

На правах рукописи



Майоров Максим Валерьевич

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СТУПИЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ
АВТОМОБИЛЯ**

Специальность 05.22.10 – «Эксплуатация автомобильного транспорта»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Орел – 2015

Работа выполнена на кафедре «Приборостроение, метрология и сертификация» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» (переименован в Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Приокский государственный университет»).

Научный руководитель: **Подмастерьев Константин Валентинович**
д.т.н., профессор, зав. каф. «Приборостроение, метрология и сертификация» Приокского государственного университета

Официальные оппоненты: **Гребенников Александр Сергеевич**
д.т.н., профессор каф. «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

Загородний Николай Александрович
к.т.н., доцент каф. «Сервис транспортных и технологических машин» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет»

Защита диссертации состоится **«17» декабря 2015 г. в 13:00 часов** на заседании объединенного диссертационного совета Д999.030.03 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе ФГБОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс», ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет», ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» по адресу: **302030, г. Орел, ул. Московская, д.77, ауд. 426.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте (www.gu-unprk.ru) ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, аудитория 340.

Автореферат разослан **«11» ноября 2015 г.** Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет» (www.gu-unprk.ru) и на официальном сайте Министерства образования и науки Российской Федерации (vak2.ed.gov.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации направлять в диссертационный совет по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29. Телефон для справок +79058569797

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 999.030.03



Катунин А.А.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В задачи, закрепленные в Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденной приказом Минпромторга России от 23 апреля 2010 г. №319, входят работы по формированию базы инновационного развития, стимулированию спроса на автотранспортные средства. Вместе с тем, рост численности подвижного состава автомобильного транспорта страны за счет новых технологий, повышающих динамические качества элементов, выдвигает на одно из первых мест обеспечение безопасности движения и эксплуатации автомобилей, которая в значительной мере зависит от надежности узлов и механизмов ходовой части. В системе мероприятий, направленных на решение этой задачи, важное место занимает контроль технического состояния систем, узлов и деталей автомобиля, влияющий на безопасность движения.

Поддержание высокого уровня надежности в условиях эксплуатации требует своевременного предупреждения, обнаружения и устранения возможных неисправностей, главным образом скрытых, не выявляемых внешним осмотром. Для этого необходимы методы и средства инструментального контроля, которые быстро и точно определяют техническое состояние ходовой части автомобиля, находящегося в эксплуатации, без ее частичной или полной разборки. В настоящее время при техническом обслуживании автомобилей контроль состояния некоторых узлов (например, ступичных узлов) устанавливается при помощи субъективных факторов. Для объективного контроля необходимы автоматизированные диагностические комплексы, способные в процессе технического обслуживания или ремонта диагностировать узлы ходовой части автомобиля, организовать хранение и обработку полученной диагностической информации, на основании которой принимаются необходимые меры для повышения качества выпускаемых автомобилей. Автоматизированные диагностические комплексы должны обеспечивать быстрое диагностирование узла с минимальными трудозатратами и, по возможности, без применения высококвалифицированного персонала в условиях сервисного обслуживания.

Существуют методы контроля и диагностирования подшипников качения, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками. Одними из главных показателей качества подшипников ступиц по ГОСТ Р 53830-2010 являются состояние поверхностей подшипника, наличие смазки, герметичность и др.

В частности, на практике для диагностирования подшипников применяют кинематические, тепловые, вибрационные, электрические и другие методы. Самыми применяемыми являются вибрационные методы, однако их использование затруднено при поиске малых и зарождающихся дефектов элементов подшипника, а также они обладают малой чувствительностью для оценки состояния смазочного материала.

Степень разработанности темы исследования. Основы диагностирования и контроля технического состояния ходовой части автомобиля рассмотрены в трудах А.И. Гришкевича, Д.М. Ломако, В.П. Автушко. Проблемы, касающиеся диагностирования элементов и узлов автомобиля по параметрам кинематики, режимов смазки, являются темой исследований А.С. Денисова, А.С. Гребенникова, А.Н. Виноградова, Р.Ф. Калимуллина. Вибродиагностика подшипников представлена в трудах В.В. Ключева, В.Н. Челомея.

Наибольший вклад в области разработки и применения электропараметрических методов диагностирования подшипников внесен А.Ф. Блиновым, Н.К. Мышкиным, С.Ф. Корндорфом, К.В. Подмастерьевым, В.Я. Варгашкиным, В.В. Мишиным, Е.В. Пахолкиным.

Анализ показывает, что каждый из методов обладает рядом недостатков и совместное их использование может исключить этот факт. В работах К.В. Подмастерьева, Мишина В.В. предложено совместное использование нескольких методов диагностирования. Такой подход в настоящее время представляется весьма актуальным.

Целью диссертационной работы является создание метода диагностирования ступичных подшипников автомобиля, на основе оценки технического состояния ступичного подшипника по комплексному параметру.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи:

- разработка математической модели вибрационных процессов и электрического сопротивления в трибосопряжениях двухрядного ступичного подшипника качения с возможностью моделирования локальных дефектов, волнистости поверхностей качения и состояния смазочного слоя;

- теоретические исследования параметров вибрационных процессов и электрического сопротивления трибосопряжений и влияния на них локальных дефектов, волнистости дорожек качения ступичного подшипника, а также состояния смазочного материала;

- разработка комплексного диагностического параметра;

- разработка алгоритма диагностирования ступичного подшипника с применением комплексного диагностического параметра;

- разработка устройства диагностирования ступичных подшипников и методики диагностирования ступичного подшипника для автосервисного предприятия.

Научная новизна.

- математическая модель электрофлуктуационных и вибрационных процессов в трибосопряжениях ступичного подшипника, базирующаяся на зависимостях проводимости и механического взаимодействия контактирующих тел, отличающаяся возможностью параметризации локальных дефектов, волнистости дорожек качения и состояния смазочного слоя;

- теоретические зависимости влияния локальных дефектов, волнистости дорожек качения и состояния смазочного слоя ступичного подшипника на параметры вибрационных процессов и электрического сопротивления;

- метод комплексного диагностирования ступичного подшипника с применением комплексного параметра, учитывающего характеристики электрофлуктуационных и вибрационных процессов ступичного подшипника.

Теоретическая значимость. Разработаны математические модели вибрации и сопротивления ступичного подшипника, позволяющие моделировать локальные дефекты, волнистость дорожек качения и состояние смазочного материала.

Практическая значимость. Разработано устройство диагностирования ступичных подшипников автомобилей, позволяющее определять наличие локальных дефектов, волнистости на дорожках качения, а также состояние смазочного материала ступичного подшипника автомобиля; составлена методика оценки технического состояния ступичных подшипников автомобиля для использования на предприятиях автосервиса.

Методология и методы исследования. В основе теоретических исследований лежат методы механики твердых тел, трибологии, нейросетевых алгоритмов обработки. Теоретические результаты получены с помощью методов математического анализа, аналитических и численных методов решения систем уравнений, методов спектрального анализа. При обработке экспериментальных данных использовались методы математической статистики, корреляционного, регрессионного и спектрального анализов. Разработка программных средств производилась с применением комплекса оригинальной разработки, с использованием прикладного пакета программ Octave.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель электрофлуктуационных и вибрационных процессов в трибосопряжениях ступичного подшипника, базирующаяся на зависимостях проводимости и механического взаимодействия контактирующих тел, отличающаяся возможностью параметризации дефектов и волнистости поверхностей качения, а также состояния смазочного слоя;

- теоретические зависимости влияния на параметры электрофлуктуационных и вибрационных процессов в трибосопряжениях наличия на поверхностях качения ступичного подшипника локальных дефектов и волнистости, а также состояния смазочного материала;

- метод диагностирования ступичного подшипника автомобиля с применением комплексного параметра, учитывающего характеристики электрофлуктуационных и вибрационных процессов трибосопряжений, с использованием интеллектуальной системы выявления наличия локальных дефектов и волнистости поверхностей качения, а также состояния смазочного материала, построенной с применением искусственных нейронных сетей;

- устройство диагностирования ступичного подшипника автомобиля.

Реализация работы.

Экспериментальные данные и разработки диагностических устройств внедрены в учебный процесс кафедры «Сервис и ремонт машин» ФГБОУ ВПО «Государственный – УНПК» для дисциплины «Информационные системы на транспорте».

Работа выполнялась на базе научно-образовательного центра «ДИ-АТРАНСПРИБОР», с применением измерительного оборудования Центра коллективного пользования ФГБОУ ВПО «Государственный – УНПК».

Диагностическая система и методика прошли опытно-промышленную проверку и внедрение на базе ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание», МУП «Трамвайно-троллейбусное предприятие»

Апробация работы.

Работы по тематике диссертационного исследования велись при участии автора в качестве исполнителя следующих научных проектов и грантов: государственного задания №7.2668.2011 «Теория и принципы интеллектуализации электрических методов мониторинга узлов трения»; хоздоговорных тем № Н-02/04-10 «Разработка диагностического обеспечения прецизионных подшипников качения по электрическим параметрам».

Основные результаты работы доложены и обсуждены на международных научно-технических семинарах «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (г. Алушта 2009-2012) , III международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы инновационного развития транспортной инфраструктуры» (г. Орел, 2013), восьмой сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов» (г. С.-Петербург, 2013), международной научно-практической конференции «Информационные технологии на транспорте» (г. Орел, 2015), а также на научных семинарах кафедр «Приборостроение, метрология и сертификация» и «Сервис и ремонт машин».

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 16 печатных работ, в том числе 6 статей в изданиях ВАК, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 3 патента на полезную модель.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 120 страницах основного машинописного текста, содержит 39 рисунков и 7 таблиц. Она состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников, включающего 92 наименования и 5 приложений.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена ее цель и решаемые задачи, сформулирована научная новизна и представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена рассмотрению особенностей ступичных подшипников автомобилей, анализу и классификации возможных дефектов ступичных подшипников с учетом особенностей их использования. Рассмотр-

рены возможные методы оценки их технического состояния, а также приведена классификация методов по различным признакам.

Проведен обзор применяемых на практике интеллектуальных методов обработки и распознавания сигналов. На основе анализа было выявлено, что наиболее целесообразным является применение комплексного параметра, включающего информационные признаки вибрационных и электрофлюктуационных процессов в трибосопряжениях ступичного подшипника, с дальнейшим анализом этого параметра интеллектуальным модулем на основе искусственной нейронной сети, обучаемой с учителем.

Во второй главе проведена разработка математической модели сопротивления и вибрации двухрядного ступичного радиально-упорного шарикоподшипника с учетом кинематики и наличия локальных дефектов на поверхностях качения. С учетом наиболее распространенных типов ступичных подшипников схема сил для расчета взаимодействия элементов изображена на рисунке 1.

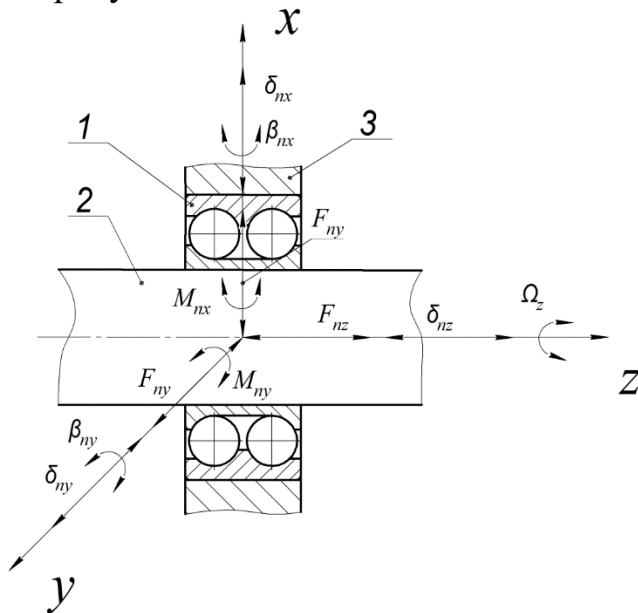


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на колесо и ступичный подшипник

колец подшипника.

Уравнение движения тел качения, после преобразований представляется следующим образом:

$$m_j \ddot{\zeta}_j + m_j g \cos(\alpha_j) \sin(\theta_j) - m_j \zeta_j \cos(\alpha_j)^2 \dot{\theta}_j^2 - k_{\text{конт.вн.}} \delta_{\text{вн}}^{3/2} \times \left[\frac{\zeta_j - x_{\text{вн}} \cos(\alpha_j) \theta_j - y_{\text{вн}} \cos(\alpha_j) \sin(\theta_j) - (-1)^j z_{\text{вн}} \sin(\alpha_j)}{\beta_j} \right] + k_{\text{конт.вну.}} \delta_{\text{вну}}^{3/2} = F_d^j, \quad (1)$$

где m_j - масса j -го тела качения, F_d^j - общая сила упругого взаимодействия j -го тела качения с наружным и внутренним кольцом, α_j - угол между осью контакта и вертикальной осью для j -го тела качения, β_j - перемещение j -го те-

Решение уравнений статического равновесия подшипника относительно деформаций, возникающих в местах контакта шариков с кольцами, а также моделирование дефектов дорожек или элементов качения позволило определить параметры изменения жесткостей и сил, вынуждающих вибрацию шарикоподшипника.

Для этого произведено математическое моделирование ступичного подшипника, базирующееся на уравнениях Лагранжа, учитывая контактные взаимодействия между телами качения и поверхностями внутреннего и внешнего

ла качения относительно внутреннего кольца, θ_j - угол контакта между j -ым телом качения и фиксированным кольцом, $x_{вн}$, $y_{вн}$, $z_{вн}$ - горизонтальное, вертикальное и аксиальное перемещения наружного кольца соответственно.

Характеристики и свойства смазочного материала, который обладает значительным влиянием на параметры матрицы демпфирования и жесткости подшипника, учитываются при расчете общей силы упругого взаимодействия тел качения с наружным и внутренним кольцом.

Подставляя расчетные значения параметров элементов модели в обобщенный вектор перемещения Лагранжа с дальнейшими преобразованиями, уравнение движения наружного кольца запишем как:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{вн} \ddot{x}_{вн} - k_{конт.вн.} \sum_{j=1}^N \delta_{вн}^{3/2} \frac{[x_{вн} - \zeta_j \cos \alpha_j \cos \theta_j]}{\beta_j} = \sin(\omega_6 t) + F_{d_вн}^x \\ m_{вн} \ddot{y}_{вн} + m_{вн} g - k_{конт.вн.} \sum_{j=1}^N \delta_{вн}^{3/2} \frac{[y_{вн} - \zeta_j \cos \alpha_j \sin \theta_j]}{\beta_j} = 1 + \sin(\omega_6 t) + F_{d_вн}^y \\ m_{вн} \ddot{y}_{вн} - \sum_{j=1}^N \frac{1}{2} \left\{ m_j \zeta_j^2 \dot{\theta}_j^2 + I_j \left[\dot{\theta}_j \left(1 + \frac{R_i}{D_{вн} / 2} \right) \right]^2 \right\} \frac{(-1)^{j+1} \sin 2\alpha_j}{R_r - R_{вн}} - \\ - k_{конт.вн.} \sum_{j=1}^N \delta_{вн}^{3/2} \left[\frac{z_{вн} - (-1)^j \zeta_j \sin \alpha_j}{\beta_j} + \frac{(-1)^j}{R_r - R_{вн}} \times \right. \\ \left. \times \frac{\zeta_j x_{вн} \sin \alpha_j \cos \theta_j + \zeta_j y_{вн} \sin \alpha_j \sin \theta_j - (-1)^j \zeta_j z_{вн} \cos \alpha_j}{\beta_j} \right] + \\ \left. + \sum_{j=1}^N \frac{(-1)^{j+1}}{R_r - R_{вн}} m_j g \zeta_j \sin \alpha_j \sin \theta_j = F_z + F_{d_вн}^z \right. \quad . \quad (2) \end{array} \right.$$

Кроме того, математическая модель учитывает при моделировании волнистость и локальные дефекты поверхностей внутреннего и внешнего колец. Ее можно описать через функцию радиуса внутреннего и внешнего кольца:

$$R_i = \kappa_{i0} + \kappa_{ip} \sin(N_i \theta_{ij}), \quad (3)$$

$$R_o = \kappa_{o0} + \kappa_{op} \sin(N_o \theta_{oj}), \quad (4)$$

где κ_{i0}, κ_{o0} - мгновенные амплитуды волнистости внутреннего и внешнего колец; κ_{ip}, κ_{op} - максимальные амплитуды волнистости внутреннего и внешнего колец; N_i, N_o - волновые числа для описания волнистости внутреннего и внешнего колец; θ_{ij}, θ_{oj} - угол контакта внутреннего и внешнего кольца с j -ым шариком.

Локальные дефекты в данной работе детерминируются тремя параметрами: угловое положение дефекта относительно оси вращения подшипника, касательный размер дефекта и радиальная глубина дефекта.

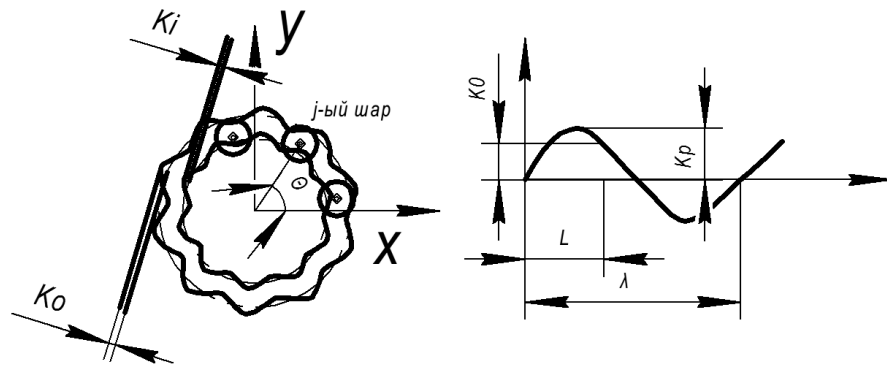
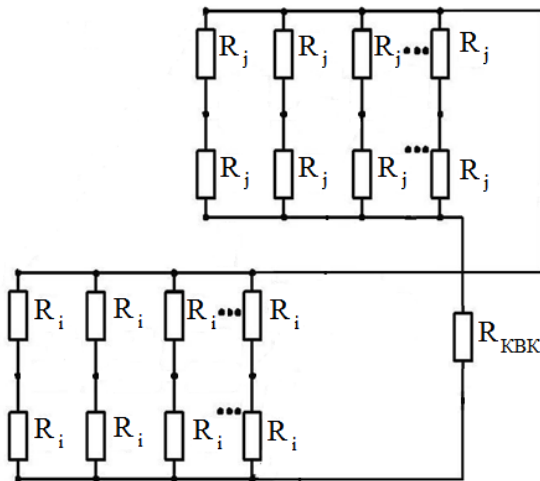


Рисунок 2 – Моделирование волнистости дорожек качения
Таким образом дефект можно моделировать следующим уравнением:

$$d_p(\theta) = \begin{cases} d, & \text{если } |\text{mod}(\theta, 2\pi) - \theta_{pd}| < \theta_e, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

где θ_{pd} - угол центра дефекта;

θ_e - половина угла касательного размера дефекта.



R_i, R_j - сопротивление трибосопряжения в контакте тела качения и дорожки кольца первого и второго рядов ступичного подшипника соответственно, $R_{квк}$ - сопротивление контакта внутренних колец ступичного подшипника

Рисунок 3 – Упрощенная эквивалентная схема ступичного подшипника

Алгоритм моделирования сопротивления основывается на расчетах толщины смазочной пленки, распределения давления между элементами ступичного подшипника. Данная модель отличается от ранее известных учетом двухрядности подшипника.

Ступичный подшипник предложено представить в виде эквивалентной схемы, изображенной на рисунке 3. На ней подшипник представлен в виде набора параллельно соединенных сопротивлений контактов (резисторов) по каждому из тел качений (каждого из рядов) с кольцами подшипника и с сепаратором. При этом контакт тела качения рассматривается как с внутренним, так и с наружным кольцом.

Основными оставляющими электрического сопротивления подшипника R_s считаются сопротивление стягивания $R_{ст}$ и сопротивление смазочной пленки $R_{сп}$:

$$R_s = R_{ст} + R_{сп} \quad (6)$$

Сопротивление смазочного слоя определяется толщиной гидродинамической пленки, разделяющей рабочие поверхности и удельным электрическим сопротивлением смазочного материала. В условиях смешанной и жид-

костной смазки сопротивление смазочной пленки будет основной составляющей сопротивления фрикционного контакта между телом качения и кольцом подшипника:

$$R_{СП} = \frac{\rho_{СМ}}{\rho} \cdot \frac{h_0}{r_k} \cdot \frac{A_r}{A_c - A_r} \cdot R_M, \quad (7)$$

где h_0 - минимальная толщина смазочной пленки; $\rho_{СМ}$ - удельное сопротивление смазочного материала (составляет 10^5 - 10^{13} Ом·м для пластичных смазочных материалов); A_c, A_r - контурная площадь и площадь локальных фактических площадок, r_k - радиус контактирующей поверхности.

Фактическая площадь контакта рассчитывается в соответствии с теорией реального контакта реальных поверхностей и имплементируется в систему уравнений при расчете контактной жесткости пары качения, с моделированием дефектов дорожек качения по (3 – 5).

Тогда общее сопротивление ступичного подшипника, согласно схеме будет определяться как:

$$R_{II} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{ОЭi}} \right)^{-1} + \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{ОЭj}} \right)^{-1} + R_{КВК}, \quad (8)$$

где $R_{ОЭi}, R_{ОЭj}$ - сопротивление трибосопряжения в контакте тела качения с внутренним и наружными кольцами первого и второго рядов ступичного подшипника соответственно, $R_{КВК}$ - сопротивление контакта внутренних колец ступичного подшипника, которым, в связи с тем, что оно значительно меньше первых двух слагаемых, можно пренебречь при расчетах.

Для определения режима трения трибосопряжения ступичного подшипника, который характеризует состояние смазочного материала, критерием выбран:

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{Rq_1^2 + Rq_2^2}}, \quad (9)$$

где Rq_1, Rq_2 - среднеквадратическое отклонение профиля дорожек качения от центральной линии. Известно, что граничный режим трения осуществляется при $0 < \lambda < 1$, смешанный режим трения – $1 \leq \lambda < 3$, а жидкостный – $3 \leq \lambda$.

Теоретические спектры виброскоростей ступичного подшипника с моделированием локального дефекта (квадратная лунка размером 120 мкм), волнистости дорожки качения (длина волны не более 0,1 мкм) на внутреннем кольце подшипника, а также изменением количества смазочного материала в трибосопряжении, представлены на рисунке 4.

Анализ результатов показал, что при моделировании локальных дефектов на наружном кольце выявлено повышение первой гармоники на частоте близкой к частоте прохождения шариков через зону нагружения, так же выявлена чувствительность модели к изменениям волнистости, что подтверждается увеличением сигнала в низкочастотной области. Также выявлено отсутствие чувствительности вибрационных параметров на изменение количества смазочного материала в трибосопряжении ступичного подшипника.

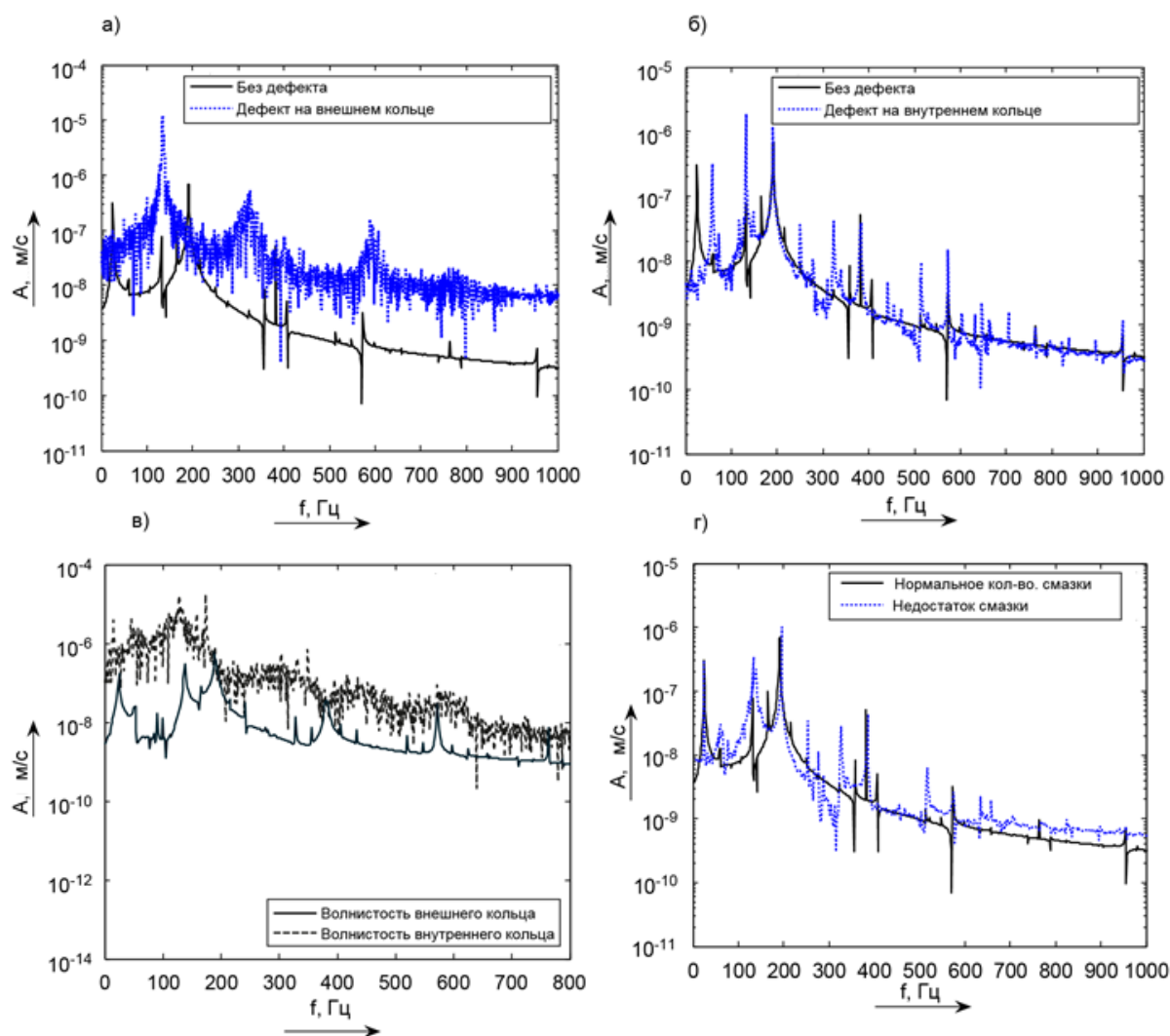


Рисунок 4 – Спектры виброскоростей ступичного подшипника с моделированием локальных дефектов, макрогеометрии и состояния смазочного материала ступичного подшипника

Графики теоретической функции сопротивления ступичного подшипника с моделированием локального дефекта (квадратная лунка размером 120 мкм), волнистости дорожки качения (длина волны не более 0,1 мкм) на внутреннем кольце подшипника, а также изменением количества смазочного материала в трибосопряжении, представлены на рисунке 5. Установлено, что чувствительность функции сопротивления весьма велика, так при недостаточности смазочного материала сопротивление трибосопряжения стремится к 0.

При статистических испытаниях для проверки адекватности моделей вибрации и сопротивления, принимая во внимание погрешности измерительных приборов, выявлено, что дисперсии с установленной вероятностью неразличимы.

В третьей главе разработан метод, структурная схема которого представлена на рисунке 6, объединяющей в себе зависимости параметров вибрационных и электрофлуктуационных процессов.

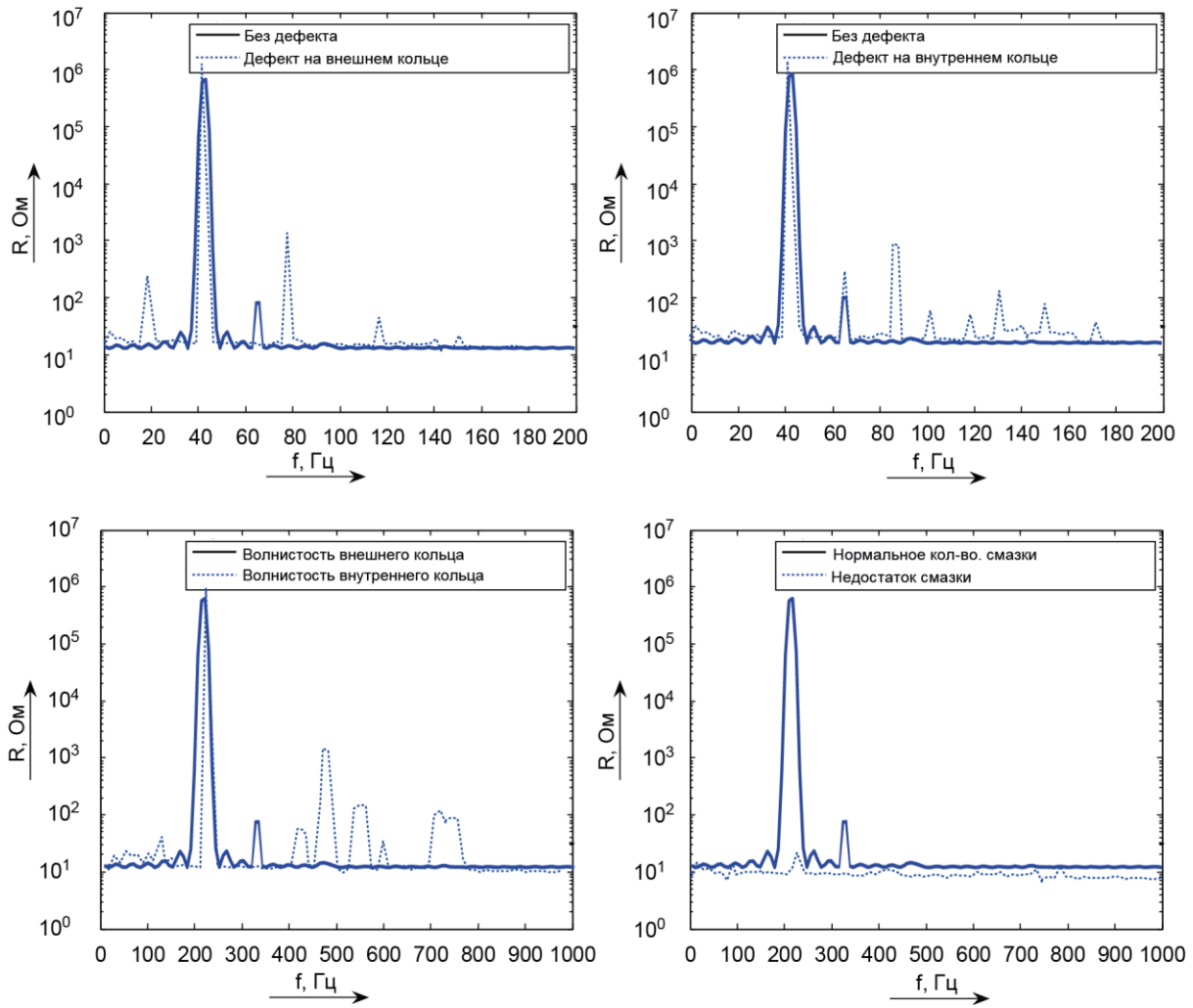


Рисунок 5 – Спектры функции сопротивления ступичного подшипника

Суть метода заключается в обработке информации, получаемой при совместном измерении параметров вибрации и сопротивления трибосопряжения ступичного подшипника, с последующей ее кластеризацией и ассоциацией к конкретному техническому состоянию, с помощью заранее обученной искусственной нейронной сети (классификатором).



Рисунок 6 – Структурная схема метода диагностирования ступичного подшипника

Предложен комплексный вектор-параметр, далее использующийся интеллектуальной системой на основе искусственной нейронной сети, состоящий из статистических оценок (математического ожидания, дисперсии, среднеквадратического отклонения, корреляционная функция, спектральная плотность) сигналов сопротивления и виброускорения ступичного подшипника.

Задача, решаемая нейросетью, заключается в кластеризации входного вектора диагностических признаков, т.е. разбиении множества состояний объекта на несколько групп со сходными параметрами. На основании априорной информации выдается суждение о том, какому техническому состоянию подшипника соответствует каждая группа. Для задачи кластеризации предложено использовать сеть Кохонена с применением алгоритма обучения с учителем.

Тренировочная выборка формируется на основе результатов математического моделирования вибрации и электрического сопротивления ступичного подшипника с учетом наличия заданных дефектов, волнистости дорожек качения и состояния смазочного материала.

Ранжирование параметров по техническому состоянию поясняется в таблице 1.

Таблица 1 – Диагностируемые дефекты ступичного подшипника

Тип дефекта	Возможное состояние	Интервалы параметров	Примечания
Локальный дефект «впадина»	Присутствует	Размах (Пик-Пик) спектра огибающей виброускорения gE 0,01...1	ГОСТ Р ИСО 13373-2009
	Отсутствует	Размах (Пик-Пик) спектра огибающей виброускорения gE 1...10	
Волнистость дорожки качения	Удовлетворительно	$V < 0,6 \cdot Ra$	ГОСТ не регламентирует интервалы, выбран по рекомендациям отрасли
	Неудовлетворительно	$V > 0,6 \cdot Ra$	
Состояние смазочного материала (режим трения)	Удовлетворительно	$\lambda \geq 1$	Обеспечение смешанного или жидкостного режима трения
	Неудовлетворительно	$\lambda < 1$	

Этапы обработки измерительной информации в соответствии с алгоритмом обучения нейросети при решении задачи диагностики подшипников следующие:

- подготовка и нормализация сигналов сопротивления и виброускорения;

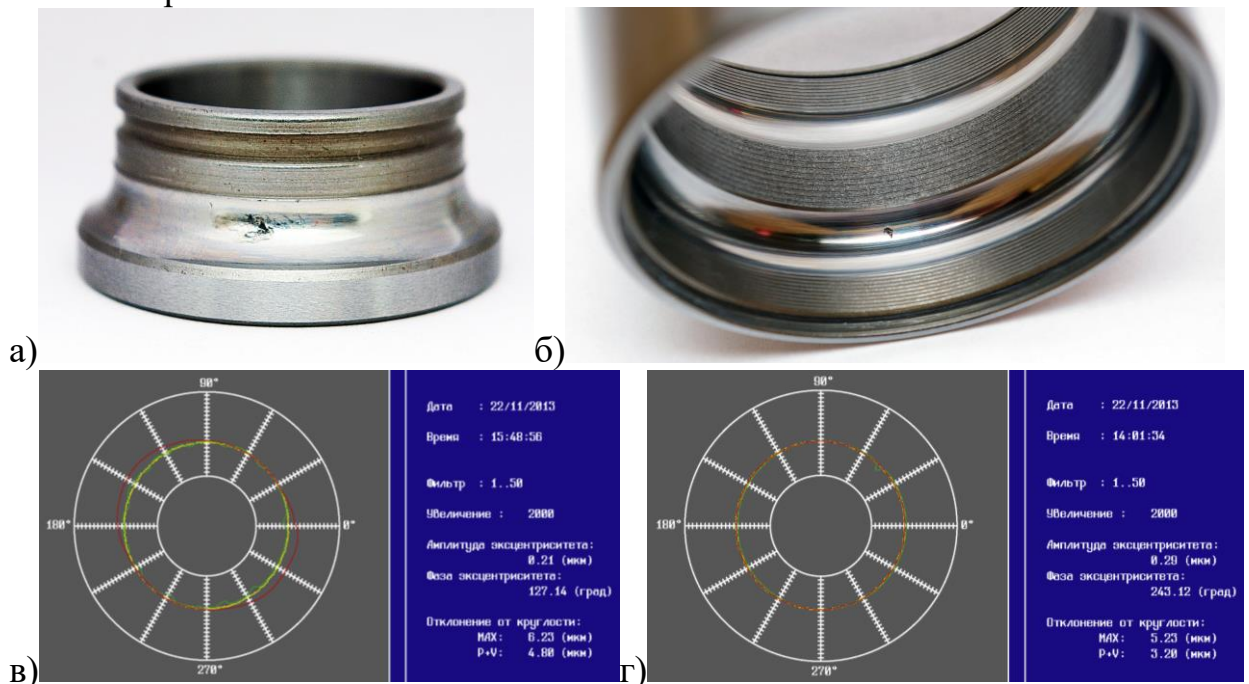
- вычисление статистических оценок (математического ожидания, дисперсии, среднеквадратического отклонения, корреляционная функция, спектральная плотность) в заданном измерительном окне;
- формирование вектор-параметра признаков;
- подача вектора на вход искусственной нейронной сети, обученной на сигналах, полученных при теоретическом моделировании.

В четвертой главе приведены экспериментальные исследования по оценке технического состояния ступичных подшипников.

Экспериментальные исследования проводились на стенде с возможностью задания различных режимов работы, а также с возможностью быстрой замены ступичного подшипника, что позволило учесть наличие различных дефектов (дефектов дорожек качения, состояния смазочного материала).

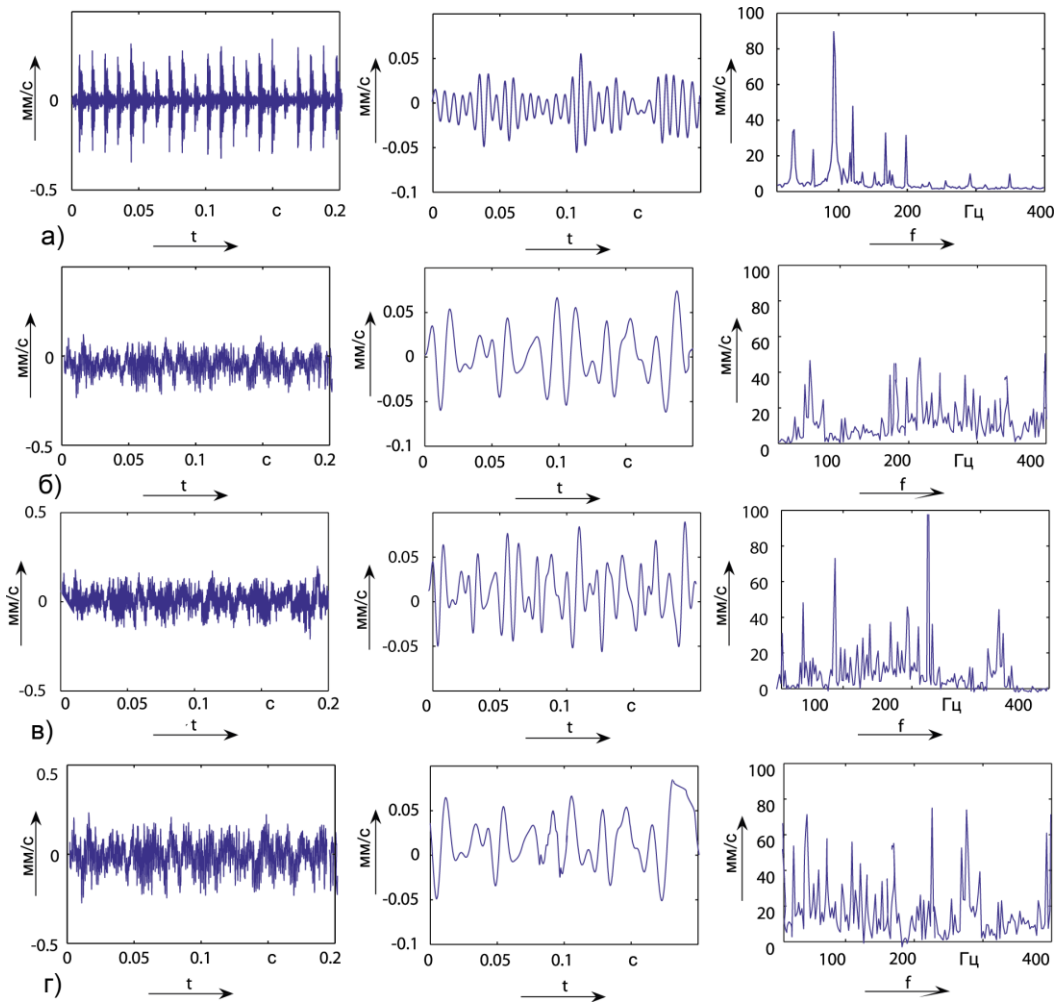
В процессе эксперимента участвовали ступичные подшипники разной степени дефектности, некоторые параметры которых приведены на рисунке 7. Круглограммы колец ступичных подшипников автомобиля ВАЗ-2114 были получены с помощью кругломера «АБРИС К-11».

На рисунке 8 представлены спектры сигналов вибрации при наличии дефектов и волнистости дорожек качения, а также недостаточности смазочного материала.



а) локальный дефект «впадина» внутреннего кольца ступичного подшипника, б) локальный дефект «впадина» внешнего кольца ступичного подшипника, в) круглограмма ступичного подшипника с дефектом типа «впадина», г) круглограмма ступичного подшипника с волнистостью 1 мкм

Рисунок 7 – Характеристика дефектов ступичных подшипников, используемых в экспериментальных исследованиях

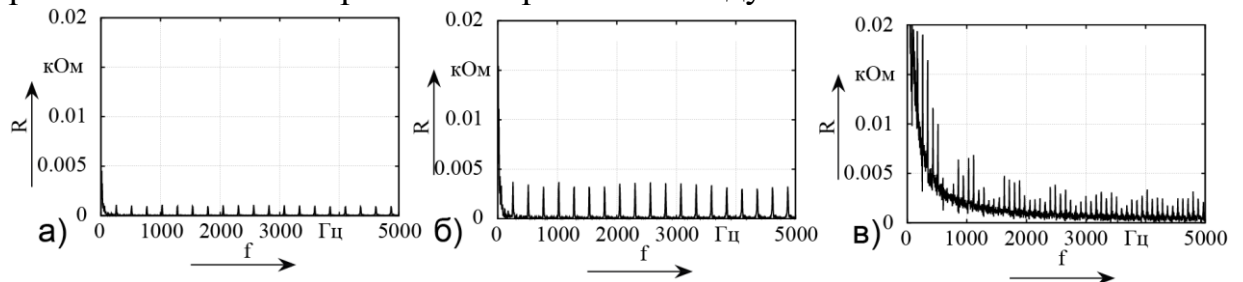


а) дефект внешнего кольца, б) при недостаточном количестве смазочного материала, в) дефект внутреннего кольца, г) волнистость дорожки качения

Рисунок 8 – Спектры экспериментальных сигналов вибрации ступичного подшипника

Полученные спектры подтверждают гипотезы, выдвинутые при математическом моделировании вибрационных процессов.

Экспериментальные исследования спектральных характеристик функции сопротивления, изображенных на рисунке 8, указывают на высокий уровень гармоник в низкочастотной области при невысоких количествах смазочного материала в трибосопряжении. После увеличения количества смазки выявлены повышение гармоник в более высокочастотной области, что говорит о появлении микроконтактирования между телами качения.



а) 0,1 мл Литол, б) 1 мл Литол; в) 1,6 мл Литол;

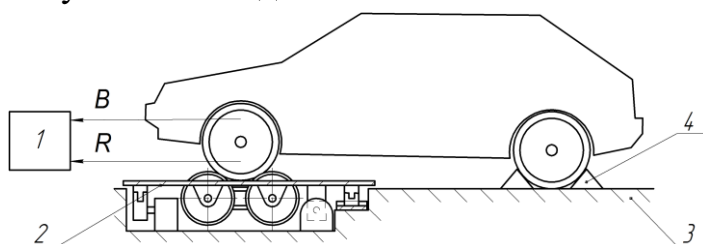
Рисунок 8 – Спектральные характеристики функции сопротивления при различных количествах смазочного материала

В таблице 2 представлены результаты распознавания принадлежности 960 выборок комплексных векторов, сочетающих в себе параметры электрофлуктуационных и вибрационных процессов к определенным группам дефектности. Установлено обеспечение безошибочного соотнесения групп дефектности с точностью 98 %, при доверительной вероятности 0,95 и окне измерения 10 с.

Таблица 2 – Результаты распознавания технического состояния ступичного подшипника

Временное окно, с	Вероятность безошибочной классификации			
	Без дефекта	Локальный дефект «впадина»	Волнистость	Дефект смазки
1	100%	88%	79%	81%
5	100%	98%	94%	98%
10	100%	100%	98%	100%

Разработано устройство диагностики ступичного подшипника. Предложена структура построения устройства диагностики, изображенные на рисунке 9, разработаны каналы измерения электрического сопротивления ступичного подшипника. И приведена методика диагностирования двухрядного ступичного подшипника автомобиля.



1 – блок сбора и анализа информации, 2 – подвижная опора с беговыми барабанами, 3 – основание, 4 – колесные упоры

Рисунок 9 – Функциональная схема стенда диагностики ступичного подшипника

Предлагаемый метод реализуется на основе тормозного стенда СТМ-3500. Стенд содержит основание, на котором закреплен подвижный стол, опорами которого являются подшипники качения поступательного движения, передвигающийся во взаимно перпендикулярных направлениях, пневмоцилиндры для каждой оси перемещения подвижного

стола и направляющие, конструкция подвижного стола содержит опорно-беговые барабаны с электроприводом для установки исследуемой оси транспортного средства и содержит электронный диагностический блок, анализирующий информацию, поступающую с датчиков канала измерения вибрации и электрических параметров трибосопряжения диагностируемого ступичного подшипника.

Архитектура программного обеспечения для контроля процесса диагностики и анализа технического состояния ступичного подшипника защищена авторским свидетельством на регистрацию программ ЭВМ. Разработана методика диагностирования ступичных подшипников для предприятий автосервиса.

В пятой главе обоснованы рекомендации для повышения объективности оценки технического состояния подвижного состава, проходящего тех-

ническое обслуживание и ремонт. Произведена оценка экономического эффекта при внедрении диагностической операции в процесс технического обслуживания.

Рекомендуется использовать данный метод диагностирования во время проведения ТО-2 при контрольном диагностировании и при контроле замены ступичного подшипника автомобиля, с целью минимизировать возможности неправильной установки.

Расчет экономической эффективности показал, что годовой экономический эффект от внедрения методики и устройства диагностирования ступичного подшипника на предприятии автосервиса составит 35442 руб./год.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы:

В результате проведенных исследований разработан комплексный метод диагностирования ступичного подшипника автомобиля, решена научно-техническая задача разработки математической модели электрофлуктуационных и вибрационных процессов в трибосопряжениях двухрядного ступичного подшипника качения с учетом возможности моделирования локальных дефектов, волнистости поверхностей качения и состояния смазочного материала.

К основным выводам работы можно отнести следующие:

1. Проведенный анализ конструкций ступичных подшипников автомобилей, а также диагностических операций по контролю их технического состояния, показал актуальность разработки комплексного метода диагностирования, совмещающего в себе преимущества вибрационного и электрофлуктуационного принципов получения информации о состоянии трибосопряжения.

2. Разработана математическая модель электрофлуктуационных и вибрационных процессов в трибосопряжениях двухрядного ступичного подшипника качения с учетом возможности моделирования локальных дефектов, волнистости поверхностей качения, отличающаяся учетом многорядности диагностируемого подшипника, учетом размеров локального дефекта.

3. Разработанная математическая модель электрофлуктуационных и вибрационных процессов в трибосопряжениях двухрядного ступичного подшипника качения с учетом возможности моделирования локальных дефектов, волнистости поверхностей качения и состояния смазочной пленки позволяет обучать интеллектуальную систему на основе искусственных нейронных сетей для принятия решения о наличии дефектов в ступичном подшипнике.

4. Проведенные теоретические исследования математической модели электрофлуктуационных и вибрационных процессов в трибосопряжениях двухрядного ступичного подшипника качения с учетом возможности моделирования локальных дефектов, волнистости поверхностей качения и состо-

яния смазочной пленки показали качественное изменение параметров при наличии дефектов на телах и поверхностях качения.

5. Выбраны параметры, являющиеся оценками вибрационных и электрофлуктуационных процессов для создания вектор-параметра, подаваемого на вход классификатора, что позволяет учитывать совместные вариации параметров.

6. Определены границы дефектности ступичного подшипника для предложенного метода.

7. Разработана методика, устройство диагностирования и программное обеспечение для диагностирования ступичного подшипника автомобиля.

8. Разработанный метод диагностирования ступичного подшипника автомобиля позволяет комплексно оценивать техническое состояние узла без его демонтажа, что позволяет получить экономический эффект за счет параллелизации и интеллектуализации диагностической операции.

**Основные положения диссертации и полученные результаты опубликованы:
Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов и изданий
для опубликования основных научных результатов диссертации**

1. **Майоров, М.В.** К вопросу о возможности технического диагностирования подшипников качения с применением нейросетевых систем выявления дефектов [Текст] / М.В. Майоров, В.В. Мишин // Известия ОрелГТУ. – 2009. – №2-4/274(560). – С. 28-31

2. **Майоров, М.В.** Экспериментальное исследование электрического сопротивления (проводимости) подшипника качения как диагностического параметра [Текст] / М.В. Майоров, В.В. Мишин, А.В. Селихов, А.А. Катыхин, К.В. Шаталов, В.И. Некрасов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – №6-2/284. – С. 25-34

3. **Майоров, М.В.** Комплексный способ диагностирования подшипникового узла с применением нейронных сетей [Текст] / М.В. Майоров, В.В. Мишин, К.В. Подмастерьев, А.В. Селихов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – №2/3 (286). – С. 145-149

4. **Майоров, М.В.** Экспериментальное исследование сигнала активного сопротивления подшипника в режиме сухого трения [Текст] / В.Н. Чернышов, В.В. Мишин, В.Н. Чернышов // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» — ФГБОУ ВПО «Госуниверситет — УНПК». — 2013. — № 1. — С. 145-151.

5. **Майоров, М.В.** Диагностирование ступичных подшипников автомобиля [Текст] / М.В. Майоров, В.В. Мишин, В.Н. Чернышов // «Мир транспорта и технологических машин» — Орёл: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет — УНПК». — 2013. — № 2(41) — С. 9-16.

6. **Майоров, М.В.** Исследование особенностей диагностирования ступичного подшипника автомобиля [Текст] / М.В. Майоров, Подмастерьев К.В., А.В. Селихов, Е.Б. Андросова // «Мир транспорта и технологических машин» — Орёл: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет — УНПК». — 2014. — № 2(42) — С. 8-13.

Статьи в сборниках трудов и научных конференций

7. **Майоров, М.В.** Программная модель для реализации нейросетевой системы технического диагностирования подшипников качения [Текст] / М.В. Майоров // Труды VI Межвузовской международной итоговой научно-практической конференции студентов «Студенческая наука: взгляд молодых». – Челябинск: ЧОУ ВПО ЮУИУиЭ, 2009. – С. 78-80

8. **Майоров, М.В.** Модель системы диагностирования подшипника на основе нейросетевых технологий [Текст] / М.В. Майоров // Труды XVII Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации». – Алушта: МАИ, 2009. – С. 50

9. **Майоров, М.В.** Устройство диагностирования подшипников качения. Аппаратная реализация [Текст] / М.В. Майоров // Труды XVIII Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации». – Алушта: МАИ, 2010. – С. 68

10. **Майоров, М.В.** К вопросу о комплексировании диагностических параметров при разработке нейросетевого метода контроля качества подшипникового узла [Текст] / М.В. Майоров // Труды 19 Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации». – Алушта: МАИ, 2011. – С. 57

11. **Майоров, М.В.** К вопросу о построении устройства диагностирования ступичных подшипников автомобиля [Текст] / М.В. Майоров, К.В. Подмастерьев // Труды XV международная научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – ТЕХНОЛОГИЯ-2012». – Орел: ГУ-УНПК, 2012. – С. 49-52

12. Селихов, А.В. Акустический контроль подшипников качения [Текст] / А.В. Селихов, **Майоров М.В.**, В.В. Мишин, В.Н. Чернышов // Труды XV международная научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – ТЕХНОЛОГИЯ-2012». – Орел: ГУ-УНПК, 2012. – С. 53-56

13. Селихов, А.В. Система контроля качества опоры качения [Электронный ресурс] / А.В. Селихов, **М.В. Майоров**, В.Н. Чернышов, В.В. Мишин // Интернет-журнал «Информационные ресурсы, системы и технологии». Режим доступа: <http://irsit.ru/article256> (дата обращения: 12.10.2012)

14. **Майоров, М.В.** Стенд диагностики ступичного подшипника автомобиля [Текст] / М.В. Майоров [Текст] // Труды IV-ой международной научно-практической интернет-конференции «Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса». – Орел: ГУ-УНПК, апрель, 2014. – С. 78-82

15. Подмастерьев, К.В. Диагностирование ступичных подшипников автомобиля [Текст] / К.В. Подмастерьев, **М.В. Майоров**, В.В. Мишин // Труды восьмой сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов». – С.-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. – С. 23-29

16. **Майоров, М.В.** Применение интеллектуальных алгоритмов обработки многомерных диагностических данных [Текст] / К.В. Подмастерьев, **М.В. Майоров**, В.В. Мишин // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные технологии на транспорте». – Орел: ГУ-УНПК, 19-20 мая 2015 г. – С. 193-197

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. **Майоров, М.В.** Программа для микроконтроллера прибора диагностики ступичных подшипников автомобиля / М.В. Майоров, В.В. Мишин, Н.В. Рыбакова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612553. Заявл.14.01.2013. рег. 05.03.2013.

2. **Майоров, М.В.** Программа анализа диагностической информации о техническом состоянии ступичного подшипника автомобиля / М.В. Майоров, В.В. Мишин, Е.Г. Власова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612849. Заявл.14.01.2013. рег. 14.03.2013.

Патенты на полезную модель

1. Пат. Российской Федерации № 133300 МКИ G 01 M17/04 Устройство диагностики состояния ступичного подшипника / **Майоров М.В.**, Чернышов В.Н., Мишин В. В., Подмастерьев К. В., Рыбакова Н. В., Крутикова В. Ю. — №2013118873/11; заявл. 23.04.2013; опубл. 10.10.2013.

2. Пат. Российской Федерации № 133299 МКИ G 01 M17/04 Стенд для диагностики и испытания ступичных подшипников / **Майоров М.В.**, Чернышов В.Н., Мишин В. В., Рыбакова Н. В. — №2013118864/11; заявл. 23.04.2013; опубл. 10.10.2013.

3. Пат. Российской Федерации № 133298 МКИ G 01 M13/04 Устройство измерения сопротивления трибосопряжения подшипника качения / **Майоров М.В.**, Мишин В. В., Селихов А.В., Рыбакова Н. В. — 2013118870/28; заявл. 23.04.2013; опубл. 10.10.2013.

ЛР ИД № 00670 от 05.01.2000 г.

Подписано к печати «15» октября 2015 г.

Усл. печ. л. 1 Тираж 100 экз.

Заказ № 12

Полиграфический отдел «Госунiversитет – УНПК»

302030, г. Орел, ул. Московская, 65