

Ульяновский государственный технический университет

Стенографический отчет

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 999.003.02

Повестка дня

**ЗАЩИТА ДИССЕРТАЦИИ Гаспаровым Эриком Сергеевичем
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

**«ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИРОВАНИЯ И БЕЗРАЗБОРНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ
ОПОР»**

Специальность:

**05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки**

Официальные оппоненты:

Янкин Игорь Николаевич – д.т.н., профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Башаров Рашит Рамилович – к.т.н., доцент кафедры «Мехатронные станочные системы» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)»

Ульяновск - 2016

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 999.003.02

от 10 июня 2016 года

на заседании присутствовали члены Совета

1.	Табаков В.П. (председатель)	д.т.н., профессор	05.02.07-технические науки
2.	Веткасов Н.И. (ученый секретарь)	д.т.н., доцент	05.02.07-технические науки
3.	Булыжев Е.М.	д.т.н., доцент	05.02.08-технические науки
4.	Горшков Б.М.	д.т.н., профессор	05.02.07-технические науки
5.	Ганиев М.М.	д.т.н., профессор	05.02.08-технические науки
6.	Денисенко А.Ф.	д.т.н., профессор	05.02.07-технические науки
7.	Драчев О.И.	д.т.н., профессор	05.02.07-технические науки
8.	Дьяконов А.А.	д.т.н., доцент	05.02.08-технические науки
9.	Зибров П.Ф.	д.т.н., профессор	05.02.08-технические науки
10.	Кирилин Ю.В.	д.т.н., доцент	05.02.07-технические науки
11.	Киселев Е.С.	д.т.н., профессор	05.02.08-технические науки
12.	Клячкин В.Н.	д.т.н., профессор	05.02.07-технические науки
13.	Ковальногов В.Н.	д.т.н.	05.02.07-технические науки
14.	Носов Н.В.	д.т.н., профессор	05.02.08-технические науки
15.	Полянсков Ю.В.	д.т.н., профессор	05.02.08-технические науки
16.	Салов П.М.	д.т.н., профессор	05.02.08-технические науки
17.	Унянин А.Н.	д.т.н., доцент	05.02.07-технические науки
18.	Худобин Л.В.	д.т.н., профессор	05.02.08-технические науки

Председатель
диссертационного совета Д 999.003.02

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 999.003.02



(Handwritten signature)

Табаков Владимир Петрович

Веткасов Николай Иванович

(Handwritten initials and date)
14.06.2016

Председатель

Сегодня на повестке дня заседания совета, защита диссертации Гаспарова Эрика Сергеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Обеспечение динамического качества высокоскоростных шпиндельных узлов на основе моделирования и безразборной оценки состояния опор». Специальность 05.02.07 - "Технология и оборудование механической и физико-технической обработки"

Официальные оппоненты:

Янкин Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» из «Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.» и Башаров Рашит Рамилович – доцент, кандидат технических наук, кафедра «Мехатронные станочные системы», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимского государственного авиационного технического университета ,

Ведущая организация «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева».

На заседании нашего совета из 20 членов совета присутствует 18 человек, значит, кворум у нас имеется. Повестка дня утверждена. Есть у кого замечания? (нет). Утверждаем.

По специальности защищаемой диссертации 05.02.07 "Технология и оборудование механической и физико-технической обработки" на заседании присутствует 9 докторов наук, значит заседание наше правомочно.

Объявляется защита диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Гаспарова Эрика Сергеевича по теме «Обеспечение динамического качества высокоскоростных шпиндельных узлов на основе моделирования и безразборной оценки состояния опор»

Работа выполнена в Самарском государственном техническом университете».

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Денисенко Александр Федорович.

Официальные оппоненты

Янкин Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» «Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.». Он у нас здесь присутствует и Башаров Рашит Рамилович – доцент, кандидат технических наук, кафедра «Мехатронные станочные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, тоже у нас на совете присутствует.

Письменные согласия на оппонирование данной работы от них были своевременно получены

Ведущая организация «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева».

Слово предоставляется **ученому секретарю Николаю Ивановичу Веткасову** для оглашения документов из личного дела соискателя.

Ученый секретарь

Уважаемые коллеги в деле соискателя имеются следующие документы представленные к защите: личный листок по учету кадров, из которого следует что Гаспаров Эрик Сергеевич 1977 года рождения закончил «Самарский государственный аэрокосмический университет по специальности «Бытовая радиоэлектронная аппаратура» в 2002 году и окончил аспирантуру в 2011 году по специальности 05.02.07- «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в Самарском государственном техническом университете. В настоящее время работает ассистентом кафедры "Транспортные процессы и технологические комплексы" Самарского государственного технического университета. Имеется выписка из расширенного заседания кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы». На этом заседании было принято заключение, на котором отмечается личное участие автора, степень обоснованности научных положений, степень научных ценностей и как итог дается рекомендация о том, что данная работа была защищена по специальности 05.02.07. имеется нотариально заверенные копии диплома об окончании Самарского государственного аэрокосмического университета. Имеется заключение о сдаче кандидатских экзаменов со следующими оценками: английский язык – хорошо, философия - хорошо, специальная дисциплина «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»- отлично. Имеется список публикаций Гаспарова Эрика Сергеевича, который включает в себя 18 наименований, из которых 17 по теме диссертации, из них 7 научных публикаций в журналах из перечня ВАК. Имеется заявление, которое было представлено при подаче документов в диссертационный совет на имя председателя совета. Имеется протокол заседания о приеме диссертации к предварительному рассмотрению, заключение экспертной комиссии в составе Кирилина Ю.В., Клячкина В.Н и Киселева Е.С. о возможности защиты диссертации в нашем диссертационном совете и соответствии требованиям ВАК о изложении материалов в автореферате в соответствии данной специальности. Имеется отзыв научного руководителя. Также имеется протокол заседания диссертационного совета о приеме диссертации к защите. Имеется список рассылки авторефератов, включающий в

себя 71 адрес, в которые были направлены эти документы. Также содержат сведения о ведущей организации, отзывы ведущей организации и официальных оппонентов. Кроме того представлены 12 отзывов, пришедшие на автореферат. Все необходимые документы были вовремя опубликованы на сайте университета и в интернете и соответствуют требованиям процедуры рассмотрения диссертации в диссертационном совете.

Председатель

Так, вопросы к Николаю Ивановичу есть? (нет). К соискателю вопросы есть? (нет). Так прошу Вас, Эрик Сергеевич.

Соискатель

Добрый день! Разрешите представить Вам работу на тему «Обеспечение динамического качества высокоскоростных шпиндельных узлов на основе моделирования и безразборной оценки состояния опор». Понятие «Динамическое качество» было впервые введено Кудиновым и объединяет под одним общим термином совокупность показателей динамических процессов. Наиболее важными являются: динамическая податливость как в радиальном так и в осевом направлениях; амплитудно-частотная характеристика, резонансные частоты; демпфирование и возможный диапазон скоростей вращения шпинделя, без регулировки опор. Опоры шпиндельных узлов металлорежущих станков, в 90-95% случаях - это подшипники качения, и регулировка которых производится за счет установки предварительного натяга. Т.к в настоящее время в конструировании ШУ существует тенденция, когда можно шпиндельный узел представить как жесткий шпиндель на упругих опорах, то можно говорить, что динамическое качество шпиндельного узла практически полностью определяется динамическим качеством подшипника.

Имеющиеся в литературных источниках методы обеспечения динамического качества шпиндельных узлов удалось разделить на три группы: это методы математического моделирования шпиндельных узлов, методы обеспечения за счет обеспечения качества изготовления составных частей и сборки шпиндельных узлов и методы технической диагностики и как логическое следствие автоматизация процессов диагностирования.

В связи с изложенным была поставлена **цель работы**: обеспечение динамического качества высокоскоростных ШУ на основе прогнозирования динамического качества подшипниковых узлов и экспериментальной оценки усилия предварительного натяга опор методом безразборного контроля, и сформулированы и решены следующие **задачи**.

Нами предложена структурно-параметрическая модель опоры. Здесь установлен радиально-упорный шарикоподшипник, но при необходимости результаты можно будет перенести на радиальный подшипник. В структурно-параметрической модели имеется одна неподвижная система координат и несколько подвижных систем координат, в зависимости от числа шариков.. Предложена расчетная схема опоры с динамическим эксцентриситетом, т.е. имеется обратная связь по амплитуде.

Рассмотрена механическая система вдоль одной из подвижных осей. Это четырехмассовая система с упругими связями. Массой шарика m_2 можно пренебречь т.к. она на порядок меньше остальных масс. Здесь учтены: приведенная на опору силу резания, сила предварительного натяга, центробежные силы которые возникают при вращении шпинделя. Также учтены функции кинематических возмущений, которые возникают из-за неровностей профилей беговых дорожек и линий качения шариков. Здесь приведена математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений. Также используется нелинейная упругая характеристика Герца.

Функцию кинематического возмущения можно аппроксимировать практически любым рядом, но целесообразно использовать ряд Фурье, т.к. функция данная, периодическая, а тригонометрические функции являются собственными функциями линейного фильтра, что в принципе потом возможно упростит задачу гармонического анализа.

С целью использовать хорошо развитый математический аппарат расчета электрических цепей и специализированные методы расчета и программные средства, данная математической модель опоры, по теории подобия динамически аналогичных систем была преобразована в электрическую систему и построена соответствующая ей электрическая схема. Методом эквивалентного генератора схема была упрощена, Составлено уравнение баланса напряжений. Получено алгебраическое уравнение в третьей степени, которое сопоставлением формуле косинуса тройного угла было решено.

Получены решения математической модели: решения для контактной деформации, колебаний ротора и колебаний корпуса. Данные решения аналитические.

Используя справочные данные, данные из статей Леонтьева, Левиной были построены зависимости АЧХ ШУ от усилия предварительного натяга, а также при воздействии силы гармонического характера. Из рисунка очень хорошо видно, что изменение усилия влияет на амплитуду нижних резонансных частот и вызывает смещение резонансных частот в область

более высоких частот для верхних резонансных частот. На проекции трехмерного графика очень хорошо видно как модулируется амплитуда нижних резонансных частот и смещаются верхние резонансные частоты.

Для экспериментальной оценки усилия предварительного натяга опор был разработан стенд и здесь приведены схемы тестовых воздействий. Тестовые воздействия в виде удара производились по переднему концу шпинделя и также по корпусу ШУ в трех местах, исходя из положений теории контролеспособности, в области передней опоры, задней опоры и в середину корпуса... В качестве объекта использовался мотор шпиндель отечественного производства, который является полным аналогом электрошпинделя американской фирмы «Браянт» M1090 и в опорах использовались радиально-упорные подшипники второго класса точности 76101E. Усилие предварительного натяга осуществляется за счет винта регулировки и пружины предварительного натяга. Здесь на рисунке представлена схема последовательного расположения элементов ШУ по продольной оси. Без изменений в конструкции ШУ между регулировочным винтом и пружиной предварительного натяга был установлен датчик силы, характеристики датчика приведены здесь же в таблице. Информационно-измерительная система представляет собой датчик виброускорения AP98 с встроенным предусилителем стандарта ICP, и предназначен для использования в сильных электромагнитных полях. Здесь же приведены каналы используемых модулей. Использовались модули фирмы NI: модуль 9234 и модуль 9219. Также использовалось программное обеспечение NI Sound and Vibration Assistant, которая входит в базовый пакет LabView.

Для десяти значений усилия предварительного натяга были получены сигналы виброускорений, при нанесении ударов по переднему концу шпинделя. Были проведены по три ударных воздействия одинаковой силы по переднему концу шпинделя.

Так как данный процесс затухающий, было решено искать критерий в виде коэффициента затухания. Представив колебание в виде следующей функции, неопределенность в выборе функций мгновенных значений амплитуды и фазы удалось избежать применением преобразования Гильберта.

Были получены амплитудные огибающие по Гильберту, к которым было применено гомоморфная обработка. Как мы видим, существуют низкочастотная и высокочастотная составляющие. Но как видно из амплитудных огибающих низкочастотный тренд смещается вправо, при увеличении предварительного натяга, что говорит о наличии интервала в области нижних частот, который реагирует на изменение предварительного

натяга или по-другому изменяется скорость нарастания низкочастотного тренда. Были найдены линейные тренды логарифмических преобразований огибающих, методом наименьших квадратов. Однако исходя из того что мы получили сделан вывод, что предварительный натяг незначительно влияет на демпфирование, а коэффициент затухания не может быть критерием для определения предварительного натяга. Но исходя из выводов которые были сделаны мы перешли к спектральному анализу и получили спектральные характеристики сигналов виброускорений при различных значениях усилия предварительного натяга. На рисунке видно, что с увеличением значения предварительного натяга, особенно на интервале 3200-4200 Гц, так называемая «эффективная ширина» спектра смещается в область более высоких частот при увеличении предварительного натяга. В качестве критерия была выбрана относительная пиковая частота, вычисляемая как абсцисса центра тяжести спектра выбранного диапазона. Т.к. расхождений в значении вычисляемого критерия при повторных воздействиях не было, статистический анализ не проводился.

Построена зависимость данного критерия от предварительного натяга. Как видно из графика в области малых натягов данный критерий обладает высокой разрешающей способностью. Положительный результат получен лишь при воздействии в область передней опоры, по корпусу шпиндельного узла. Зависимость критерия от предварительного натяга также приведена в виде графика. На основе полученных результатов мы предложили зависимость частот вращения мотор - шпинделя от значения предварительного натяга по динамическому критерию. Вывод который был сделан: производителем заявлен интервал эксплуатационных частот вращения шпинделя от 1000 до 1666 Гц или от 60 000 до 100 000 об/мин. Мы выяснили, что в зону рабочих частот входит резонансная частота т.е. использовать данный мотор шпиндель с частотами вращения от 60000 до 75000 об/мин. не целесообразно.

Далее применялись методы функциональной диагностики. Т.е критерии которые были получены методом тестовой диагностики были апробированы методом функциональной диагностики. Экспериментальный стенд был доработан. Сюда вошли система смазки и система охлаждения статора. Был добавлен вихретоковый датчик виброперемещений, который позволял контролировать стабильность частоты вращения шпинделя.

Исходя из того, что размеры применяемых шлифовальных кругов на данных мотор шпинделях малы и исходя из выводов, сделанных из ряда публикаций исследователей саратовской школы, сделан вывод, что общие уровни вибраций при холостом ходе и при чистой обработке отличаются

незначительно то мы можем говорить что полученные методом функциональной диагностики критерии, апробированные, могут применяться и в режимах обработки.

Для того чтобы определить механизм возникновения вынужденных колебаний было применено преобразования Фурье при разгоне шпинделя с от 0 до 72 000 оборотов. Получены частотно-временные спектрограммы. Здесь очень хорошо видны коммутационные частоты, т.е. вклад электромагнитных сил. Данный эксперимент подтверждает вывод сделанный в литературе а именно у Пуша младшего, что вклад электромагнитных сил в вибрацию составляет порядка 80-90% от общей вибрации. Для того чтобы увеличить вклад собственных колебаний и увеличить эффективность применения диагностических критериев был применен режекторный БИХ-фильтр для диапазона 3950-4050 Гц и с ослаблением более 120 ДБ на частоте 4000 Гц. Таким образом, были получены временные реализации сигнала виброускорения для пяти значений усилия предварительного натяга: 0 Н; 18,9 Н; 49,2 Н; 68,6 Н; 88Н. Для двенадцати интервалов длительностью в одну секунду были вычислены относительные частота и мощность, как абсцисса и ордината центра тяжести спектрограммы соответственно. Вычислены математические ожидания соответствующих значений относительных частоты и мощности.

Полученные в результате обработки экспериментальных данных абсциссы и ординаты центра тяжести приведены в таблице, а зависимости их математических ожиданий от предварительного натяга в виде графиков.

Также была проведена возможность оценки предварительного натяга методом биспектрального анализа. Это было сделано в связи с тем, что в реальных условиях производства всегда существуют шумы различной природы. Показано что модуль биспектра не может являться направлением в поиске критериев, а более однозначно ведет себя функция бикогерентности.

Так как большинство замечаний было связано с плохим качеством рисунка схемы программного обеспечения, я вывел ее на отдельный лист и при необходимости поясню принцип ее работы.

По результатам настоящих экспериментальных исследований был получен патент на способ определения предварительного натяга роторных систем на опорах качения. Результаты экспериментального исследования апробированы и приняты к внедрению в виде методик диагностирования оборудования на предприятиях ООО «Завод приборных подшипников» (г. Самара), АО «Волгабурмаш» (г. Самара). Также рассчитан предполагаемый экономический эффект при применении системы диагностирования. Основные выводы по работе приведены на трех листах. У меня все.

Председатель

Так, пожалуйста, вопросы.

д.т.н., профессор Салов П.М.

Как можно использовать полученные результаты для радиальных подшипников? Просто для радиальных?

Соискатель.

Я рассматривал только плоскую модель. Данная модель не трехмерная. Почему я так говорю, потому что, я сравнивал результаты полученные Леонтьевым М.К., профессором МАИ, где он характеризует экспериментально полученные спектры. Он ссылается на то, что спектры очень сложные. И он не может определить по критериям изменение зазора подшипника. В моем случае, мой критерий вполне работает на этих спектрах.

д.т.н., профессор Салов П.М..

Ясно. Т.е. надо сказать, что результаты можно использовать.

Соискатель

Т.е. результаты можно переложить, конечно.

д.т.н., профессор Салов П.М..

Переложить!?Переложить - вот так и надо было говорить.

Соискатель

Результаты можно переложить, конечно, с учетом.

д.т.н., профессор Салов П.М.

Не учитывали массу шарика?

Соискатель

Не учитывали массу шариков... дело в том, что у меня решение аналитическое. Т.к. форма символическая, т.е я пишу в частотном спектре, выражения получаются очень сложными. В принципе можно, учитывая массу шарика, получить выражения аналитические. Но выражения будут очень громоздкими, потому что получается два нелинейных упругих элемента. И выражения будут просто нечитаемыми. Скажу, что в работе

приведен график изменения предварительного натяга от частоты вращения и там видно, что натяг меняется незначительно. Там натяг меняется за счет центробежных сил шарика, т.е. есть некое изменение натяга, но оно незначительно по сравнению с установленными значениями натяга. На этом основании можно сказать, что экспериментом подтверждено.

д.т.н., доцент Унянин А.Н.

Производители узлов дают рекомендации относительно натяга?

Соискатель

Для типоразмеров подшипника используемых в опорах исследуемого шпиндельного узла есть данные в справочниках и преднатяг устанавливается в зависимости от частоты вращения. В области небольших частот вращения используется больший преднатяг, а в области высоких частот малые значения преднатяга. По справочнику интервал преднатяга для одного режима работы составляет 30-40 ньютонов.

д.т.н., доцент Унянин А.Н.

Какие рекомендации по использованию математической модели?

Соискатель

Я использовал математическое моделирование как стратегию выбора направления поиска критериев.

д.т.н., доцент Унянин А.Н.

Ваши рекомендации получены на базе одного эксперимента. Вот как широко их можно использовать?

Соискатель

Их можно переложить на любые конструкции шпиндельных узлов. Я апробировал их на электрошпинделях других типоразмеров – у меня все работает. Получаются другие частотные интервалы, но подход работает.

Председатель

Евгений Степанович Киселев, пожалуйста.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Пятый плакат. У вас на плакате приведены силы резания. Что за силы и к чему они приведены?

Соискатель

Это радиальная составляющая силы резания, приведенная к опоре.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Радиальная или осевая? К чему она приведена?

Соискатель

Радиальная. К опоре.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Приведенная к опоре?

Соискатель

К опоре.

Председатель

Приведенные к опоре килограммы?

Соискатель

Нет, ньютоны.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

И какой порядок брали, каков порядок приведенных сил?

Соискатель

Я не брал. Я не давал никаких количественных оценок

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Ну, а в каком диапазоне? На какие величины?

Соискатель

Я не давал никаких количественных величин.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Второй вопрос. Опять к этой схеме. Эрик Сергеевич скажите, а на какие числа оборотов рассчитана ваша схема, Вашего электрошпинделя? И какую скорость шлифования она может обеспечивать? Давайте к реальному процессу шлифования обратимся.

Соискатель

Этого в модели нет.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Как нет?

Соискатель

Силы не учтены в эксперименте, а в модели могут быть учтены.

д.т.н., профессор Киселев Е.П.

Я уже не о силах говорю, а о числах оборотов.

Соискатель

Я не ограничивал.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Она у вас не имеет ограничений? Ну, хорошо, почему Вы утверждаете, что это шлифование? Может это сверление?

Соискатель

Я не утверждал, что математическая модель для шлифования.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Вы везде говорите о высокоскоростных шпиндельных узлах шлифовальных станков

Соискатель

Я построил эксперимент на базе шлифовальных станков.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Я и спрашиваю, какая скорость шлифования?

Соискатель

Если Вы про частоты вращения, то от 60 до 100 тысяч оборотов.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

При диаметре круга?

Соискатель

Данные шпиндельные узлы используются на станках серии ЛЗ Петербургского завода прецизионного станкостроения. Станки ЛЗ-247, имеют шлифовальные круги диаметром до 6 мм.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Это мы знаем, Вы нам на семинаре рассказывали. Но модель, то у Вас не с реальным шпинделем связана?!

Соискатель

Модель нет. Модель была создана, чтобы определиться с критериями, в каком направлении искать критерии.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Еще раз повторяю, каким реальным диапазонам чисел оборотов соответствует Ваша модель или она не имеет ограничений?

Соискатель

Ограничения, в данном случае, могут быть в связи учетом влияния центробежных сил шарика.

Председатель

Эрик Сергеевич скажите более четко назначение модели.

Соискатель

Назначение – это стратегия и выбор направления поиска критериев. Мне надо было определить амплитудно-частотную характеристику. Количественная оценка меня никак не интересовала.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Правильно ли я понял, вы, когда докладывали, сказали, что по результатам отзывов на автореферат я провел дополнительный эксперимент. Вот вы такую фразу говорили.

Соискатель

Нет. Я такого не говорил. Я увеличил масштаб рисунка программного обеспечения и вывел на отдельный лист. Большинство замечаний в отзывах связаны с плохим качеством рисунка в автореферате.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Работа та, которая сдана в совет, никакой коррекции не допускает.

Соискатель

Никакой коррекции в работе не было.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Еще раз повторюсь согласно Положениям, работа та, которая сдана в совет, никакой коррекции не должна подвергаться.

Соискатель

Я нечего не вводил и ничего не дорабатывал.

Председатель

Еще вопросы.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Нет вопросов

д.т.н., профессор Полянский Ю.В.

Вот такое замечание. Математическая модель не может обеспечить, а математическая модель - это средство получения чего-то.

Соискатель

Математическая модель может использоваться на стадии проектирования, это есть у ряда авторов в том числе у Кельсона А.С., например, для прогнозирования динамического качества, для того чтобы заложить необходимое динамическое качество на стадии проектирования.

д.т.н., профессор Полянский Ю.В.

Но она не обеспечивает. Проверка модели проводится с помощью каких-нибудь средств. Должен быть практический выход. Вот у Вас написано, что результаты апробированы, а практическое подтверждение есть? Документы есть?

Соискатель

Да. Получен акт внедрения. В работе.

д.т.н., профессор Худобин Л.В.

А почему в автореферате ни слова об этом нет? Ну, смотрите Ваши выводы, там никакого упоминания нет.

Соискатель

Есть в автореферате. Просто я был ограничен объемом.

Председатель

Есть на странице 15-ой.

Председатель

Еще вопросы, пожалуйста. Борис Михайлович, пожалуйста.

д.т.н., профессор Горшков Б.М.

В Вашей работе в экспериментальном исследовании используются подшипники второго класса точности. Это подшипники очень высокого класса. Задача, которую Вы решаете, это задача Герца. Она в общем то решена. Вы пошли, по-видимому, дальше. Вот Вы использовали массу шариков при оценке натяга?

Соискатель

Я все делал безразборным методом. Вообще в модели можно было учесть массу шариков, просто выражения получаются не читаемыми.

д.т.н., профессор Горшков Б.М.

Я понял, спасибо.

Председатель

Борис Михайлович нет больше вопросов? (нет) Владимир Николаевич Клячкин, пожалуйста.

д.т.н., профессор Клячкин В.Н.

В третьей главе Вы занимаетесь исследованием зависимости коэффициента затухания от величины предварительного натяга. Идет заключение о том, что, предварительный натяг незначительно влияет на демпфирование. Непонятно на чем основано заключение?

Соискатель

Вот здесь на листе есть низкочастотные составляющие, есть смещение низкочастотного тренда, некое влияние есть, но высокочастотная составляющая, которая присутствует, не дает нам определить критерий, требуется дополнительный вычислительный ресурс. Нужно определяться с границей низкочастотного диапазона. Возникает необходимость в предварительной фильтрации и требуется спектральный анализ. Для того, чтобы не увеличивать вычислительный ресурс, я перешел к спектральному анализу.

д.т.н., профессор Клячкин В.Н.

Со спектральным анализом ясно.

Соискатель

Представив сигнал в виде такой функции, я пытался определить коэффициент затухания по углу наклона тренда.

д.т.н., профессор Клячкин В.Н.

У меня еще один вопрос, возможно не совсем по существу, но тем не менее. Вы занимаетесь вопросами технической диагностики, поскольку один из моих аспирантов тоже занимается этими делами, то я влез в вашу диссертацию на сайте и первое, что я посмотрел это литература, а не найду ли я там что-нибудь полезное. Обнаружил там ссылку на книгу Фихтенгольца Г.М., одна тысяча девятьсот тридцать первого года. В советские времена он переиздавался каждый год, по крайней мере, 2005 года издание было. Так, что такого особенного было за 31 год, чего не было в более поздних изданиях?

Соискатель

По поводу решения математической модели: она была решена в тригонометрической форме. Полученное уравнение баланса напряжений, представляло собой уравнение третьей степени. Решение было получено не по формуле Кардано, там получают уравнения шестой степени, у Кельсона А.С. это есть и он избегает этого решения. Решение есть у Фихтенгольца Г.М., когда данное алгебраическое уравнение сопоставляется косинусу тройного угла, и решается данное уравнение в тригонометрической форме. Преимущества тригонометрического решения пояснять думаю не надо. Связь с гармоническим анализом органична.

д.т.н., профессор Худобин Л.В.

Эрик Сергеевич, скажите, пожалуйста, вот у Вас имеющийся список литературы 15 позиций. Во всех пятнадцати публикациях Гаспаров первый. Это что действительно так?

Соискатель

Да, совершенно верно. Это мои работы.

д.т.н., профессор Худобин Л.В.

Да, я понимаю, что это ваши работы, но это действительно так?

Соискатель

Да.

д.т.н., профессор Худобин Л.В.

Я вопрос задаю не просто так. Необычная ситуация, когда прибегают к такому приему, соискатель стоит первым. Т.е в публикациях Вы стоите первым?

Соискатель

Да.

д.т.н., профессор Худобин Л.В.

Ну, хорошо. Молодец.

Председатель

Нет вопросов? Пожалуйста.

д.т.н., профессор Ганиев М.М.

Вы создали математическую модель, так ведь? Покажите хотя бы одну реперную точку. Был какой-нибудь эксперимент или нет? Хотя бы по частотам. Я про качественную адекватность тоже хочу услышать.

Соискатель.

Я говорю, что в области нижних резонансных частот у нас присутствует амплитудная модуляция, влияние силы гармонического характера вызывает такую модуляцию. В вибродиагностике есть метод огибающей колебания на резонансных частотах и заключается именно в том, что рассматривается амплитудное модулирование на резонансных частотах механизма.

д.т.н., профессор Ганиев М.М.

Был какой-нибудь эксперимент для количественной оценки?

Соискатель

Я не сравниваю данные полученные в модели с экспериментальными данными. Я использую модель только для стратегии.

Ученый секретарь, д.т.н., доцент Веткасов Н.И

Скажите, пожалуйста, в чем новизна математической зависимости, которая приведена у Вас? Ну, в частности, на странице 5 - математическая модель опоры. Что она до Вас не была известна?

Соискатель

Была известна. Я использую плоскую математическую модель. Она получила достаточно широкое развитие. Я постарался учесть по максимуму параметры, факторы, влияющие на амплитудно-частотную характеристику, колебания ротора и корпуса. Использовал нелинейную характеристику Герца и получил аналитические решения. Учел кинематические возмущения которые возникают из-за неровностей беговых дорожек и линий качения шариков. Есть работы которые учитывают либо то либо это. Я старался собрать все воедино, так сказать использовать на перспективу, как модуль для анализа динамической системы резания.

Ученый секретарь, д.т.н., доцент Веткасов Н.И.

Как Вы доказывали адекватность предложенной модели?

Соискатель

Использование контактной теории Герца не требует доказательства адекватности. Она доказана, во многих работах, начиная с работ Рихарда Штрибека. Я ее использую. Я решил существующую модель аналитически. Дело в том, что в литературе имеющиеся решения аналитические решения больше всего связаны с тем, что контактная характеристика Герца заменена аппроксимацией, полиномом третьей степени без квадратичного члена, но в таком случае данная опора не опора Герца, а опора Дуффинга. И второе, для решения дифференциальных уравнений необходимо, чтобы были известны аналитические выражения функции восстанавливающей силы или жесткостной характеристики и силы возмущения. В моем случае я не привязывался к аналитическому виду функции возмущения. Она в принципе

может быть любой, но ясно, что должны выполняться условия ее интегрируемости и тому подобное.

Ученый секретарь, д.т.н., доцент Веткасов Н.И.

Каков Ваш личный вклад в работу?

Соискатель

Все самостоятельно.

Ученый секретарь, д.т.н., доцент Веткасов Н.И.

А соавторы?

Соискатель.

Я по первому образованию не технолог и не станочник, я технарь, но по совершенно другому направлению. Люди, которые у меня вписаны в работы и статьи, переключивали мои мысли на понятный язык.

Председатель, д.т.н., профессор Табаков В.П.

Вы проводили расчет экономической эффективности? Каков результат?

Соискатель.

Предполагаемый экономический эффект был рассчитан за счет сокращения времени диагностирования т.е. как мы видим для одного шпинделя в год. Я получил следующие данные с завода приборных подшипников: у них шпиндельный узел снимается со станка раз в неделю и на целый день. За счет сокращения времени диагностирования, а в литературе есть данные, что подобные системы увеличивают межсервисный интервал в полтора раза, на основе этого рассчитан экономический эффект.

Председатель, д.т.н., профессор Табаков В.П.

Так это проведен расчет экономической эффективности в случае применения Вашей диагностической системы?

Соискатель

Да.

Председатель.

Вопросы еще есть? Нет? Достаточно? (Да) Тогда слово предоставляется научному руководителю доктору технических наук профессору Денисенко А.Ф.

Денисенко А.Ф.

Уважаемые коллеги! Сегодня слушается нами работа, которая по трудоемкости заняла более 10 лет. Уже одно это свидетельствует, что перед нами человек целеустремленный, стремящийся к поставленным целям. Хочу отметить что, когда мы начали работать с Эриком Сергеевичем, у него за плечами была, как это видно из работы, мощная база электротехнического образования со своими методиками, методами, математическим аппаратом. Вот отвечая на вопрос, который Леонид Викторович задал, так сказать по мере работы выяснилось: достаточно и необходимо было сформулировать и поставить цель ему и дальше он начинал двигаться целенаправленно решая поэтапно вопросы, которые стоят. Поэтому в тех публикациях он, совершенно оправдано, стоит на первом месте. Это его идеи, которые он реализовывал, мысли, а остальные соавторы на самом деле подправляли методически, поскольку молодой ученый, как всегда это бывает, не всегда мог грамотно изложить свои мысли. Закончив аспирантуру 2011 г. Эрик Сергеевич не забросил, как многие делают, работу а продолжал дорабатывать в течении пяти лет, и конечно работа по сравнению с выходом его после аспирантуры изменилась весьма существенно. Ему пришлось выполнить самостоятельно все вычисления. Мы во многом видим только итоговый результат. Не всегда вы знаете поставленный эксперимент дает ответ на поставленные вопросы, много было ошибок, ложных путей, но тем не менее математический аппарат который был применен, вот тот подход электрических аналогий который был применен позволил получить ему результаты которые он продублировал в целях и задачах. По мере работы над диссертацией пришлось осваивать методы цифровой обработки сигналов. Он не сказал о том что использует мощное современное программное обеспечение которым тоже нужно владеть и все это он делал самостоятельно. Я считаю, что по своему уровню по тем задачам по развитию направления которым он занялся, по достигнутым результатам он вполне достиг уровня кандидата наук и я считаю что он вполне заслуживает этой искомой степени. Спасибо.

Председатель

Спасибо. Слово предоставляется ученому секретарю совета для оглашения заключения организации по месту выполнения работы и отзыва ведущей организации

Ученый секретарь

Уважаемые коллеги, в деле соискателя имеется заключение Самарского государственного технического университета, где выполнялась диссертация. Заключение подготовлено зам. зав. кафедрой "Автоматизированные станочные и инструментальные системы", ведущим инженером этой же кафедры Разумовой и подписано проректором Самарского государственного технического университета Ненашевым М.В.. В заключении отмечается личное участие автора в получении научных результатов, степень обоснованности научных положений, достоверности полученных результатов, научной ценности и новизны полученных результатов, практическая значимость работы. Отмечается, что работа достаточно хорошо апробирована в публикациях, патенте, материалах конференций в которых участвовал соискатель. в заключении отзыва отмечается целесообразность и что диссертационная работа Гаспарова Э.С. "Обеспечение динамического качества высокоскоростных шпиндельных узлов на основе моделирования и безразборной оценки состояния опор" является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по повышению надежности металлообрабатывающего оборудования, имеющей существенное значение для машиностроения.

Работа отвечает всем требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тема диссертационной работы и её содержание полностью соответствует специальности 05.02.07 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Диссертация Гаспарова Эрика Сергеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 - в нашем диссертационном совете.

Заключение принято на заседании кафедры "Автоматизированные станочные и инструментальные системы" Самарского государственного технического университета.

Председатель

Вопросов нет по заключению?(нет)

Ученый секретарь

Имеется отзыв ведущей организации Самарского национального исследовательского университета имени С.П.Королева. Отзыв составлен директором института двигателей и энергетических установок Самарского национального исследовательского университета имени Королева,

профессором Ермаковым Александром Ивановичем, доктором технических наук, заведующим кафедрой «Технологий производства двигателей» Самарского национального исследовательского университета имени С.П. Королева, профессором Скуратовым Дмитрием Леонидовичем, доктором технических наук, доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой «Основы конструирования машин» этого же университета, профессором Балякиным Валерием Борисовичем. Отзыв положительный. Отмечается актуальность темы, новизны и степень обоснованности, достоверность полученных результатов, практическая значимость. Результаты получены лично соискателем в публикациях и апробации работы.

Вместе с тем отзыв содержит пять замечаний, которые я с Вашего позволения зачитаю.

Первое замечание: недостаточно внимания уделено методам обеспечения динамического качества высокоскоростных ШУ за счет технологичности их изготовления и применения новых материалов.

Второе замечание: При постановке задач соискатель не провел оценку влияния таких технологических погрешностей изготовления как отклонения от круглости (гранность, волнистость и т.д.) беговых дорожек колец подшипников качения опор шпиндельного узла на динамику шпинделя. При том, что разработанная математическая модель учитывает влияние данных погрешностей на радиальные колебания шпинделя. Такая информация была бы полезной для полной оценки адекватности предлагаемой математической модели.

Третье замечание: При визуализации результатов математического моделирования (рис. 2.12, 2.13) для большей наглядности следовало использовать в качестве единиц измерения частоты герцы, а не частотные отсчеты.

Четвертое: Для большей наглядности оценки вклада электромагнитных сил в колебания шпиндельного узла нужно было привести в дополнение к частотно-временным разложениям (рис. 4.6 а, б, в), привести временные реализации колебаний шпиндельного узла с учетом влияния привода и без, т.е. на свободном выбеге.

Последнее замечание: При проведении экспериментальных исследований следовало дать оценку параметрам осевых колебаний шпиндельного узла.

Выше перечисленные замечания не снижают ценности результатов работы и носят рекомендательный характер.

И в заключение приводится общая характеристика диссертационной работы Гаспарова Э.С.

Отмечается в частности, что диссертация соответствует пункту 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации, тема, цель, задачи и содержание диссертационной работы соответствуют заявленной научной специальности 05.02.07., работа выполнена на достаточно высоком научно-теоретическом уровне, методы и средства теоретических и экспериментальных исследований современны и адекватны решаемым задачам. Новые научные и прикладные результаты, полученные соискателем в диссертационной работе, достоверны и достаточны для обоснования сделанных выводов. Диссертация имеет практическую ценность т.к. разработанные соискателем способ определения предварительного натяга опор шпиндельных узлов и методика диагностирования могут быть использованы в автоматизированном производстве для текущего контроля динамического качества шпиндельных узлов. Перспективы использования результатов диссертационной работы в машино- и приборостроении достаточно широки. Диссертационная работа в достаточной степени апробирована, что подтверждает семнадцать публикаций в научно-технических изданиях, докладов на научно-технических конференциях, причем семь изданий из перечня ВАК. Результаты работы внедрены в производство. Кроме того имеется положительное решение на патент по заявке. Содержание автореферата отражает основные положения диссертационной работы и главные доказательства их истинности.

И в заключении отмечается, что диссертация Гаспарова Эрика Сергеевича представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, имеющее значение для обеспечения динамических показателей шпиндельных узлов на стадии проектирования и этапе эксплуатации путем автоматизации процессов диагностирования и организации мониторинга текущего состояния опор шпиндельных узлов, а также других роторных систем на опорах качения.

С учетом ранее изложенного считаем, что представленная диссертационная работа Гаспарова Э.С. удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор, Гаспаров Эрик Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и утвержден на расширенном заседании кафедры технологии производства двигателей.

Все. У меня все.

Председатель

Вопросы, замечания есть?(нет)

Председатель

Значит на автореферат диссертации поступило 12 отзывов. Все они положительные. Предлагается заслушать обзор отзывов. Возражения? Нет возражений?(нет).Пожалуйста.

Ученый секретарь

Как было отмечено на автореферат диссертации поступило 12 отзывов.

Первый отзыв поступил из Донского государственного технического университета. Подписан отзыв заслуженным изобретателем, доктором технических наук зав. каф. «Информационное обеспечение автоматизированных технологических комплексов» профессором Шишкаревым М.П. Замечаний три: 1. Не ясно, какой смысл соискатель вкладывает в понятие «динамическое качество..» неоднократно упоминаемое в автореферате. 2. В разделе «Научная новизна работы» пункт 3, скорее всего относится к практической значимости работы. 3. Из автореферата непонятно, как соискатель выделяет при проведении экспериментов амплитудную составляющую, вносимую в картину колебательного процесса опорами качения, в общем спектре колебаний шпиндельного узла.

Второй отзыв из Саратовского государственного технического университета. Отзыв подготовлен профессором Игнатьевым А.А. 1. Не указано, откуда взяты значения параметров(с.10) для моделирования АЧХ (рис.3); 2. В материалах по главе 3 (с.12) «перспективная частота вращения шпинделя», но не поясняется, что под этим понимается. 3. Не уточнено, как все-таки выбирается диапазон скоростей вращения шпинделя по двум критериям (с14).

Третий отзыв также из Саратовского государственного технического университета, подписан профессором Насад Т.Г., два замечания: Какой тип датчика температуры был использован в ИИС, как производилась обработка экспериментальных данных и какова погрешность измерений? Для подтверждения эффективности предложенной методики и программного обеспечения целесообразно рассчитать предполагаемый экономический эффект от внедрения результатов исследования

Четвертый отзыв из Севастопольского государственного университета подписанный заведующим кафедрой «Технология машиностроения» профессором Братаном С. М. 1. Некоторые грамматические неточности в

автореферате: масштаб и качество схемы на рис.8 затрудняют восприятие данной иллюстрации даже в электронном виде; 3. Частота вращения шпинделя обозначается «об/мин», хотя правильнее было бы обозначать «мин⁻¹». Из автореферата неясно, возможно ли результаты проведенных исследований применить для шпиндельных узлов с газостатическими (аэростатическими) или газомангнитными опорами с осевыми подпятниками, например, из углеграфита?

Пятый отзыв из Тульского государственного университета профессором Трушиным Н.Н. и доцентом Золотых С.Ф.. Замечания 1.С целью упрощения модели механической системы шпинделя соискатель пренебрегает массой шариков подшипников. Однако такой подход не является надежным; как в процессе экспериментов учитывалось воздействие на испытуемый шпиндель сил резания? Низкое качество рисунка 8 не позволяет адекватно оценить разработанное программное обеспечение для вычисления вибродиагностических критериев. Непонятно, где в математической модели учитывается нелинейная жесткость упругих связей? На стр. 7 автореферата $S_{общ}$ выражена линейной зависимостью; не совсем понятна процедура замены системы уравнений с механическими параметрами на аналогичную систему уравнений с электрическими параметрами.

Шестой отзыв из Пермского национального исследовательского университета подписан зав. каф. Ивановым В.А. и доцентом Никитиным С.П. 1.Из автореферата не ясно, в какой степени предложенная методика повышения динамического качества ШУ учитывает изменение тепловых процессов в шпиндельной опоре при варьировании предварительного натяга; 2. Некоторая небрежность в представлении схемы программного обеспечения не позволяет в полной мере оценить предложение по рациональному выбору режима работы ШУ.

Седьмой отзыв из Брянского государственного технического университет кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», подписан зав. каф. Хандожко А.В. Из автореферата, неясно пригодна ли предложенная методика диагностирования (включая техническое оснащение) для произвольного шпинделя (шпиндельного узла) или полученные характеристики являются параметрами конкретного изделия, которые не переносимы для других конструкций? Представляет интерес, в какой мере изменяются динамические характеристики шпиндельного узла во времени. В автореферате такой информации нет, но она может быть интересной как для конструкторов, так и для механиков контролирующих состояние оборудования..

Восьмой отзыв из Волгоградского государственного технического университета, подписан зав. каф. «Автоматизация производственных процессов» профессором Сердобинцевым Ю.П. и доцентом Крыловым Е.Г. В

автореферате не приведено обоснование численных значений параметров для построения трехмерной АЧХ механической системы представленной на рис.3

Девятый отзыв из Иркутского национального исследовательского технического университета, подписан зав. каф. «Технологии и оборудования машиностроительных производств» профессором Лукьяновым А.В. и мл. научным сотрудником Алейниковым Д.П. Известно, что увеличение радиально-осевого натяга снижает ресурс подшипников. Из автореферата, не ясно проводились ли автором расчеты средней наработки на отказ подшипников ШУ с различными усилиями предварительного натяга. Не приведена блок-схема программы вычисления диагностических признаков, а приведенный на рис. 8 графический код не нагляден.

Десятый отзыв из Омского государственного технического университета, подписан зав. каф. «МСИ» профессором Поповым А.Ю. и доцентом Реченко Д.С. Из автореферата не ясно, как изменяется АЧХ при работе ШУ с инструментом и без.

Одиннадцатый отзыв из Ковровской государственной технологической академии, подписан зав.каф. «Технология машиностроения» профессором Житниковым Ю.З. 1. В автореферате не обоснован, а представлен диагностический критерий качества ШУ. 2. Рекомендованный рациональный диапазон частот вращения шпинделя представлен в выводах, но не обоснован в автореферате;

И последний отзыв из Липецкого государственного технического университета, подписан Почетным работником ВПО, зав.каф. «Технология машиностроения» профессором Козловым А.М. 1. Не ясно шпиндельные узлы, каких станков анализировались - для обработки тел вращения или корпусных деталей? Из материалов автореферата неясно, почему качество шпиндельного узла, определяемое величиной предварительного натяга, называется динамическим?

У меня все.

Председатель

Спасибо. Эрик Сергеевич, пожалуйста. Только хотелось бы, чтобы четко сказали, с чем согласны, и замечания, на которые отвечаете. Замечаний много.

Соискатель

По Саратовскому государственному университету, отзыв составленный профессором Игнатьевым А.А.: Не уточнено, как все-таки выбирается диапазон скоростей вращения шпинделя по двум критериям. На заявленном

производителем диапазоне выбирается наименее виброактивная точка, а далее по уровню 3 дБ выбираются границы.

По поводу вопроса из государственного университета города Севастополя. Вопрос: возможно ли результаты проведенных исследований применить для шпиндельных узлов с газостатическими (аэростатическими) или газомангнитными опорами с осевыми подпятниками, например, из углеграфита? В принципе общий подход возможно применить, но при этом надо учитывать что данные опоры имеют другую природу.

По поводу вопроса из Тульского государственного университета: Непонятно, где в математической модели учитывается нелинейная жесткость упругих связей? На стр.7 автореферата $C_{\text{общ}}$ выражена линейной зависимостью; Да, я не стал расшифровывать данный параметр, так как подход, который я использовал этого не требует, а в математической модели в электрической системе введена нелинейная характеристика.

Брянский технический университет: из автореферата, неясно пригодна ли предложенная методика диагностирования (включая техническое оснащение) для произвольного шпинделя (шпиндельного узла) или полученные характеристики являются параметрами конкретного изделия. Да, являются пригодными.

Председатель

Эрик Сергеевич, не надо повторять вопросы. Все вопросы которые были связаны с невозможностью все показать в автореферате с ними надо соглашаться. Если они принципиальные, тогда надо ответить.

Соискатель

Да объем автореферата ограничен, поэтому со многими вопросами я согласен.

Председатель

Все у вас да?

Соискатель

Да

Председатель

Есть предложение сделать перерыв минут на пять на семь, а потом продолжить.

Соискатель

По поводу замечаний ведущей организации...

Ученый секретарь

А с ответами на замечания, по отзывам на автореферат вы закончили?

Соискатель

Да, я сказал, что с остальными согласен.

По поводу замечаний ведущей организации я не соглашусь только со вторым вопросом. В перечень поставленных задач это не входило и некоторые возражения по последнему вопросу по оценке осевых колебаний, скажу, что они менее значимы, поэтому они не исследовались. С остальными замечаниями я полностью согласен.

Председатель

Так, хорошо спасибо. Вопросы? (Нет). Слово предоставляется официальному оппоненту доктору технических наук профессору Янкину Игорю Николаевичу, пожалуйста.

д.т.н. Янкин И.Н.

Я с Вашего позволения прочитаю

Общая характеристика работы и соответствие темы диссертации паспорту научной специальности. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, содержит 62 рисунка и 15 таблиц. Общий объем диссертации 174 страницы, включая приложения на 7 страницах, в которых приведены копии документов, подтверждающих внедрение результатов работы в производство, тексты и блок-схемы компьютерных программ, свидетельства об утверждении средств измерения и расчет предполагаемой экономической эффективности. Структура диссертации построена логически верно. Первая глава посвящена аналитическому обзору состояния вопроса, постановке цели и задач исследования. Во второй главе описывается разработанная автором модель динамики подшипниковой опоры шпиндельного узла с учетом нелинейной упругой характеристики в системе «шарик - дорожка качения» и кинематического возмущения за счет их отклонений от геометрически правильных форм, уравнения движения и их аналитическое решение, излагаются результаты теоретических исследований влияния предварительного натяга в подшипниковой опоре на динамические характеристики шпиндельного узла, делается вывод о наличии связи между

величиной предварительного натяга и амплитудно-частотными характеристиками шпиндельного узла в области передней опоры, приводятся результаты теоретического исследования влияния преобразующих свойств элемента с нелинейной упругой характеристикой на амплитудно-частотную характеристику узла при гармоническом возмущении от дисбаланса ротора шпинделя. В третьей главе дается описание разработанного автором экспериментального стенда, обосновывается выбор информационных точек для регистрации колебаний, приводится методика экспериментального исследования, методика обработки сигнала колебательного процесса и результаты экспериментальных исследований по установлению связи спектрального состава колебаний с величиной предварительного натяга. В четвертой главе диссертации приводятся обоснование возможности и разработанные критерии оценивания величины предварительного натяга, методика функциональной диагностики шпиндельного узла по его амплитудно-частотной характеристике, получаемой из колебательного процесса путем возмущения механической системы изменяемой частотой вращения шпинделя, показана эффективность использования биспектрального преобразования для выделения информационной составляющей из зашумленного сигнала, даются основы разработки системы функционального диагностирования по динамическому критерию.

По каждой главе имеется вступительная часть, в которой излагаются решаемые в ней задачи и заключительная часть, в которой приводятся результаты и основные выводы. В целом по объёму и структуре диссертация соответствует установленным требованиям. Автореферат раскрывает основные положения диссертации, а тема диссертационной работы соответствует заявленной специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (пункты 1, 4 и 5 паспорта специальности).

Актуальность темы диссертации. Шпиндельные узлы (ШУ) являются наиболее ответственными элементами динамической системы станка. Их динамическое качество во многом определяется качеством функционирования шпиндельных опор. И здесь важная роль отводится не только точности изготовления подшипников, качеству сборки опор шпинделя, но и созданию оптимальных условий их эксплуатации в шпиндельном узле, что достигается настройкой оптимального предварительного натяга в подшипниковых опорах.

Величина предварительного натяга оказывает значимое влияние на основные параметры функционирования шпиндельного узла - на тепловой

режим в опорах, на точность вращения оси шпинделя, на жесткость и виброустойчивость, на ресурс работы шпиндельного узла. Поэтому важное значение в шпиндельных узлах отводится способам создания и обеспечения оптимального натяга в подшипниковых опорах. Особую значимость они приобретают для высокоскоростных шпиндельных узлов. Целью диссертации является обеспечение динамического качества высокоскоростных ШУ на основе прогнозирования динамического качества подшипниковых узлов и экспериментальной оценки усилия предварительного натяга опор методом безразборного контроля, что определяет на актуальность темы.

Новизна проведенных исследований и полученных результатов, выводов, рекомендаций.

С величиной предварительного натяга коррелируются такие параметры, как жесткость переднего конца шпинделя, тепловой режим опор, момент вращения шпинделя на холостом ходу, форма траектории вращения переднего конца шпинделя, уровень виброактивности шпиндельных опор.

В принципе каждый из указанных параметров может быть использован в качестве информационного критерия для оценивания и поддержания величины натяга в оптимальном диапазоне. Автор же выбрал наиболее чувствительный фактор для оценивания динамического качества шпиндельного узла и величины натяга в опорах в виде свойств колебаний, которые генерируются в опорах шпиндельного узла, что во многом определило новизну подхода к решению задач диссертации. Новизну проведенных исследований отражают следующие положения:

1. Разработанная структурно-параметрическая модель опоры качения с нелинейной упругой характеристикой и ее математическое описание, позволившие автору увязать в единый комплекс инерционно-жесткостные и диссипативные характеристики шпиндельного узла с кинематическим возмущением от движения тел качения по дорожкам подшипника и с силовым воздействием на шпиндельные опоры.
2. Полученные аналитические решения математической модели, позволившие автору установить зависимость амплитудно-частотных характеристик шпиндельного узла от величины предварительного натяга в подшипниковых опорах и выявить влияние на нее преобразующих свойств нелинейной подсистемы «шарики-дорожки качения».
3. Обоснование диагностических критериев для оценивания величины предварительного натяга в опорах безразборным способом по характеристикам колебательного процесса, возбуждаемого в шпиндельном узле.
4. Предложенная научно обоснованная методика диагностирования

предварительного натяга способами тестовой и функциональной диагностики на основе анализа частотных составляющих колебательного процесса, возбуждаемого ударным способом или динамическим воздействием вращающегося неуравновешенного шпинделя.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Обоснованность научных положений подтверждается:

- корректностью использования методов разработки модели динамики подшипниковой опоры шпиндельного узла с учетом нелинейной упругой характеристики и кинематического возмущения от перемещения тел по дорожкам качения, методов приведения инерционных, упругих и диссипативных характеристик шпиндельного узла к подшипниковым опорам;
- применением классической теории подобия динамических систем механической и электрической природы при выводе аналитического решения уравнений движения, использованием классической теории электрических цепей и методов цифровой обработки сигналов;
- применением современных компьютерных технологий и известных и апробированных пакетов прикладных программ для обработки и визуализации полученных экспериментальных зависимостей (пакет LabView для автоматизации научных исследований, визуальный язык программирования G);
- согласованностью экспериментальных данных с результатами теоретических исследований;
- апробацией научно обоснованных методик диагностики шпиндельных узлов на промышленных предприятиях, что подтверждено актами внедрения.

Экспериментальная часть работы выполнена на достаточно высоком техническом уровне с использованием современных измерительных приборов и оборудования, а также методик исследования и обработки экспериментальных данных. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается наличием документов об утверждении типа средств измерения, их поверке и корректностью методик проведения исследований.

Основные выводы диссертации являются научно обоснованными и отражают существо проведённых исследований. Выводы 2-4 раскрывают научные основы для реализации возможности диагностирования состояния предварительного натяга в подшипниковых опорах путем анализа амплитудно-частотной характеристики шпиндельного узла. Выводы 5-8 делаются на основе результатов экспериментальных исследований и описывают принципы реализации способа диагностирования предварительного натяга по динамическому критерию. Вывод 9-11

раскрывает основы реализации функциональной диагностики шпиндельного узла. Вместе с тем, большая часть выводов носит констатирующий характер. Практическая значимость результатов работы. В результате выполненного исследования предложены способы оценивания величины предварительного натяга в опорах, в основе которого лежит его корреляция с амплитудно-частотной характеристикой шпиндельного узла, что позволило решить задачу настройки предварительного натяга без проведения операции разборки. Указанные способы подкреплены соответствующими конструкторскими решениями по оснащению измерительного стенда, выбором регистрирующей аппаратуры, методическими рекомендациями и программной поддержкой процесса диагностирования шпиндельных узлов без применения разборных операций.

Публикации по работе. Основные результаты диссертационной работы изложены в 17-ти публикациях и доложены на научно-технических конференциях различного уровня. Из них 7 работ опубликованы в рецензируемых изданиях и журналах, рекомендованных ВАК РФ, имеется положительное решение на патент. Все опубликованные работы соответствуют теме и отражают основное содержание диссертации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Результаты, полученные в работе, ориентированы на использование в технологическом оборудовании, реализующем высокоскоростную механическую обработку, прежде всего, на внутришлифовальных станках, которые находят широкое применение в подшипниковой промышленности, в частности, на предприятиях группы компаний ЕПК. Разработанные в диссертации способы тестовой и функциональной диагностики могут найти применение не только для настройки оптимального натяга в опорах шпинделя, но и для выявления начальной стадии образования неисправностей в подшипниках, которые впоследствии могут привести к снижению качества или появлению брака обрабатываемых деталей.

Рекомендации по использованию материалов диссертации в учебных целях. Научные положения работы могут быть использованы в учебном процессе при изучении дисциплин, в которых излагаются вопросы моделирования динамики технологических систем, способы наладки и оптимальной настройки технологического оборудования по различным критериям, включая минимизацию уровня виброактивности опор. На базе экспериментального стенда целесообразно создать учебно-исследовательские работы по изучению параметрического возмущения в

опорах шпиндельного узла, связи динамических явлений с характеристиками механической системы и условиями эксплуатации шпиндельных узлов.

Замечания по существу работы

1. Шпиндельный узел в диссертации рассматривается как свободная колебательная система. Однако при механической обработке на нее накладываются новые динамические связи в виде подсистемы «инструмент - процесс резания», что может оказывать влияние на результаты исследования. В этой связи необходимо отметить, что добавление к динамической системе шпиндельного узла дополнительного упруго-диссипативного элемента, моделирующего колебательную систему оправки с инструментом, замкнутой на процесс резания, могло бы существенно повысить адекватность разработанной модели реальным условиям эксплуатации шпиндельного узла.
2. В модели колебательной системы шпиндельного узла не учитывается вязкое сопротивление в подсистемах «наружное кольцо подшипника - корпус шпиндельного узла» и «корпус шпиндельного узла - станина». Автор ссылается на их малую значимость, однако не приводит источники информации. Вместе с тем, не учет вязкого сопротивления может оказывать существенное влияние на амплитудно-частотные характеристики узла в области значений их собственных частот.
3. В заключении главы 3 определены численные значения границ рекомендуемых частот вращения шпинделя с минимальной виброактивностью, однако не указаны критерии определения или расчета указанных границ.
4. В третьей главе диссертации для выявления связи между динамическими характеристиками шпиндельного узла и величиной предварительного натяга применен метод ударного воздействия с регистрацией и последующей обработкой затухающего вибрационного сигнала. Однако на подобные испытания имеется ГОСТ "Р 53190-2008" - (Испытания на удар с воспроизведением ударного спектра), на который автор не ссылается. Указанный ГОСТ устанавливает правила нанесения удара и выделения из регистрируемого сигнала ударного импульса и исследуемой информационной составляющей.
5. Не ясно, почему автор для получения аналитического решения математической модели динамики шпиндельной опоры использует переход на электрические аналоги. Ведь для решения систем нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих движения механических систем, известны хорошо разработанные асимптотические методы нелинейной механики.

Замечания по терминологии:

1. Термин «значение относительной частоты пика», которым автор обозначает вычисляемую частоту центра тяжести частотного диапазона, не отражает смысл этого параметра. Целесообразнее

было бы его обозначить в соответствии с методикой его вычисления, например, «интегральная частота».

2. В диссертации на стр. 87 допущено некорректное выражение «.. экспериментальное исследование влияния значения такого конструктивного параметра как предварительный натяг ..». Предварительный натяг является не конструктивным, а настроечным параметром шпиндельного узла.

Заключение. На основании изучения содержания диссертационной работы, ее автореферата и публикаций считаю, что диссертация Гаспарова Э.С. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Проведенные автором исследования и полученные результаты обладают научной новизной, практической значимостью и вносят значительный вклад в решение актуальной научно-технической задачи повышения динамического качества высокоскоростных шпиндельных узлов. Достоверность и обоснованность результатов не вызывает сомнений. Материал диссертации изложен грамотно с использованием принятой в машиностроении терминологии, текст диссертации хорошо иллюстрирован. Содержание исследований достаточно полно отражено в открытой печати и представлено на научно-технических конференциях.

Считаю, что диссертационная работа по своему содержанию, актуальности, научной новизне и практической значимости полностью отвечает требованиям ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям и определенным «Положением о порядке присуждения ученых степеней» № 842 от 24.09.2013г., а ее автор, Гаспаров Эрик Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Председатель

Все присаживайтесь Игорь Николаевич. Соискатель, пожалуйста, ответьте на замечания.

Соискатель

Я соглашусь с первыми двумя замечаниями. По поводу границ частот вращения шпинделя скажу, что они устанавливались по уровню 3 дБ. По поводу того что нет ссылки на ГОСТ, дело в том что данный ГОСТ имеет сферу применения: это ударные воздействия, испытания на стойкость. Данный ГОСТ рекомендует наличие электрогидравлических или электромеханических стендов, что, в конечном итоге, т.к. у нас система

диагностическая уменьшит, ее конкурентоспособность. По поводу последнего вопроса, почему я не использовал имеющиеся методы решения уравнений. Дело в том, что нет единого общего подхода к решению нелинейных дифференциальных уравнений. Имеющиеся методы, приближенные, в случае, если возмущающая сила очень сложная. В моем случае подход обеспечивает то, что нет никакой зависимости от вида возмущающей силы.

Председатель. Игорь Николаевич Вы удовлетворены ответом?

Янкин И.Н.

Да.

Председатель

Слово предоставляется второму оппоненту кандидату технических наук Башарову Рашиту Рамиловичу. Пожалуйста.

к.т.н. Башаров Р.Р.

Здравствуйте уважаемые члены совета. Конкурентоспособность металлообрабатывающего оборудования в значительной степени определяется параметрами его работоспособности, к которым относятся: точность, жесткость, виброустойчивость и др. Производительность обработки и качество изготавливаемых деталей зависят от ряда факторов, в частности, от динамических процессов, происходящих в технологическом оборудовании.

Особенностью современного технического прогресса в машиностроении является повышение скоростей резания, увеличение частот вращения шпинделей станочного оборудования, сокращение времени холостых ходов и вспомогательных перемещений. Всё это направлено на увеличение производительности при обработке деталей. Исследования, связанные с повышением геометрической, кинематической и динамической точности оборудования и его узлов остаются актуальными.

Устройством металлообрабатывающего станка, в значительной степени определяющим показатели его работы, является шпиндельный узел. Основные требования, предъявляемые к ШУ: высокая точность, высокая быстроходность, высокая нагрузочная способность, высокая статическая жесткость, виброустойчивость, малые статические, динамические и температурные смещения конца шпинделя, высокий ресурс работы. В станкостроении наблюдается тенденция оснащения станков

мехатронными узлами, особенно – шпиндельными мехатронными модулями, обладающими высокими скоростями вращения. Важными элементами шпиндельных узлов являются их подшипниковые узлы. Жёсткость опор в значительной степени определяет жёсткость шпиндельного узла, тем самым оказывая решающее влияние на точность и производительность станка. Постоянная тенденция к повышению скоростей резания обуславливает разработку и применение гидростатических, гидродинамических, аэростатических, электромагнитных опор. Их них, каждый тип имеет свои характеристики, достоинства и недостатки. Области использования этих подшипников зависят от условий работы, а также точностных, скоростных и других эксплуатационных показателей. В настоящее время 90% высокоскоростных шпиндельных узлов оснащаются классическими или гибридными (со стальными кольцами и керамическими шариками) подшипниками качения.

Шарикоподшипник представляет собой систему с весьма большим числом степеней свободы. По шесть степеней свободы имеют ротор, корпус, тела качения, сепараторы. Поэтому описание и математический расчёт данных систем является сложной задачей, чаще всего при этом учитывается одновременное влияние большого количества факторов, таких как центробежные силы, гироскопические моменты, параметры смазки, дефекты деталей, температурных деформаций, особенностей работы и т.д.

Учитывая вышеизложенное, считаю, что диссертационная работа Гаспарова Э.Д., посвященная исследованию динамического качества высокоскоростных шпиндельных узлов является актуальной для машиностроения. Оценка структуры и содержания работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы (190 источников) и 7 приложений. Объем диссертации – 174 страницы, включая 62 рисунка и 15 таблиц в тексте.

По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и сформулирована цель работы. Обоснована научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Изложены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о публикациях и апробации результатов работы.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы обеспечения динамического качества шпиндельного узла. Основное внимание уделено методам обеспечения динамического качества шпиндельных узлов (методы математического моделирования шпиндельных узлов, методы обеспечения технологичности изготовления и удобной сборки

шпиндельных узлов, обеспечение динамического качества шпиндельных узлов путем применения методов технической диагностики и уточнения условий эксплуатации.

Результатами исследований, изложенных во второй главе являются полученные аналитические функциональные зависимости колебаний элементов опоры от силовых воздействий, с учетом предварительного натяга и жесткостных характеристик.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям с целью поиска диагностических признаков для оценки значения оптимальной величины предварительного натяга. В итоге на основе анализа спектра виброускорений определен эффективный критерий в виде «относительной частоты пика».

Также в данной главе проведен экспериментальный поиск диагностических точек шпиндельного узла для проведения мероприятий, связанных с диагностикой опор шпиндельного узла.

В четвертой главе проведена оценка возможности исследования спектра виброускорений шпиндельного узла для оценки предварительного натяга при его работе на холостых ходах. Уточнены диагностические критерии:

- критерий по частоте (вычисляемый как абсцисса «центра тяжести»);
- критерий по мощности (вычисляемый как ордината «центра тяжести» выбранного частотного участка спектра).

В итоге проведенных экспериментов подтверждена эффективность выбранных диагностических критериев и доказано, что использование двух критериев позволяет повысить точность при определении предварительного натяга. Также, в данной главе показана возможность оценки величины предварительного натяга методом биспектрального анализа вибрационного сигнала.

В заключении диссертационной работы, на основе полученной соискателем совокупности результатов исследований, приведены основные выводы по работе, показывающие достижение поставленной цели. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации:

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций и заключения, приведенных в диссертации, подтверждается корректным использованием современных методов математического анализа, приведенными результатами натуральных экспериментов, апробацией основных результатов на конференциях и семинарах, в опубликованных работах и актами внедрения результатов диссертационной работы.

Достоверность и новизна полученных результатов. К новым научным результатам относятся:

- разработанная структурно-параметрическая и математическая модель опоры качения шпиндельного узла с нелинейной упругой характеристикой типа Герца, позволяющая дать качественную оценку вибровозмущений в зависимости от условий работы опоры.

- предложенный и обоснованный выбор диагностических критериев, позволяющих без разборки шпиндельного узла, оценить значение предварительного натяга его опор и назначить рациональные частоты вращения шпинделя. Достоверность результатов подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Разработанные структурно-параметрическая и математическая модель опоры качения ШУ с нелинейной упругой характеристикой типа Герца и аналитическое решение математической модели несут несомненную значимость для науки и практики в вопросах нахождения оптимального решения при проектировании шпиндельного узла или внесения в нём конструктивных изменений.

Предложенный автором диагностический критерий (относительная частота пика) позволяет с высокой точностью проводить оценку значения величины предварительного натяга опор шпиндельного узла. Применение данного критерия и учёт собственных частот колебаний шпиндельного узла позволяет разрабатывать рекомендации по назначению величины предварительного натяга опор и рабочих диапазонов частот вращения шпиндельного узла, с целью снижения его виброактивности и повышения точности обработки. Замечания по диссертационной работе

1. Не проведена оценка в количественном виде адекватности разработанных математических моделей по сравнению с результатами экспериментальных исследований.

2. Не уделено внимание вопросам формирования базы эталонных значений критериев.

3. В тексте работы не показано, каким способом осуществлялось крепление датчика виброускорения на элементы шпиндельного узла.

4. В работе приведены различные значения предварительного натяга при исследованиях (стр. 100, стр. 130, стр. 134).

5. Почему на графике зависимости относительной частоты пика от предварительного натяга (рис 3.12) исследуется натяг до 126 Н а на рисунке 3.15 до 57 Н?

6. Отсутствуют ссылки в тексте диссертации на использованную литературу под номерами 37, 148, 184, 187, 190.

7. Автор использует различные размеры символов в формулах и обозначениях (стр. 31, 56, 69, 96, 126).

Заключение. К достоинствам данной работы относятся разработанные: структурно-параметрическая и математическая модель опоры качения шпиндельного узла с нелинейной упругой характеристикой типа Герца; методика диагностирования и алгоритмы проведения анализа диагностических данных исследуемого объекта посредством цифровой обработки вибрационных сигналов. Работа отражает высокий профессиональный уровень и знания соискателя в области вибродиагностики, динамики оборудования и программирования. Отмеченные замечания не снижают достоинств работы в научном и практическом плане.

Диссертация Гаспарова Эрика Сергеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи обеспечения динамического качества высокоскоростных шпиндельных узлов, имеющей существенное значение для соответствующей отрасли знаний, а именно для станкостроительной и металлообрабатывающей отраслей, что соответствует требованиям п. 9 «Положение о присуждении ученых степеней». Автор работы Гаспаров Э.С. заслуживает присуждения искомой ученой степени. Призываю всех поддержать работу.

Председатель

Спасибо садитесь. Прошу Эрик Сергеевич.

Соискатель

По поводу первых двух замечаний я соглашусь. По поводу крепления датчика – значит крепление резьбовое. Применение других видов креплений зависит от того какой интервал частот анализируется. При применении воска или клея уменьшается частотный интервал, который анализируется. По поводу разных значений натяга скажу, что динамическая грузоподъемность данных подшипников порядка 5,6 кгс. В любом случае я охватывал весь возможный диапазон предварительного натяга. По поводу того что тестовыми методами натяг до 126 Ньютон, дело в том, что есть справочная информация, что на малых частотах вращения интервал натяга может быть увеличен, поэтому я анализировал так. Эксперименты были разнесены по времени в связи с этим я не придерживался одинаковых значений. По поводу

ссылки в тексте диссертации на используемую литературу, да действительно я это обнаружил причем одна из ссылок на мою статью это произошло в связи с тем что очень часто менялась нумерация. Вот и все.

Председатель

Вас удовлетворили ответы?

к.т.н Башаров Р.Р.

Да, полностью.

Председатель

Спасибо садитесь.

Председатель

Ну, приступим к дискуссии наверно. Кто хочет сказать? Пожалуйста, профессор Горшков Б.М.

д.т.н., профессор Горшков Б.М.

Уважаемые коллеги! Шпиндельные узлы, высокоскоростные шпиндельные узлы являются весьма ответственными узлами, потому, что они в значительной степени определяют точность обработки. Здесь же связь просматривается с опорой. Опоры, которые используются в узлах, они несколько необычны. Во-первых это подшипники радиально-упорные подшипники, и класс точности который меня поразил. Знаете, что класс точности первый самый высокий, второй пониже, третьего нет, четвертый еще хуже, пятый, шестой и нулевой - народное хозяйство. Вы видите, где по этой линейке находится подшипник? второй класс точности! Это говорит об ответственности данного узла. Если говорить о стоимости, то второй класс, от нулевого отличается на порядок. Вроде по виду они одинаковые, а качество их небо и земля. Такие подшипники обычно используются или в военной области или используются в области связанной вот с такими высокоточными прецизионными узлами. Данная работа посвящена вот таким исследованиям. Эти исследования я считаю весьма актуальными, весьма нужными. Те натяги, которые созданы в подшипниках вы наверно знаете и знаете, конечно, что внутреннее кольцо оно насаживается на вал, кольцо наружное оно находится в свободном состоянии. Это условное свободно состояние, с минимальным зазором. Это сделано специально, чтобы волна деформации от натяга, который существует в подшипнике в данном месте не выбивала лунку и оно вращается при этом точность узла не уменьшается. В

данной работе рассмотрена модель, весьма очень интересная модель плоского характера. Дело в том, что данная работа может быть продолжена в дальнейшем. При резании возникают осевые силы. Подшипник, радиально-упорный подшипник, поэтому осевую силу он воспринимает. Она незначительна эта сила. В данной работе это не является погрешностью. Поэтому, когда оппонент говорил об этом недостатке, я считаю его несущественным, понимаете? Хотя в дальнейшем она может быть учтена. Модель она конечно громоздкая, но для этого существует каноническая форма, что бы записать уравнение, вот Зибров П.Ф. меня в этом поддержит. Нужно привести размеры к более удобной форме для вычислений. Работа сделана большая. Время и сил потрачено много. Она очень наглядная. Я думаю, что она будет полезна не только для науки, но и для производства. Я буду поддерживать эту работу, голосовать за и призываю Вас поддержать эту работу. Спасибо.

Председатель

Спасибо садитесь. Есть желающие? Кирилин Юрий Васильевич.

д.т.н., доцент Кирилин Ю.В.

Я эту работу второй раз слушаю, на предварительном заседании рассмотрели и вот сейчас. Вот если сравнивать впечатления, что было и сейчас: небо и земля. Доклад мне понравился, несомненно. Ответы на вопросы тоже. Ни один вопрос его в тупик не поставил, подробно рассказал буквально обо всем. Это мне тоже понравилось. Что касается научной новизны, практической полезности все в работе есть, но маленькое замечание я все-таки сделаю. Я взял автореферат и вот научная новизна, три пункта здесь написано. Никаких сомнений, что научная новизна в структурно-параметрической и математической модели есть. Или третий пункт - разработаны методики диагностирования. А вот второй пункт мне не понравился: научная новизна заключается в выполненном обоснованном выборе диагностических критериев, позволяющих оценить значение предварительного натяга. Каких критериев? Их же здесь надо перечислить. Чтобы это ясно было. И тогда никаких вопросов не возникнет. Маленькое замечание. Что касается самой работы мне она очень понравилась, я буду голосовать за.

Председатель

Так, еще желающие, пожалуйста.

д.т.н., профессор Салов М.П.

Работа я считаю стройная. В ней все есть. Автор разработки проявил хорошую осведомленность материала, который рассматривал. Работа сделана большая. Я считаю, что работа достойная, и я буду голосовать за.

Председатель

Так еще желающие? Заканчиваем? (да)

Председатель

Так мы переходим к тому, что предоставляем заключительное слово соискателю. Эрик Сергеевич.

Соискатель

Первоначально хочу выразить большую благодарность своему руководителю за то, что принял в аспиранты, за то стратегическое планирование, осуществленное, результат которого то, что я здесь стою, спасибо жене приехала и помогла, спасибо сотрудникам Ульяновского государственного технического университета за гостеприимство и теплоту приема, спасибо членам диссертационного совета за то, что выслушали и положительно оценили.

Председатель

Переходим к голосованию. Есть предложение создать счетную комиссию и включить в состав комиссии следующих профессоров: Кирилина Юрия Васильевича, Клячкина Владимира Николаевича, Киселева Евгения Степановича. Возражения? Голосуем (да)

Председатель

Объявляю технический перерыв для голосования.

Председатель

Продолжаем работу и слово предоставляется председателю счетной комиссии Евгению Степановичу Киселеву.

д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Уважаемые коллеги. Комиссия в составе Киселева Е.С., Клячкина В.Н. и Кирилина Ю.В. приняла решение. Результаты следующие:

Оглашается протокол счетной комиссии
(Протокол счетной комиссии прилагается)

Председатель

Таким образом на основании тайного голосования за 18, против нет, недействительных нет, диссертационный совет при Ульяновском государственном техническом университете и Тольяттинском государственном университете признает: диссертация Гаспарова содержит решение задачи обеспечения динамического качества высокоскоростных узлов имеющей существенное значение для развития технологии механической обработки и соответствует требованиям к кандидатским диссертациям и присуждает Эрику Сергеевичу ученую степень кандидата технических наук по специальности 05.02.07.

Председатель

На руках у каждого члена совета имеется заключение. Давайте мы его оперативно посмотрим. Пожалуйста, замечания, предложения по заключению.

(обсуждение проекта)

Председатель

Кто за данное заключение прошу проголосовать.
 Кто за? (Все)
 Кто против? (Нет)
 Воздержался? (Нет)
 Принимается единогласно.

Заключение объявляется соискателю

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОБЪЕДИНЕННОГО ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 999.003.02 НА БАЗЕ ФГБОУ ВО «УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» И ФГБОУ ВО «ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» МИНИСТЕРСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело N _____
 решение диссертационного совета от 10 июня 2016 г. № 19

О присуждении Гаспарову Эрику Сергеевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Обеспечение динамического качества высокоскоростных шпиндельных узлов на основе моделирования и безразборной оценки состояния опор» по специальности 05.02.07 "Технология и оборудование механической и

физико-технической обработки" принята к защите 01 апреля 2016 года, протокол № 16, объединенным диссертационным советом Д 999.003.02 на базе ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» Министерства образования и науки РФ, 432027, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 и ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» Министерства образования и науки РФ, 445667, Самарская область, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14, приказ №123/нк от 17 февраля 2015 г.

Соискатель Гаспаров Эрик Сергеевич 1977 года рождения. В 2002 году соискатель окончил «Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева». В 2011 году окончил аспирантуру ФГБОУ ВПО "Самарский государственный технический университет" по специальности 05.02.07 "Технология и оборудование механической и физико-технической обработки". Работает инженером-программистом и ассистентом кафедры "Транспортные процессы и технологические комплексы" в ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический университет" Министерства образования и науки РФ.

Диссертация выполнена на кафедре «Автоматизированные станочные и инструментальные системы» в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Министерства образования и науки РФ.

Научный руководитель - доктор технических наук, Денисенко Александр Федорович, заведующий кафедрой "Автоматизированные станочные и инструментальные системы" ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический университет».

Официальные оппоненты:

Янкин Игорь Николаевич – доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», кафедра «Проектирование технических и технологических комплексов», профессор;

Башаров Рашит Рамилович – кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный авиационный технический университет", кафедра «Мехатронные станочные системы», доцент, дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» г. Самара в своем положительном отзыве, подписанном Прокофьевым Андреем Брониславовичем, доктором технических наук,

профессором, проректором по науке и инновациям ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»; Ермаковым Александром Ивановичем, доктором технических наук, профессором, директором института двигателей и энергетических установок ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»; Скуратовым Дмитрием Леонидовичем, доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой технологий производства двигателей ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»; Балякиным Валерием Борисовичем, доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой основ конструирования машин ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», указала, что диссертация Гаспарова Э.С. соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением №842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года и удовлетворяет требованиям ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор - Гаспаров Эрик Сергеевич - заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата наук по специальности 05.02.07 "Технология и оборудование механической и физико-технической обработки".

Соискатель имеет 18 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 17 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях 7. Объем научных изданий - 4,86 печатных листа, из них авторский вклад - 2,28 печатных листа. Соискателем опубликован 1 патент на изобретение.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации Э.С. Гаспарова:

Гаспаров, Э.С. Анализ сигналов виброускорения подшипниковых опор мотор-шпинделя / Э.С. Гаспаров, А.Ф. Денисенко, Л.Б. Гаспарова // Известия Самарского научного центра РАН, т. 14, №6, Самара, 2012. - С. 63-69. *Гаспаров, Э.С.* Экспериментальная оценка зависимости вибродиагностических параметров шпиндельного узла от величины предварительного натяга его опор / Э.С. Гаспаров, А.Ф. Денисенко, Л.Б. Гаспарова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», №2(46), 2015. - С.152-158. *Гаспаров, Э.С.* Определение усилия предварительного натяга подшипниковых опор шлифовального шпинделя / Э.С. Гаспаров, А.Ф. Денисенко, Л.Б. Гаспарова // «Сборка в машиностроении, приборостроении», №9, 2015. - С. 26-29. *Гаспаров, Э.С.* Определение величины установки предварительного натяга подшипниковых опор шпиндельного узла методом виброакустической диагностики / Э.С. Гаспаров, А.Ф. Денисенко, Л.Б. Гаспарова

// «Вестник машиностроения», №12, 2015. - С. 126-129.

На диссертацию и автореферат поступили **положительные** отзывы с замечаниями: **ведущей организации** - недостаточно внимания уделено методам обеспечения динамического качества высокоскоростных ШУ за счет технологичности их изготовления и применения новых материалов; при постановке задач соискатель не провел оценку влияния на динамику шпинделя таких технологических погрешностей изготовления как отклонения от круглости (овальность, огранка), волнистость и т.д.) беговых дорожек колец подшипников качения опор шпиндельного узла. При том, что разработанная математическая модель учитывает влияние данных погрешностей на радиальные колебания шпинделя. Такая информация была бы полезной для полной оценки адекватности предлагаемой математической модели; при визуализации результатов математического моделирования (рис. 2.12, 2.13) для большей наглядности следовало использовать в качестве единиц измерения частоты герцы, а не частотные отсчеты; для большей наглядности оценки вклада электромагнитных сил в колебания шпиндельного узла нужно было привести в дополнение к частотно-временным разложениям (рис. 4.6 а, б, в), временные реализации колебаний шпиндельного узла с учетом влияния привода и без, т.е. на свободном выбеге; при проведении экспериментальных исследований следовало дать оценку параметрам осевых колебаний шпиндельного узла; **официальных оппонентов: Янкина И. Н.** - Шпиндельный узел в диссертации рассматривается как свободная колебательная система. Однако при механической обработке на нее накладываются новые динамические связи в виде подсистемы «инструмент - процесс резания», что может оказывать влияние на результаты исследования. В этой связи необходимо отметить, что добавление к динамической системе шпиндельного узла дополнительного упруго-диссипативного элемента, моделирующего колебательную систему оправки с инструментом, замкнутой на процесс резания, могло бы существенно повысить адекватность разработанной модели реальным условиям эксплуатации шпиндельного узла; в модели колебательной системы шпиндельного узла не учитывается вязкое сопротивление в подсистемах «наружное кольцо подшипника - корпус шпиндельного узла» и «корпус шпиндельного узла - станина». Автор ссылается на их малую значимость, однако не приводит источники информации. Вместе с тем, не учет вязкого сопротивления может оказывать существенное влияние на амплитудно-частотные характеристики узла в области значений их собственных частот; В заключении главы 3 определены численные значения границ рекомендуемых частот вращения шпинделя с минимальной виброактивностью, однако не указаны критерии определения или расчета указанных границ; В третьей главе диссертации для выявления связи

между динамическими характеристиками шпиндельного узла и величиной предварительного натяга применен метод ударного воздействия с регистрацией и последующей обработкой затухающего вибрационного сигнала. Однако на подобные испытания имеется ГОСТ "Р 53190-2008" - (Испытания на удар с воспроизведением ударного спектра), на который автор не ссылается. Указанный ГОСТ устанавливает правила нанесения удара и выделения из регистрируемого сигнала ударного импульса и исследуемой информационной составляющей; Не ясно, почему автор для получения аналитического решения математической модели динамики шпиндельной опоры использует переход на электрические аналоги. Ведь для решения систем нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих движения механических систем, известны хорошо разработанные асимптотические методы нелинейной механики; Башарова Р. Р.- не проведена оценка в количественном виде адекватности разработанных математических моделей по сравнению с результатами экспериментальных исследований; не уделено внимание вопросам формирования базы эталонных значений критериев; в тексте работы не показано, каким способом осуществлялось крепление датчика виброускорения на элементы шпиндельного узла; в работе приведены различные значения предварительного натяга при исследованиях (стр. 100, стр. 130, стр. 134); почему на графике зависимости относительной частоты пика от предварительного натяга (рис 3.12) исследуется натяг до 126 Н а на рисунке 3.15 до 57 Н? отсутствуют ссылки в тексте диссертации на использованную литературу под номерами 37, 148, 184, 187, 190; автор использует различные размеры символов в формулах и обозначениях (стр. 31, 56, 69, 96, 126). ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» - не ясно какой смысл соискатель вкладывает в понятие «динамическое качество..» неоднократно упоминаемое в автореферате; В разделе «Научная новизна работы» пункт 3, скорее всего относится к практической значимости работы; Из автореферата непонятно, как соискатель выделяет при проведении экспериментов амплитудную составляющую, вносимую в картину колебательного процесса опорами качения, в общем спектре колебаний шпиндельного узла; ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им Гагарина Ю.А.» - не указано, откуда взяты значения параметров(с.10) для моделирования АЧХ (рис.3); в материалах по главе 3 (с.12) «перспективная частота вращения шпинделя», но не поясняется, что под этим понимается; не уточнено, как все-таки выбирается диапазон скоростей вращения шпинделя по двум критериям (с.14). ФГБОУ ВПО Тульский государственный университет - с целью упрощения модели механической системы шпинделя соискатель пренебрегает массой шариков подшипников. Однако такой подход не является надежным; непонятно, где в математической модели учитывается нелинейная жесткость упругих

связей? На стр.7 автореферата $C_{общ}$ выражена линейной зависимостью; не совсем понятна процедура замены системы уравнений с механическими параметрами на аналогичную систему уравнений с электрическими параметрами; как в процессе экспериментов учитывалось воздействие на испытуемый шпиндель сил резания? Низкое качество рисунка 8 не позволяет адекватно оценить разработанное программное обеспечение для вычисления вибродиагностических критериев.

ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет - из автореферата не ясно, в какой степени предложенная методика повышения динамического качества ШУ учитывает изменение тепловых процессов в шпиндельной опоре при варьировании предварительного натяга; некоторая небрежность в представлении схемы программного обеспечения не позволяет в полной мере оценить предложение по рациональному выбору режима работы ШУ.

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им Гагарина Ю.А.» ЭТИ, - какой тип датчика температуры был использован в ИИС, как производилась обработка экспериментальных данных и какова погрешность измерений? Для подтверждения эффективности предложенной методики и программного обеспечения целесообразно рассчитать предполагаемый экономический эффект от внедрения результатов исследования.

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» - из автореферата, неясно пригодна ли предложенная методика диагностирования (включая техническое оснащение) для произвольного шпинделя (шпиндельного узла) или полученные характеристики являются параметрами конкретного изделия, которые не переносимы для других конструкций? Представляет интерес, в какой мере изменяются динамические характеристики шпиндельного узла во времени. В автореферате такой информации нет, но она может быть интересной как для конструкторов, так и для механиков контролирующего состояние оборудования.

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» - в автореферате не приведено обоснование численных значений параметров для построения трехмерной АЧХ механической системы представленной на рис.3.

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» - известно, что увеличение радиально-осевого натяга снижает ресурс подшипников. Из автореферата, не ясно проводились ли автором расчеты средней наработки на отказ подшипников ШУ с различными усилиями предварительного натяга; не приведена блок-схема программы вычисления диагностических признаков, а приведенный на рис. 8 графический код не нагляден.

ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» - из автореферата не ясно, как изменяется АЧХ при работе ШУ с инструментом и без.

ФГБОУ ВО Севастопольский государственный университет - некоторые грамматические неточности в автореферате; масштаб и

качество схемы на рис.8 затрудняют восприятие данной иллюстрации даже в электронном виде; частота вращения шпинделя обозначается «об/мин», хотя правильнее было бы обозначать «мин⁻¹»; из автореферата неясно, возможно ли результаты проведенных исследований применить для шпиндельных узлов с газостатическими (аэро-статическими) или газомангнитными опорами с осевыми подпятниками, например, из углеграфита? ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия» - В автореферате не обоснован, а представлен диагностический критерий качества ШУ; рекомендованный рациональный диапазон частот вращения шпинделя представлен в выводах, но не обоснован в автореферате; ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» - неясно шпиндельные узлы каких станков анализировались - для обработки тел вращения или корпусных деталей? Из материалов автореферата неясно, почему качество шпиндельного узла, определяемое величиной предварительного натяга, называется динамическим? Все поступившие **отзывы положительные.**

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в области динамики роторных систем, подшипников качения, металлорежущих станков и обрабатывающих технологий, что подтверждается представленными списками публикаций.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: **разработаны** математическая модель подшипниковой опоры с нелинейной упругой характеристикой; экспериментальный стенд и информационно-измерительная система; новая экспериментальная методика определения осевого предварительного натяга опор качения шпинделя, позволяющая проводить его измерение с малой погрешностью и без разборки шпиндельного узла; **предложены** пути повышения эффективности применения вибродиагностических критериев за счет использования цифровых БИХ-фильтров для подавления частот вынужденных колебаний и оценки осевого предварительного натяга методом биспектрального анализа; **доказана** перспективность использования вибродиагностических методов на резонансных частотах шпиндельного узла; новые понятия не **вводились.**

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: доказано влияние осевого предварительного натяга на показатели динамических процессов шпиндельного узла; применительно к проблематике диссертации результативно **использованы** разработанные соискателем в пакете LabView модули программного обеспечения, реализующие необходимые вычисления на различных этапах исследования, и позволяющие визуализировать результаты; **изложены** элементы классической теории подобия динамически аналогичных

систем, теории контролеспособности и распознавания образов; **раскрыты** особенности влияния осевого предварительного натяга и контактных жесткостей на амплитудно-частотную характеристику подшипниковой опоры; **изучены** методы обеспечения и повышения динамического качества шпиндельных узлов; **проведена модернизация** математической модели для плоской схемы подшипниковой опоры шпинделя.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: **разработана и внедрена** методика диагностирования оборудования на предприятиях: ООО «Завод приборных подшипников» (г. Самара), АО «Волгабурмаш» (г. Самара). Получен патент на изобретение «Способ определения предварительного осевого натяга подшипниковых опор ротора», № 2583337; **определены** направления, пути решения и задачи совершенствования динамического качества шпиндельных узлов; **созданы** алгоритм и модуль программного обеспечения для автоматизации процесса диагностики и выбора частот вращения шпинделя по динамическому критерию; **представлены** рекомендации по использованию перспективных, по динамическому критерию, диапазонов частот вращения шпинделя, с целью увеличения производительности станков.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ использовались современные измерительные средства, и датчики, входящие в государственный реестр измерительных средств. Для обработки полученных сигналов использовались методы цифровой обработки сигналов, алгоритмы которых реализовывались с помощью современного программного обеспечения; **теория** построена на проверяемых теоретических и экспериментальных данных и согласуется с ними. Достоверность и обоснованность научных выводов, положений и полученных результатов базируется на основных положениях классической механики и теории подобия динамических систем различной природы, теории цепей, методах операционного исчисления, системного и математического анализов, методах цифровой обработки сигналов, математической статистики; **идея базируется** на использовании и обобщении передового опыта российских и зарубежных ученых в области обеспечения динамического качества шпиндельных узлов методами вибродиагностирования и математического моделирования; **использовано** сравнение авторских данных и данных, имеющих в эксплуатационной практике и в исследованиях в указанной области; **установлено** совпадение результатов полученных автором с результатами представленными в источниках независимой периодической и справочной печати по тематике исследования; **использованы** современные методы сбора и обработки исходной информации.

Личный вклад соискателя состоит в: разработке и аналитических решениях модели опоры качения шпиндельного узла, разработке экспериментального стенда и информационно-измерительной системы, разработке способа определения предварительного осевого натяга подшипниковых опор ротора, выборе и обосновании диагностических критериев, разработке программного обеспечения.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследований и основной идейной линией, взаимосвязью поставленных задач и полученных выводов.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация соответствует требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденных Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, с изменениями и дополнениями, и представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи обеспечения динамического качества высокоскоростных шпиндельных узлов металлорежущих станков, имеющей существенное значение для развития технологии механической обработки.

На заседании 10.06.2016 диссертационный совет принял решение присудить Гаспарову Э.С. ученую степень кандидата технических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 18, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель.

Защита объявляется законченной. Замечания есть? (нет). Поздравляем Эрика Сергеевича с защитой.

Заседание объявляется закрытым

Председатель
диссертационного совета
Д 999.003.02

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 999.003.02



Табакон Владимир Петрович

Веткасов Николай Иванович