

В диссертационный совет 24.2.332.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

### ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., с.н.с. Серкова Николая Алексеевича на диссертационную работу Шлаева Кирилла Ивановича на тему: «Повышение эффективности станков на основе диагностики технического состояния угловых фрезерных головок», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

#### **Актуальность работы.**

Диссертационная работа Шлаева К. И. посвящена проблеме повышения эффективности современного машиностроительного производства. Предприятия стремятся максимально использовать имеющееся оборудование, оснащая его дополнительной технологической оснасткой. В частности, в серийном производстве находят широкое применение угловые фрезерные головки для расширения технологических возможностей массово используемых простых 3-координатных многоцелевых станков с ЧПУ.

Дополнительная оснастка, как правило, снижает жесткость и виброустойчивость станка и, тем самым, ухудшает точность обработки и снижает надежность работы оборудования.

По этой причине, весьма важным, является разработка и внедрение современных методов мониторинга и диагностики технического состояния высокопроизводительных станков с ЧПУ. Необходимость проведения своевременного технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию оборудования становится актуальным направлением повышения эффективности работы технологического оборудования современного машиностроительного высокоавтоматизированного производства. Повышение эффективности производства достигается путем предотвращения непредвиденных отказов и серьезных поломок оборудования.

Поэтому **актуальность** направлений исследований диссертационной работы Шлаева К. И. на тему: «Повышение эффективности станков на основе диагностики технического состояния угловых фрезерных головок» **не вызывает сомнений.**

**Характеристика работы.** Основной целью диссертации является повышение эффективности станков на основе диагностики технического состояния 3-х координатного станка с ЧПУ, оснащенного угловой фрезерной головкой.

Решение проблемы диссертант начал с изучения влияния вспомогательной оснастки на динамические характеристики станка (**глава 1**).

При проведении обзора применяемой оснастки на 3-х координатных продольно-фрезерных станках с ЧПУ отмечен всё усиливающийся практический интерес к оснащению металлорежущих станков угловыми фрезерными головками для выполнения обработки корпусных деталей сложной формы. Они существенно расширяют технологические возможности станка при относительно малых финансовых вложениях.

Рассмотрены основные типы вспомогательной оснастки и случаи их применения. Выявлена группа оснастки, для которой уже разработаны математические модели, и другая группа оснастки, нуждающаяся в дополнительном исследовании.

В результате анализа литературных источников установлено, что угловые фрезерные головки являются составной частью динамической системы станка. Прогнозирование их влияния на техническое состояние обрабатываемой системы возможно только на основе экспериментальных данных, получаемых в процессе обработки детали при применении фрезерных угловых головок, и оперативного анализа динамических характеристик обрабатываемой системы в целом.

**Во второй главе** подробно рассмотрены основные методы моделирования, применяемые в настоящее время при моделировании динамических систем.

Диссертант отметил, что при использовании матричного подхода для решения задач динамики более доступны численные методы и компьютерное моделирование. Однако автор считает, что для моделирования динамических характеристик угловых головок наиболее подходящим является «метод конечных элементов», зарекомендовавший себя как эффективный и надежный способ анализа сложных динамических систем. Метод позволяет учитывать нелинейность системы и множество степеней свободы, а также обеспечивает высокую точность расчета статических и динамических характеристик в широком диапазоне частот колебаний.

Ядром методики является схематизация упругой механической системы совокупностью «массивов» и «стержней», соединенных упругими элементами «упруго-вязкая пружина». По существу, автор в своей работе удачно использует эти два метода моделирования.

**В третьей главе** диссертант, развивая подходы профессора Пуша В.Э. к применению *метода конечных перемещений* и *метода конечных элементов*

для исследования вопросов жесткости несущих деталей станка, разработал модель угловой фрезерной головки на языке программирования C++ и на её основе рассчитал динамические характеристики фрезерной головки Alberti T90-8. Для этого потребовалось построить расчетную схему угловой головки в соответствии с конструкцией головки и содержащей 7 «конечных элементов «массив», 3 «конечный элемента «стержень» и 11 «конечных элементов «упруго-вязкий стык» и сформировать матрицы инерции, демпфирования и жесткости угловой головки. Для получения данных о инерционных свойствах элементов модели выполнено измерение деталей и построена 3D модель для анализа динамических характеристик в среде моделирования CAD.

С помощью разработанного ПО построена АЧХ и основная собственная частота равна 633 Гц.

**В четвертой главе** приведены результаты проведенных экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проводились на угловых головках Alberti T90-8 и OMG TA 40 в производственных условиях на продольно-фрезерном 3-координатном станке с ЧПУ портальной конструкции мод. Sanco SDM-2214L.

Исследование заключалось в импульсном возбуждении угловой головки, которое осуществлялось динамометрическим молотком по инструментальной оправке, закрепленную в угловую головку. На корпусе головки устанавливались два вибродатчика, регистрирующих отклик системы на импульсное возбуждение. АЧХ системы получалась отношением усредненного спектра вибраций к усредненному спектру силового воздействия.

Другое исследование проводилось при свободном вращении шпинделя на скоростях 400, 800, 2000 и 4000 об/мин. Исследовались в основном передние опоры, т.к. на них приходится основная нагрузка при фрезеровании, и именно они первыми выходят из строя. Получены спектры вибраций для изношенной и новой угловой головки, позволяющие оценить состояния конструктивных элементов угловой головки (подшипников, зубчатых колес и др.) по известным методикам. По совокупности данных был предположен дефект подшипникового узла. После разборки выявился дефект шариков на передних подшипниках горизонтального вала.

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. Строятся XY диаграммы. Анализируется спектр сигнала на наличие дефектов по заданным формулам.

Четвертый этап – интерпретация результатов: если данные диагностики в пределах нормы, 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.

Анализ эффективности методики с использованием данных по эксплуатации угловых фрезерных головок АО «ГНПП «Регион», АО «АКИН», АО «ВНИИРТ», АО «СТП-САСТА» показал, что время технического обслуживания и ремонта в среднем сокращается на 12%, а производительность технологического оборудования повышается в среднем на 9% за счёт сокращения времени на ремонт и техническое обслуживание.

**Научная новизна и достоверность полученных результатов.** Автору удалось решить поставленные научные задачи и получить новые оригинальные результаты, основные из которых следующие. В работе решена задача повышения эффективности станков, использующих угловые головки, заключающаяся в повышении ресурса угловых головок, снижении времени простоя и затрат на обслуживание, повышении надежности в процессе эксплуатации, прогнозировании остаточного ресурса:

- в определении взаимозависимости между динамическими и статическими характеристиками угловой головки и её техническим состоянием, что вскрывает резервы повышения эффективности эксплуатации;

- в разработанном способе вибродиагностики конического зубчатого зацепления, позволяющем диагностировать состояние зацепления и оценить ее влияния на процесс фрезерования;

- в разработанной математической модели поведения во времени головки, учитывающей угловое расположение ведущего и ведомого валов и наличие конического зубчатого зацепления, позволяющей определять и оценивать её динамические характеристики;

- в определении взаимосвязи между динамическими 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;

**Достоверность** полученных результатов диссертации обеспечивается:

- совместным рассмотрением (сопоставлением) результатов, полученных при экспериментальных исследованиях и полученных при моделировании;

- применением современных методик и средств проведения исследований;
- применением фундаментальных положений механики и метрологии;
- проведением измерений на современном измерительном оборудовании и современном технологическом оборудовании с ЧПУ;
- научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, подкреплены фактическими данными, представленными в приведенных рисунках и таблицах.

#### **Практическая значимость результатов научных исследований.**

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 в виде методики диагностики технического состояния угловых головок, состоящей из 5 этапов;
- в возможности использования технологами-машиностроителями получаемых АФЧХ угловых фрезерных головок при разработке техпроцессов и назначении режимов резания, не приводящих к разрушительным вибрациям.

**Апробация работы и публикации.** Теоретические и практические результаты диссертации Шлаева К. И. 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-ТЕСН» (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).

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.

## Замечания по диссертационной работе

К работе имеются замечания.

1. В работе не рассмотрено включение в модель крутильных колебаний вертикального и горизонтального валов, а это важный аспект возникновения автоколебаний при фрезеровании.
2. В качестве пожелания диссертанту для дальнейших работ можно посоветовать дальнейшее развитие методики формирования модели динамического поведения механической упруго-вязкой системы в виде функционально связанных блоков на подобии Simulink. Это позволит широкому кругу инженеров-исследователей оперативно строить динамические модели колебательных механических систем.

Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку научного уровня и практической ценности диссертационной работы.

**Заключение.** Диссертация Шлаева К. И. является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлены результаты решения научной проблемы повышения эффективности станков на основе диагностики технического состояния угловых фрезерных головок. Диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Шлаев Кирилл Иванович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Официальный оппонент,  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории вибротехнических систем  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института машиноведения  
им. А.А. Благонравова Российской академии наук  
д.т.н., с.н.с.

Серков Николай Алексеевич

14.11.2024

Подпись заверяю

*Серков Николай Алексеевич*

Контакты: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук  
(ИМАШ РАН)

101000, Москва, Малый Харитоньевский пер., дом 4, тел. +7(495) 628-87-30, e-mail: info@imash.ru