

В диссертационный совет 24.2.332.01  
при ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»  
127994, Москва, ГСП-4,  
Вадковский переулок, д.1

Ученому секретарю  
к. т. н. Сотовой Е. С.

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

Вайнера Леонида Григорьевича

на диссертационную работу Блохина Дмитрия Андреевича  
«Разработка метода определения погрешностей перемещений узлов  
фрезерных станков с числовым программным управлением с физической  
имитацией рабочей динамической нагрузки», представленную на соискание  
ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 –  
Технология и оборудование механической и физико-технической обработки  
(технические науки)

### **Актуальность темы**

Работа посвящена развитию методов диагностирования точности перемещений узлов металлорежущих станков за счет приложения эквивалентной динамической нагрузки, имитирующей процесс технологического взаимодействия. Данный метод оценки точности позиционирования элементов несущей системы станка является эффективным, ведь известно, что погрешность величин перемещений узлов станка в процессе работы всегда существенно выше результатов статических испытаний.

Испытания в квазистатических состояниях — это общепринятая методика, уровень которой соответствует текущему уровню развития приборной базы. Однако, в процессе эксплуатации станков неизбежно происходит износ механических элементов приводов, используются приспособления и оснастка, которые существенно меняют картину по точности и жесткости технологических наладок, изменяется отклик упругой системы на силовое воздействие.

Особой проблемой является локальный износ шарико-винтовых передач, формирующий участок траектории движения стола, на котором точность перемещений существенно ниже, чем в других зонах траектории. Кроме того, жесткость станка не является константой из-за изменения положения кареток, гайки винтовой передачи, направления и точки приложения сил при обработке. Приложение нагрузки, имитирующей силовое воздействие в процессе резания, позволяет чис-

ленно оценить погрешности перемещений с учетом особенностей технологической наладки.

В процессе предварительных исследований и работы над диссертацией были проведены многочисленные испытания станков фрезерного типа различных классов точности, габаритов и степени износа, что позволило автору окончательно сформулировать задачу и предложить достаточно простой и эффективный метод оценки точности перемещений станка, позволяющий получить результат, достаточно близкий к моделируемым условиям фрезерования.

В этой связи не вызывает сомнений актуальность диссертации Блохина Д.А., в которой поставлены и решены задачи, связанные с разработкой метода определения погрешностей перемещений узлов станков под действием нагрузки, эквивалентной реальной нагрузке в процессе фрезерования.

### **Научная новизна, теоретическая и практическая значимость положений и результатов, сформулированных в диссертационной работе**

К новым научным положениям, полученным автором диссертации, и обладающим высокой значимостью, следует отнести:

1. Разработанный метод имитации рабочей нагрузки при испытаниях за счет вращающегося вектора сил и доказана его адекватность действию сил при фрезеровании по круговой траектории.

2. Экспериментально доказанный факт позиционной зависимости различий между точностью позиционирования и перемещений узлов станка, измеренных в квазистатическом и в нагруженном состоянии.

3. Установленную возможность определить виброустойчивость для различных зон стола станка за счет изменения параметров устройства, имитирующего силы резания.

К новым результатам, полученным в диссертации и имеющим высокую теоретическую и практическую значимость, относятся следующие:

1. Разработанный метод определения точности перемещений станка в условиях, имитирующих процесс обработки, позволяющий установить взаимосвязь между динамической нагрузкой, имитирующей силы резания, и точностью перемещений элементов несущей системы металлорежущих станков с программным управлением в условиях локального износа элементов механической части привода.

2. Метод определения точности круговых перемещений станка на момент испытания с учетом активной программной коррекции, установленных вибродемпфирующих устройств и состояния шарико-винтовых передачах и направляющих.

3. Разработанное устройство для создания динамической нагрузки, возникающей в процессе фрезерования, по подобию параметров амплитуды и частоты вынужденных колебаний, позволяющее также решить задачу определения пре-

дельно допустимых режимов резания, не допускающих опасных амплитуд колебаний.

4. Предложенное принципиальное решение по конструкции специального малогабаритного фрезерного станка объектного базирования, в котором жесткость обеспечивается не за счет корпусных элементов, а за счет увеличения жесткости направляющих и шарико-винтовых передач.

Новизна установленных автором новых взаимосвязей и технических решений подтверждается патентом на изобретение, а также их сопоставлением с результатами научных исследований в данной области, глубокий анализ которых дан соискателем в разделе 1 и далее по тексту диссертационной работы.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Для обоснования цели, задач и полученных результатов, автором проанализированы исследования и разработки авторитетных ученых и научных групп, занимающихся вопросами динамики станочных систем и, в частности, диагностики круговых перемещений и вибродиагностики. При проведении исследований применялись специализированные программы Renishaw Ballbar 5, Baltech-expert, Origin pro 2021 и КОМПАС v 21.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях с использованием современных измерительных приборов: лазерный интерферометр Renishaw Laser XL-80, прибор для измерения отклонений от окружности Renishaw Ballbar QC20-W, виброанализатор Baltech VP-3470.

Достоверность результатов, полученных в рамках диссертационной работы, подтверждена применением системного подхода к решению поставленных задач, многочисленными экспериментальными данными, полученными с использованием современного технологического и аналитического оборудования, общепринятых методик исследований, согласованием результатов теоретических исследований с результатами экспериментальных испытаний. Обоснованность научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается фактическими данными, наглядно представленными в рисунках и таблицах.

Полученные соискателем результаты не противоречат данным других исследователей, что также говорит об их достоверности.

### **Апробация и полнота публикаций**

Основные положения и результаты диссертационной работы прошли апробацию на 6 научно-технических конференциях, заслушивались на заседаниях профильных кафедр ОмГТУ и МГТУ «Станкин» и опубликованы (всего - 10 публикаций, из них 6 – в ведущих рецензируемых научных журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук).

Результаты исследований применялись в производственной практике при выполнении хоздоговорных работ по технической диагностике оборудования и разработке механической части специального фрезерного станка

Степень апробации результатов и полнота публикаций достаточна.

## **Оценка содержания диссертации и автореферата**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Диссертация изложена на 161 странице текста, содержит 72 рисунка, 8 таблиц и список литературы из 104 наименований.

Автореферат диссертации изложен на 20 страницах текста и в полной мере отражает основное содержание работы.

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления».

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, достоверность результатов, апробация работы, количество публикаций.

**В первой главе** автор рассмотрел вынужденные колебания, возникающие при фрезеровании, а также существующие методы измерения точности металлорежущих станков. В ходе обзора установлено, что данные, получаемые в ходе испытаний точности перемещений в квазистатических условиях, существенно отличаются от результатов, получаемых при фрезеровании.

На основе практики измерений типовыми методами автор установил, что точность и жесткость станка является позиционно-зависимой характеристикой оборудования, связанной с локальным износом элементов привода, поэтому точность станка является текущей характеристикой на момент измерения. Сделан вывод о необходимости разработки метода определения точности перемещений станков с имитацией сил резания и использованием современных высокоточных приборов. Сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** дано описание конструкции вибровозбудителя, который позволяет реализовать силовое воздействия в виде вращающегося вектора сил за счет неуравновешенной массой на валу электродвигателя. Доказана адекватность силовой нагрузки от разработанного вибровозбудителя воздействию концевых фрез при обработке сложных траекторий. Экспериментально установлено, что, ввиду воздействия сил резания на упругую систему станка, точность обработки всегда значительно отличается от результата испытаний в квазистатических условиях, причем эта разница зависит от позиции стола и величины центробежной силы и может изменяться от десятков до сотен процентов в зависимости от текущего состояния станка.

Установлено, что существенное возрастание амплитуды колебаний гайки относительно винта на локальном участке, надежно выявляется только под действием знакопеременной нагрузки. Подобный подход к моделированию сил реза-

ния позволяет исследовать точность как изолированных, так и согласованных перемещений двух приводов, находящихся в постоянном разнонаправленном движении с изменяющимися скоростями и позициями, при котором оценка погрешностей происходит в наиболее важном радиальном направлении.

**В третьей главе** представлена экспериментальная установка и разработан алгоритм диагностирования точности круговых движений под нагрузкой. Проведенные эксперименты подтверждают достоверность испытаний круговых перемещений узлов фрезерных станков с ЧПУ. Разработан алгоритм оценки точности и виброустойчивости круговых перемещений с применением телескопического датчика с приложением имитирующего силового возбуждения. На способ измерения получен патент на изобретение.

Повышение виброустойчивости наладки можно обеспечить за счет выбора участка рабочей зоны станка, обладающей большей жесткостью и применения демпфирующих устройств. Методика позволяет определить зоны стола, в которых точность и виброустойчивость перемещений максимальны.

Экспериментально доказана высокая сходимость результатов измерения виброперемещений при фрезеровании заготовки типа «диск» концевой фрезой и при работе устройства, имитирующего процесс фрезерования, определенная с помощью встроенных линейных измерительных датчиков. Измерения проводились с помощью двух систем измерения виброперемещений: прибор ballbar, встроенные датчики обратной связи, что повышает достоверность полученных результатов. Дополнительно были проведены измерения виброперемещений на различных режимах. Результаты измерений качественно совпадают. Наиболее точно схеме обработки соответствует результаты измерения телескопическим датчиком по месту расположения прибора на плоскости стола в ходе измерения. Данный результат обладает высокой наглядностью и сравнительно легко интерпретируется.

В главе также представлен обширный массив результатов испытаний станков различных компоновок и условий эксплуатации.

**Четвертая глава** посвящена применению результатов работы и расширению возможностей разработанного метода диагностики.

Проведено исследование эффективности демпферов, применяемых в станочных системах, которые основаны на создании дополнительных сопротивлений при перемещении рабочих органов станков. Установлено, что применение демпферов существенно снижает точность перемещений узла станка и может применяться только на черновых операциях. Вывод с одной стороны очевидный, с другой стороны измерен в количественном виде. Это позволяет разрабатывать и испытывать демпфирующие устройства с применением измерительных средств с имитацией рабочей нагрузки по параметрам точности и виброустойчивости перемещений. Результаты испытаний, проведенных в нагруженных состояниях, применимы для актуализации математических моделей фрезерных станков.

Предложено изменить концепцию обеспечения жесткости малогабаритного оборудования исключив из конструкции станину. Станок специальный, для фрезерования вафельного фона внутри бака, спроектирован под технические требо-

вания заказчика. Но сама идея обеспечения жесткости станка объектного базирования за счет увеличения элементов привода представляет интерес.

В **заключении** обобщены основные научные и практические результаты исследований. Основные выводы соответствуют поставленным задачам и подтверждают их выполнение.

Структура и содержание работы соответствует цели и задачам исследований. Каждая глава диссертации завершается соответствующими выводами. Структура диссертации имеет внутреннее единство, написана грамотным литературно-техническим языком, снабжена достаточным количеством корректно оформленного графического и фотоматериала.

### **Замечания по диссертации**

1. Известно, что исследуемые характеристики динамической системы станка зависят от вида фрезерования, силового и кинематического взаимодействия инструмента и заготовки, т. е. для разных видов фрезерования различны (фрезерование цилиндрической или торцевой фрезой, зубофрезерование и проч.) В постановочной части диссертации, в тексте и выводах не уточняется, для каких способов фрезерования может использоваться разработанный метод имитации процесса.

Если данный метод претендует на универсальность, то следовало бы дать конкретные рекомендации по размещению и креплению вибровозбудителя в рабочем пространстве и его настройки (частота вращения, дисбаланс и др.) в зависимости от конкретных условий и способа реального фрезерования. Впрочем, это может быть одним из направлений дальнейшего развития представленных исследований (включая оценку применимости метода для других групп металлообрабатывающего оборудования).

2. Известно, что изменение силы резания с «зубцовой» частотой происходит по отнулевому циклу, в то время как имитирующая нагрузка от дисбаланса - по симметричному. Для подтверждения адекватности метода это требует дополнительного пояснения при доказательстве соответствия силового воздействия вибровозбудителя силам резания.

3. Соискатель констатирует, что «сравнение результатов измерения проводилось многократно на различном оборудовании с различными материалами и условиями фрезерования». При этом многократность не представлена в виде каких-либо общепринятых статистических характеристик (подраздел 3.2. Адекватность представленного метода).

4. В диссертации в отдельных случаях имеет место описательный подход к решениям конкретных инженерных задач. Так в подразделе 4.5 «Метод обеспечения жесткости проектируемого малогабаритного станка» на четырех страницах приводятся 2 фотографии, но не приведено ни одной расчетной схемы или расчетного анализа предлагаемых изменений. Решение приводится в констатирующей, потому не в полной мере доказательной форме.

5. В названии и цели работы объектом исследования указан станок, но точность обработки детали определяется всей цепью формообразования, включая, в частности, приспособление. В диссертации этот вопрос проработан недостаточно.

6. Решаемая соискателем задача проектирования малогабаритного станка объектного базирования (подраздел 4.3), безусловно, практически значима, однако, имеет слабую связь с темой диссертации и поставленными задачами.

7. Наименование подраздела 3.3 «Исследования модернизированного координатно-расточного станка модели 2431СФ10» не соответствует общему наименованию раздела 3. Эти исследования следовало привести как пример применения методики, отработанной на фрезерном станке, для координатно-расточного станка, и, возможно, разместить в приложении.

8. Приведенный на с. 144 список терминов представляется излишним, т. к. состоит из общеизвестных терминов (жесткость, виброустойчивость, испытания и др.).

9. В работе встречаются пунктуационные, в отдельных случаях – стилистические ошибки: например, «предлагается производить испытания не во время фрезерования, но под воздействием аналогичной силы, **вынуждающей колебания** несущей системы исследуемого станка». Возможный вариант: ... силы, вызывающей вынужденные колебания несущей системы ...; «**к несущей системе станка** осуществляют на входе гармоническое возбуждение». Возможный вариант: осуществляют на входе гармоническое возбуждение несущей системы станка; «**Результат результатов** испытаний на точность круговых перемещений под нагрузкой представлен на рисунке 3.5.».

Имеются опечатки, например, «врем» на стр. 129; на рисунках 2.8, 2.9, 2.20, 2.21 не указаны единицы измерения для вертикальной шкалы; на рисунке 3.2 вместо подписанной оси С показано круговое направление С.

В целом, замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки», разделам «Направления исследований»:

- п.2 (Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических, химических и комбинированных воздействий);

- п.3 (Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышения производительности, надежности и экономичности обработки);

- п.6 (Исследование влияния режимов обработки на силы резания, температуру, стойкость инструмента и динамическую жесткость оборудования).

## **Заключение**

Прежде всего, следует отметить, что в данном диссертационном исследовании предпринята попытка натурального моделирования очень сложного, имеющего множество факторов влияния процесса динамики фрезерования с помощью достаточно простого и доступного инструментария. Очевидно, что для возможности решения задачи в такой постановке, реальный процесс технологического взаимодействия надо в значительной степени упрощать при его имитации. В этом случае от исследователя на протяжении всех этапов требуется не только классический научный, но и по-настоящему креативный подход – поиск адекватных допущений и ограничений, позволяющих отсеивать малозначительные факторы и принимать во внимание наиболее значимые. Можно констатировать, что соискатель с этими задачами успешно справился. Подтверждением служат результаты сравнительных испытаний отдельных станков.

В диссертационной работе Блохина Д.А. решена научная задача, имеющая значение для развития машиностроения в области диагностирования станочных систем, заключающаяся в разработке метода определения погрешностей перемещений узлов фрезерных станков с числовым программным управлением с физической имитацией рабочей динамической нагрузки. Диссертация соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, и требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствующие о личном вкладе автора диссертации в науку, что подтверждает соответствие диссертации требованиям п. 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней».

Все положения и выводы диссертации опубликованы в полном объеме в научных изданиях из перечня Министерства науки и высшего образования РФ, а также представлены в виде устных докладов на международных и всероссийских конференциях. Таким образом, требования к публикациям основных научных результатов, предусмотренных пунктами 11, 12 и 13 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», автором выполнены.

Диссертация содержит ссылки на источники заимствования материалов, а при использовании результатов научных работ, выполненных соискателем в соавторстве, на это имеются соответствующие указания в тексте диссертации. Таким образом, автором соблюден пункт 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация Блохина Д.А. по теме «Разработка метода определения погрешностей перемещений узлов фрезерных станков с числовым программным управ-

