

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОДАТЛИВОСТИ СТОЛА КООРДИНАТНО-РАСТОЧНОГО СТАНКА ПОД НАГРУЗКОЙ

В статье представлен метод оценки динамической податливости стола координатно-расточного станка с учетом деформаций несущей системы станка при воздействии периодических сил. Вибровозбудитель в виде электродвигателя с несбалансированным ротором позволяет моделировать динамическую нагрузку, эквивалентную процессу фрезерования по параметрам модуля сил резания и частоты воздействия, исключая применение СОЖ и стружкообразование. Приведенный метод может быть применен для определения предельных режимов резания и участков рабочей зоны станка, обеспечивающих необходимую жесткость и точность обработки.

Ключевые слова: обрабатываемые центры, точность обработки, точность фрезерования, жесткость несущей системы, динамика привода, ballbar.

I. Введение. Станки с числовым программным управлением (ЧПУ) играют ключевую роль в современной промышленности, обеспечивая высокую точность и эффективность в процессе обработки различных материалов. Исследование запаса виброустойчивости узлов станка при позиционировании и перемещениях под нагрузкой является актуальной задачей в области машиностроения и производства. Стол координатно-расточного станка является одной из его основных компонентов и выполняет роль опоры для приспособлений и заготовки во время обработки. Под воздействием динамической нагрузки стол испытывает различные смещения и деформации, что негативно сказывается на точности обработки [1].

Неблагоприятные параметры процесса резания могут привести к вибрациям, своего рода самовозбуждающимся неустойчивым колебаниям с большими нарастающими амплитудами. Высокие амплитуды вибрации в процессе фрезерования приводят к ухудшению поверхности заготовки, повышенному износу инструмента и повышенному шуму. В худшем случае эти вибрации могут привести к обширной доработке или браковке заготовки, особенно для деталей низкой жесткости и для станков со значительным износом шарико-винтовых передач. Чтобы преодолеть проблемы с вибрацией, многие операторы выполняют фрезерование тонкостенных заготовок с очень консервативными режимами резания, такими как уменьшенная скорость подачи, глубина резания и ширина резания. Однако это снижает скорость съема материала, что приводит к менее эффективному процессу обработки [2]. Существует множество работ, которые исследуют динамические характеристики передач винт-гайка качения, широко эксплуатируемые в приводах металлорежущих станков [3–5].

Общая тенденция станкостроения в области повышения точности станков состоит в стремлении компенсировать любые машинные ошибки. Для этого необходимо знать техническое состояние каждой машины в настоящий момент времени. Существует множество различных тестов состояния станков с ЧПУ, которые были стандартизированы, например, испытания с помощью лазерного интерферометра и телескопического датчика. Тест с лазерным трекером обычно используется для определения всего векторного пространства объемной погрешности и генерации таблицы коррекций [6]. Поскольку подобные проверки занимают достаточно много времени и требуют наличия специального измерительного оборудования, а требуемая коррекция зависит от внешних параметров [7], то многие предприятия не проводят таких работ при стандартном обслуживании станков.

Испытание с помощью телескопического датчика представляет собой лучшую практическую альтернативу, но дает лишь частичную информацию о состоянии машины.

Учеными предложены множество методов испытаний станков с прибором ballbar, позволяющие расширить результаты за счет позиционных или траекторных вариаций [8]. Они отличаются оборудованием, стоимостью, длительностью и типом результатов.

II. Цель исследования. В данной статье была поставлена следующая цель: исследование зависимости величины колебаний стола координатно-расточного станка от скорости контурной подачи и модуля силового гармонического воздействия. Понимание этих зависимостей и факторов, влияющих на упругие деформации, позволят разработчикам станков и инженерам улучшить конструкцию стола и оптимизировать параметры его работы, такие как точ-

ность и производительность, а также снизить количество бракованных изделий.

Для достижения данной цели будет проведено экспериментальное исследование, включающее в себя нагружение стола вибрационной периодической нагрузкой и измерение деформаций в радиальном направлении при перемещении по круговым траекториям.

III. Основная часть. В качестве измерительного устройства для контроля точности круговых перемещений станков с ЧПУ используют телескопический датчик с двумя сферическими шарнирами на конце согласно пункту 6.633 ГОСТ Р ИСО 230-1-2010. В данной работе был применен прибор Renishaw Ballbar QC-20W, который обладает точностью измерения $\pm 0,5$ мкм. Этот прибор оснащен встроенным пьезодатчиком и программным обеспечением, позволяющим выделить множество элементарных погрешностей при перемещении по круговым траекториям. Программное обеспечение прибора Renishaw Ballbar QC-20W обеспечивает возможность обнаружения различных погрешностей, таких как люфты в системе шарико-винтовой передачи (ШВП) и направляющих, неперпендикулярность осей, рассогласование приводов и другие неточности [9]. При перемещении по круговым траекториям пьезодатчик регистрирует динамически изменяющийся радиус и анализирует множество элементарных погрешностей, которые могут влиять на точность оборудования. Использование такого измерительного устройства и метода [10] позволяет более детально и точно анализировать геометрическую точность станка под действием различных факторов и нагрузок, что способствует улучшению процесса обработки и повышению точности исполнения траекторий.

Именно радиальная составляющая отклонений при круговой интерполяции создает ключевую погрешность, определяющую размерную точность и шероховатость поверхности в различных точках рабочего пространства металлорежущего станка. Поэтому максимальное радиальное перемещение определяет размерную точность и шероховатость поверхности обрабатываемой детали в различных точках рабочего пространства металлорежущего станка. Чем больше радиальное перемещение, тем больше радиальная составляющая погрешности при круговой интерполяции и тем менее точным будет размер обрабатываемой на станке детали.

В приводе подачи шарико-винтовая передача преобразует вращающееся движение сервопривода в линейное движение. Во время фрезерования возникающие силы передаются через элементы ШВП на корпусные детали станка. Поэтому такие характеристики, как осевая жесткость ШВП и их элементов качения, имеют существенное значение для эксплуатационного поведения станка [11].

Статическая нагрузка может в некоторых случаях устранить существующий люфт в шарико-винтовых передачах, люфт, который при нормальных условиях обработки будет устранен за счет воздействия сил резания на конструкцию [12]. Однако нагрузка, создаваемая статически, не эквивалентна реальным силам резания.

Применение программной коррекции позволяет повысить точность позиционирования и перемещений только для ненагруженных состояний, что нехарактерно для любого металлорежущего оборудования. Активная программная коррекция ГОСТ ISO/TR 16907-2017 требует точной и акту-

альной информации о состоянии оборудования, включая его геометрические параметры и динамические характеристики, может привести к небольшим движениям осей, которые неподвижны без коррекции, например, при коррекции отклонения от прямолинейности. Программная коррекция может быть ограничена в своей способности стабилизировать быстропротекающие физические процессы в оборудовании, такие как колебания вследствие износа деталей или деформации конструкции [13]. Снижение точности позиционирования из-за нелинейности трения и деформации муфт и шпинделя приводит к ошибкам слежения и некачественному формообразованию поверхности [14].

Изменение мгновенных значений силы резания при фрезеровании во времени происходит не по синусоидальному закону, а характеризуется более сложными закономерностями и имеет доминирующие частоты. В рамках данной работы используется нагрузочное устройство, создающее приближенное вынуждающее инерционное силовое воздействие на несущую систему станка в виде вращающегося вектора сил. Такой подход позволяет создать условия, близкие к процессу резания, и исследовать динамическую податливость стола станка под этой эквивалентной нагрузкой с учетом имеющихся зазоров (рис. 1).

Для контроля выбран станок модели 2431СФ10, оснащенный системой ЧПУ «Маяк-600», который обладает значительным износом элементов привода и механизмами демпфирования. Испытания оборудования, имеющего механизмы демпфирования или фиксации осей, целесообразно производить в условиях внешнего инерционного силового нагру-

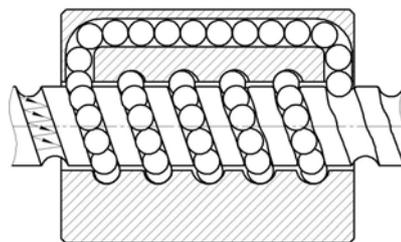


Рис. 1. Схема изменения вектора нагрузки в ШВП при знакопеременной нагрузке; конструктивные изменения, связанные с износом шарико-винтовой пары

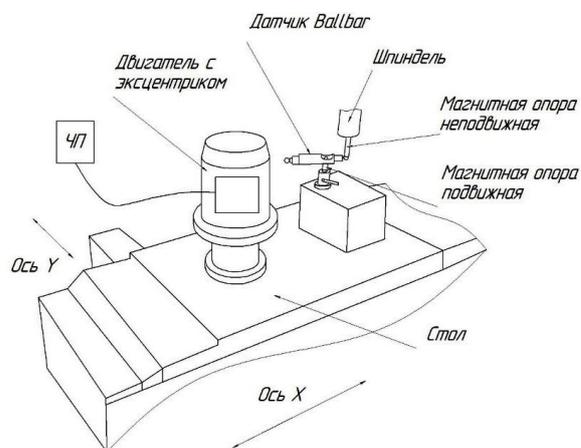
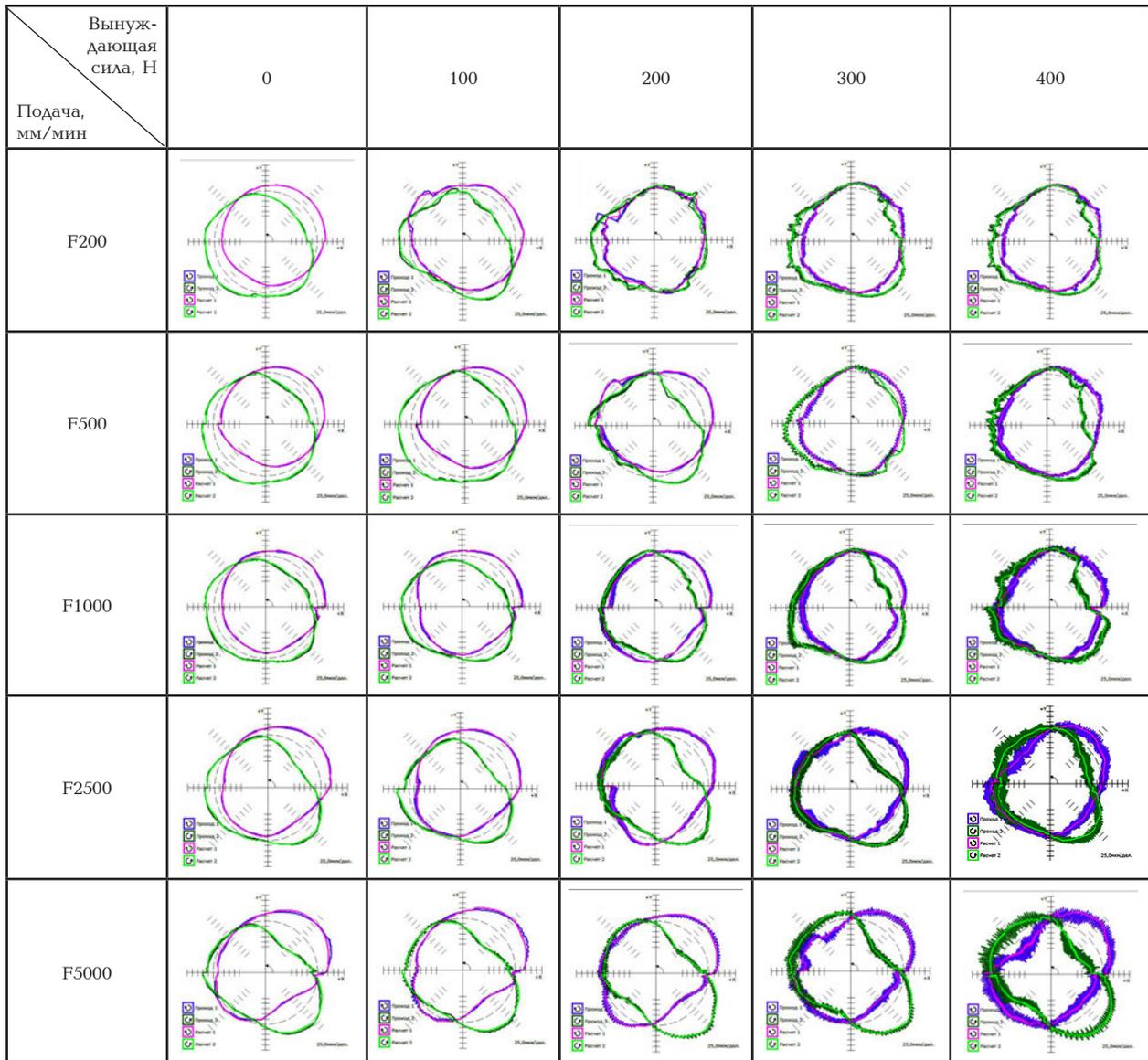


Рис. 2. Схема измерения виброустойчивости при нагружении вибрацией стола координатно-расточного станка

Изменение результата диагностики в зависимости от подачи и вынуждающей силы



жения по представленному выше методу. При этом необходимо документировать условия нагружения, активные коррекции в системе ЧПУ, позиции узлов станка, прогрева оборудования и температурных условий окружающей среды. Проведение экспериментов с различными массами груза и частотами вращения шпинделя позволяет определить влияние этих параметров на деформации стола и его поведение под нагрузкой.

Предлагаемая схема установки (рис. 2), которая позволяет создать периодические вынужденные колебания, имитирующие процесс фрезерования, и измерить амплитуду виброперемещений. Перемещение по круговой траектории задействует сразу две оси X и Y, что позволяет выявить наиболее устойчивые к нагрузке положения подвижного крестового стола. Использование круговой диаграммы под действием нагрузки является эффективным методом для определения отклонений и анализа точности оборудования при обработке материалов. В соответствии с известными алгоритмами [15, 16] данная диаграмма позволяет визуализировать ряд отклонений, описанных ранее.

Для создания инерционного силового воздействия используется вибровозбудитель, включающий в себя жестко закрепленный на столе корпус с трехфазным электродвигателем со статически неуравновешенным ротором, подключенным через частотный преобразователь. На конце вала этого двигателя эксцентрично установлен сборный груз переменной массы. Таким образом, вибрационная нагрузка, приближенная к процессу резания, передается на стол станка. Масса груза и плечо (расстояние от оси вращения до центра массы) могут быть подобраны экспериментально, учитывая равенство амплитуд и частот, возникающих в процессе резания колебаний.

Неуравновешенность вращающегося ротора создает динамический дисбаланс, который при вращении вызывает центробежную силу. Величина центробежной силы, которая действует на груз и вызывает вынужденные колебания, рассчитывается по формуле:

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

Таблица 2

Размах виброперемещений в зависимости от вынуждающей силы и подачи

| Вынуждающая сила, Н \ Подача, мм/мин | 0 | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 |
|--------------------------------------|---|----|-----|-----|-----|-----|
| 200 | 1 | 2 | 5 | 8 | 10 | 15 |
| 500 | 1 | 1 | 3 | 10 | 24 | 25 |
| 1000 | 1 | 2 | 10 | 8 | 30 | 30 |
| 2500 | 2 | 5 | 17 | 25 | 35 | 45 |
| 5000 | 8 | 10 | 16 | 30 | 45 | 60 |

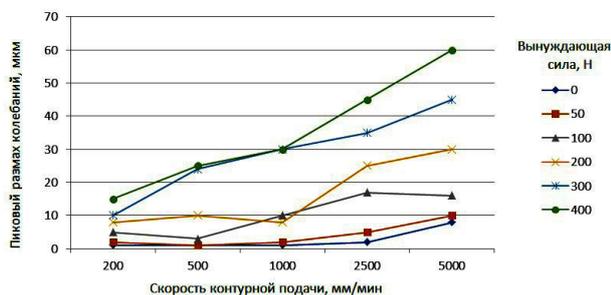


Рис. 3. График зависимости максимальной амплитуды вынужденных колебаний от скорости подачи по окружности

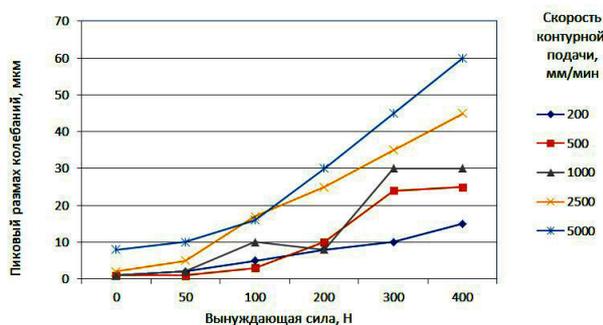


Рис. 4. График зависимости максимальной амплитуды вынужденных колебаний от модуля вынуждающей силы

где m — неуравновешенная масса, кг; ε — эксцентриситет, м; ω — угловая скорость, рад/с; f — частота вращения шпинделя, Гц.

Диапазон контурной подачи для предоставления наиболее широкого спектра результатов для всех возможных типов обработки был выбран в диапазоне 200 – 5000 мм/мин. Пять значений частоты вынуждающего воздействия, устанавливаемые на частотном преобразователе, позволяют по формуле 1 получить центробежную силу со значениями 0, 100, 200, 300 и 400 Н.

В табл. 1 приведены 25 результатов измерений координатно-расточного станка по представленному методу испытаний при изменении значений контурной подачи и модуля силы, создающей имитирующие вынужденные колебания. Остальные параметры диагностики оставались неизменными.

Значения отклонений были получены при изучении результатов в программе прибора Renishaw Ballbar QC-20W и внесены в табл. 2. Главным контролируемым параметром было максимальное отклонение, что позволяет упростить сравнение, повысить скорость исследования и изучить наибольшие смещения, которые могут вызвать отбраковку детали.

Полученная картина фактической точности станка под нагрузкой предоставляет ценную информацию для анализа влияния состояния оборудования на точность выполнения траекторий при обработке. Она позволяет визуализировать запас устойчивости упругой системы станка в рабочем пространстве в процессе, имитирующем обработку, и позволяет принять соответствующие меры для оптимизации процесса обработки и повышения точности исполнения траекторий.

Кроме того, на основе такой картины можно определить эффективные пределы корректирующих воздействий для системы числового программного управления металлорежущих станков и другого технологического оборудования. Такие корректировки могут быть введены для компенсации отклонений и повышения точности обработки, исходя из полученных данных о фактической точности станка под нагрузкой.

Основная особенность в том, что вместе с увеличением центробежной силы увеличивается размах колебаний (рис. 3), а при увеличении контурной подачи искажается средняя линия, а также несколько изменяется размах колебаний (рис. 4).

На графике зависимости пикового размаха колебаний (в микрометрах) от скорости контурной подачи (в миллиметрах в минуту) и вынуждающей силы (в Ньютонах) (рис. 3), наибольшая величина пикового размаха колебаний наблюдается при максимальной вынуждающей силе, которая составила в эксперименте 400 Н и скорости контурной подачи 5000 мм/мин.

Из графика зависимости максимальной амплитуды вынужденных колебаний от модуля вынуждающей силы при различных скоростях контурной подачи (рис. 4) можно заметить, что при увеличении вынуждающей силы увеличивается и пиковый размах колебаний. В то же время для каждой вынуждающей силы существует определенная скорость контурной подачи, при которой пиковый размах колебаний будет минимальным. При скоростях контурной подачи более 1000 мм/мин при увеличении вынуждающей силы пиковый размах колебаний существенно увеличивается, что указывает на определенные ограничения в процессе обработки материала при таких условиях.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что оптимальная скорость контурной подачи для исследуемого станка составляет 500 мм/мин, так как пиковый размах колебаний не превышает 25 микрометров. Улучшению при применении программной коррекции подвергается преимущественно геометрическая точность, но уменьшить динамическую податливость привода средствами программной коррекции невозможно.

VI. Выводы.

1. Представленный метод позволяет измерить и оценить фактическое влияние состояния станка на динамическую податливость двух линейных осей при круговом движении под воздействием нагрузки, имитирующей силы резания при фрезеровании, в том числе с учетом активной программной коррекции и механизмов вибродемпфирования, а так-

же проводить сравнительные испытания состояния и жесткости различных единиц технологического оборудования.

2. Проведение многофакторных исследований позволяет прогнозировать ожидаемую амплитуду виброперемещений для конкретного станка в настоящий момент времени с учетом различий в силах резания и скоростях подачи и участка рабочего пространства. Исходя из результатов испытаний, под действием вынуждающей силы более 100 Н и при скорости подачи более 1000 мм/мин существенно увеличивается смещение элементов привода станка.

Библиографический список

1. Luo B. A method to predict position-dependent structural natural frequencies of machine tool // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 92. P. 72–84. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.02.009.
2. Maslo S., Menezes B., Kienast P. [et al.]. Improving dynamic process stability in milling of thin-walled workpieces by optimization of spindle speed based on a linear parameter-varying model // *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 93. P. 850–855. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.092.
3. Brecher C., Altstadter H., Daniels M. Axis position dependent dynamics of multi-axis milling machines // *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 31. P. 508–514. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.068.
4. Бушуев В. В., Новиков В. А. Определение приведенных коэффициентов демпфирования элементов привода подач станков с передачей винт–гайка качения // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2016. № 4 (39). С. 22–26.
5. Deng C., Liu Y., Zhao J. Analysis of the machine tool dynamic characteristics in manufacturing space based on the generalized dynamic response model // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. P. 1–14. DOI: 10.1007/s00170-017-0201-9.
6. Телешевский В. И., Соколов В. А., Пимушкин Я. И. Повышение точности многокоординатных технологических и измерительных систем на основе лазерной коррекции объемных геометрических погрешностей // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2018. № 4 (47). С. 99–104.
7. Телешевский В. И., Пимушкин Я. И., Соколов В. А. Влияние нагрузок на лазерную коррекцию объемной точности многокоординатных технологических и измерительных систем // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2020. № 2 (53). С. 8–13.
8. Woźniak M., Majda P. Reproducibility of machine tools' circularity test according to ISO 230-4 with respect to testing position // *Archives of Mechanical Technology and Materials*. 2017. Vol. 37. P. 22–26. DOI: 10.1515/amt-2017-0003.
9. Blokhin D. A., Popov A. Yu. Investigation of the causes of shape deviations in contour milling // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260 (3). P. 032007-1–032007-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032007.

10. Пат. 2794584 С1 Российская Федерация, МПК G 01 M 13/00, B 23 Q 17/00. Способ диагностики точности металлорежущего станка под нагрузкой / Блохин Д. А., Попов А. Ю. № 2022109724; заявл. 12.04.22; опубл. 21.04.23.

11. Brecher C., Falker J., Eber B. [et al.]. Modelling of ball screw drives rolling element contact characteristics // *CIRP Annals*. 2018. Vol. 67 (1). DOI: 10.1016/j.cirp.2018.04.109.

12. Archenti A., Nicolescu M., Casterman G. [et al.]. A new method for circular testing of machine tools under loaded condition // *Procedia CIRP*. 2012. Vol. 1 (1). P. 575–580. DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.002.

13. Givi M., Mayer J. R. R. Optimized volumetric error compensation for five-axis machine tools considering relevance and compensability // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2015. Vol. 12. P. 44–55. DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.09.002.

14. Guo C., Chen L., Ding J. A novel dynamics model of ball-screw feed drives based on theoretical derivations and deep learning // *Mechanism and Machine Theory*. 2019. Vol. 141. P. 196–212. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.07.011.

15. Блохин Д. А., Попов А. Ю., Нуртдинов Ю. Р., Дроздов И. Н. Способ контроля виброустойчивости стола вертикально-фрезерного станка // *Инновационное и цифровое машиностроение: материалы Всерос. науч.-техн. конф., Уфа, 07–09 апреля 2021 года. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2021. С. 263–268.*

16. Блохин Д. А., Дроздов И. Н. Составление карты точности перемещений стола фрезерного станка под нагрузкой // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2021. № 4 (59). С. 53–56.

БЛОХИН Дмитрий Андреевич, старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Машиностроительного института Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 5142-6237

AuthorID: 869045

ORCID: 0000-0001-6197-435X

AuthorID (SCOPUS): 56503655400

ResearcherID: A-8621-2017

Адрес для переписки: blohin.da@mail.ru

МИХАЙЛОВ Игорь Сергеевич, студент гр. КТО-214 Машиностроительного института ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: mik3d@mail.ru

Для цитирования

Блохин Д. А., Михайлов И. С. Исследование динамической податливости стола координатно-расточного станка под нагрузкой // *Омский научный вестник*. 2024. № 1 (189). С. 66–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-66-72.

Статья поступила в редакцию 01.09.2023 г.

© Д. А. Блохин, И. С. Михайлов

THE STUDY OF THE DYNAMIC DISPLACEMENT OF THE TABLE OF A JIG BORING MACHINE UNDER LOAD

The article presents a technique for evaluation dynamic flexibility of the vertical milling machine table, considering the deformations of the supporting system of the machine under the influence of forces equivalent to cutting forces. The vibration exciter in the form of an electric motor with an unbalanced rotor makes it possible to simulate a dynamic load equivalent to the milling process in terms of the modulus of cutting forces and impact frequency, excluding the use of coolant and chip formation. A setup has been developed to create an equivalent dynamic load on the machine tool. The proposed technique can be used to determine the cutting limits and the locality of the working area of the machine that provide the greatest rigidity and processing accuracy.

Keywords: CNC machine tools, milling accuracy, supporting system rigidity, feed drive system dynamics, ballbar.

References

1. Luo B. A method to predict position-dependent structural natural frequencies of machine tool // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 92. P. 72–84. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2015.02.009. (In Engl.).
2. Maslo S., Menezes B., Kienast P. [et al.]. Improving dynamic process stability in milling of thin-walled workpieces by optimization of spindle speed based on a linear parameter-varying model // *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 93. P. 850–855. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.092. (In Engl.).
3. Brecher C., Altstadter H., Daniels M. Axis position dependent dynamics of multi-axis milling machines // *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 31. P. 508–514. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.068. (In Engl.).
4. Bushuev V. V., Novikov V. A. Opredeleniye privedennykh koeffitsiyentov dempfirovaniya elementov privoda podach stankov s peredachey vint-gayka kacheniya [Determination of the reduced damping coefficients of the feed drive elements of machine tools with a rolling screw-nut transmission] // *Vestnik MGTU Stankin*. 2016. Vol. 4 (39). P. 22–26. (In Russ.).
5. Deng C., Liu Y., Zhao J. Analysis of the machine tool dynamic characteristics in manufacturing space based on the generalized dynamic response model // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. P. 1–14. DOI: 10.1007/s00170-017-0201-9. (In Engl.).
6. Teleshevskiy V. I., Sokolov V. A., Pimushkin Ya. I. Povysheniye tochnosti mnogokoordinatnykh tekhnologicheskikh i izmeritel'nykh sistem na osnove lazernoy korrektsii ob'yemnykh geometricheskikh pogreshnostey [Improving the Accuracy of Multi-Axis Technological and Measuring Systems Based on Laser Correction of Volumetric Geometric Errors] // *Vestnik MGTU Stankin*. 2018. Vol. 4 (47). P. 99–104. (In Russ.).
7. Teleshevskiy V. I., Pimushkin Ya. I., Sokolov V. A. Vliyaniye nagruzok na lazernuyu korrektsiyu ob'yemnoy tochnosti mnogokoordinatnykh tekhnologicheskikh i izmeritel'nykh sistem [Influence of Loads on Laser Correction of Volumetric Accuracy of Multi-Axis Technological and Measuring Systems] // *Vestnik MGTU Stankin*. 2020. Vol. 2 (53). P. 8–13. (In Russ.).
8. Woźniak M., Majda P. Reproducibility of machine tools' circularity test according to ISO 230-4 with respect to testing position // *Archives of Mechanical Technology and Materials*. 2017. Vol. 37. P. 22–26. DOI: 10.1515/amt-2017-0003. (In Engl.).
9. Blokhin D. A., Popov A. Yu. Investigation of the causes of shape deviations in contour milling // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260 (3). P. 032007-1–032007-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032007. (In Engl.).
10. Patent 2794584 C1 Russian Federation, IPC G 01 M 13/00, B 23Q 17/00. Sposob diagnostiki tochnosti metallorezhushchego stanka pod nagruzkoj [Method for diagnosing the accuracy of a metal-cutting machine under load] / Blokhin D. A., Popov A. Yu. No. 2022109724. (In Russ.).
11. Brecher C., Falker J., Eßer B. [et al.]. Modelling of ball screw drives rolling element contact characteristics // *CIRP Annals*. 2018. Vol. 67 (1). DOI: 10.1016/j.cirp.2018.04.109. (In Engl.).
12. Archenti A., Nicolescu M., Casterman G. [et al.]. A new method for circular testing of machine tools under loaded condition // *Procedia CIRP*. 2012. Vol. 1 (1). P. 575–580. DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.002. (In Engl.).
13. Givi M., Mayer J. R. R. Optimized volumetric error compensation for five-axis machine tools considering relevance and compensability // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2015. Vol. 12. P. 44–55. DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.09.002. (In Engl.).
14. Guo C., Chen L., Ding J. A novel dynamics model of ball-screw feed drives based on the theoretical derivations and deep learning // *Mechanism and Machine Theory*. 2019. Vol. 141. P. 196–212. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.07.011. (In Engl.).

15. Blokhin D. A., Popov A. Yu., Nurtdinov Yu. R., Drozdov I. N. Sposob kontrolya vibroustoychivosti stola vertikal'no-frezernogo stanka [Method for controlling vibration resistance of a table of a vertical milling machine] // Innovatsionnoye i tsifrovoye mashinostroyeniye. *Innovative and Digital Engineering*. Ufa, 2021. P. 263–268. (In Russ.).

16. Blokhin D. A., Drozdov I. N. Sostavleniye karty tochnosti peremeshcheniy stola frezernogo stanka pod nagruzkoy [Mapping the accuracy of the movements of the milling machine table under load] // Vestnik MGTU Stankin. *Vestnik MSUT «Stankin»*. 2021. Vol. 4 (59). P. 53–56. (In Russ.).

BLOKHIN Dmitriy Andreyevich, Senior Lecturer of Metal-Cutting Machines and Instruments Department, Mechanical Engineering Institute, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 5142-6237

AuthorID: 869045

ORCID: 0000-0001-6197-435X

AuthorID (SCOPUS): 56503655400

ResearcherID: A-8621-2017

Correspondence address: blohin.da@mail.ru

MIKHAILOV Igor Sergeyevich, Student of gr. KTO-214 Mechanical Engineering Institute, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: mik3d@mail.ru

For citations

Blokhin D. A., Mikhailov I. S. The study of the dynamic displacement of the table of a jig boring machine under load // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 66–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-66-72.

Received September 01, 2023.

© D. A. Blokhin, I. S. Mikhailov