

На правах рукописи



Шлаев Кирилл Иванович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАНКОВ  
НА ОСНОВЕ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
УГЛОВЫХ ФРЕЗЕРНЫХ ГОЛОВОК

Специальность 2.5.5

Технологии и оборудование механической и физико-технической  
обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2024

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

**Научный руководитель:** **Сабиров Фан Сагирович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры станков ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», г. Москва

**Официальные оппоненты:** **Утенков Владимир Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

**Серков Николай Алексеевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории вибротехнических систем федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», г. Москва

Защита состоится «03» декабря 2024 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», по адресу: 127055, 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\\_1491](https://stankin.ru/pages/id_115/page_1491).

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

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

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



Е.С. Сотова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Одной из задач современного машиностроения является повышение эффективности производства. В условиях ограниченных финансовых ресурсов предприятия стремятся максимально использовать существующее оборудование, расширяя его технологические возможности с помощью вспомогательной оснастки.

Один из путей повышения эффективности станков - применение угловых фрезерных головок, позволяющих проводить обработку под различными углами без необходимости переустановки заготовки. Однако внедрение дополнительной оснастки влияет на динамические характеристики станка, что может привести к снижению точности обработки и надежности оборудования.

Проблема недостаточной изученности влияния угловых фрезерных головок на динамические характеристики станка актуальна для обеспечения высокой производительности и качества обработки. Необходимость проведения технического обслуживания или ремонта в зависимости от фактического состояния оборудования становится актуальной задачей для предотвращения неожиданных отказов и сокращения временных затрат.

Актуальность темы подчеркивается не только финансовыми рисками, связанными с поломками оборудования, но и необходимостью совершенствования производственных процессов. Разработка эффективных методов диагностики и мониторинга технического состояния угловых фрезерных головок повысит надежность оборудования и снизит эксплуатационные расходы.

**Степень разработанности.** В настоящее время активно изучается влияние вспомогательного оборудования на динамическую систему станка. Основные положения динамики станков разработаны Кудиновым В.А. Хомяков В.С. занимался решением задач оптимизации конструкции несущих систем станков.

Исследованиями по анализу колебательных процессов в станках и шпиндельных узлах, занимались Дроздов И.А., Пуш В.Э., Бушуев В.В., Фигатнер А.М., Серков Н.А., Козочкин М.П., Молодцов В.В., Утенков В.М., Зверев И.А., Сабиров Ф.С., Кочинев Н.А. и др. Из иностранных исследователей наиболее известны работы Weck M., Teipel K., Sadek M.M., Knight W.A., Mohanram P.V. и др.

Анализом влияния вспомогательной оснастки на динамическую систему станка занимались Шереметьев К.В., Парфенов И.В., Кушнир М.А., Ромашев А.Н., Баськов А.А., а также зарубежные исследователи.

Влияние ускорительных головок на динамическую систему станка рассматривал Plusty J., внутришлифовальных - Smith S., Stern E. Krol O., Sokolov V. анализировали 3D модель угловой фрезерной головки для фрезерного станка. В их работе проведено моделирование действия нагрузки на угловую головку, однако, моделировалось воздействие только на горизонтальный вал. Ортогональное расположение валов не учитывалось.

Wei-Zhu Lin, Jui-Pin Hung моделировали динамические характеристики угловой головки с переменным углом. Но в работе головка рассматривается как одно тело. Моделирование проведено при углах поворота  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $180^\circ$ . Валы моделировались по отдельности. В выводах отмечена необходимость разработки более точных моделей. Существующие исследования подтверждают актуальность изучения влияния вспомогательного оборудования на динамику станка.

**Целью** работы является повышение эффективности станков на основе диагностики и установления взаимосвязей между динамическими характеристиками угловых головок и их техническим состоянием. Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

- провести экспериментальные исследования динамических характеристик неисправной угловой фрезерной головки до и после устранения дефекта, а также на аналогичных исправных угловых фрезерных головках;
- установить зависимость между динамическими (собственной частотой, амплитудой колебаний, среднеквадратичным значением и эксцессом вибраций) и статическими (жесткостью) характеристиками угловой головки и ее техническим состоянием в процессе эксплуатации;
- разработать способ вибродиагностики технического состояния конического зубчатого зацепления и оценки ее влияния на процесс фрезерования;
- разработать конечно-элементную математическую модель для оценки динамических и статических характеристик угловой головки и оценить её адекватность сопоставлением результатов моделирования с экспериментальными данными;
- разработать программное обеспечение, позволяющее оценивать собственную частоту и жесткость угловых головок и использовать результаты для анализа их технического состояния;
- разработать методику прогнозирования технического состояния угловых головок на основе мониторинга изменения их динамических характеристик, регистрируемых в производственных условиях и предложить рекомендации для обеспечения достоверности результатов.

**Научная новизна** работы заключается:

- в определении зависимости между динамическими и статическими характеристиками угловой головки и сроком ее эксплуатации, для прогнозирования остаточного технического ресурса;
- в установлении диагностических признаков исправных и неисправных угловых фрезерных головок по их динамическим характеристикам;
- в способе вибродиагностики конического зубчатого зацепления, позволяющем диагностировать состояние зацепления и оценить ее влияния на процесс фрезерования;
- в конечно-элементной математической модели, учитывающей угловое расположение ведущего и ведомого валов и наличие конического зубчатого зацепления, позволяющей оценить динамические характеристики угловой головки, и на их основе прогнозировать динамическое качество головки.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработанная конечно-элементная математическая модель является теоретически значимой частью работы.

Практическая значимость заключается в методике диагностики, позволяющей оценить продолжительность безотказной работы угловых головок в зависимости от их динамических характеристик; программном обеспечении для моделирования пространственных конструкций типа угловых головок, позволяющем оценить динамические характеристики и прогнозировать эффективность; в рекомендациях по выполнению вибродиагностики.

**Методология и методы исследования.** Работа выполнена с применением метода конечных элементов для моделирования динамической системы угловых головок. Исследования проводились с применением методов планирования и обработки результатов эксперимента, современного испытательного и диагностического оборудования, методов обработки экспериментальных данных и математической статистики.

Для обработки результатов применялось актуальное программное обеспечение (MatLab, SolidWorks, NX, Autodesk Inventor, Wolfram Mathematica) и специализированное, разработанное на кафедре станков МГТУ «СТАНКИН» (nkRecorder, SpinDyna, ExpDyna). Эксперименты проводились в производственных условиях и включали в себя измерение виброхарактеристик угловых головок Alberti T90-8, OMG TA 40, HS 250C200 при различных видах возмущающего воздействия.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Зависимость между динамическими и статическими характеристиками угловой головки и ее техническим состоянием.

2. Конечно – элементная математическая модель, учитывающая угловое расположение ведущего и ведомого валов и наличие конического зубчатого зацепления.

3. Функциональная взаимосвязь между динамическими характеристиками угловой головки и сроком ее эксплуатации, для прогнозирования остаточного технического ресурса.

4. Способ вибродиагностики состояния конического зубчатого зацепления, позволяющий диагностировать состояние зацепления и оценить ее влияния на процесс фрезерования.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается согласованием данных, полученных при экспериментальных исследованиях, и результатах, полученных при моделировании теоретическим путем; применением современных методик и средств проведения исследований; использованием положений теории, основанной на известных достижениях фундаментальных и прикладных научных дисциплин, сопряженных с предметом исследования.

Основные положения работы докладывались на научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии» (2019 г.), на XIII всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: Традиции и инновации» (2020 г.), на XXI Международной конференции имени А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование (2022 г.), на 81-ой Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы современной науки, техники и образования" (2023 г.), на Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Лидеры 3D-TECH» (2023 г.).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение научных исследований в рамках государственного задания (проект № FSFS-2021-0006).

**Публикации.** По материалам диссертации было опубликовано 12 работ, в том числе 5 работ в изданиях, рекомендованных ВАК, 5 работ в журналах, входящих в российские базы цитирования РИНЦ, получен 1 патент на изобретение, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** По теме и содержанию настоящая работа соответствует паспорту научной специальности 2.5.5. «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» пунктам 2, 3, 6 раздела направления исследований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность исследования, направленного на повышение эффективности станков путем разработки комплексной методики диагностики технического состояния угловых фрезерных головок (УФГ).

**В первой главе** проведен обзор существующих исследований в области динамики станков. Проанализировано влияние вспомогательной оснастки на динамические характеристики станка, причины возникновения колебаний и методы их устранения. Приведены основные типы вспомогательной оснастки и случаи их применения. Рассмотрена оснастка, для которой разработаны математические модели. Выделена вспомогательная оснастка, нуждающаяся в дополнительном исследовании.

В результате анализа литературных источников поставлена цель исследования и определены задачи, необходимые для ее достижения. Объектом исследования выбраны угловые фрезерные головки как составная часть динамической системы станка.

**Во второй главе** проведен анализ теоретических положений, применяемых при моделировании динамических систем. Рассмотрена задача моделирования конструкции станка с использованием матричного подхода. Матричные уравнения, описывающие динамику станка, облегчают анализ и решение задач, делая процесс более доступным для численных методов и компьютерного моделирования.

Показано, что для моделирования динамических характеристик угловых головок наиболее подходит метод конечных элементов, зарекомендовавший себя как эффективный и надежный способ анализа сложных динамических систем. Метод позволяет рассчитывать линеаризованные системы и учитывать множество степеней свободы, а также обеспечивает высокую точность расчета статических и динамических характеристик в широком диапазоне частот колебаний.

Динамическая система угловой головки моделируется элементами  $n \times n$  матриц дифференциального уравнения

$$A\ddot{\mathbf{q}}(t) + B\dot{\mathbf{q}}(t) + C\mathbf{q}(t) = \mathbf{D} \quad (1)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – матрицы инерции, демпфирования и жесткости соответственно,  $\mathbf{q}$  – вектор обобщенных координат системы,  $\mathbf{D}$  – вектор сил и моментов, воздействующих на систему. Уравнение (1) не включает в себя квадратичные члены по обобщенным скоростям, т.к. матрица инерции  $A$  в данном случае постоянна.

**В третьей главе** выполнено моделирование угловой головки методом конечных элементов. Построена расчетная схема угловой головки (рис. 1).

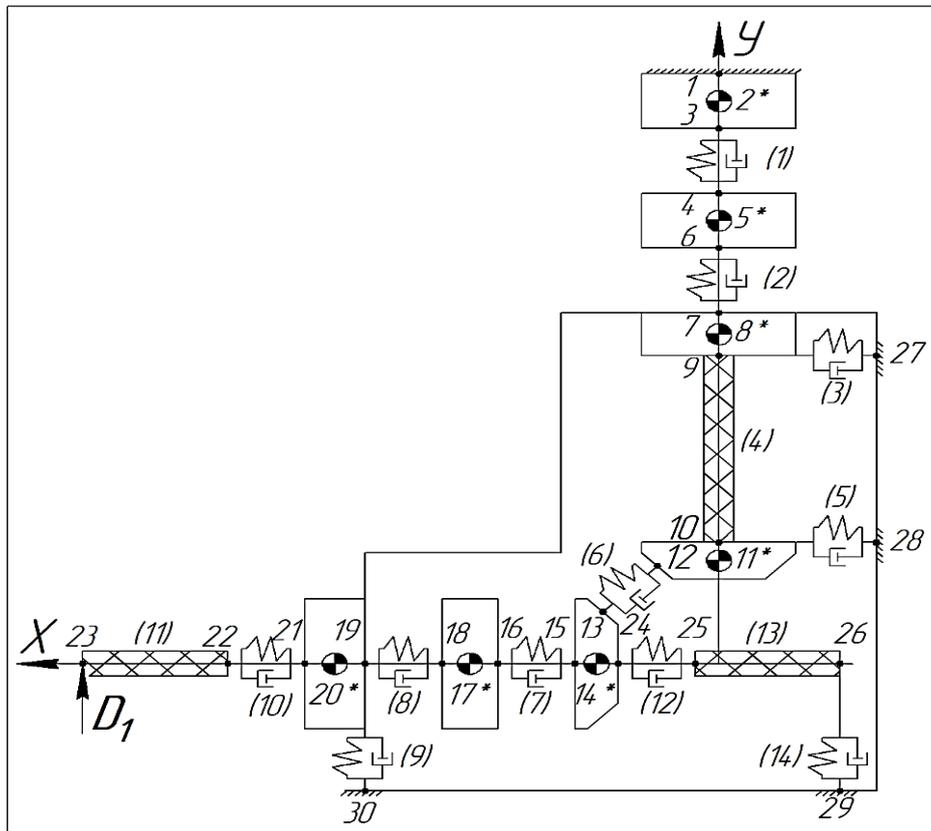


Рис. 1. Расчетная схема угловой фрезерной головки

Сформированы матрицы инерции, демпфирования и жесткости угловой фрезерной головки. Поведение динамической системы угловой головки описывается вектором

$$\mathbf{q} = [q_2 q_5 q_8 q_9 q_{10} q_{11} q_{14} q_{17} q_{20} q_{22} q_{23} q_{25} q_{26}]^T \quad (2)$$

где  $\mathbf{q}_i$  – векторы обобщенных перемещений узловых точек расчетной схемы. Решение задачи начинается с построения несвязной матрицы жесткости системы  $[CC]$ . Используя условия непрерывности перемещений в узлах конструкции, с использованием матрицы соединений  $[G1]$  строится матрица жесткости  $[C]$ :

$$[C] = [G1]^T [CC] [G1] \quad (3)$$

При этом учитывается положение локальной системы координат конечного элемента относительно глобальной  $[C^e]$ . Если системы координат не совпадают, то матрица жесткости  $[C_d^e]$  подвергается конгруэнтному преобразованию с помощью матрицы направляющих косинусов  $[PR]$ :

$$[C^e] = [PR][C_d^e][PR]^T \quad (4)$$

При формировании инерционной матрицы  $[A]$  учитывается наличие в расчетной схеме упруго-вязких, с распределенной массой, конечных элементов и «массивов».

Как следствие, инерционная матрица представляется как сумма

$$[A] = [A_p] + [A_c] \quad (5)$$

где  $[A_p] = [G1]^T[AA][G1]$  формируется подобно  $[C]$  из несвязанной инерционной матрицы  $[AA]$  с помощью матрицы соединений  $[G1]$  и имеет такой же размер, как и матрица  $[CC]$ . Матрица  $[A_c]$  формируется как блочно–диагональная с размещением матриц инерционных характеристик  $[A_i]$  в местах «массивов» расчетной схемы. Матрица демпфирования элемента  $[B^e]$  по своей структуре аналогична соответствующей матрице жесткости  $[C^e]$ . Уравнение (1) несущей системы умножаем слева на  $[A]^{-1}$ . Используя линейное преобразование координат  $\mathbf{q} = [V]\mathbf{p}$  и проведя ряд преобразований получим выражение для формирования элементов матрицы  $[B]$ :

$$[B] = 2 [A][V] \text{diag} [\zeta_k \omega_k][V]^{-1} \quad (6)$$

где  $\text{diag} [\zeta_k \omega_k]$  вычисляется исходя из уравнений

$$\text{diag} [b_k/a_k] = [V]^{-1}[A]^{-1}[B][V] \quad (7)$$

$$\text{diag} [c_k/a_k] = [V]^{-1}[A]^{-1}[C][V] \quad (8)$$

где  $b_k/a_k = 2 \zeta_k \omega_k$ , а  $c_k/a_k = \omega_k^2$  ( $\zeta_k$  – коэффициент относительного рассеивания,  $\omega_k$  – собственная частота системы без учета демпфирования).

Построение матрицы  $[V]$  связано с решением задачи о собственных значениях системы. При построении выполняется переход в исходных уравнениях движения к нормальным координатам с последующим решением отдельных независимых уравнений, получившихся в результате расщепления системы.

Для получения данных о инерционных свойствах измерены детали угловой головки (рис. 2, а). Построена 3D модель для анализа динамических характеристик в САД системах (рис. 2, б). Материал деталей выбран из встроенной библиотеки материалов. Например, шестерни и валы в основном изготавливают из конструкционных хромистых сталей, корпуса – из серого чугуна и т.д. Материал назначался по плотности, а затем масса полученной детали сравнивалась с фактически измеренными данными (рис. 2, в).

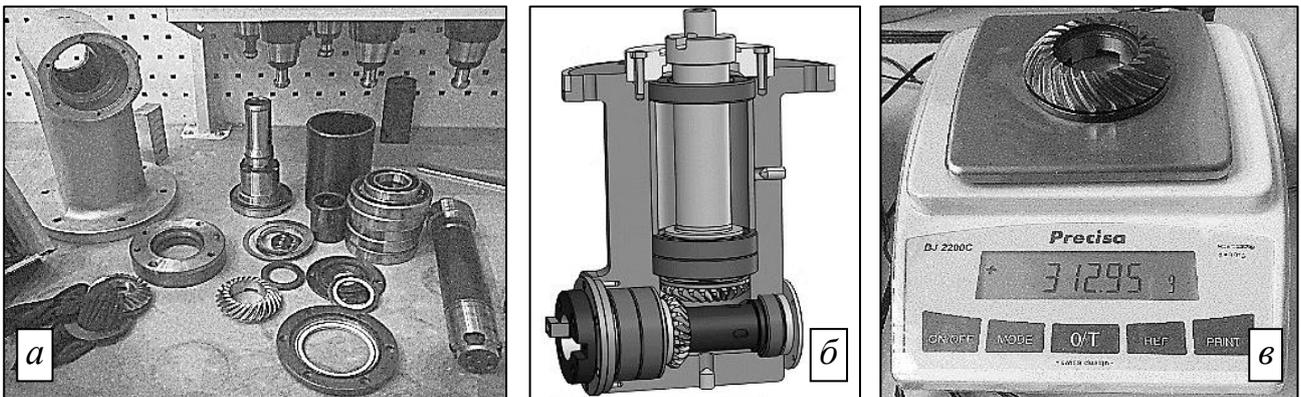


Рис. 2. Детали головки (а), 3D модель (б), измерение массы (в)

Проведен расчет динамических характеристик в программных комплексах Solid Works, NX CAD, Autodesk Inventor. Первая собственная частота, рассчитанная в Solid Works составила 629 Гц, в NX CAD – 665 Гц, в Autodesk Inventor – 643 Гц.

Для определения собственной частоты фрезерной головки Alberty T90-8 вне динамической системы станка проведено исследование на вибродинамическом стенде (рис. 3, а). Измерения проводились в диапазоне частот от 10Гц до 2кГц с виброускорением 2g. АЧХ (рис. 3, б) показала собственную частоту 731 Гц.

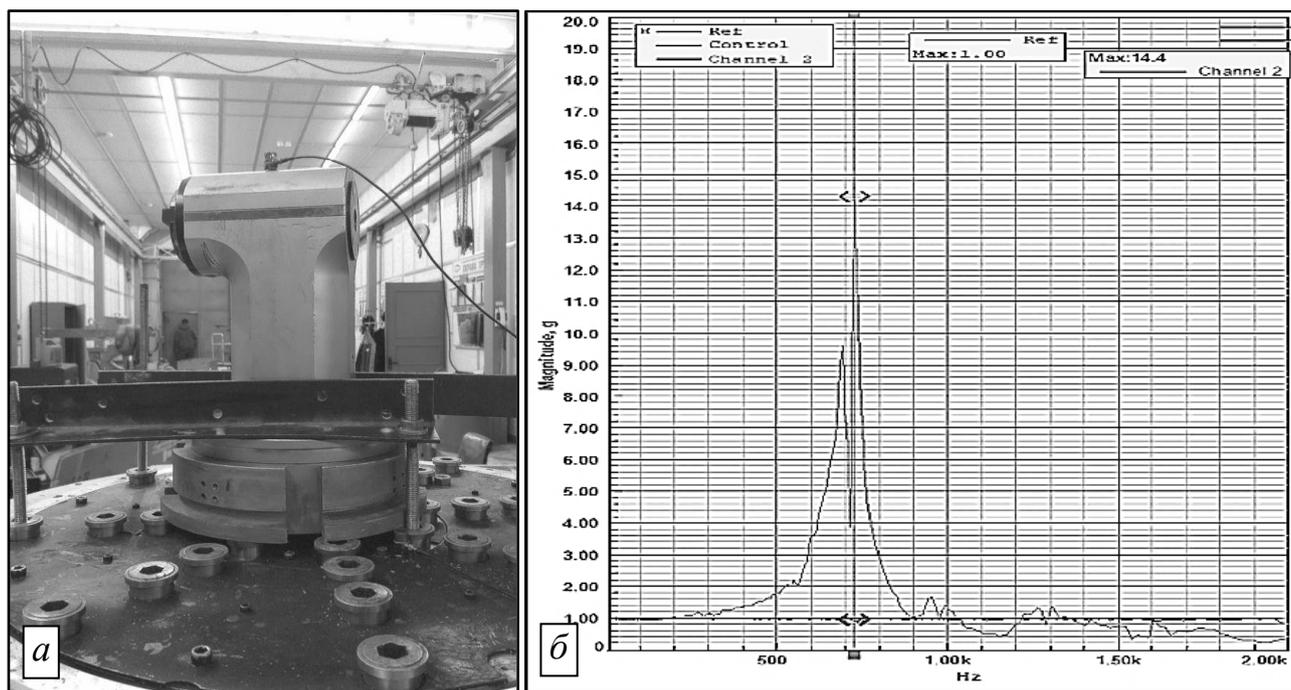


Рис. 3. Схема установки угловой головки на вибростенд (а), полученная АЧХ(б)

На языке программирования с++ разработано кроссплатформенное программное обеспечение, позволяющее выполнить сбор, обработку и сохранение данных для моделирования динамических характеристик угловых фрезерных головок. После ввода исходных данных (инерционные параметры, размеры, действующие силы и моменты и т.д.) строится расчетная схема модели. Далее формируются матрицы уравнения (1) и вектор действующих сил. Выбирается один из методов решения дифференциальных уравнений – Рунге–Кутты, Эйлера или Адамса–Башфорта. Строится график АЧХ, вычисляются собственные частоты системы и ее жесткость. Общий вид алгоритма работы программы приведен на рис. 4.

Результаты расчета собственной частоты угловой головки в разработанном программном обеспечении, рассчитанные в CAD системах и полученные экспериментально, показаны на рис. 5.

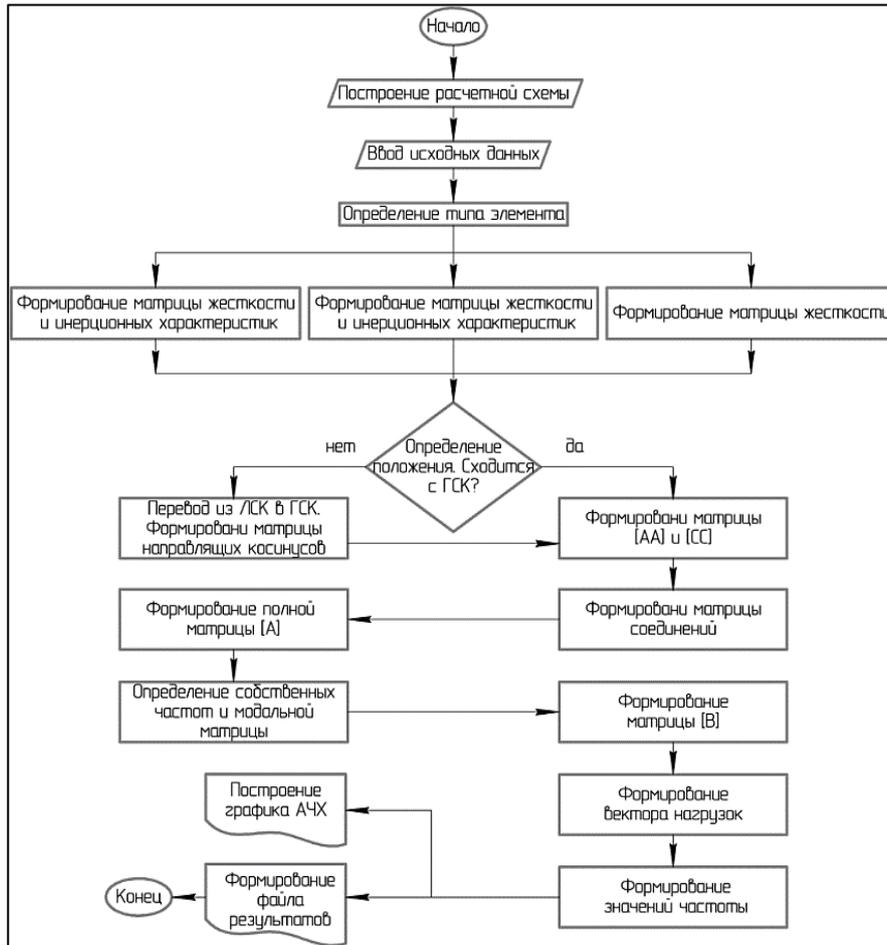


Рис. 4. Общий алгоритм работы программы

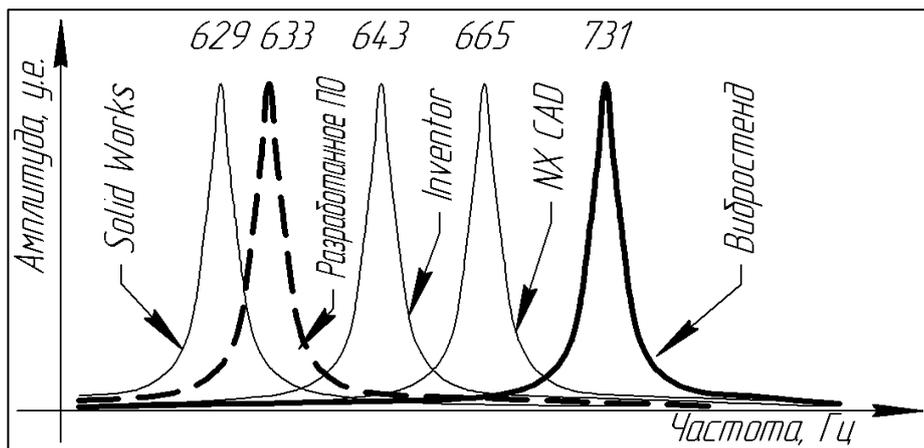


Рис. 5. АЧХ угловой головки Alberti полученная различными методами

**В четвертой главе** приведены результаты проведенных экспериментальных исследований. Объектом исследования являлись угловые головки Alberti T90-8 (рис. 6, а), OMG TA 40 (рис. 6, б) и HS 250C200 (рис. 6, в). Угловые головки Alberti и OMG выполняли аналогичные операции в рамках одного технологического процесса на станке Sanco SDM-2214L.

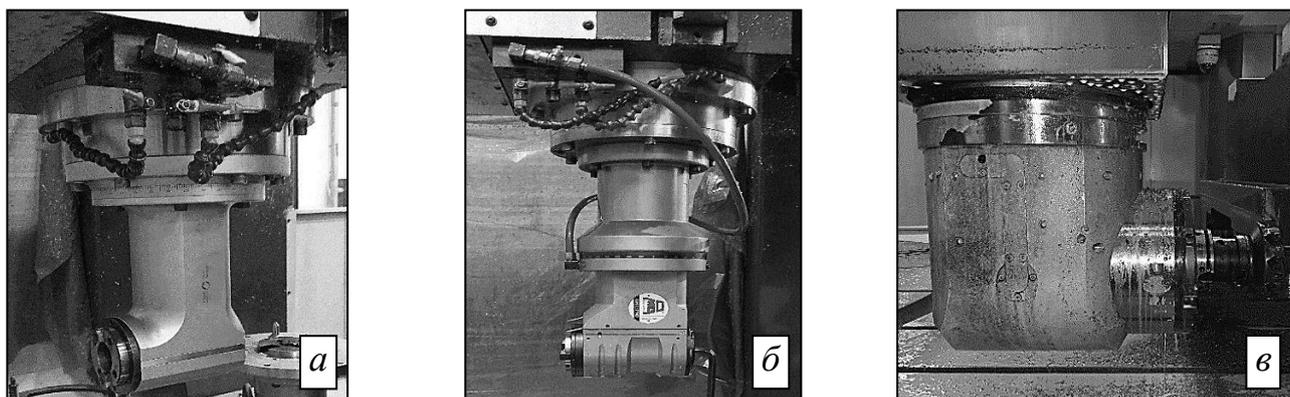


Рис. 6. Угловые головки Alberti T90-8 (а), OMG TA 40 (б), HS 250 C200 (в)

При работе станка с угловой головкой Alberti T90-8 оператор выявил увеличение волнистости поверхности, эпизодически возникающий шум и нагрев корпуса головки. В рамках настоящей работы проведено ее обследование.

Исследование заключалось в импульсном возбуждении угловой головки (рис. 7, а). Динамометрическим молотком наносится удар по инструментальной оправке. На корпусе головки установлено два вибродатчика (рис. 7, б), регистрирующих отклик системы на импульсное возбуждение. Исследования проведены при различном варианте расположения вибродатчиков. Получена АЧХ системы, являющаяся отношением усредненного спектра вибраций к усредненному спектру силового воздействия.

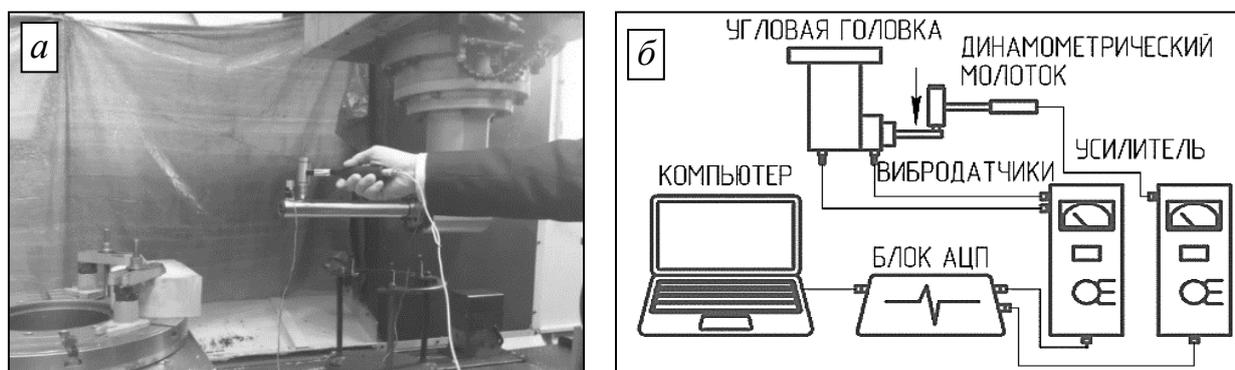


Рис. 7. Импульсное возбуждение (а), схема стенда регистрации колебаний (б)

В результате обработки сигналов получена АЧХ динамической системы угловой головки, установленной на шпиндель. По графику АЧХ первая собственная частота равна 214 Гц (рис. 8).

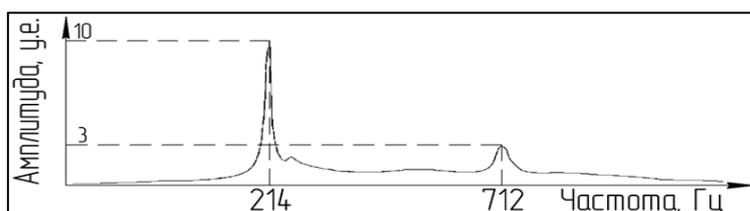


Рис. 8. АЧХ угловой головки

Другое исследование проводилось при различных режимах работы станка. Вибродатчики устанавливались взаимоперпендикулярно в радиальной плоскости опор валов. Регистрация колебаний проводилась при частотах вращения шпинделя 400, 800, 2000 и 4000 об/мин. В плоскости YZ датчики закреплялись у передних опор горизонтального вала, в плоскости XZ – у передних опор вертикального вала. Исследовались в основном передние опоры, т.к. на них приходится основная нагрузка при работе, и именно они первыми выходят из строя. Получившийся спектр (рис. 9) позволяет оценить состояния конструктивных элементов угловой головки (подшипников, зубчатых колес и т.д.) по известным зависимостям.

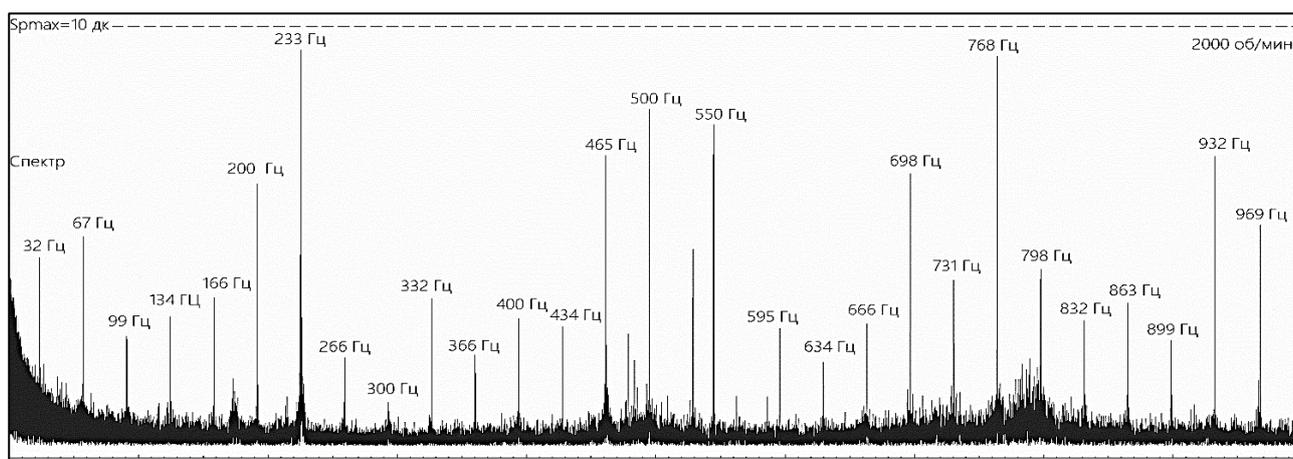


Рис. 9. Спектр сигнала с акселерометра, установленного у передних вертикальных опор, на частоте вращения 2000 об/мин

Например, на спектре сигнала, записанного при частоте вращения 2000 об/мин, пик 32 Гц соответствует оборотной частоте, 67 Гц и 99 Гц ее вторая и третья гармоники, 798 Гц это зубцовая частота и т.д. Анализируя спектры сигнала, полученные с вибродатчиков у подшипниковых опор вертикального и горизонтального вала, выявлены гармоники одинаково большой амплитуды, кратные оборотной частоте шпинделя. Это свидетельствует о дисбалансе вращающегося вала угловой головки.

Для сравнения уровня вибраций у опор вертикального (рис. 10, а) и горизонтального (рис. 10, б) вала головки по величине среднеквадратичного значения (СКЗ), построены XY диаграммы.

По совокупности данных был предположен дефект подшипникового узла. После разборки выявился дефект шариков на передних подшипниках горизонтального вала.

Угловая головка была восстановлена путем замены подшипников. После восстановления проведены исследования, аналогичные исследованиям в неисправном состоянии. При работающем станке было подтверждено отсутствие

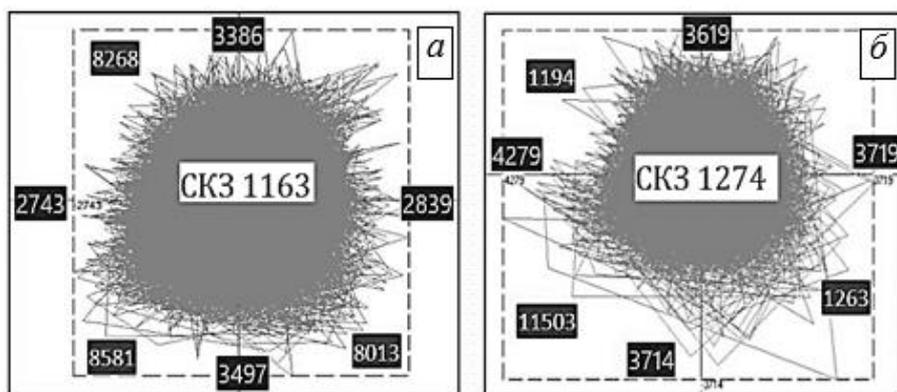


Рис. 10. XY диаграммы для вертикального (а) и для горизонтального (б) валов постороннего шума и нагрева. Проведено сравнение качества поверхности, обработанной с применением неисправной угловой головки и после ее восстановления. Обрабатывался сплав АМг6 торцевой фрезой при частоте вращения шпинделя 800 об/мин (рис. 11).

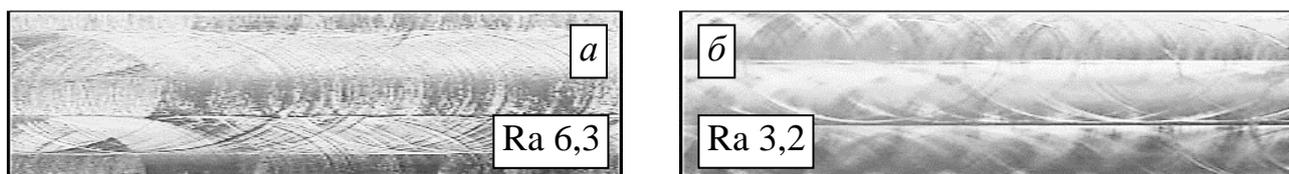


Рис. 11. Качество поверхности заготовки после обработки с применением угловой головки в неисправном состоянии (а) и после восстановления (б)

Выполнено исследование статической жесткости угловой фрезерной головки, установленной на станок (рис. 12, а).

Измерение жесткости выполнено по трем осям угловой головки. Результаты измерений приведены на рис. 12, б и 13, а, б.

На спектре сигнала идентифицированы частоты, характерные для различных деталей конструкции угловой фрезерной головки (рис. 14).

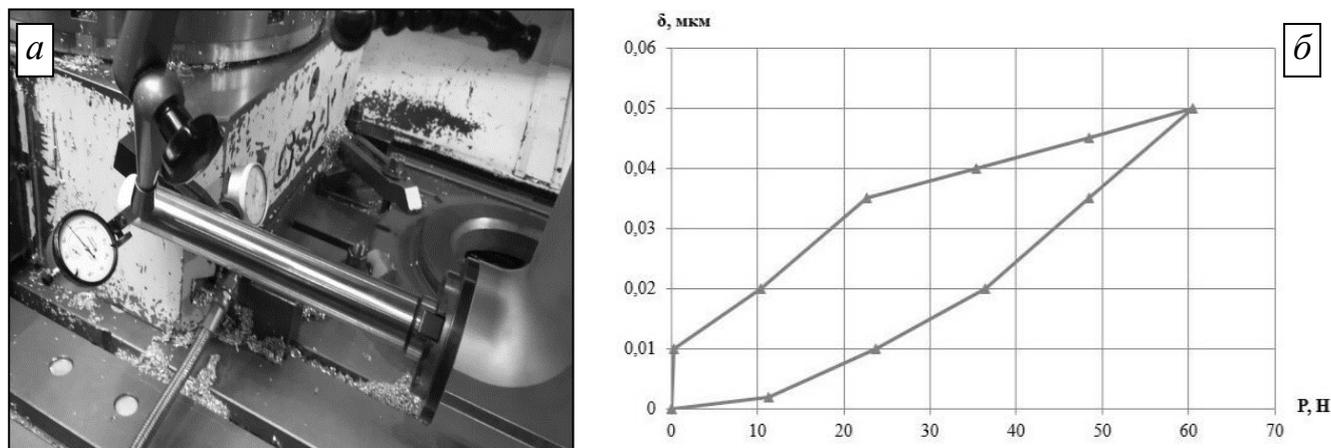


Рис. 12. Измерение жесткости УФГ (а), жесткость по оси Х (б)

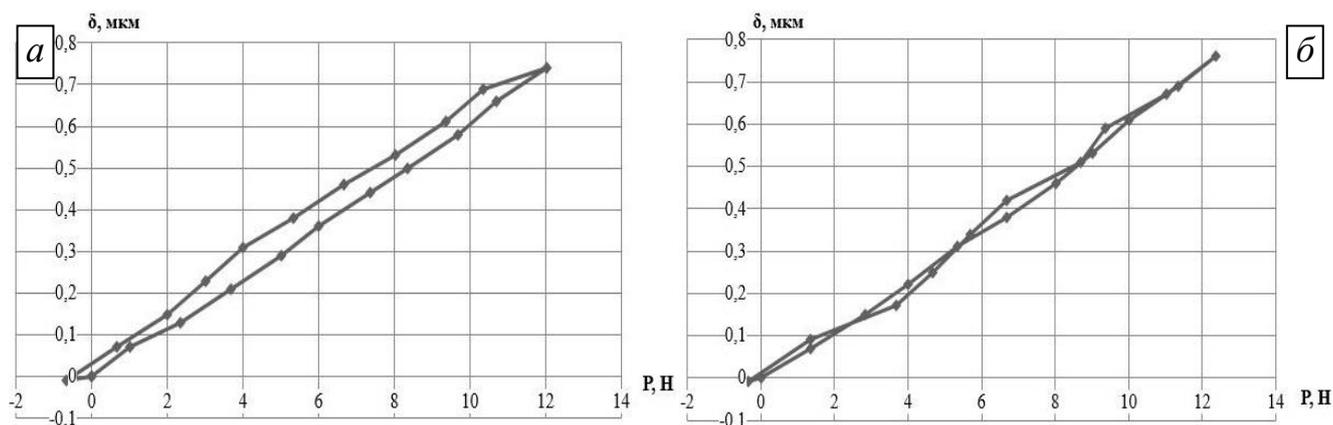


Рис. 13. Жесткость по оси Y (а) и по оси Z (б)

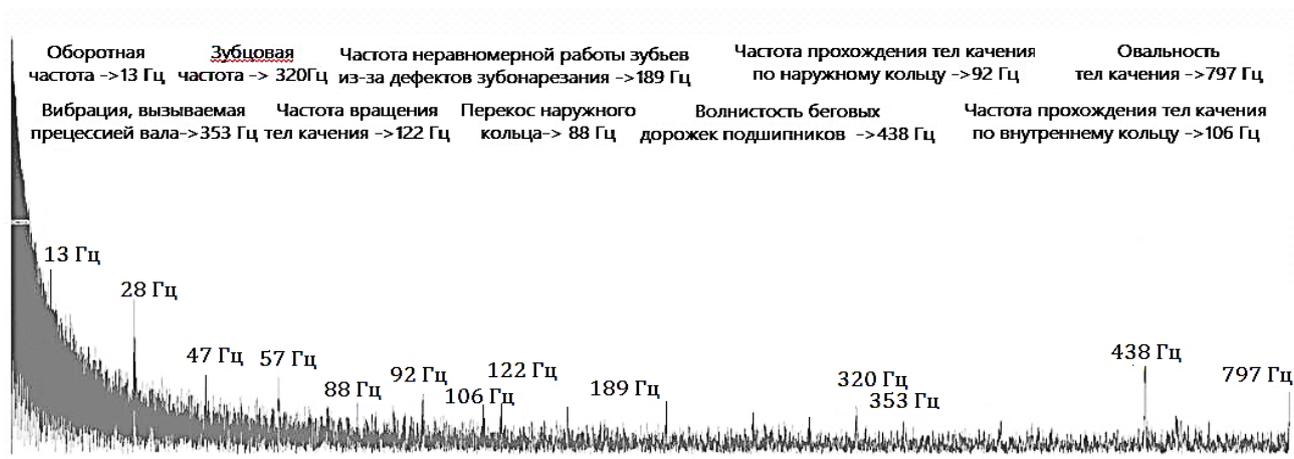


Рис. 14. Спектр сигнала с акселерометра, установленного у горизонтальных опор, на частоте вращения 800 об/мин (после восстановления угловой головки)

Например, 13 Гц на спектре это оборотная частота, 122 Гц – частота вращения тел качения, 88 Гц – вызванная переко́сом наружного кольца и т.д.

После восстановления головки качество поверхности детали улучшилось с  $Ra \approx 6,3$  до  $Ra \approx 3,2$  на одинаковых режимах обработки. Получена АФЧХ угловой головки в неисправном состоянии и после восстановления (рис. 15). После восстановления головки наибольшая отрицательная действительная часть уменьшилась, что свидетельствует о повышении виброустойчивости. Это подтвердилось сравнением графиков АЧХ угловой головки в неисправном и восстановленном состоянии. После ремонта головки собственная частота увеличилась с 214 Гц до 297 Гц, что свидетельствует об увеличении ее жесткости. Увеличение жесткости угловой головки подтвердилось повторными измерениями при статическом нагружении.

Сравнение спектра сигнала угловой головки в неисправном состоянии со спектром в восстановленном состоянии на различных частотах вращения показало снижение энергии гармоник оборотной частоты в среднем на 32 % (рис. 16).

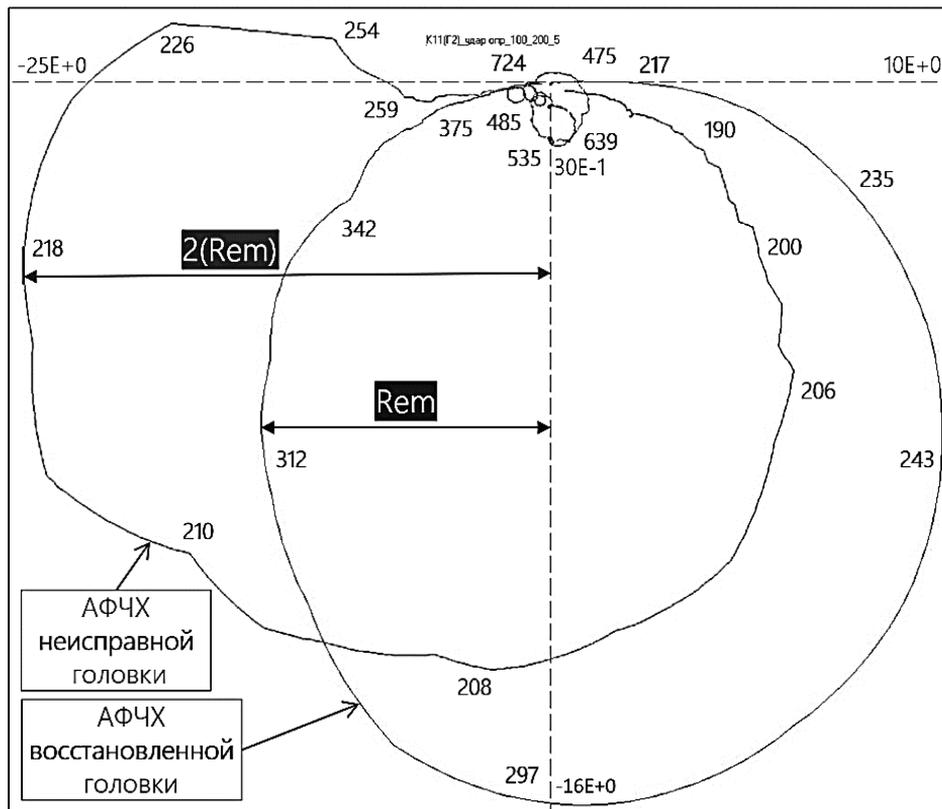


Рис. 15. АФЧХ УФГ в неисправном состоянии и после ремонта

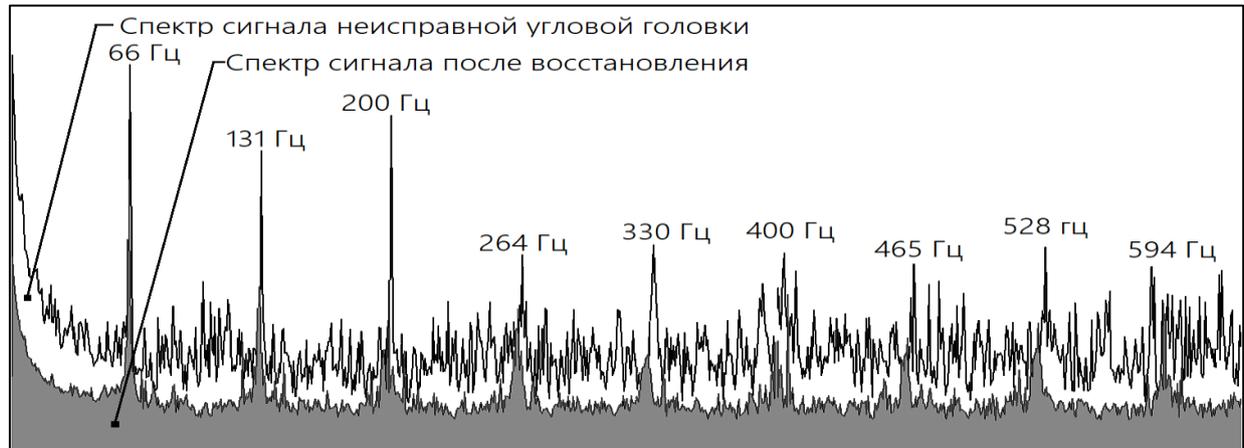


Рис. 16. Спектр сигнала с акселерометров на частоте вращения 4000 об/мин в неисправном состоянии и после восстановления

Выявлено снижение уровня спектральных составляющих и СКЗ, вызванного деталями подшипников – шариками, кольцами, сепараторами. СКЗ вибровозмущений в среднем снизилось на 12 % по вертикальному валу и на 15 % по горизонтальному. Результаты исследования угловой головки до восстановления и после, свидетельствуют об успешно выполненном ремонте.

Разработан способ вибродиагностики состояния конического зубчатого зацепления, который заключается в предварительном определении собственных

частот элементов, входящих в упругую систему, и записи сигналов с вибродатчиков на корпусе УФГ при фрезеровании. Обороты шпинделя устанавливают таким образом, чтобы зубцовая частота конической передачи отличалась от собственных частот элементов системы, на возможно большую величину. Из оцифрованного сигнала выбирают отрезок, соответствующий целому числу оборотов шпинделя (рис. 17). Приведен пример для угловой головки с коническими колесами, имеющими по 20 зубьев и фрезой с 6 зубьями.

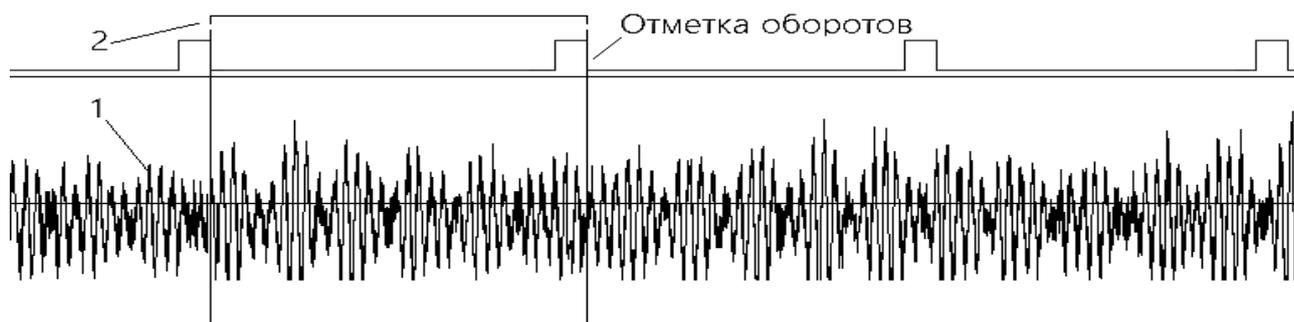


Рис. 17. Записанный вибросигнал – 1, отрезок, соответствующий одному обороту шпинделя – 2

Далее определяются СКЗ и сигнал раскладывается в тригонометрический ряд. Полученная числовая последовательность делится на отрезки, равные периоду одного оборота шпинделя, и суммируются числа последовательности каждого отрезка. Для полученной числовой последовательности определяют ее огибающую с помощью вычисления скользящего СКЗ. После осреднения методом скользящего СКЗ получается сигнал из огибающей на периоде  $T$ . Следующим шагом является представление огибающей в виде тригонометрического ряда, т.е. по гармоникам на периоде  $T$  (рис. 18).

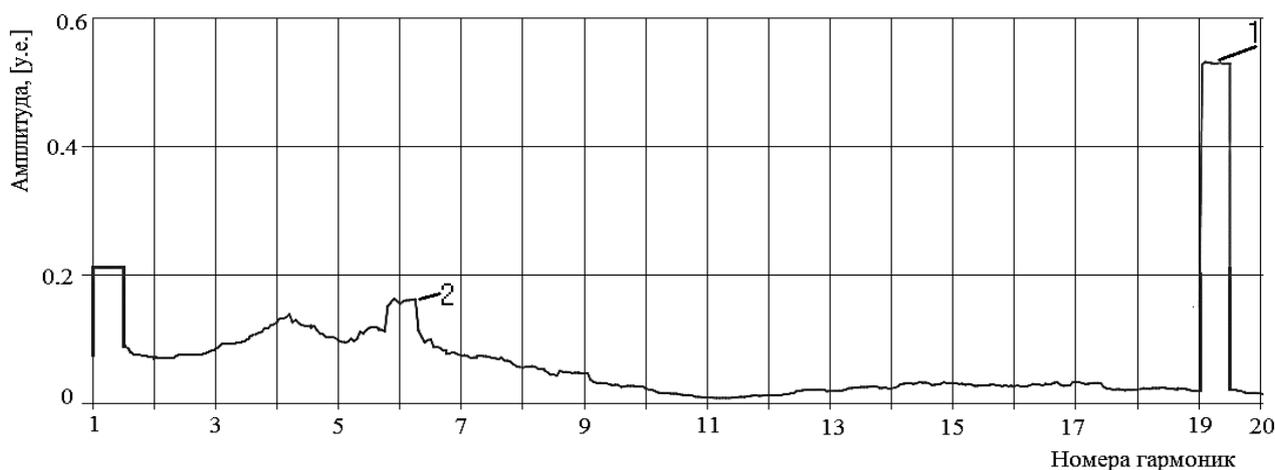


Рис. 18. Разложение сигнала на гармоники. Гармоника зубцовой частоты конической передачи – 1, гармоника зубцовой частоты фрезы – 2

По оси ординат указана амплитуда в условных единицах, по оси абсцисс номер гармоники: гармоника 1 соответствует периоду  $T$  (1 оборот шпинделя). На

рис. 18 выделены гармоники зубцовой частоты конической передачи – 1 и гармоники, соответствующие числу зубьев фрезы (6 зубьев) – 2. Явно выделяется гармоника зубцовой частоты передачи.

Разработана методика диагностики технического состояния угловых головок, состоящая из 5 этапов. Первый этап – сбор исходных данных. Второй этап – диагностика путем импульсного возбуждения и измерение вибраций при работающем шпинделе. Третий этап – обработка данных. Определяется АЧХ системы, собственная частота и жесткость. Анализируется спектр сигнала по формулам вынужденных колебаний подшипников и зубчатых колес. Четвертый этап – интерпретация результатов: если данные диагностики в пределах нормы, установленной для подшипников (например, 13 % для частоты вращения тел качения, 16 % для частоты, вызванной перекосом наружного кольца при посадке и т.д.), назначается следующая дата диагностики; если значения перешли порог дефекта, выдается рекомендация о проведении ремонта или технического обслуживания. Пятый этап – построение графика. По оси абсцисс отложено время проведения диагностики, а по оси ординат значения измеренных собственных частот и жесткости. График позволяет отслеживать техническое состояние головки в процессе эксплуатации. В качестве примера приведены графики, построенные по результатам серии исследований угловой головки Alberty T90-8 (рис. 19). Спад графика до 510 Гц после 4000 ч наработки показывает момент выхода из строя. После восстановления собственная частота и жесткость увеличились практически до уровня, соответствующего состоянию новой головки.

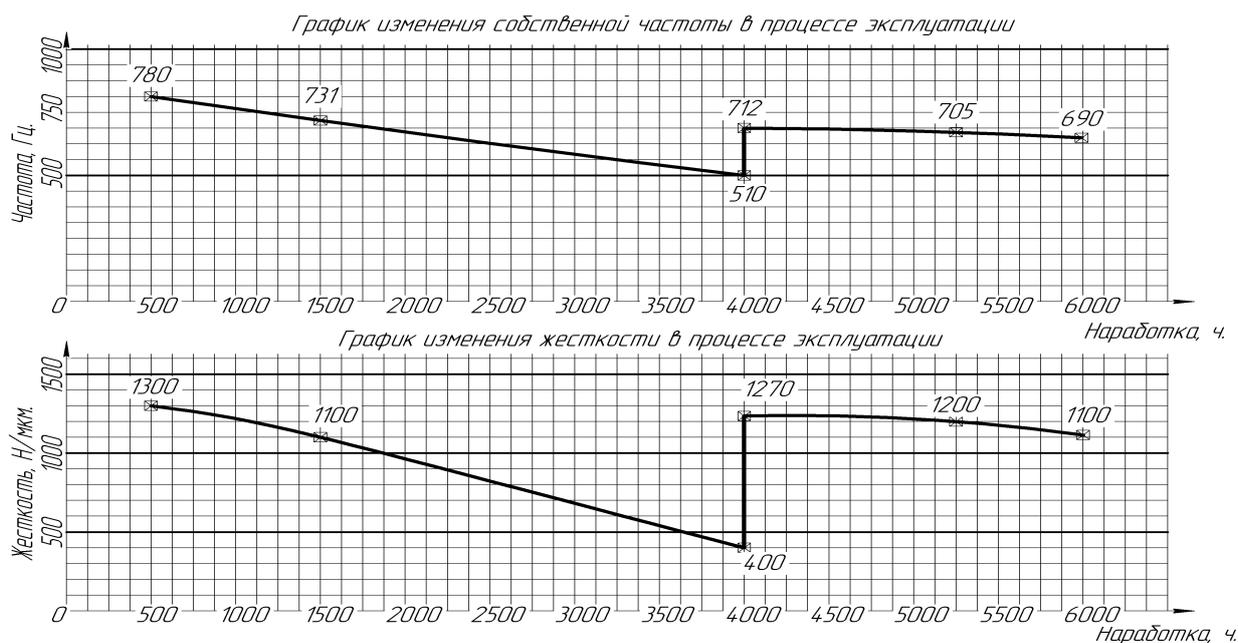


Рис. 19. Графики для мониторинга собственной частоты и жесткости

На основании данных, полученных в процессе исследований, а также справочной информации от производителей угловых головок, сформированы исходные данные для анализа эффективности методики. Производственные планы и графики ремонта предоставили АО «ГНПП «Регион», АО «АКИН», АО «ВНИИРТ», АО «СТП-САСТА». На основе этих данных и результатов экспериментов построены графики среднего времени выполнения ремонта (рис. 20, а) и простоя (рис. 20, б). Также построен график изменения средней штучной производительности (рис. 21) до и после внедрения результатов данной работы в производство.

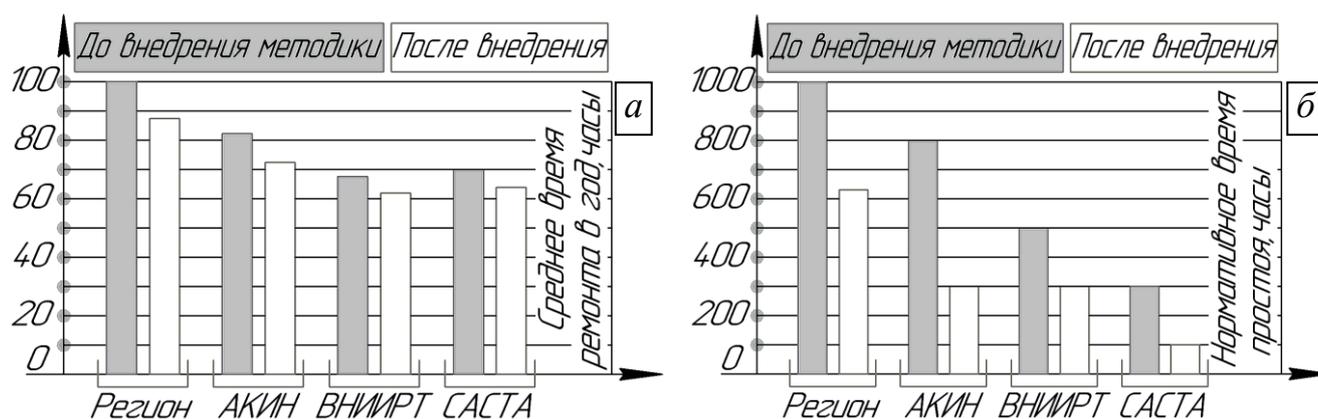


Рис. 20. Графики среднего времени ремонта (а) и простоя (б) для оценки эффективности методики

На основе данных, взятых из трёх графиков (рис. 20, а, б, 21), построен обобщённый график, демонстрирующий усредненное по четырем предприятиям повышение эффективности эксплуатации станков, после внедрения методики диагностики технического состояния (рис. 22). При построении данного графика использованы усредненные данные по нормативному времени простоя, производительности и среднего

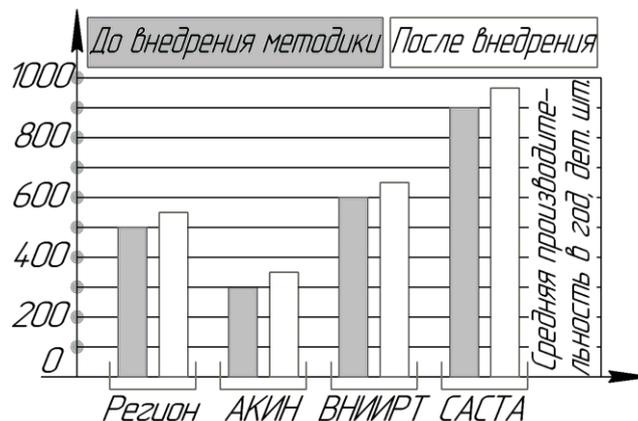


Рис. 21. График производительности для оценки эффективности методики

времени ремонта. Значения нормированы от 0 до 1 для объединения в один график, значения графика изменения средней производительности, дополнительно инвертированы, для соблюдения логики представления. Полученные результаты показывают, что при применении разработанной методики диагностики технического состояния угловых головок удастся снизить время простоя. Результат достигается ранним обнаружением дефектов и планирования дальнейшего ремонта. Например, при обнаружении момента

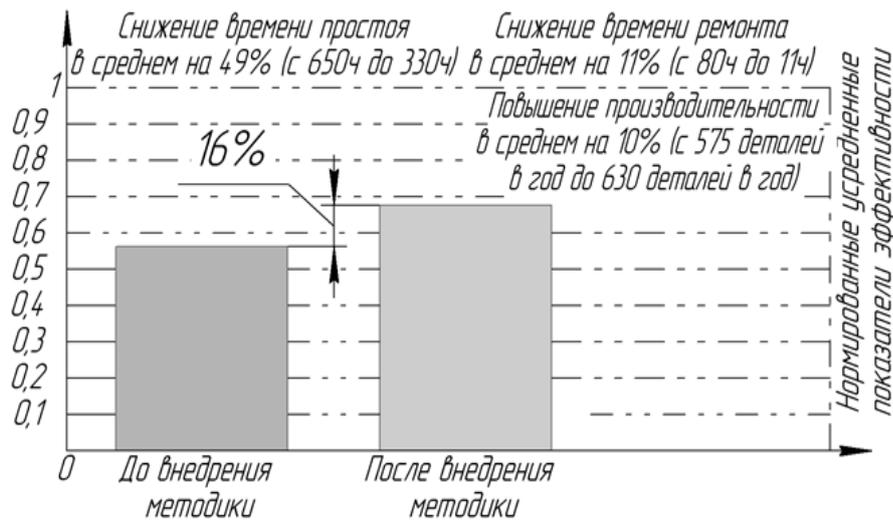


Рис. 22. График производительности для оценки эффективности методики

зарождения дефекта подшипникового узла, можно заранее закупить запасные части для ремонта. По результатам исследований, выполненных на четырех предприятиях, время технического обслуживания и ремонта в среднем сокращается на 12 %. В результате сокращения времени на ремонт и техническое обслуживание производительность оборудования повышается в среднем на 9 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена задача повышения эффективности станков, использующих угловые головки, заключающаяся в снижении времени простоя и затрат на обслуживание, повышении срока безотказной работы в процессе эксплуатации, прогнозировании остаточного ресурса.

Полученные зависимости жесткости, собственной частоты, амплитуды колебаний, среднеквадратичного значения и эксцесса амплитуд вибраций угловой головки от ее технического состояния в процессе эксплуатации, позволили оценить ресурс исследуемых угловых головок до следующего ремонта.

Установлены диагностические признаки неисправности угловых фрезерных головок. В качестве таких признаков при вибродиагностике оценивается амплитуда гармоник оборотной частоты, зубовой частоты, частоты деталей подшипника и т.д. Указан порог дефекта для заданных частот.

Разработана конечно-элементная математическая модель вспомогательного оборудования типа угловых фрезерных головок, позволяющая учитывать положение ведущего и ведомого вала под углом друг к другу. Модель позволила получить формализованное представление об основных

количественных и качественных соотношениях между элементами динамической системы.

Разработан способ вибродиагностики конического зубчатого зацепления в угловых фрезерных головках. Способ позволяет оценить техническое состояние зубчатой передачи по энергии гармоник на спектре вибросигнала. На способ вибродиагностики получен патент на изобретение.

Разработана методика прогнозирования технического состояния угловых головок на основе мониторинга статической жесткости, собственной частоты, амплитуды колебаний, среднеквадратического значения и эксцесса амплитуд вибраций в процессе эксплуатации. Методика подтвердила свою эффективность на практике и внедрена на 4 предприятиях.

Разработано кроссплатформенное программное обеспечение для моделирования пространственных конструкций типа угловых головок. Программа позволяет оценить конструкцию угловой фрезерной головки на начальном этапе проектирования путем анализа ее АЧХ. Это позволяет учесть влияние угловой головки на общие динамические характеристики станка.

## **СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:**

1. **Шлаев К.И.,** Сабиров Ф.С. Исследование динамических характеристик угловой фрезерной головки // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 3. С. 62–66.
2. **Шлаев К.И.,** Сабиров Ф.С. Оценка технического состояния угловых фрезерных головок путем исследования динамических характеристик // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 12-2. С. 252–257.
3. **Шлаев К.И.,** Сабиров Ф.С. Вибродиагностика технического состояния угловых фрезерных головок // Вестник «МГТУ «СТАНКИН». 2024. № 1 (68). С. 68–74.
4. **Шлаев К.И.** Динамические характеристики угловой фрезерной головки в программных средах 3D моделирования // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 6 (362). С. 69–72.
5. **Шлаев К.И.** Исследование вибраций угловой фрезерной головки в целях оценки технического состояния // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 6. С. 106–113.

### **Прочие публикации:**

6. **Шлаев К.И.,** Сабиров Ф.С. Экспериментальное исследование и моделирование угловых фрезерных головок // Материалы XIII всероссийской

конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНИКН». – 2020. – С. 417–422.

7. **Шлаев К.И.** Динамические характеристики угловой фрезерной головки в программных средах 3D моделирования // Лидеры 3D-Tech: материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых – Тула: Издательство АНО ДПО «Высшая техническая школа». – 2023. – С. 43–48.

8. **Шлаев К.И.,** Сабиров Ф.С. Исследование динамических характеристик угловой фрезерной головки // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2022): Материалы XXI Международной конференции имени А.Ф. Терпугова. – Томск: Издательство Томского государственного университета. – 2023. – С. 325–330.

9. **Шлаев К.И.** Сравнение результатов исследования динамических характеристик угловой фрезерной головки, полученных методом имитационного моделирования и прямого эксперимента // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции. – Магнитогорск: Издательство Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2023. – Т.1. – С. 395.

10. **Шлаев К.И.** Вибродиагностика угловой фрезерной головки // Материалы научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии». Сборник докладов института машиностроения и инжиниринга. Под ред. А.Э. Волкова. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». – 2019. – С. 32–33.

#### **Патенты:**

11. Патент № 2824523 Российская Федерация, МПК G01M13/021. Способ вибродиагностики состояния конической передачи и оценки ее влияния на процесс фрезерования / Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., **Шлаев К.И.**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (RU). – №2824523 Заяв. 26.02.2024 опубл. 08.08.2024 Бюл. № 22.

#### **Свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ:**

12. Св-во о государственной регистрации программы ЭВМ № 2023619968. Программа расчета собственных частот и жесткости угловых фрезерных головок / **Шлаев К.И.**; зарегистрировано в госреестре 17.05.2023. Бюл. № 5.

Научное издание

Шлаев Кирилл Иванович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАНКОВ  
НА ОСНОВЕ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
УГЛОВЫХ ФРЕЗЕРНЫХ ГОЛОВОК

*Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата  
технических наук*