

В диссертационный совет 24.2.332.01 при
ФГБОУ ВО «Московский
государственный технологический
университет «СТАНКИН», 127994, г.
Москва, ГСП-4, Вадковский пер., д. 1.

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Пимушкина Ярослава Игоревича

«Разработка метода повышения объёмной точности многокоординатного металлорежущего оборудования на основе цифровой коррекции перемещений рабочих органов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

1. Актуальность темы диссертационного исследования.

Одна из тенденций развития современной промышленности связана с повышением ее гибкости, обусловленной переходом в подавляющем большинстве отраслей на серийное и мелкосерийное производство. Локомотивом ее реализации является широкое внедрение станков с ЧПУ, многоцелевых станков и обрабатывающих центров, представляющих многокоординатные машины, выполняющие автоматический цикл обработки. Постоянный рост требований к надежности выпускаемой продукции проявляется в необходимости увеличения точности этих станков. Проблема заключается в уменьшении погрешностей воспроизведения траекторий перемещения режущей кромки инструмента, определенных в трехмерном рабочем пространстве станка, обладающем геометрическими искажениями, обусловленными технологией изготовления станков, и реализуемой тремя и более независимыми приводами. Эксплуатация этих станков показала, что конструкторские и технологические средства, применяемые при производстве этих станков на современном этапе, не могут решить эту проблему. Перспективным направлением ее решения является коррекция траектории движения на основании учета векторного поля погрешностей, распределенных в рабочем пространстве станка. Однако методики построения этого поля, вычисления требуемых коррекций по координатным осям станка и введения их в контур управления в нужное время и в нужном месте далеки от совершенства.

Таким образом, актуальной является задача разработки метода повышения точности формообразования на основе цифровой коррекции перемещений рабочих органов многокоординатных станков, учитывающей распределение погрешностей в его рабочем пространстве.

В связи с этим тема диссертационной работы Пимушкина Я.И.

«Разработка метода повышения объёмной точности многокоординатного металлорежущего оборудования на основе цифровой коррекции перемещений рабочих органов» и выполненные в ее рамках исследования являются актуальными.

2. Общие сведения о диссертации

Диссертация Пимушкина Ярослава Игоревича состоит из введения, четырех глав, заключения, включающего в себя выводы по результатам работы, и списка литературы из 119 наименований, общим объемом 165 страниц машинописного текста, включая 69 рисунков, 43 таблицы и приложения на 13 страницах.

Во введении изложены актуальность темы работы, степень ее разработанности, поставленные цель и задачи, научная новизна, практическая ценность работы, приведены сведения о положениях, выносимых на защиту, методологии исследований, достоверности полученных результатов и обоснованности выводов.

В первой главе представлены результаты обзора и анализа известных решений в области измерения и коррекции объёмных погрешностей многокоординатных обрабатывающих центров. Установлены факторы, влияющие на точность позиционирования обрабатывающих центров, такие как точность её компонентов, погрешности взаимного расположения используемых систем координат и их искажения (косоугольность и криволинейность осей).

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 определенных допущениях распределения объёмных погрешностей в рабочем пространстве.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи работы. По главе сделано три вывода, все они основаны на анализе фактического материала, непротиворечивы и обоснованы.

Во второй главе сформулирована проблема возникновения погрешности технологических машин, заключающаяся в несовпадении системы физического движения, реализуемого приводами, и измерительной системы (ИС/система ЧПУ). Предложены три тангенциальных метода коррекции движения точки: статический, использующий постоянную матрицу направляющих косинусов осей движения для всех точек рабочего пространства; интервальный, использующий предварительное разбиение осей движения на совокупность интервалов и квазидифференциальный, предполагающий, что физическая система координат станка криволинейная.

В результате экспериментов с использованием лазерного трекера были сформулированы рекомендации по шагу построения сетки тангенциальных

направлений и установлено, что в результате коррекции движения объёмная точность в выбранных контрольных точках увеличилась, на 49 %, 62 % и 72 %, в зависимости от примененного метода соответственно.

Предложенные подходы и критерии не содержат очевидных ошибок и являются достоверными. По результатам проведенных исследований сделано два вывода. Они носят констатирующий характер, но не лишены логики и обоснованы.

В третьей главе проведено моделирование объёмной точности трёхкоординатного станка в условиях, когда полюс инструмента находится на радиус-векторе относительно точки его крепления в фиксирующем устройстве и имеет возможность перемещаться под действием трёх векторов конечных поворотов и трех векторов линейных смещений, задаваемых в соответствующих декартовых системах координат. На основе теории конечных поворотов разработаны две модели распределения объёмной точности: первого (линейная) и второго (квадратичная) порядков малости. В последней применены аппарат векторных интервальных чисел и арифметика Каухера.

Для оценки адекватности разработанных моделей с помощью лазерной интерференционной измерительной системы Renishaw XL 80 построена модель распределения параметрических погрешностей центра СТАН S500. На основании анализ полученных результатов сделан вывод о том, для оценки объёмной точности металлорежущих станков достаточно применение моделей 1-ого порядка малости.

Используемые методы построения моделей не содержат очевидных ошибок и являются достоверными. По материалам главы сделано 3 вывода. Они представляют констатацию факта проведения исследований, однако не лишены логики и обоснованы.

В четвертой главе представлен метод повышения точности на основе таблиц параметрических погрешностей. Он базируется на тангенциальном квазидифференциальном методе с моделью распределения объёмных погрешностей 1-ого порядка малости и астатическом законе управления механическим движением.

В среде Mathcad Prime 8.0 реализован алгоритм предложенного метода, формирующий базу данных для решения обратной задачи кинематики. Он выдает рассчитанные значения обобщённых координат целевых точек, загружаемых в систему ЧПУ станка. При выполнении циклов позиционирования в эти точки проводились измерения с помощью лазерного трекера LTD800. Сравнение результатов экспериментальных исследований предложенных в работе методов коррекции перемещений рабочих органов показало, что максимальная объёмная точность станка достигается при применении квазидифференциального метода, основанного на таблицах параметрических погрешностей. По совокупности результатов в выбранных контрольных точках она на 90 % превышает исходную.

Достоверность полученных экспериментальных исследований базируется на использовании реального технологического оборудования и современных лазерных измерительных систем высокой точности (до $\pm 0,5$ ppm), подтверждается соответствующим графическим материалом и большим объемом количественных оценок, не противоречащими логике исследований. По итогам проведенных исследований сделано три вывода. Они носят констатирующий характер, отражают фактический материал, не противоречивы и **обоснованными**.

В заключении подведены итоги выполненного исследования, сформулированы общие выводы диссертации, даны рекомендации по использованию и намечены перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложении представлены:

- реализация алгоритма оценки объёмной точности трёхкоординатного обрабатывающего центра средствами теории поворотов с учётом первого и второго порядков малости;

- реализации расчета в Mathcad Prime 8.0 координат целевых точек при тангенциальных статическом, интервальном и квазидифференциальном методах соответственно;

- акт о внедрении результатов работы в АО «НИИИзмерения», г. Москва.

В ходе выполнения диссертации соискателем были решены все поставленные задачи и достигнута цель работы.

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации, отражает основные моменты исследований, имеет объем — 25 страниц.

Результаты диссертационной работы прошли достаточно широкую апробацию. По теме диссертации опубликованы 12 научных работ, из них: 6 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 3 статьи в изданиях, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Scopus, и 3 статьи в других изданиях.

Результаты исследований доложены на пяти международных и двух всероссийских научных конференциях.

Диссертационная работа написана понятным, технически грамотным языком, имеет логичную структуру, стилистически выдержана и хорошо оформлена.

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям Р 7.0.11—2011 СИБИД «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления».

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, основаны на логичном и непротиворечивом анализе фактического материала, полученного в ходе теоретических и экспериментальных исследований, на его корректном сопоставлении с результатами исследований,

выполненных другими авторами. Они базируются на:

- широком обобщении известных результатов теории и практики измерений и повышения точности многокоординатных металлорежущих станков;
- использовании основных положений теории точности металлорежущих станков, методов матричных преобразований координат и аналитической геометрии, теории конечных поворотов, теории управления;
- адекватности разработанных математических моделей реальным объектам, экспериментальным подтверждением полученных оценок объемной точности обрабатывающих центров;
- использовании в вычислительных экспериментах современных методов и средств математического и имитационного моделирования сложных систем на основе стандартных пакетов программ;
- проведении экспериментальных исследований с использованием корректных методик их постановки, современного технологического оборудования, измерительной и регистрирующей аппаратуры, качественным и количественным согласованием полученных результатов с теоретическими положениями и известными данными, приведенными в технической литературе;
- успешным использованием результатов работы в практической деятельности.

На основании сказанного можно сделать вывод об **обоснованности** научных положений, результатов и выводов диссертационного исследования.

4. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений. Они получены в ходе выполнения комплекса теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические исследования выполнены с учетом современного уровня знаний в области метрологии, точности станочного оборудования, коррекции кинематики движения, расчета характеристик векторного пространства геометрических погрешностей. Экспериментальные исследования выполнялись по корректным методикам с использованием современных лазерных измерительных систем высокой точности. Полученные результаты не противоречат результатам других исследователей и органично дополняют их. Учитывая успешное использование результатов диссертации на производстве, подтвержденное актом внедрения, можно сделать вывод о **достоверности** научных положений, выводов и рекомендаций диссертации.

Автором получены результаты, обладающие признаками **научной новизны**. Научная новизна проведенных исследований заключается в том, что:

- разработаны методы повышения геометрической точности многокоординатных станков на основе математической процедуры калибровки их кинематики движений, использующей характеристики векторного поля

погрешностей в их рабочем пространстве, получаемые с помощью лазерного трекера;

- разработан квазидифференциальный метод калибровки кинематики движений рабочих органов станка, отличающийся тем, что основан на использовании таблиц распределения параметрических погрешностей в его рабочем пространстве, решении обратной задачи кинематики и астатического закона управления движением, допускающий реализацию средствами САМ систем или современных систем ЧПУ, позволяет увеличить его объёмную точность по совокупности результатов в контрольных точках на 90%.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенные в диссертации теоретические положения, математические модели и методы служат основой для повышения геометрической точности трехкоординатных обрабатывающих центров на уровне постпроцессоров систем ЧПУ, обеспечивающих новую интерпретацию исходных управляющих программ путем калибровки кинематики движений рабочих органов на основе таблиц параметрических погрешностей их рабочего пространства, составляемых с помощью лазерного трекера.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.

Научные и практические результаты диссертационного исследования рекомендуется применять в различных отраслях промышленности для повышения геометрической точности многокоординатных металлорежущих станков, в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов в области технологии и оборудования для механической обработки и повышении квалификации инженерно-технических работников промышленных предприятий.

Перспективой дальнейшего развития диссертационных исследований является построение моделей векторного поля погрешностей рабочего пространства станков в условиях существования температурных и упругих деформаций технологических систем, сопровождающих процессы резания, а также их распространение на другие средства технологического оснащения предприятий машиностроительного профиля.

5. Замечания

В целом работа оставляет хорошее впечатление, но имеется и ряд замечаний. Часть из них носит формальный характер, другая часть затрагивает существенные моменты диссертационных исследований и требует пояснений.

Замечания по существу

1. На с.48 и в автореферате на с.8 «Сформулирована проблематика возникновения погрешности технологических машин, которая заключается в несовпадении системы физического движения (СФД), реализуемого приводами, и измерительной системы (ИС/система ЧПУ)» Однако известно, что датчики ИС системы ЧПУ конструктивно расположены непосредственно на перемещаемых

рабочих органах вдоль соответствующих координатных осей станка, а, следовательно, ИС совпадает с упомянутой СФД. С ней может не совпадать идеальная система координат, в которой записан образ желаемой траектории движения, определенной чертежом обрабатываемой поверхности и заданной в управляющей программе.

2. Приведенные формулировки основных положений диссертации акцентированы исключительно на теоретических вопросах решения сформулированной проблемы и не уделено должного внимания необходимым для ее реализации техническим решениям. В частности:

- Поставленная *цель работы* «...в повышении точности перемещений рабочих органов» никак не может быть достигнута «...на основе методов дифференциальной геометрии».

- Поставленные *задачи исследования* не раскрывают техническую сторону путей ее достижения.

- *Научная новизна* работы, заключающаяся в разработке «...метода повышения геометрической точности станка на основе математической процедуры калибровки его кинематики...в условиях дифференциального подхода к оцениванию направлений перемещения в рабочем пространстве...», также не раскрывает техническую или технологическую сущность предлагаемых в работе решений.

- *Положения, выносимые на защиту* акцентированы в значительной части на результаты теоретических изысканий и не дают каких-либо рекомендаций по совершенствованию технологии обработки заготовок на обрабатывающих центрах, их конструкции или алгоритмов функционирования.

Основные выводы носят констатирующий характер, определяющий полученные теоретические результаты, и не позволяют судить о конкретном вкладе, сделанном автором в области технических наук.

3. Примененный в работе метод оценки адекватности полученных результатов вызывает некоторые сомнения. Используя понятие «объемной точности», автор предлагает на его основании методы коррекции и проверяет их, используя «объемную точности» уже как критерий. Некорректно предлагать некоторый метод и средствами этого же метода его проверять. Ничего не сказано о погрешности установки самого лазерного трекера, или хотя бы о погрешности установки вертикальной оси самого станка. К сожалению, нет проверки адекватности путем обработки конкретной детали, что очень важно для выбранной специальности.

4. К сожалению, в работе не определена область допустимых значений погрешностей, распределенных в рабочем пространстве, которые могут быть скорректированы кинематической схемой станка и СЧПУ, учитывая требование реализуемой технологической операции к пространственному положению инструмента относительно обрабатываемой поверхности в каждый момент времени. Это существенно улучшило бы оценку работы именно с технической

точки зрения.

Формальные замечания

1. Определив направление своих исследований как повышение точности позиционирования рабочих органов во всем рабочем пространстве обрабатывающих центров, автор, к сожалению, не ознакомился с работами Врагова Ю.Д., Аверьянова О.И. и др., занимавшихся оптимизацией компоновочных решений именно в аспекте обеспечения точности. В тоже время на с. 32 автор утверждает «...один из первых методов расчета объёмной точности ..., предложенных Базровым Б. М. [3]» Следует заметить, что во время публикации этой работы Базров Б.М. не мог знать термин «объёмная точность», да и если бы знал, я думаю, не стал бы его употреблять, поскольку термин обладает определенной неоднозначностью и требует дополнительных пояснений.

2. К большому сожалению, автор не уделил должного внимания корректности терминологии, используемой им в рамках заявленной специальности 2.5.5. Например, совершенно не очевидными являются выражения: с.4 «...кинематику транспортных степеней подвижности телескопического типа»; с.42 «система физических движений»; с.48 «картину поля тангенциальных направлений рабочего пространства», с.56 «позиции полюса инструмента», с.71 «рабочий орган станка (фреза...»; в автореферате с.16 «позиции полюса эффектора станка» и т.п.

Особого порицания заслуживает вольное отношение к примененному им термину «Объёмная точность», не понятно, что это: вектор, векторное поле, модуль вектора, карта погрешностей и т.п. В частности; с.19 «...объёмной погрешностью (ОП) ...для каждой точки рабочего пространства представляет собой вектор»; с.41 «...объёмная погрешность интерпретируется как преобразование координат от идеальных к реальным.»; с.71, 74, 145 «... объёмная точность станка по совокупности результатов» по сумме модуле погрешностей «в выбранных контрольных точках повысилась на ..»; с.32 «Задача повышения объёмной точности составитьобъёмную карту погрешностей (векторное поле)» и т.п.

3. Не корректно использовать термин «астатический закон управления» в контексте высказываний, приведенных на с.119. В частности, «на основе астатического закона движения, который характеризуется устойчивостью...» – этот закон не обеспечивает устойчивость динамических систем, к которым и относятся приводы станка; «...формируем целевую скорость по формуле астатического закона управления» – скорость – это технологический параметр, он в работе вообще не рассматривался, недопустимо его произвольно изменять.

4. В результатах экспериментальных исследований, приведенных в таблицах 4.3...4.10, указаны очень большие исходные ошибки позиционирования станка СТАН S500 (без коррекции) 0,132... 0,436мм. Для такого класса оборудования это не допустимо. Тем более это настораживает в связи с тем, что точности позиционирования по координатным осям почему-то не указаны в его

технических характеристиках на с.60. В результате получается, что корректируете очень плохой станок?

5. На с.50 рис.2.2 и с.55 рис. 2.3 указаны только ИС СЧПУ и СФД, но не указана система координат лазерного трекера, не оговорена ее привязка к перечисленным выше системам. Это затрудняет понимание результатов измерения координат точек позиционирования трекером, и их сопоставление с целевыми значениями точек движения (x_d, y_d, z_d) , вероятно, задаваемыми в СФД.

6. Непонятно, почему у лазерного трекера на с.48 «Предел допускаемой абсолютной погрешности равен $\pm(10+5L)$ мкм, где L – дистанция от системы до отражателя в метрах», а на с. 68 «...– $(10+L/500)$ мкм, где L – значение измеренного расстояния в мм.»

7. На с. 49 в рис.2.1. «Принципиальная схема определения координат...» допущена ошибка в изображении координаты по оси X.

8. На с. 68-с.74 не нашло должного объяснения полученное в экспериментальных исследованиях повышение объемной точности при увеличении рассматриваемой области в рабочем пространстве и шага ее обхода. Казалось бы, должно быть наоборот.

9. Структура диссертационной работы существенно отличается от работ, представляемых на соискание ученой степени кандидата технических наук. В частности, во 2-й, 3-й и 4-й главах присутствуют, как теоретические разделы, так и разделы, связанные с их экспериментальной проверкой. Что заставляет сомневаться в единстве работы. Названия глав чересчур амбициозны. Например, 4-я глава, обычно посвященная промышленной апробации результатов или серьезным экспериментальным исследованиям, в данном случае является венцом теоретической мысли автора: «Развитие теории квазидифференциального метода повышения точности перемещений рабочих органов многокоординатного металлорежущего оборудования».

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не снижают научной и практической ценности полученных в диссертации результатов.

6. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней»

Диссертационная работа Пимушкина Я.И. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой достигнута цель исследований и решены все поставленные задачи. В ней содержится решение актуальной научной задачи, имеющей значение для развития методов повышения точности многокоординатных обрабатывающих центров, как области знаний, и связанной с расширением их функциональных возможностей на основе повышения качества и снижения трудоемкости изготовления продукции

Тема диссертационных исследований является актуальной, полученные результаты обладают научной новизной и практической значимостью. Положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации,

обоснованы и достоверны.

Научные результаты диссертации полностью опубликованы и корректно отражают сущность выполненных исследований. Основные результаты диссертационной работы доложены на научных конференциях различного уровня. Научные и практические результаты получены автором самостоятельно.

Материал диссертации имеет логическую структуру, обладает внутренним единством, изложен технически грамотным языком с использованием известной терминологии.

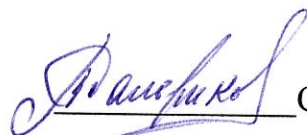
Автореферат соответствует диссертации и в достаточном объеме отражает положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе. Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Содержание и полученные результаты диссертационной работы Пимушкина Ярослава Игоревича соответствуют паспорту научной специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки п.1 и п.4.

На основании вышесказанного считаю, что диссертация Пимушкина Ярослава Игоревича «Разработка метода повышения объёмной точности многокоординатного металлорежущего оборудования на основе цифровой коррекции перемещений рабочих органов» соответствует требованиям п. 9-11 и п. 14 «Положения о присуждении учёных степеней», а Пимушкин Ярослав Игоревич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук,
доцент, профессор кафедры
«Электро- и нанотехнологии»
ФГБОУ ВО «Тульский
государственный университет»



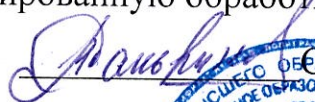
Сальников Владимир Сергеевич

Контактная информация

300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, кафедра «Электро- и нанотехнологии»,
Тел. +7(4872) 35-24-52, e-mail: info@tsu.tula.ru

Согласен на автоматизированную обработку

персональных данных



Сальников Владимир Сергеевич

Подпись Сальников В.С. заверяю

