

На правах рукописи

Блохин Дмитрий Андреевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УЗЛОВ ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ
ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ С ФИЗИЧЕСКОЙ ИМИТАЦИЕЙ
РАБОЧЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2024

Работа выполнена на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск.

Научный руководитель: **Попов Андрей Юрьевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск

Официальные оппоненты: **Вайнер Леонид Григорьевич**
доктор технических наук, доцент, профессор высшей школы промышленной инженерии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск

Штин Антон Сергеевич
кандидат технических наук, доцент кафедры «Станки и инструменты» федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Защита состоится «28» мая 2024 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»», по адресу: 127994, ГСП-4, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте https://stankin.ru/pages/id_115/page_1442

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направить по указанному адресу в диссертационный совет 24.2.332.01 на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

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



Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Результаты измерений точности оборудования в квазистатических состояниях и показатели точности контурной обработки связаны, но существенно отличаются при износе привода и значительных силах резания. Практика эксплуатации оборудования показывает, что износ обычно происходит локально, в небольшой зоне, что существенно влияет на точность обработки и виброустойчивость в этой зоне. Поскольку большинство высокоточных измерительных приборов недопустимо применять со смазывающей охлаждающей жидкостью или разлетающейся стружкой, необходимо разработать достоверный метод определения погрешностей перемещений и алгоритм исследования динамической характеристики и её распределения для станков фрезерной группы при одновременном приложении имитационной нагрузки к несущей системе. Проблема обеспечения и контроля параметров точности и виброустойчивости перемещений станка с числовым программным управлением (ЧПУ) под нагрузкой актуальна и требует проведения исследований.

Степень разработанности темы. Весомый вклад в изучение влияния сил резания на динамику и устойчивость процесса обработки, а также их связь с точностью получаемых изделий внесли такие отечественные и зарубежные ученые, как В.А. Кудинов, В.В. Бушуев, Д.Н. Решетов, В.Т. Портман, Б.М. Базров, В.В. Каминская, А.П. Кузнецов, Ф.С. Сабиров, В.И. Телешевский, В.В. Юркевич, Н.А. Серков, С. Brecher, Y. Altinas, M. Weck, Y. Peng, W. Knapp, S. Ibaraki, J.R.R. Mayer, H. Schwenke и многие другие.

Несмотря на то, что в данной области проведено большое число исследований, не существует комплексной методики оценки точности перемещений узлов фрезерных станков под нагрузкой, обеспечивающей достаточную универсальность, точность, научную обоснованность и практическую применимость.

Объектом исследования являются точностные параметры металлорежущих станков с программным управлением

Предметом исследования являются метод определения точности металлорежущих станков фрезерного типа в условиях приложения динамической нагрузки.

Целью работы является повышение достоверности результатов определения погрешностей перемещений узлов фрезерных станков с ЧПУ и определение эффективности методов повышения их виброустойчивости за счет приложения динамической нагрузки, имитирующей силовые явления при фрезеровании.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать устройство для силовой имитации процесса резания на основе исследований процесса фрезерования.
2. Разработать алгоритмы проведения экспериментальных исследований виброустойчивости несущей системы станка и составления карты распределения динамической характеристики станка с имитацией рабочей нагрузки.
3. Разработать метод определения точности под нагрузкой и виброустойчивости перемещений станков фрезерной группы с ЧПУ в условиях силовой имитации процесса фрезерования.
4. Исследовать динамические погрешности при перемещениях на изношенном участке шарико-винтовой передачи и направляющих станка при приложении динамической вибрационной нагрузки.
5. Разработать рекомендации по применению методов демпфирования в приводах станков для обработки с большими силами резания и станков для высокоскоростной обработки.

Научная новизна результатов исследований заключается в:

- разработанном методе измерения динамической характеристики станка при круговом движении в рабочей зоне с реализацией силового воздействия в виде вращающегося вектора сил за счет вращения неуравновешенной массы (патент РФ № 2794584);
- доказанном позиционно-зависимом различии между точностью позиционирования и перемещений, измеренных в квазистатическом и в нагруженном состоянии упругой системы станка.

Теоретическая значимость заключается в разработанном методе определения точности перемещений станка в условиях, имитирующих процесс обработки, позволяющем установить взаимосвязь между динамической нагрузкой, имитирующей силы резания, и точностью перемещений элементов несущей системы металлорежущих станков с программным управлением с учетом локального износа шарико-винтовых передач и направляющих.

Практическая значимость заключается в:

1. Разработанном методе определения точности перемещений станка в ходе круговых и прямолинейных рабочих перемещений конкретной единицы оборудования в текущий момент времени с учетом действующей программной коррекции, примененных вибродемпфирующих устройств и состояния шарико-винтовых передач и направляющих;
2. Разработанном устройстве для моделирования динамической нагрузки, возникающей в процессе фрезерования, по подобию параметров амплитуды и

частоты вынужденных колебаний, позволяющее, в том числе, определять предельные режимы резания конкретной единицы оборудования;

3. Разработанных рекомендаций по расчету частоты вращения, эксцентриситета и массы дисбаланса вибровозбудителя со статически неуравновешенным ротором для физической имитации сил резания;

4. Предложенной конструкции специального малогабаритного фрезерного станка объектного базирования и обеспечения жесткости его конструкции за счет увеличения жесткости направляющих и шарико-винтовых передач.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Точность перемещений узлов станка, измеренная по стандартным методам в квазистатических условиях существенно выше, чем точность перемещений в процессе обработки, что требует производить испытания при воздействии вынуждающей силы, эквивалентной силам резания.

2. Разработанный метод измерения погрешностей перемещения фрезерных станков при прямолинейных и круговых перемещениях узлов станка с имитацией рабочей нагрузки, который позволяет достоверно определить точность и виброустойчивость перемещений узлов станка в текущий момент времени.

3. Построенные карты распределения динамической характеристики станка с имитацией рабочей нагрузки позволяют определить эффективность методов вибродемпфирования и границы режимов резания, при которых происходит потеря устойчивости движения для всех участков рабочей зоны станка.

Методы исследования. Все разделы работы выполнялись с использованием методов физического моделирования многофакторных процессов. Результаты работы получены на основе теории резания металлов, законов физики раздела теории колебаний, теоретической механики. Разработанные технические решения опробованы экспериментально в лабораториях кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ОмГТУ, а также на оборудовании предприятий региона. 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, динамометр УДМ-600. Обработка теоретических и экспериментальных результатов производилась с использованием вычислительной техники с использованием программ Renishaw Ballbar 5, Baltech-expert, Origin pro 2021 и КОМПАС v 21.

Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы обеспечивается применением современных методов исследований,

высокой точностью измерительных приборов и подтверждается согласованием расчетных результатов с экспериментальными исследованиями в лабораторных и производственных условиях. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, подкреплены фактическими данными, представленными в приведенных рисунках и таблицах.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на: 2 Всероссийской научно-практической конференции «Наука и молодежь в XXI веке» (Омск, 2016 г.), I Региональной научно-технической конференции «Ученые Омска – региону» (Омск, 2016 г.), 12 международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2020 г.), 10, 11 и 13 Международной научно-практической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2016, 2017 и 2020 г.), а также на заседании кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета (Омск, 2021, 2022 г) и заседании кафедры станков и кафедры измерительных информационных систем и технологий МГТУ «СТАНКИН» (Москва, 2022, 2023 г).

Личный вклад соискателя. Автору принадлежат формулировка цели и задач исследований, выполнение физического моделирования, разработка методики диагностики, проектирование и создание опытно-производственных установок, выполнение и обработка результатов экспериментов.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 10 публикациях, из них 6 опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, имеется 1 патент на изобретение.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа представляет собой научное обоснование новых технических решений, совершенствующих средства и методы диагностики динамических процессов на этапе эксплуатации оборудования, за счет изучения связей физико-технических процессов, протекающих при удалении части объема материала и повышающих надежность и работоспособность средств реализации технологического процесса. По теме и содержанию материалов диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» раздела области 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 оборудования, агрегатов, механизмов и других

комплекующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки), п.6 (Исследование влияния режимов обработки на силы резания, температуру, стойкость инструмента и динамическую жесткость оборудования).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 104 наименований и двух приложений. Содержит 161 страницу машинописного текста, в том числе 148 страниц основного текста, 72 рисунка, 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение отражает актуальность диссертационной работы, раскрывает содержание, содержит описание цели и задач исследования, научной новизны, теоретической и практической значимости, подтверждение ценности научной работы и достоверности результатов; включает в себя описание апробации результатов работы, а также её объем и структуру.

В первой главе проведен анализ причин возникновения погрешностей на металлорежущих станках с ЧПУ, рассмотрены применяемые подходы к обеспечению точности металлорежущих станков, а также параметры, влияющие на точность, виброустойчивость и динамику процесса фрезерования. Обоснована актуальность проблемы обеспечения и оценки точности перемещений узлов станка с учетом неравномерности процессов износа шариковинтовых передач (ШВП) и направляющих на протяжении жизненного цикла станка. Аналитический обзор показывает, что нагружение упругой системы станка центробежной силой позволяет оценить жесткость во всех направлениях в плоскости перпендикулярной оси вращения.

Во второй главе разработана конструкция и обоснован принцип действия нагрузочного устройства, приведен порядок расчета параметров вибровозбудителя (дисбаланс и частота вращения вала). Проведен сравнительный обзор способов контроля с помощью внешних и встроенных в станок измерительных приборов, предложены методы, позволяющие оперативно определить распределение динамической характеристики станка в рабочем пространстве.

При работе станков возникает широкий спектр колебаний, природа которых имеет как стационарный, так и позиционно-зависимый характер. На любом технологическом оборудовании, бывшем в эксплуатации, можно наблюдать различие в размахе колебаний в пределах 2-5 раз при изменении позиции узлов и направлений приложения силы и измерения колебаний. Аналитический обзор показывает, что нагружение упругой системы станка центробежной силой позволяет оценить жесткость во всех направлениях в

плоскости перпендикулярной оси вращения. Спроектированное нагрузочное устройство создает инерционное силовое воздействие на несущую систему станка, моделирующее все возможные направления сил резания в плоскости измерения, посредством вращения неуравновешенного ротора (рисунок 1).

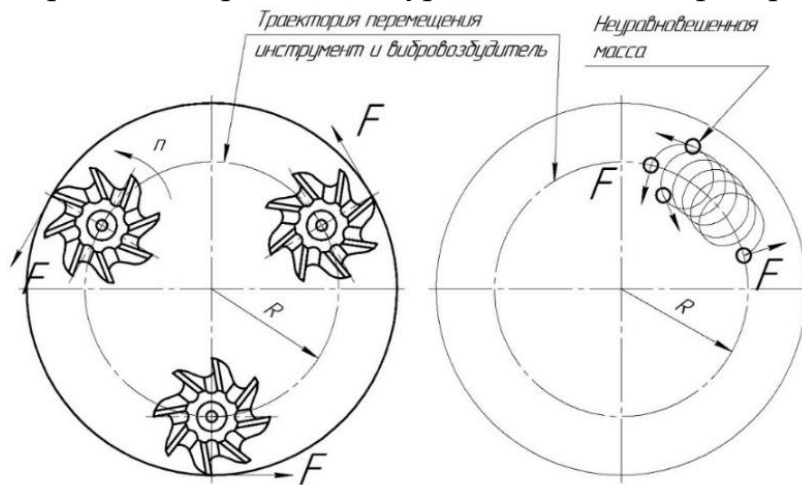


Рисунок 1 – Схема расположения сил при обработке отверстия и вращении неуравновешенной массы при движении по окружности

Совпадение скорости контурной подачи, траектории перемещения, модуля и частоты приложенной центробежной силы позволяет оценить отклик несущей системы станка на эквивалентное силовое воздействие. На рисунке 2 представлена схема установки: на подвижном крестовом столе станка закреплен источник вынужденных колебаний: трехфазный асинхронный электродвигатель 2, подключенный к электрической сети через частотный преобразователь, с установленным на конце вала сборным грузом 3 изменяемой массы, расположенным эксцентрично.

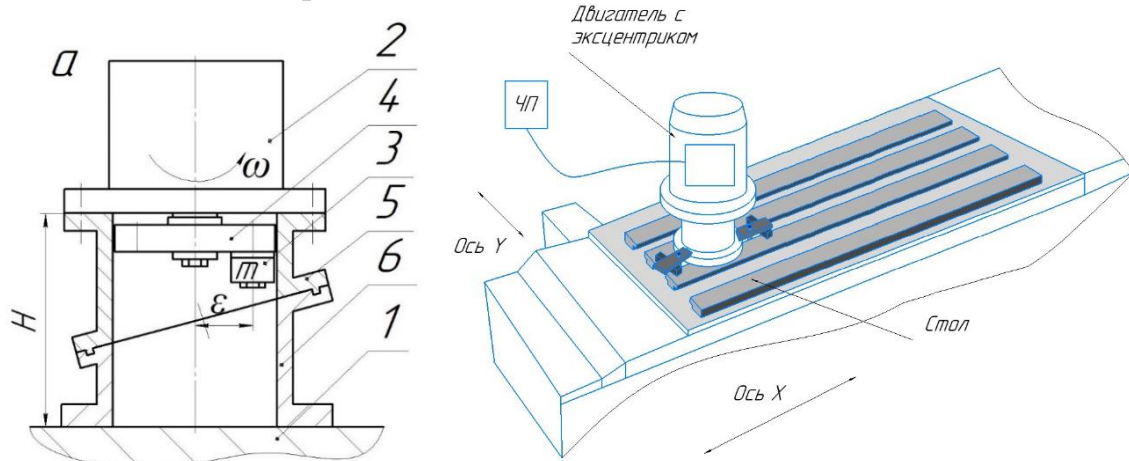


Рисунок 2 – Конструкция источника вынужденных колебаний и схема расположения источника вынужденных колебаний при нагружении вибрацией подвижного стола фрезерного станка

Таким образом, при вращении статически неуравновешенного ротора 4 электродвигателя центробежная сила, действующая на груз, передается на стол станка 1, а также может изменяться по модулю в зависимости от массы груза и частоты вращения ротора двигателя. Частотный преобразователь обеспечивает

возможность бесступенчатого изменения частоты вращения ротора двигателя в широком диапазоне. Для создания равных опрокидывающих моментов и создания периодической вертикальной составляющей силы предложены различные конструкции для монтажа вибровозбудителя, в том числе с наклоном оси вращения ротора. Автор отмечает, что для оценки важна позиция останавливаемого вибровозбудителя. Размах колебаний может быть уменьшен при установке нагрузочного устройства как можно ближе к гайке ШВП.

Нагрузочное устройство универсально, поскольку позволяет путем регулирования частоты вращения двигателя и массы несбалансированного груза подбирать необходимую нагрузку в целях проведения диагностики и контроля точности перемещений узлов оборудования с имитацией сил резания, возникающих при различных режимах фрезерования. Выбор массы груза обусловлен равенством сил резания и имитационных центробежных сил, а, следовательно, возникновением колебаний с амплитудой, равной амплитуде виброперемещений в процессе резания. Центробежная сила F , H , создающая вынужденные колебания несущей системы станка, рассчитывается по формуле:

$$F_{ц} = m \cdot \varepsilon \cdot \omega^2 = 4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot \varepsilon \cdot f^2, \quad (1)$$

где m — неуравновешенная масса, кг; ε — эксцентриситет, м; ω — угловая скорость, рад/с, f — частота вращения шпинделя, Гц. Частота вынужденных колебаний для предстоящих измерений определяется частотой входа зубьев в заготовку при выполнении пробного прохода с предельной нагрузкой по формуле:

$$f = \frac{z \cdot n}{60} \quad (2)$$

где f — расчетная частота, Гц; z — число зубьев фрезы; n — число оборотов инструмента в минуту, 1/мин. В случае необходимости можно также исследовать поведение системы в более форсированных режимах.

Алгоритм действий для построения карты распределения динамических смещений стола станка в плоскости измерений следующий: после определения силы резания необходимо произвести расчет параметров вибровозбудителя: массы и эксцентриситета груза, частоты вращения по зависимостям 1 и 2, затем вибровозбудитель монтируется на станок, выполняются измерения и запись усредненных значений размахов колебаний при позиционировании или перемещениях с определенной скоростью подачи. Данный метод может использоваться для оперативной оценки распределения динамической характеристики и виброустойчивости станка в рабочем пространстве станка.

Зависимости амплитуды виброперемещений стола от позиции узлов станка и режима нагружения наглядно представляются в виде карты распределения динамической податливости по значениям амплитуд колебаний, полученных с датчиков обратной связи двух приводов (рисунок 3). Расхождение в размахе колебаний, фиксируемом встроенными датчиками обратной связи при фрезеровании и при соответствующей имитации силового воздействия с

применением описанного устройства, для всех проведенных тестов не превышает 10%.

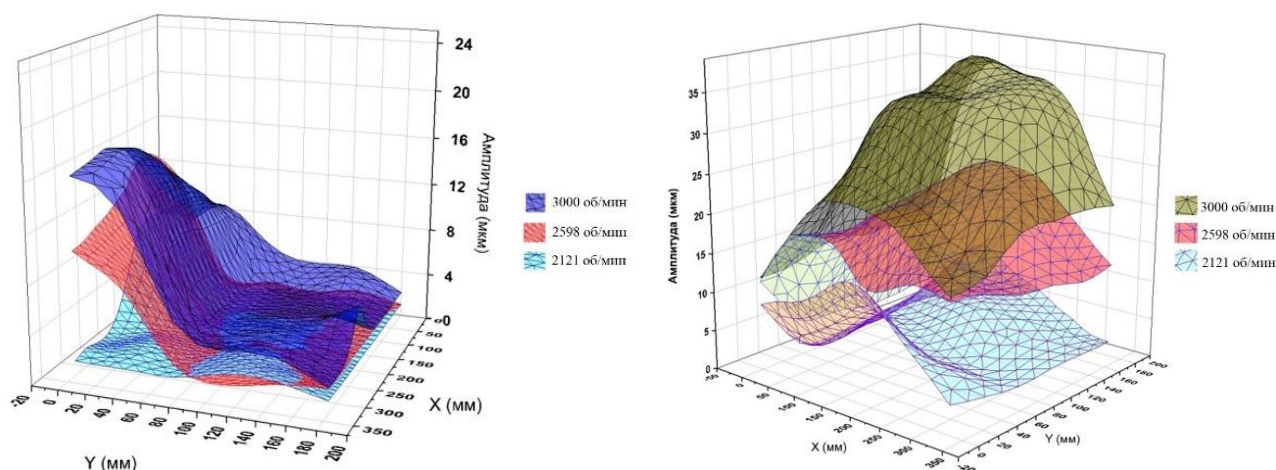


Рисунок 3 – Карты распределения виброперемещений стола станка под воздействием периодической нагрузки различной величины

Приведены результаты испытаний устойчивости станка при нагружении центробежной силой в протоколе «разгон-выбег», а также сравнительные испытания величин перемещений при фрезеровании и имитационном нагружении.

Также проведены исследования зависимости амплитуды колебаний от скорости подачи для разных режимов нагружения. Экспериментально установлено, что при появлении и увеличении скорости контурной подачи возрастает максимальный размах колебаний. Существует порог усилия, ниже которого колебания при движении в условиях нагружения по амплитуде отличаются от колебаний в неподвижном состоянии незначительно. Для каждого станка может быть определено такое пороговое воздействие, которое провоцирует «раскрытие стыков» и вызывает в ШВП скачкообразные перемещения с большей амплитудой, что было зафиксировано съемкой с использованием высокоскоростной камеры.

Проведено сравнение измерительных систем по различным параметрам: полноте данных, точности измерения, величине шума и доступности. Точность внешних виброанализаторов и встроенных линейных датчиков положения признана удовлетворительной для оценки параметров колебаний. Широкое распространение многокоординатной фрезерной обработки увеличивает интерес к точности согласованных перемещений, в том числе круговых, равно как и способам её контроля.

В третьей главе представлен разработанный метод измерения динамической характеристики несущей системы станка при круговых перемещениях и воздействии нагрузки, имитирующей процесс резания. Проведены сравнительные испытания с реальным процессом резания и даны рекомендации по практическому выполнению испытаний с физической имитацией динамической нагрузки.

На рисунке 4 представлена предлагаемая схема измерения амплитуды вынужденных колебаний при круговых перемещениях.

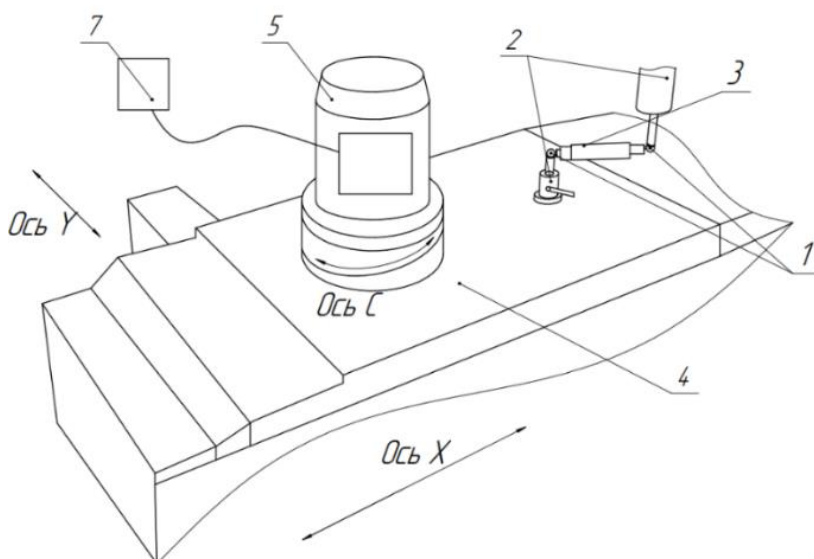


Рисунок 4 – Схема измерения амплитуды вынужденных колебаний с помощью телескопического датчика

Для испытаний динамического качества металлорежущего станка устройство, состоящее из телескопического датчика 3 со сферическими наконечниками 1 закрепляют на станке с ЧПУ в специальных подпятниках 2, один из которых устанавливают на столе станка, а другой — на его шпиндельной бабке. Изменение расстояния между двумя шарнирами в ходе движения отображается в виде круглограммы. Направление измерения радиальное и непрерывно изменяется в ходе кругового перемещения подвижного узла. Выбор направления обоснован тем, что возникающие радиальные отклонения в процессе фрезерования по круговым траекториям напрямую переносятся на обрабатываемую поверхность детали. В данной работе в качестве телескопического измерительного датчика применялся прибор Renishaw Ballbar QC-20W со встроенным пьезоэлектрическим акселерометром с погрешностью измерения $\pm (0,7 + 0,3\% L)$ мкм при 15-25 °С, ценой деления $\pm 0,1$ мкм и максимальной частотой считывания 1000 Гц. Низкий уровень шума и высокая точность измерения позволяют использовать прибор для определения амплитуд виброперемещений величиной в единицы и десятки микрометров при любом виде фрезерной обработки. Предложенный метод позволяет осуществить анализ массива круговых диаграмм, полученных в процессе измерения точности круговых перемещений станка при одновременном приложении к подвижному узлу вибрационной нагрузки, эквивалентной по модулю силе резания и частоте воздействия.

На рисунке 5 показано увеличение амплитуды колебаний при выполнении теста с использованием нагрузочного устройства (справа) по сравнению с испытаниями на холостом ходу (слева), измеренные в одной позиции, а также неравномерность динамической характеристики упругой системы станка в различных зонах, которая приводит к значительному снижению точности обработки. За счет подобных испытаний можно получить более полную информацию о поведении несущей системы станка по сравнению со стандартными испытаниями.

На рисунке 5 показано увеличение амплитуды колебаний при выполнении теста с использованием нагрузочного устройства (справа) по сравнению с испытаниями на холостом ходу (слева), измеренные в одной позиции, а также неравномерность динамической характеристики упругой системы станка в различных зонах, которая приводит к значительному снижению точности обработки. За счет подобных испытаний можно получить более полную информацию о поведении несущей системы станка по сравнению со стандартными испытаниями.

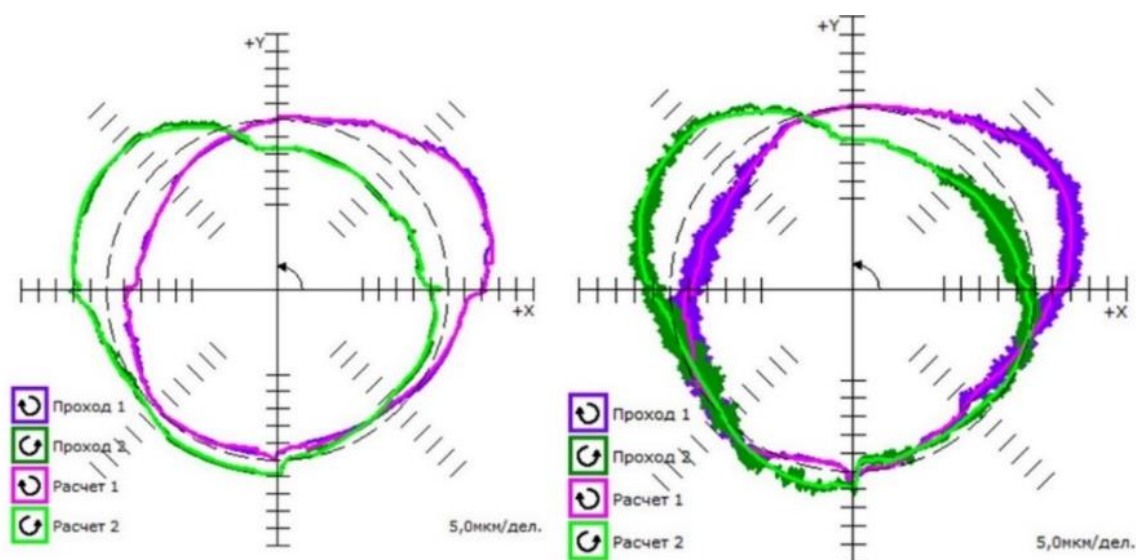


Рисунок 5 – Круговые диаграммы на холостом ходу (слева) и с вынужденными колебаниями (справа)

Можно отметить отсутствие искажений и высокую повторяемость средних линий в экспериментах с применением вибровозбудителя и на холостом ходу и различную жесткость различных осей. С целью повышения достоверности диагностика проводится многократно в каждой точке измерения, при необходимости можно изменять скорость контурной подачи и параметры силового воздействия. На рисунке 6 на виде сверху на стол станка схематически приведены положения точек измерения «а-е».

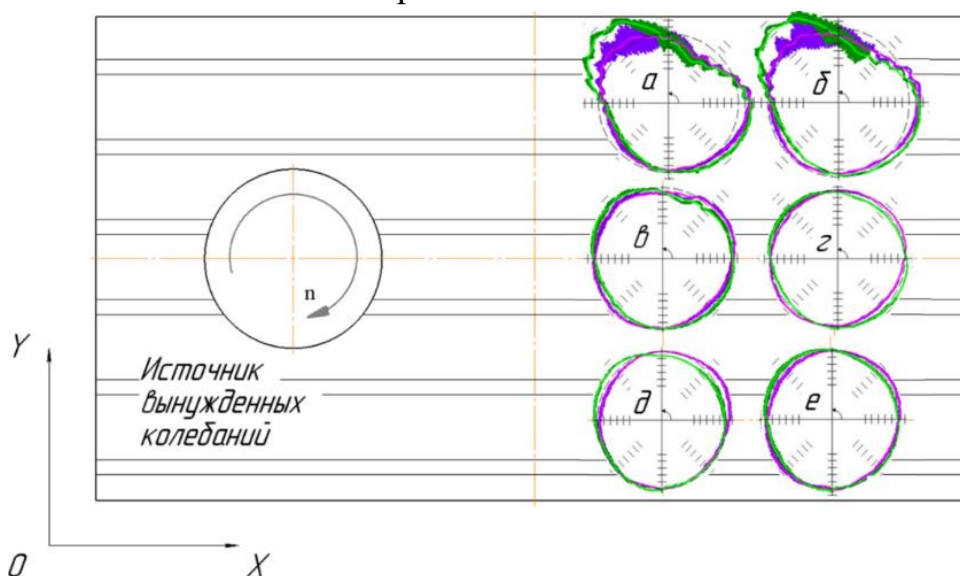


Рисунок 6 – Картирование точности круговых перемещений под нагрузкой: расположение точек измерения и вибровозбудителя при исследовании динамической характеристики станка

Алгоритм определения точности и виброустойчивости круговых перемещений фрезерных станков представлен и прокомментирован. Указаны факторы, которые необходимо принимать во внимание при настройке параметров испытания и вибровозбудителя: скорость подачи, зубцовая частота,

сила резания и масса эксцентрично расположенной массы, радиус траектории и количество зон измерения.

Определение предельно допустимого уровня вибрации производится оператором станка отдельно для каждого определенного перехода с учетом влияния величины колебаний на стабильность процесса обработки, стойкость инструмента и шероховатости поверхности. Определить этот предел инструментально и однозначно возможно, и в ряде случаев даже необходимо, но для этого требуется виброакустическая и другая контрольная аппаратура. Факт переменной жесткости оборудования на разных участках круговой или винтовой траектории можно наблюдать по расстоянию между огибающими линиями полярной диаграммы, рисунок 7; цена деления: 10 мкм/деление. Ось X совершает существенно большие перемещения при равном значении центробежной силы ввиду меньшей массы узла.

Измерение амплитуд колебаний в ходе фрезерования и в имитационном процессе выполнялось как датчиками обратной связи, так и прибором ballbar. Для оценки соответствия имитирующих сил и сил резания при фрезеровании по круговой траектории проводился комплекс испытаний по фрезерованию нескольких обрабатываемых материалов на различных режимах. Скорость подачи, сила воздействия и частота вынужденных колебаний соответствовали расчетным параметрам в ходе фрезерования соответствующих материалов.

Автор отмечает повышение информативности измерений при приложении внешней нагрузки по сравнению с испытаниями в квазистатических состояниях. В условиях знакопеременной нагрузки в процессе резания, наличие зазоров в кинематических парах неизбежно приводит к возникновению вибрации и значительному ухудшению точности обработки.

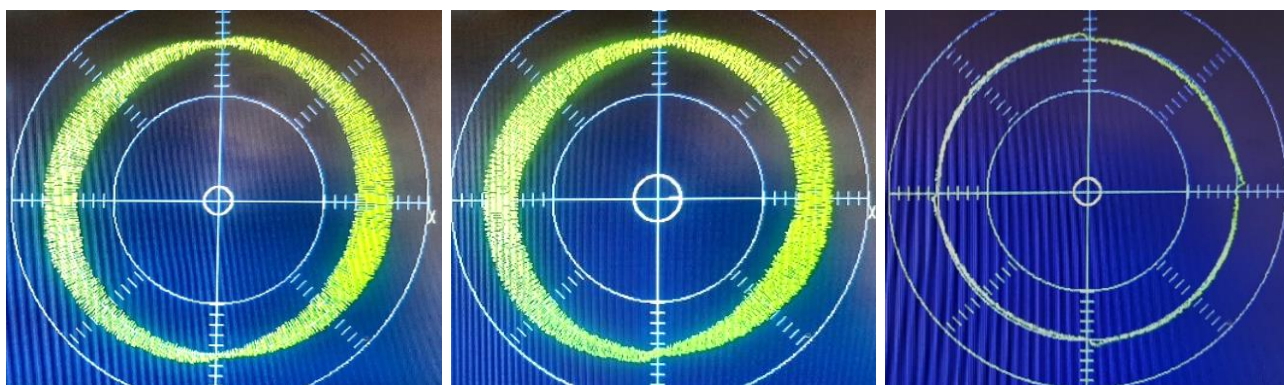


Рисунок 7 – Определение размаха виброперемещений по данным обратной связи в системе ЧПУ станка в виде полярной диаграммы: имитация с помощью вибровозбудителя (слева), реальный процесс резания (в центре), квазистатические испытания (справа)

Сравнение точности измерений с помощью встроенных систем обратной связи по линейной координате и с помощью внешнего измерительного датчика рисунок 8, проводились многократно на различном оборудовании с различными усилиями резания. В результате рекомендовано применение внешних телескопических датчиков, так как они позволяют не только оценить параметры

колебаний, но и более точно определить остальные неточности круговых перемещений.

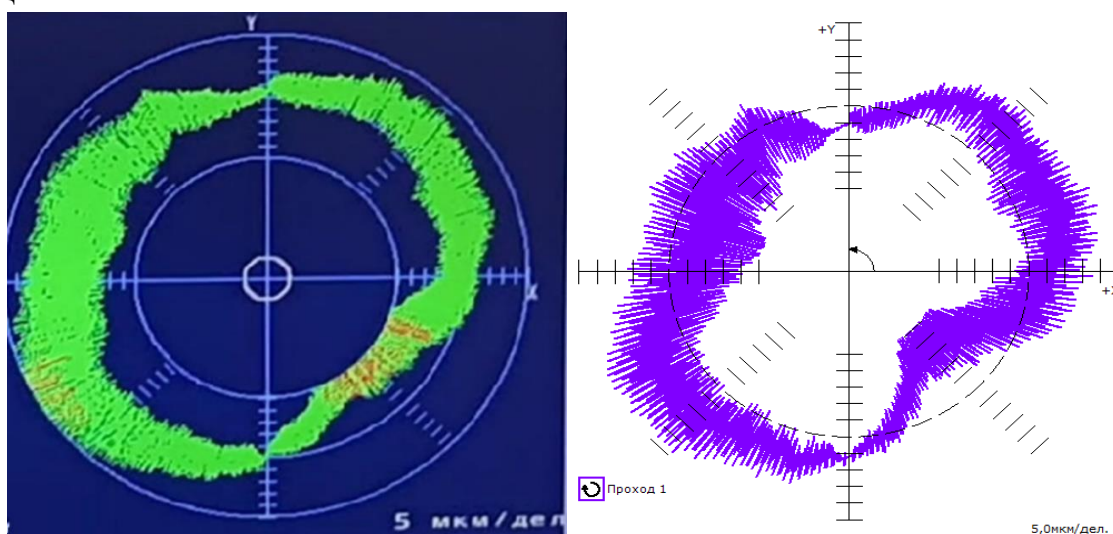


Рисунок 8 – Сравнение результатов, полученных с помощью встроенных систем обратной связи по линейной координате (слева) и с помощью внешнего телескопического датчика (справа)

Проведены экспериментальные испытания для определения предельных режимов на станках различной массы и компоновок с целью показать применимость метода для оценки предельных параметров нагружения, обеспечивающих сочетание высокой производительности фрезерования и качества поверхности детали. В работе представлены результаты измерений станка КФП-250 под действием вибрационной нагрузки. На рисунке 9 приведены результаты в виде круговых диаграмм с ценой деления 10 мкм.

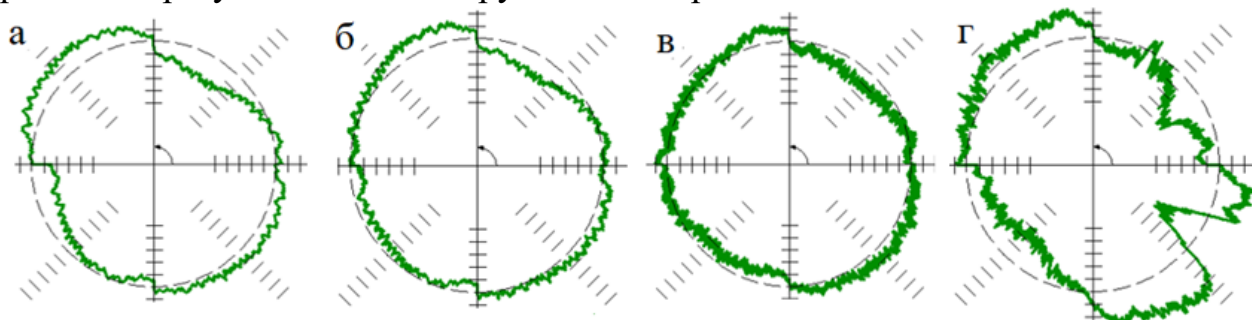


Рисунок 9 – Круговые диаграммы перемещений станка с различными величинами силового инерционного воздействия: а – без нагрузки, б - 100 Н, в - 300 Н, г - 500 Н

Приведены результаты испытаний среднегабаритного фрезерного станка МВ-400VA, который 12 лет эксплуатировался в режиме 14-часовой загрузки при обработке разнообразных материалов, в том числе труднообрабатываемых. С помощью разработанного метода обнаружены зоны наименьшей и наибольшей виброустойчивости круговых перемещений, позволившие скорректировать положение оснастки и повысить качество обработанных поверхностей в ожидании поставки комплектующих для ремонта. Результаты испытаний станка под действием вибрационной нагрузки, эквивалентной 500 Н при фрезеровании приведены на рисунке 10.

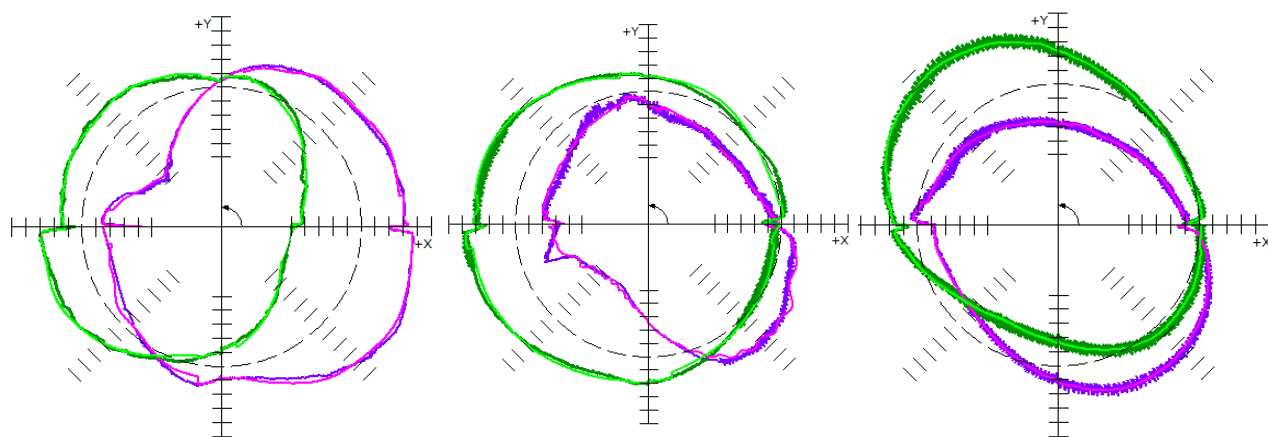


Рисунок 10 – Круговые диаграммы круговых перемещений в различных зонах станка под действием вибровозбудителя

Результаты проведенных тестов однозначно иллюстрируют повышение достоверности испытаний при применении предлагаемой методики, а также позволяют сделать обоснованные выводы о пределах режимов резания в различных ситуациях.

В четвертой главе предложен метод оценки эффективности вибродемпфирования на фрезерных станках с ЧПУ, а также даны рекомендации по проектированию приводов и модернизации специальных станков для обработки с большими силами резания и станков для высокоскоростной обработки. Представлена разработанная конструкция малогабаритного фрезерного модуля, спроектированного с учетом разработанных методик и полученных данных.

В работе приведен анализ способов вибродемпфирования различных станков, представлен вибродемпфер с тонкими пластинами, рисунок 11. Усилие прижима пластин к неподвижному элементу станины может обеспечить при перемещении постоянный поджим элементов качения к одной из сторон дорожек качения.

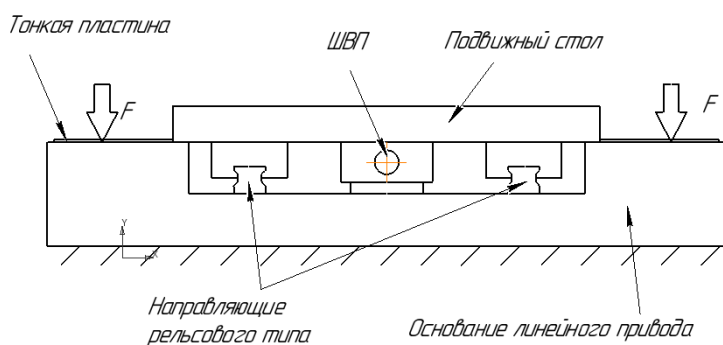


Рисунок 11 – Конструкция вибродемпфера линейного привода в поперечном разрезе

Тем самым за счет повышения инерции привода существенно повышается виброустойчивость станка. Определение позиционного распределения динамической характеристики, а кроме того предельно допустимых режимов нагружения станка, оснащенного вибродемпфером, можно производить с помощью

вышеописанных методов. На рисунке 12 представлена карта динамической характеристики станка в условиях применения предложенного вибродемпфирующего устройства с тонкими пластинами при отсутствии подачи.

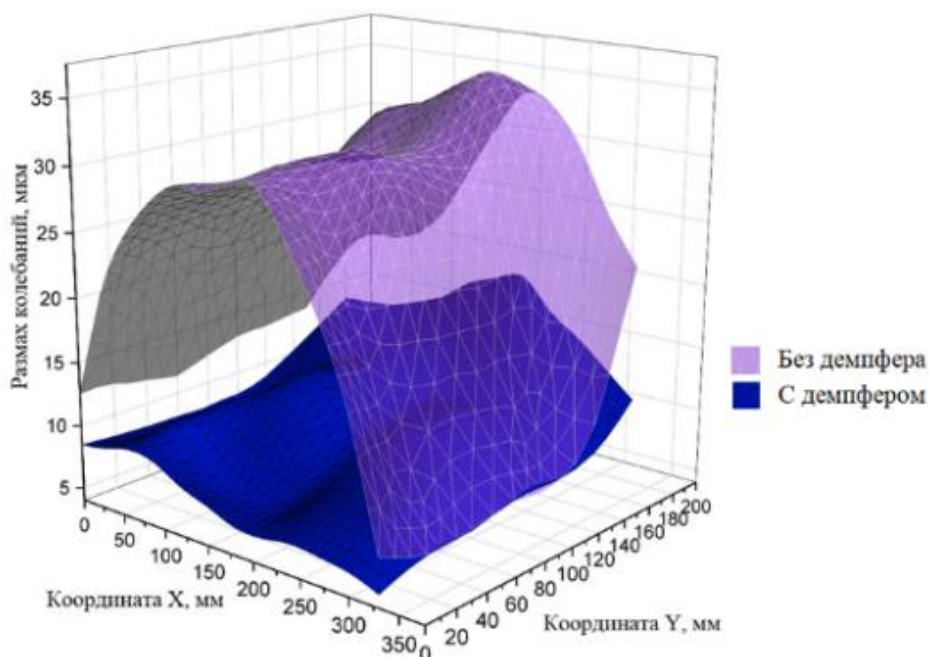


Рисунок 12 – Оценка эффективности вибродемпфирующего устройства с помощью построения карты динамической характеристики станка

Согласно проведенным исследованиям распределения динамической характеристики станка для подобного вибродемпфера амплитуда колебания при позиционировании станка снижается на 20-80% в зависимости от позиции.

Анализ эффективности демпферов при круговых перемещениях на рабочей подаче показывает уменьшение амплитуд колебаний на 10-50% в различных зонах, что существенно точнее измерений динамической податливости при отсутствии подачи, рисунок 13. Применение предлагаемой методики позволяет более достоверно определять влияние демпфирующих устройств на динамическое качество станка.

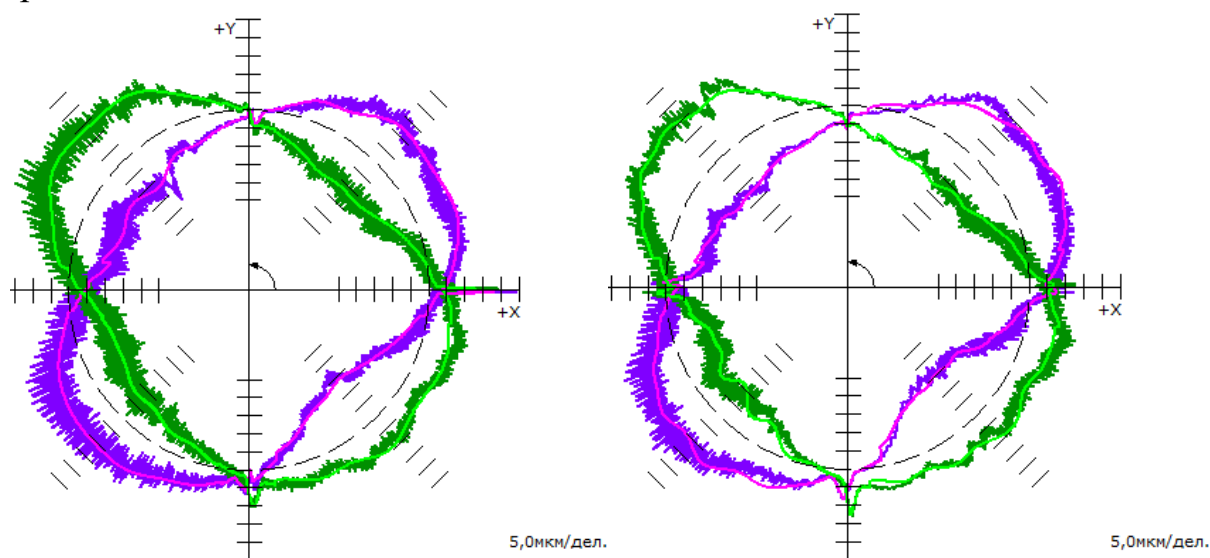


Рисунок 13 – Оценка эффективности вибродемпфирующего устройства с помощью круговых диаграмм: без применения вибродемпфера (слева) и с применением вибродемпфера описанной конструкции (справа)

Проблема обеспечения виброустойчивости специальных фрезерных станков объектного базирования в литературе не рассмотрена. Для реализации быстроходной малогабаритной конструкции по заданию ООО «НТЦ «Эталон» на базе ОмГТУ была спроектирована и изготовлена механическая часть фрезерного станка с ЧПУ. Внешний вид механической части станка в процессе наладки и 3D модель представлены на рисунке 14.

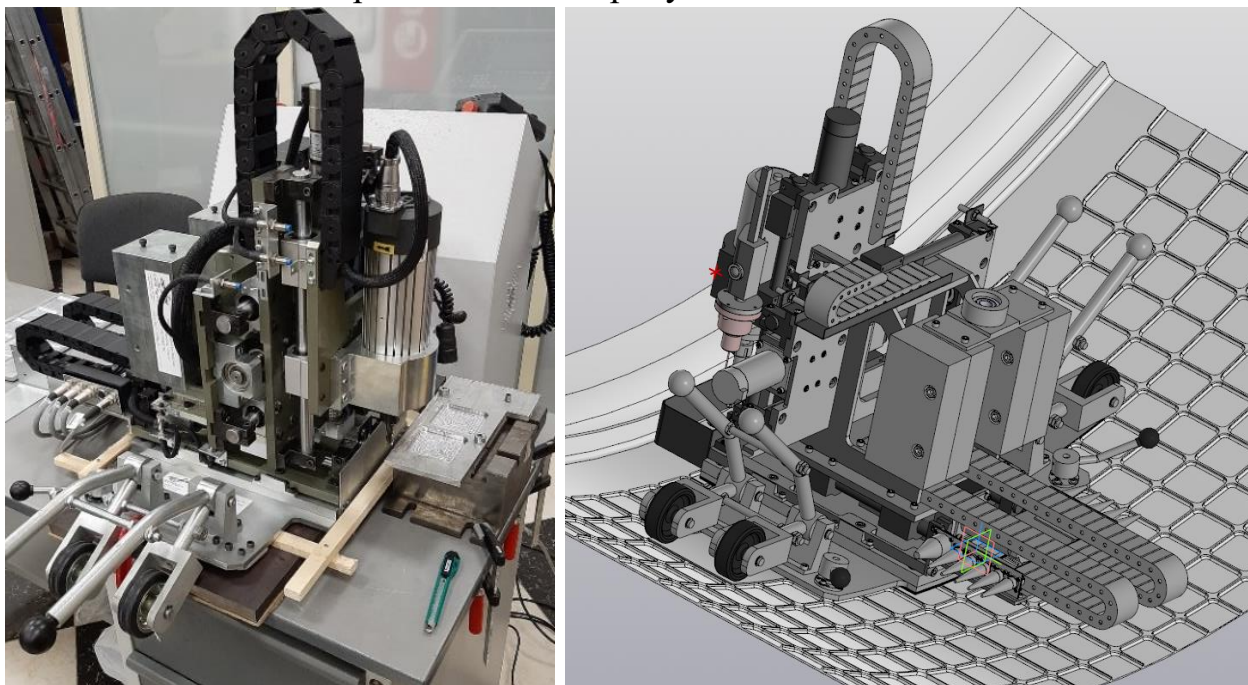


Рисунок 14 – Внешний вид опытного образца универсально фрезерного модуля в ходе наладки (слева) и трехмерная модель станка объектного базирования на регулярном макрорельефе (справа)

Ключевым ограничением при проектировании являлась масса станка, поэтому корпусные элементы имеют минимальные габариты: суммарный вес кронштейна и четырех алюминиевых плит, которые являются основаниями для опор элементов приводов станка составляет менее 7 кг. Общий вес станка в сборе составляет менее 45 кг. Поскольку жесткость корпусных алюминиевых плит толщиной 6-14 мм недостаточна, то предложено и применено конструкторское решение использовать ШВП большего диаметра, по сравнению с расчетным, с целью обеспечения жесткости не только элементами корпуса, но и в значительной мере элементами привода.

Жесткость и виброустойчивость станка объектного базирования в значительной мере зависят от способа его закрепления. Для оценки запаса устойчивости несущей системы опытного образца проводились натурные испытания по изготовлению контрольных деталей с использованием инструмента, установленного с увеличенным вылетом до 100 мм ($L/D = 10$). Сила резания передается на несущую систему и обрабатываемое изделие, но не провоцирует колебаний с большой амплитудой, следовательно, разработанный станок обладает значительным запасом устойчивости.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В диссертационной работе решена актуальная для современных технологий машиностроения задача повышения достоверности результатов определения погрешностей перемещений узлов фрезерных станков с ЧПУ за счет приложения динамической нагрузки, имитирующей силовые явления при фрезеровании, разработаны методы испытания с силовым вибрационным нагружением упругой системы станка, позволяющие более точно и достоверно определять погрешности позиционирования и перемещения узлов фрезерных станков под действием имитации рабочей нагрузки.

2. Разработано устройство для инерционной имитации силовой вибрационной нагрузки, возникающей в процессе фрезерования, позволяющее также оценить эффективность вибродемпфирующих устройств и их влияние на погрешность перемещений и динамическую характеристику станков. Установлено, что значения амплитуд виброперемещений узлов станка в процессе экспериментальных испытаний с предложенным вибровозбудителем в виде двигателя со статически несбалансированным ротором имеют сходимость менее 10% по сравнению с амплитудами виброперемещений при фрезеровании.

3. В результате высокоскоростной съемки установлена неравномерность перемещений элементов станка под действием приложенного силового воздействия и их связь с механическим износом элементов шарико-винтовой передачи. Это позволяет уточнить картину виброперемещений гайки на участке локального износа ШВП.

4. Разработан метод оценки точности и виброустойчивости круговых перемещений фрезерных станков с применением телескопического датчика с приложением имитирующего силового возбуждения (Пат. №2794584), позволяющий построить карту распределения динамической податливости в плоскости стола с точностью до 10%. Использование разработанного метода определения погрешностей круговых перемещений с имитацией рабочей нагрузки при построении карты распределения динамической податливости стола позволяет осуществить обоснованный выбор участка рабочей зоны станка, в котором может быть обеспечена заданная точность обработки.

5. Результаты, полученные в ходе комплексных испытаний различных станков в нагруженных состояниях, могут использоваться для оптимизации математических моделей оборудования в условиях динамической нагрузки и вибродемпфирующих устройств, а также поиска оптимальных технических решений в области виброзащиты фрезерных станков.

6. Предложено техническое решение, при котором за счет увеличенного вылета фрезы создаются вынужденные колебания, что позволяет определить границу виброустойчивости специальных малогабаритных станков объектного базирования и эффективность конструктивных методов виброгашения. Задача обеспечения точности под нагрузкой малогабаритных конструкций может быть решена преимущественно за счет повышения жесткости элементов линейного привода.

7. Результаты исследований применены при выполнении 7 хоздоговорных работ по технической диагностике 12 единиц оборудования на общую сумму 312 000 руб., а также проектированию и изготовлению механической части специального фрезерного станка на 705 357,36 руб.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Блохин, Д. А.** Составление карты точности перемещений стола фрезерного станка под нагрузкой / Д. А. Блохин, И. Н. Дроздов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2021. – № 4 (59). – С. 53–56.
2. **Блохин, Д. А.** Составление карты позиционной точности стола фрезерного станка / Д. А. Блохин, Ю. А. Блохина, М. М. Лакман. – DOI 10.25206/1813-8225-2021-180-21-25 // Омский научный вестник. – 2021. – № 6 (180). – С. 21–25.
3. Методика выявления причин погрешностей токарного обрабатывающего центра путем обработки контрольной детали / **Д. А. Блохин**, А. Г. Кольцов, Ю. А. Блохина, М. М. Лакман // Омский научный вестник. – 2021. – № 3(177). – С. 24-29. – DOI 10.25206/1813-8225-2021-177-24-29.
4. **Блохин, Д. А.** Методика регулировки величины люфта оси токарного обрабатывающего центра с ЧПУ с помощью лазерного интерферометра на основе экспериментальных исследований / Д. А. Блохин, А. Г. Кольцов, А. С. Серков // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2017. – № 3 (153). – С. 34–39.
5. Калибровка осей экспериментального круглошлифовального станка с ЧПУ с помощью лазерного интерферометра / А. Г. Кольцов, **Д. А. Блохин**, И. А. Бугай, Е. В. Васильев, П. В. Назаров // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2016. – № 6. – С. 25–30.
6. Методика оценки и повышения точности шлифовального центра с числовым программным управлением / **Д. А. Блохин**, А. Г. Кольцов, М. А. Тотик, А. Г. Дроботун // Омский научный вестник. – 2018. – №6 (162). – С. 19–24.

Публикации в других научных изданиях:

7. **Блохин, Д. А.** Способ контроля виброустойчивости стола вертикально-фрезерного станка / Д. А. Блохин, А. Ю. Попов, Ю. Р. Нуртдинов, И. Н. Дроздов // Инновационное и цифровое машиностроение : материалы Всерос. науч.-техн. конф. (Уфа, 7–9 апр. 2021 г.). – Уфа : Уфимский гос. авиац. техн. ун-т, 2021. – С. 263–268.
8. **Blokhin, D. A.** Investigation of the causes of shape deviations in contour milling / D. A. Blokhin, A. Yu. Popov. – DOI 10.1088/1742-6596/1260/3/032007 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1260 (3). – P. 032007.
9. **Блохин, Д. А.** Комплекс диагностики отклонений круговых траекторий станков с ЧПУ / Д. А. Блохин, А. Г. Кольцов // Ученые Омска - региону : материалы I Региональной научно-технической конференции, Омск, 28–29 декабря 2016 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2016. – С. 49-56.
10. **Блохин, Д. А.** Диагностика технического состояния металлорежущих станков с ЧПУ / Д. А. Блохин, А. Г. Кольцов, И. А. Васильева // Наука и молодёжь в XXI веке : материалы 2-й Всероссийской научно-практической конференции, Омск, 05 декабря 2016 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2016. – С. 91-96.

Патент на изобретение:

11. Патент № 2794584 С1 Российская Федерация, МПК G01M 13/00, B23Q 17/00. Способ диагностики точности металлорежущего станка под нагрузкой : № 2022109724 : заявл. 12.04.2022 : опубл. 21.04.2023 / Д. А. Блохин, А. Ю. Попов ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет".

Научное издание

Блохин Дмитрий Андреевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УЗЛОВ ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ
ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ С ФИЗИЧЕСКОЙ ИМИТАЦИЕЙ
РАБОЧЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук