции объёмной погрешности многокоординатных систем / В.И. Телешевский, В.А. Соколов, **Я.И. Пимушкин** // Проблемы машиноведения: материалы III Международной

научно-технической конференции. В 2-х частях / научный редактор П. Д. Балакин. – Москва, 2019. – С. 249-253.

2. Телешевский, В.И. Определение объёмной геометрической точности многокоординатных машин методами лазерной интерферометрии с программной коррекцией погрешностей / В.И. Телешевский, В.А. Соколов, **Я.И. Пимушкин** // Автоматизация и управление в машиностроении. – 2018. – № 2(31). – С. 36-46.

3. Телешевский, В.И. Повышение точности многокоординатных технологических и измерительных систем на основе лазерной коррекции объёмных геометрических погрешностей / В.И. Телешевский, В.А. Соколов, **Я.И. Пимушкин** // Метрология, стандартизация, качество: теория и практика: материалы Международной научно-технической конференции. – Москва, 2017. – С. 75-84.

Научное издание

Пимушкин Ярослав Игоревич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ОБЪЁМНОЙ ТОЧНОСТИ
МНОГОКООРДИНАТНОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА
ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ КОРРЕКЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

*Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук*