

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс»
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет — УНПК»)

На правах рукописи



Майоров Максим Валерьевич

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
СТУПИЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ АВТОМОБИЛЯ

05.22.10 - Эксплуатация автомобильного транспорта

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Подмастерьев К.В.

Орел – 2015

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Общая характеристика проблем диагностирования ступичных подшипников автомобиля	9
1.1 Существующие подходы и проблемы диагностики ступичных подшипников автомобиля.....	9
1.2 Ступичный подшипник как объект контроля.....	12
1.2.1 Типы ступичных подшипников автомобилей.....	12
1.2.2 Виды дефектов ступичных подшипников.....	17
1.2.3 Методы диагностирования ступичных подшипников.....	23
1.4 Обзор реализаций синтеза диагностической модели на основе алгоритмического обучения.....	35
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	38
Глава 2. Математическое моделирование процессов в ступичном подшипнике... ..	40
2.1 Основные задачи моделирования.....	40
2.2 Моделирование вибрационных процессов ступичного подшипника	41
2.3 Моделирование волнистости дорожек качения ступичного подшипника.....	47
2.4 Моделирование локальных дефектов ступичного подшипника	48
2.5 Уравнения движения.....	49
2.6 Моделирование сопротивления ступичного подшипника.....	55
2.8 Результаты теоретического моделирования вибрации и электрического сопротивления ступичного подшипника	61
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	66
Глава 3. Метод диагностирования ступичного подшипника	67
3.1 Комплексование измерительной информации.....	67

3.2 Формулирование метода диагностирования ступичного подшипника автомобиля	70
3.3 Оценка точности распознавания дефектов ступичного подшипника	80
Выводы по главе 3.....	83
Глава 4. Средство диагностирования ступичного подшипника автомобиля. Экспериментальные исследования.....	85
4.1 Устройство диагностирования ступичного подшипника автомобиля	85
4.2 Механическая часть устройства диагностирования.....	89
4.3 Экспериментальные исследования работоспособности метода	91
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.	99
Глава 5. Организационно-экономическое обоснование разрабатываемого метода диагностирования.....	100
5.1 Определение периодичности диагностирования ступичного подшипника....	100
5.2 Экономический эффект внедрения методики диагностирования ступичного подшипника	107
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	110
Литература	112
Приложение А. Расчет осевых и радиальных реакций ступичного подшипника	121
Приложение Б. Экспериментальные данные.	123
Приложение В. Виды дефектов ступичного подшипника при экспериментальных исследованиях.....	124
Приложение Г. Акты внедрения предложенного метода в производство	129
Приложение Д. Патенты.....	139

Введение

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, увеличение количества автомобилей с высокими показателями динамики, в связи с развитием технологической базы, увеличивает необходимость обеспечения безопасности движения и эксплуатации автомобилей. [1].

Контроль технического состояния систем, узлов и агрегатов автотранспорта является важным этапом жизненного цикла автомобиля, предупреждающим аварийные ситуации. В частности, контроль ходовой части весьма актуален, так как от 10 до 25 % дорожно-транспортных происшествий происходят с участием автомобилей ходовая часть которых неисправна [1, 2].

В связи с ростом интеграции элементов, установлением тенденции к укрупнению и функциональному расширению компетенций агрегатов автомобиля, ужесточению требований к их надежности возникла необходимость в разработке гибких методов диагностирования, позволяющих определять зарождающиеся, скрытые при визуальной экспертизе неисправности и прогнозировать изменение технического состояния [3].

В настоящее время при техническом обслуживании автомобилей контроль состояния некоторых узлов (например, ступичных узлов) производится с помощью органолептических методов. Чтобы увеличить эффективность данных операций контроля необходимы интеллектуальные диагностические устройства и комплексы, которые обеспечат автоматизированную диагностику ходовой части автомобиля, смогут дать исчерпывающую прогностическую оценку и предложить рекомендации по дальнейшему обслуживанию. Такие устройства и комплексы предполагают быстрое диагностирование узла с минимальными трудозатратами

и, по возможности, без применения высококвалифицированного персонала в условиях сервисного обслуживания [6, 7].

Выбор методов контроля и диагностирования подшипников, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками, весьма велик. Одними из главных показателями качества подшипников ступиц по ГОСТ Р 53830-2010 являются состояние поверхностей подшипника, наличие смазки, герметичность и др.

В частности, в практике диагностирования подшипников являются кинематические, тепловые, вибрационные, электрические и др. Самыми применяемыми являются вибрационные методы, однако их использование затруднено при поиске малых и зарождающихся дефектов элементов трибоузла, а также они обладают малой чувствительностью для оценки состояния смазочного материала [8].

Степень разработанности темы исследования. Ряд фундаментальных работ большого числа ученых, позволил получить значительные успехи в применении электропараметрических методов диагностирования, которые позволяют оперативно идентифицировать развивающиеся неисправности подшипника, такие как появление локальных дефектов на телах и дорожках качения, нарушение режимов смазывания в связи с уменьшением и загрязнением смазочного материала в трибоузле. Наибольший вклад в области разработки и применения данного метода внесен Н.К. Мышкиным [33], С.Ф. Корндорфом, К.В. Подмастерьевым [8], В.Я. Варгашкиным, Мишиным В.В., Пахолкиным Е.В., Б.Д. Блиновым.

Также в работах К.В. Подмастерьева [8, 13], Мишина В.В. [12] предложено использование совместного комплексного применения нескольких методов диагностирования, например, вибрационного и электропараметрического, что позволит повысить достоверность и надежность принятия решения о техническом состоянии подшипника. Такой подход в настоящее время представляется весьма актуальным.

Необходимость создания автоматизированных устройств для диагностирования ступичных узлов автомобилей вызвана отсутствием в отечественной и иностранной сфере сервисного диагностического оборудования производства специ-

ализированных стендов и устройств для предприятий сервиса и ремонта автомобилей.

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 работы:

- 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.

Методы исследования. В основе теоретических исследований лежат методы механики твердых тел, трибологии, нейросетевых алгоритмов обработки. Результаты математического моделирования базируются на решениях систем уравнений численными методами. Данные экспериментальной части подлежали обработке методами статистики, методам спектрального анализа. Разработка программных средств производилась с применением комплекса программного обеспечения NI LabView, 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.

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».

По тематике диссертационного исследования опубликовано 18 печатных работ, в том числе 7 статей в изданиях ВАК, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 3 патента на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и 6 приложений. Общий объем составляет 120 страниц и включает 39 рисунков, 7 таблиц, а также 5 приложений.

Глава 1. Общая характеристика проблем диагностирования ступичных подшипников автомобиля

1.1 Существующие подходы и проблемы диагностики ступичных подшипников автомобиля

Одной из важнейших народнохозяйственных задач является модернизация системы технического обслуживания и ремонта автотранспортных средств. Этому в значительной степени способствует широкое внедрение в технологические процессы технического обслуживания (ТО) и ремонта (Р) автотранспортных предприятий (АТП) и станций технического обслуживания (СТО) современных методов и средств технического диагностирования [1].

Внедрение методов и средств технического диагностирования автомобилей позволяет снизить трудоемкость и стоимость технического обслуживания (на 5—7%), уменьшить расход топлива (до 8—10%) и запасных частей (на 3—5%) [2]. В результате внедрения методов и средств диагностирования снижается удельная составляющая числа дорожно-транспортных происшествий по техническим причинам.

В настоящее время разработаны, рекомендованы к внедрению и внедрены в систему технического обслуживания и ремонта автомобилей на АТП и СТО новые методы и средства диагностирования, обеспечивающие необходимую точность и достоверность измерений широкой номенклатуры диагностических параметров. Широко применяют автоматизированные диагностические комплексы, принципиально новые средства оценки технического состояния автомобилей.

Даже при столь высоком уровне оснащения процессов диагностирования материальные и трудовые затраты на контрольно-регулирующие работы составляют 40% общего объема работ по техническому обслуживанию.

При этом остается высоким (до 50% продолжительности диагностических работ) и подготовительно-заключительное время на установку, подключение и снятие диагностических датчиков (преобразователей) [1]. В этой связи для снижения затрат на контрольно-регулирующие работы автомобили оснащают встроенными системами диагностирования. Наиболее оптимальной является комбинированная система встроенного и стационарного диагностирования. Применяют и специализированные поверочные средства, позволяющие улучшить метрологическое обеспечение средств технического диагностирования (СТД) и повысить достоверность диагностической информации.

Вопросы долговечности узлов и агрегатов автомобилей интересуют как производителей и разработчиков, так и работников автосервисных предприятий. Повышение надежности подвижных сопряжений машин и механизмов во многом связано с развитием и усовершенствованием методов и средств техники диагностирования. Автомобили представляют собой сложные сочетания узлов и механизмов, с большим количеством вращающихся частей, опорами которых являются подшипники различных видов. Диагностика состояния подшипников в ряде случаев сопряжено с трудоемкими операциями, проводимыми квалифицированным персоналом [1, 3]. При этом точная оценка износа и наличия дефектов с помощью существующих методов не всегда возможна, в связи с конструктивными особенностями узлов и агрегатов. В частности, износ или повреждение ступичных подшипников, представляющий большую опасность для всех участников движения, определяется на станциях технического обслуживания с использованием визуального осмотра и измерением люфта в диагностируемом узле.

Ступичный подшипник, установленный в узел, является достаточно сложным объектом диагностирования, поскольку его техническое состояние определяется совокупностью различных по природе и еще до конца не изученных процессов и явлений в зонах трения деталей [5, 8].

Анализируя отчёты производителей подшипников отмечено, что около 80% вышедшей из строя продукции является следствием неправильной

настройки (чрезмерный зазор/нагрузка, повреждения при установке/настройке), повреждения уплотнителей при установке, что влечёт за собой необходимость контроля, в частности, состояния ступичного узла после замены или ремонта [2, 4].

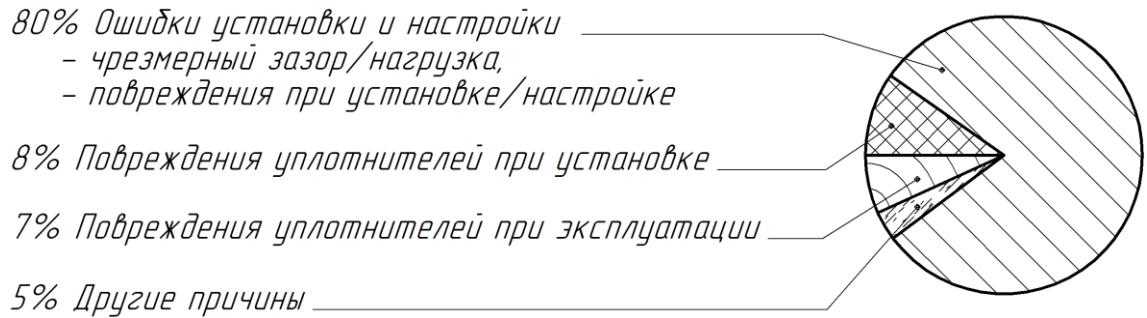


Рисунок 1.1 – Причины выхода из строя ступичных подшипников

Из опыта предприятий автосервиса встречаются случаи поставок контрафактной продукции, ресурс которой невелик. Использование таких подшипников может повлечь за собой большие убытки или нанесению вреда здоровью участникам дорожного движения.

Из-за особенностей конструкций ходовой части автомобилей, можно отметить факт, что визуальный осмотр ступичных подшипников не дает полной информации о техническом состоянии, также конструкция большинства подшипниковых узлов не предусматривает разборку или снятие уплотнительных колец, что полностью исключает контроль состояния внутренних поверхностей подшипника и состояния смазочного материала [1, 18, 19]. В связи с этим возникает необходимость применения неразрушающих методов контроля и диагностики.

Анализ показывает наличие широкого круга инструментальных методов контроля и диагностирования подшипников и узлов, которые базируются на физических принципах различной природы [10]. Но каждый из этих методов имеет ряд недостатков, что не позволяет в полной мере описать все стороны технического состояния объекта контроля.

В ряде работ был предложен комплексный подход диагностирования, представляющий собой сочетание лучших сторон методов для увеличения достоверности результатов [8].

Подробная информация об особенностях конструкций, методах контроля и областях применения содержится в работах Явленского А.К., Явленского К.Н., Гаевика Д. Т., Бейзельмана Р. Д., Бальмонта В. Б., Коросташевского Р.В., Нарышкина В.Н., Рагульскиса К.М., Подмастерьева К.В. и др.[8, 11, 15, 17, 23, 24].

1.2 Ступичный подшипник как объект контроля

1.2.1 Типы ступичных подшипников автомобилей

В ступичном узле применение однорядных подшипников практически прекратилось или используется для коммерческого транспорта и на спецтехнике. С 1960-х годов на автомобили начали устанавливать двухрядные радиально-упорные подшипники, предназначенные для восприятия радиальных и осевых нагрузок [23]. По скоростным характеристикам радиально-упорные подшипники не уступают радиальным однорядным. Увеличение угла контакта несколько снижает допустимые пределы частоты вращения. А их способность воспринимать осевую нагрузку определяется величиной угла контакта, представляющего собой угол между плоскостью центров шариков и прямой, проходящей через центр шарика и точку касания шарика с дорожкой качения. Установлено, что грузоподъемность будет увеличиваться при изменении угла контакта [9].

На рисунке 1.2 изображены различные типы ступичных подшипников, наиболее часто применяемых в автомобилестроении.

	Преднатяг гайкой					Преднатяг развальцовкой		
								
	1 пок.	1Т пок.	2 пок.	2D пок.	3E пок.	2.1 пок.	3EW п.	3.2 пок.
Ведущее колесо	✓ П	✓ П		✓ Б	✓ Б	✓ П	✓ Б	✓ Б
Ведомое колесо	✓ П	✓ П	✓ П	✓ Б	✓ Б	✓ П	✓ Б	✓ Б
Крепление к кулачку: Б - болтовое соединение, П - запрессовка								

Рисунок 1.2 – Типы ступичных подшипников автомобиля

Внедрение подшипников первого поколения обозначило переход от однорядных подшипников, которые требуют осевой зазор (от 0 до 10 мкм), а также настроек после установки в транспортном средстве. Ступичные подшипники первого поколения – единый, готовый к установке узел, состоящий из двух радиально-упорных подшипников со сдвоенными (по схеме «спина к спине») наружными кольцами [57].

Такая конструкция позволила интегрировать следующие функциональные элементы:

- уплотнительные устройства с датчиками систем ABS;
- смазочные материалы, заправленные на весь срок службы подшипника;
- саморегулирующиеся элементы.

Переход на ступичные подшипники первого поколения был ускорен ростом популярности переднеприводных автомобилей [61]. Последующие поколения ступичных подшипников получали улучшения, связанные с дальнейшей функциональной интеграцией, упрощением установки и обслуживания, а также с уменьшением веса узлов автомобиля. Таким образом, узлы новых поколений являются очень специализированными устройствами, что упрощает и удешевляет технологию производства автомобилей, но может повлечь материальные расходы при дальнейшем обслуживании.

Первое поколение ступичных подшипников обладают простой конструкцией, компактностью и могут быть использованы, как для ведущих колес, так и для колес без привода. На сборочной линии не требуется проводить настройку предварительного натяга (включая настройку размеров при помощи регулировочных прокладок). Начальный осевой зазор настраивается таким образом, что после установки предварительный натяг попадает в указанный диапазон [5-7, 26].

Второе поколение ступичных подшипников имеет наружное кольцо со встроенным фланцем, к которому могут быть присоединены тормозной диск и колесо. Это дает возможность уменьшить общее количество элементов в ходовом узле и значительно уменьшить вес. Следует отметить, что стандартные ступичные подшипники второго поколения использовались только для ведомых колес, а подшипники поколения 2D с фланцем, для закрепления на поворотном кулаке, могут быть использованы и для ведущих колес [4, 57, 58].

Третье поколение ступичных подшипников имеет интегрированные фланцы на внутреннем и внешнем кольце подшипника для одновременного крепления к ступице и тормозному диску [6, 7, 61]. В отличие от типа 3.2 или 2.1, подшипники поколения 3E имеют только одно внутреннее кольцо. Подшипники типа 3.2 и 3E идентичны в отношении технических характеристик, таких как ресурс, осевые биения и др.

Для повышения срока службы и точности ступичные подшипники практически всех поколений рассчитаны на предварительный натяг от 0 до 40 мкм. У некоторых подшипников есть возможность задать предварительный натяг обратимо затянув гайку центральной оси с необходимым моментом, а у других натяг достигается в рамках производственного процесса и остается неизменным (поколения 2.1, 3EW, 3.2). Основное различие между подшипниками поколений 3E и 3EW изображено на рисунке 1.3. Для подшипника типа 3EW, уже обладающим предварительным натягом, гайка оси служит только для предотвращения смещения вала в осевом направлении.

Данный предварительный натяг производится на стадии сборки узла, путем пластической деформации конца фланца, что создает компрессию внутренних элементов ступичного подшипника и, как следствие, позволяет уменьшить момент затяжки главной гайки.

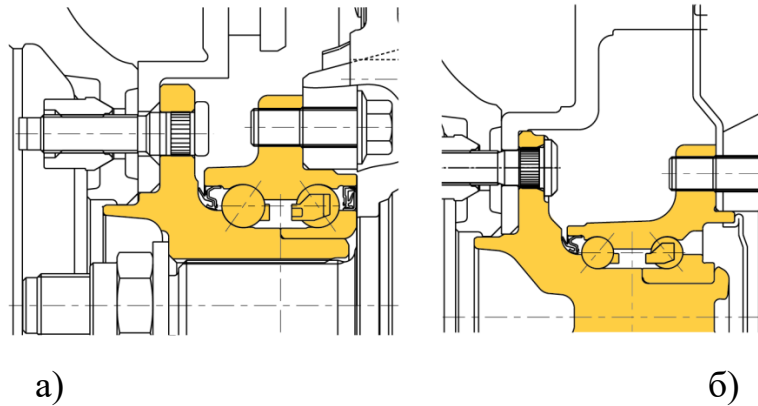


Рисунок 1.3 – Ступичные подшипники 3E (а) и 3EW (б) типов

В последние годы начали появляться ступичные подшипники четвертого поколения, изображенные на рисунке 1.4 [6, 49, 57, 58]. Их особенности заключаются в том, что ступичные подшипники третьего поколения совмещены с ШРУС, что позволяет достичь значительного снижения веса и увеличения компактности, увеличение жесткости конструкции, простоты монтажа и ремонтпригодности.



Рисунок 1.4 – Ступичный подшипник 4-ого поколения (Иллюстрация NTN)

Еще большую интеграцию элементов ступичного узла ступичного можно продемонстрировать на ступичном подшипнике 5 поколения, изобра-

женном на рисунке 1.5, которые только начинают устанавливать на серийные автомобили. Внешнее кольцо подшипника жестко зафиксировано в тормозном диске и не позволяет его извлечь [58]. Такая конструкция значительно облегчает монтаж узла, не требует регулировок в процессе установки, а также значительно уменьшает вес элементов.



Рисунок 1.5 – Ступичный подшипник 5-го поколения

Сравнительные характеристики различных типов ступичных подшипников представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение различных типов ступичных подшипников

Тип ступичного подшипника	Особенности
1	2
Ступица с двумя однорядными подшипниками	Требуется сложная настройка преднатяга, сложный механизм смазывания, сложный процесс установки, большие габариты собранного узла, большое расстояние между центрами приложения нагрузки
Ступичный подшипник первого поколения	Простая установка, компактный размер, не требует заполнения смазкой, встроенные уплотнители, простая и надежная настройка преднатяга

Продолжение таблицы 1.1

1	2
Ступичный подшипник второго поколения	Не требует тугой посадки в кулаке, простой монтаж, простая настройка преднатяга, малые размер и вес, возможно наличие встроенных датчиков скорости вращения
Ступичный подшипник третьего поколения	Преднастройка оптимального предварительного натяга, простой монтаж, увеличена жесткость, простая установка датчиков АБС
Ступичный подшипник четвертого поколения	Интеграция с ШРУС, увеличение жесткости, малые размеры и вес, облегчение установки и сборки узла в целом
Ступичный подшипник пятого поколения	Совмещение с тормозным диском, упрощение конвейерной сборки, уменьшение веса узла, не требуетстройки

1.2.2 Виды дефектов ступичных подшипников

В нормативных документах [72, 73] четко прописаны все важные термины и определения, относящиеся к сфере управления качеством продукции, в частности, термин дефект регламентирован как отклонение параметров продукции от установленных норм.

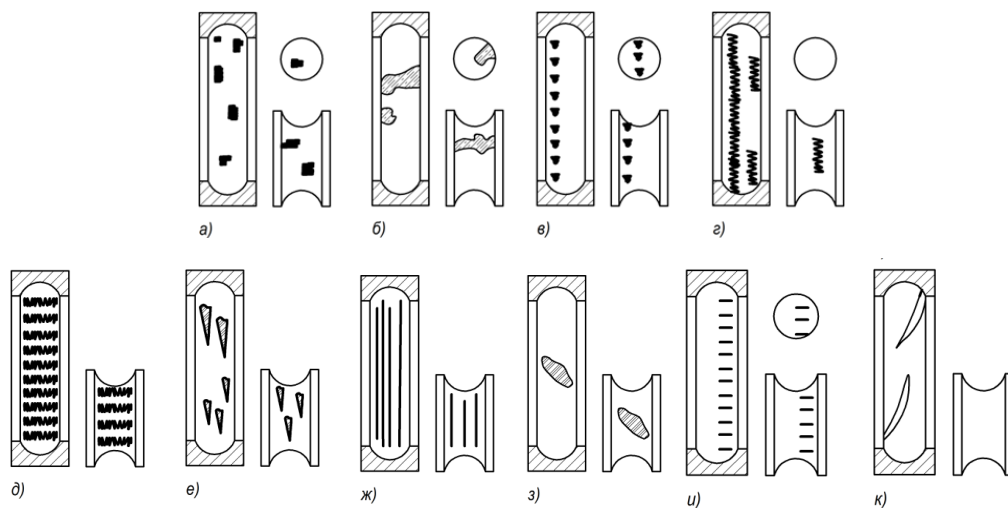
Особые требования по соблюдению нормативных параметров предъявляются к подшипникам качения, как весьма ответственным деталям любого механизма с вращающимися деталями [5, 61, 63]. К одной из главных характеристик относится показатель шероховатости рабочих поверхностей. Для различных типов подшипников оговаривается индивидуальное числовое значение шероховатости, но не больше 0,04 мкм (Ra) и 0,1 мкм (Rz). Обязатель-

ны к соблюдению также гранность, овальность, разноразмерность тел качения, осевое и радиальное биение дорожек качения [42, 74, 75].

Основные виды дефектов представлены на рисунке 1.6.

По одному из подходов, классификация дефектов опор качения проводится путем группирования возникающих дефектов по времени их появления. К примеру, подшипники могут повредить до монтажа, во время проведения монтажных работ или уже в процессе эксплуатации оборудования. Специалисты компании «SKF» определяют следующие причины, приводящие к возникновению дефектов: вина производителя; допущенные погрешности на стадии проектирования подшипникового узла (неправильный выбор посадочных размеров, типа подшипника, системы смазки); неправильная сборка узла; влияние окружающей среды; несоблюдение норм эксплуатации [2, 4].

Стоит отметить, что авторы современных научных трудов по дефектоскопии и неразрушающему контролю, основным признаком, классифицирующем дефекты, считают стадию технологического процесса, на которой данный тип дефекта появился.



- а) усталостные разрушения поверхностей, б) выкрашивание поверхности, в) абразивный износ, г) атмосферная коррозия, д) бриннелирование, е) электроповреждения, ж) натирсы, з) задиры поверхности, и) повреждения при сборке, к) несоосность колец

Рисунок 1.6 – Классификация дефектов ступичных подшипников

Многие дефекты возникают еще на стадии производства. К ним относятся наросты, раковины, вмятины, инородные включения, газовые поры, зональные и дендритные ликвации, заливины, оксидные пленки, трещины, образовавшиеся при остывании металла. Также к списку дефектов, добавляются расслоения, рванины, вкрапления шлака, скворечники, волосовины, трещины, закаты и заковы, образующиеся при обработке давлением. При термической обработке увеличивается зерно, детали пережигаются, теряют углерод или наоборот, насыщаются углеродом, появляются водородные и термические трещины, флокены [41, 42]. Шлифовочные и отделочные трещины и прожоги появляются во время механической обработки поверхностей.

Для выяснения степени влияния вышеперечисленных дефектов на отказы опор качения, в ходе опытных испытаний в [20] выявлено, что исследуемые дефекты не оказывают существенного воздействия на выход из строя подшипниковых узлов.

Рассмотрим виды дефектов, которые возникают и увеличиваются в ходе проведения монтажных работ и во время эксплуатации ступичных подшипников. На процессы изнашивания указывают различного рода разрушения элементов конструкции узла. Своевременное выявление момента начала процесса изнашивания, обеспечит успех в поиске и устранении дефектов.

Изнашивание – это процесс отслаивания частиц поверхностного слоя металла или деформирование его во время трения [56]. Впоследствии изменяются линейные параметры тела и его форма.

Множество разных причин, в той или иной мере, способствуют процессу изнашивания. Эти проблемы, и частично рекомендации по их решению, подробно описаны отечественными и иностранными авторами в своих работах [9, 17, 21, 22].

Наиболее распространенной причиной разрушения рабочей поверхности подшипников качения считается усталостное изнашивание. Или механическое изнашивание вследствие разрушения микрообъемов в верхних слоях материала. Исследования компании «SKF» констатируют, что усталостные

явления способствуют разрушению подшипников качения в 30% случаев от общего числа зафиксированных поломок [2]. Усталость верхнего микрослоя (может достигать сотен мкм) зависит от напряженно-деформированного состояния материала, физических и механических свойств, наличия смазочного слоя, физико-химических характеристик, иных факторов [25, 28, 29, 31].

Результатом усталостного изнашивания (питтинга), становится отслаивание частиц материала от рабочей поверхности и образование раковин на поверхности трения [31, 33, 34]. Об отслаивании идет речь тогда, когда раковины размещаются по рабочей поверхности подшипника качения отдельными группами. Когда раковинами поражается вся рабочая поверхность изделия, наступает общий износ детали.

Довольно широко распространен так называемый класс локальных дефектов. Он образуется на рабочих поверхностях подшипников качения при попадании их в зону абразивного воздействия. Наиболее подвержены такому влиянию подшипники качения, работающие в неблагоприятных условиях (транспортные машины) [33, 34]. Абразивный износ случается местах соприкосновения поверхностей различной жесткости, в связи с повреждениями уплотнителей и пыльников подшипника. Чаще всего это происходит, когда твердые инородные частицы с размерами, большими чем слой смазки, попадают между двумя поверхностями трибосопряжения.

В результате такого воздействия, на рабочих поверхностях подшипников качения образуются царапины или риски (чаще применяется к подшипникам). В роли абразива могут выступать частицы металла, образующиеся в результате изнашивания трущихся деталей, или проникающие извне частицы различного происхождения. При более интенсивном абразивном изнашивании, на поверхностях трения появляются задиры в виде глубоких и широких каналов, параллельных направлению скольжения [34].

В случаях, когда нарушаются нормы эксплуатации ступичных подшипников (отсутствие необходимого уровня смазочных материалов, деструкция смазки, вследствие ее загрязнения, разрушение адсорбционных

слоев на поверхности детали, неблагоприятное совмещение микровыступов деталей) возможно протекание процессов адгезионного изнашивания, для которого характерно сваривание рабочих поверхностей в отдельных местах.

Адгезионному износу зачастую сопутствует такое явление, как заедание. Его появление вызывают схватывания и вырывания материала, перенос материала с одной поверхности трения на другую (налипание, наволакивание), влияние возникающих выступов на сопряженную поверхность [28].

В результате образования соединений микронеровностей, начинается процесс разрушения двух соприкасающихся поверхностей. Но рабочие поверхности могут сами восстановиться только в том случае, если неблагоприятное воздействие на детали будет кратковременным (например, будет восполнено недостающее количество смазки). В обратном случае величина износа интенсивно увеличивается, возрастает температура, подшипник заклинивает и разрушается [14].

Начинается этот процесс после вырывания материала с рабочих поверхностей подшипников и образования на них раковин [17].

Еще одно распространенное явление, разрушающее рабочие поверхности опор качения называется фреттинг-коррозией. При этом происходит коррозионно-механический износ соприкасающихся деталей при небольших колебательных перемещениях относительно друг друга. Этот процесс является достаточно сложным, сопровождается химическими и физическими явлениями, в результате которых на поверхностях деталей появляются раковины. Данный вид изнашивания имеет одну особенность. При фреттинг-коррозии дефекты образуются не только во время эксплуатации подшипников качения, но и от воздействия вибрации, при перемещении изделий [25].

Еще одним примером возникновения дефектов во время транспортирования подшипников качения или при выполнении монтажных работ, служит процесс формирования лунок ложного бринеллирования от приложенных ударных нагрузок. При этом глубина лунок может достигать десятков микрометров. В этом случае индентором выступают детали подшипника или ча-

стицы инородных тел. Во втором случае, абразивные частицы образуют лунки меньшей площади, которые еще называют вмятинами [31].

Эксплуатация ступичных подшипников сопровождается процессами местных нагревов и охлаждений отдельных частей. При этом возникают знакопеременные нагрузки, характерные для огневой и механической обработки металла, что вызывает появление трещин. Их увеличение приводит, как правило, к разрушению деталей подшипника.

Еще одной распространенной формой разрушения рабочей поверхности выступает коррозия. Этот химический процесс вызывает возникновение на деталях подшипников микротрещин. На местных участках микротрещины развиваются и, впоследствии, образуют очаги выкрашивания – раковины коррозионного происхождения [8].

Стоит отметить, что в обзоре были приведены теоретические выкладки протекания процессов изнашивания и сопровождающих их явлений. Но, на практике, в чистом виде они встречаются крайне редко. И тому есть примеры. В результате усталостных явлений, материал выкрашивается и накапливается в смазке. Это приводит к увеличению абразивного износа. С другой стороны, абразив внедряется в поверхностный слой материала детали подшипника и образует вмятину (лунку), материал в окрестностях которой обладает повышенными остаточными напряжениями. Это приводит к увеличению вероятности усталостного разрушения подшипника качения в 50 раз [33].

Последствием рассмотренных форм износа может быть увеличение температуры эксплуатируемой опоры качения с последующими процессами адгезионного изнашивания. И, хотя в теории существует множество процессов и форм износа рабочих поверхностей подшипников качения, в практической плоскости их можно встретить в ограниченном количестве [13].

1.2.3 Методы диагностирования ступичных подшипников

Необходимость диагностики ступичных подшипников и подшипников в целом предполагает интенсивное развитие данного направления. За последние 20 лет по информации Федерального института промышленной собственности (ФИПС) в подклассе испытания подшипников (G 01 M 13/04) по МКИ зарегистрировано свыше 1000 изобретений, базирующихся на разнообразных физических принципах и обладающих различными возможностями и точностью.

Техническое состояние подшипника качения может быть охарактеризовано двумя видами диагностических параметров [8]:

- прямыми;
- косвенными.

Прямые параметры связаны с объектом контроля структурно, что позволяет характеризовать техническое состояние непосредственно. Такие параметры: характеристики микрогеометрии поверхностей качения, параметры локальных дефектов, макроотклонения элементов подшипника, зазоры, углы контакта и др. [37].

Косвенные параметры (выходные) определяют состояние объекта контроля по опосредованным свойствам, которые характеризуются параметрами процессов, происходящих внутри трибосопряжения. К этой группе относят различные статистические оценки признаков, например, вибрации, момента трения, температуры, электрического сопротивления, различные спектральные оценки и др.

Прямые параметры более просты для идентификации, в связи с чем они составляют основу параметров, которые ранжируются и регламентируются в научно-технической документации. В случае получения информации о действительных значениях параметров эту информацию, нельзя считать достаточной для достоверной оценки состояния подшипника, поскольку каждый

из внутренних параметров часто нормируется независимо от влияющих факторов и значений других параметров.

Следует отметить, что подшипник – это система, на которую влияет большое число, как внешних, так и внутренних факторов, тогда возникает необходимость в определении состояния динамически. Отсюда наиболее выгодно использование косвенных параметров, которые позволяют в динамике и комплексно охарактеризовать процессы в трибосопряжении, а, следовательно, и техническое состояние подшипника в целом [47].

Поэтому, для выбора метода получения первичной информации из зоны трения будут рассмотрены только косвенные методы оценки состояния подшипника.

Ступичные подшипники являются частным случаем конструкций и применения подшипников качения. Существует большое количество методов диагностики подшипников, среди которых часто используемыми являются: механические методы, тепловые методы, кинематические методы, виброакустические методы, ультразвуковые методы, методы фотометрии и спектрометрии, электрические методы [8, 13, 22].

В работах [8, 12, 13] проанализированы и систематизированы большинство методов диагностики, ряд из которых применим и для контроля технического состояния ступичных подшипников при проведении планового обслуживания автомобиля.

На рисунке 1.7 приведена классификация методов диагностики подшипников качения [8, 24].

Методы диагностирования по прямым параметрам не подходят в рамках данных исследований, так как проводятся на стадии производства подшипников и неприменимы в рамках технического обслуживания автомобиля. Тогда как методы с применением косвенных или выходных параметров значительно лучше подходят для решения поставленных задач.

Наиболее используемыми на практике методами, согласно [8], для анализа и диагностики трибосопряжений являются следующие методы:

- кинематический;
- виброакустический;
- тепловой;
- электрический;
- механический (анализируются параметры момента сопротивления вращению и трогания).

Среди перечисленных методик наиболее перспективными на сегодня являются электрические и виброакустические методы. Первый из них основан на проведении диагностической оценки электрических параметров флуктуирующих процессов в подшипниках, а второй на анализе вибрационных параметров деталей подшипника.

Проведенные, за несколько последних лет, патентные исследования по тематике разработки технологий триботехнических диагностик и испытаний показывают, что технические решения по этим двум методам составляют наибольшую долю от общего числа решений существующих методов в этой области. Электрические методы составляют 28%, а виброакустические – 24% [44, 45].

Наиболее часто на сегодня используются виброакустические методы диагностики [24, 63]. Они основаны на измерении и последующем анализе параметров виброакустических сигналов, которые излучают в процессе работы трибосопряжения подшипниковых узлов (рабочая диагностика). Кроме этого, выполняется анализ частотных параметров канала, по которому проходит сигнал от излучателя (тестовая диагностика). Исследуемый канал состоит из следующих цепей – излучатель – трибоузел – первичный преобразователь.

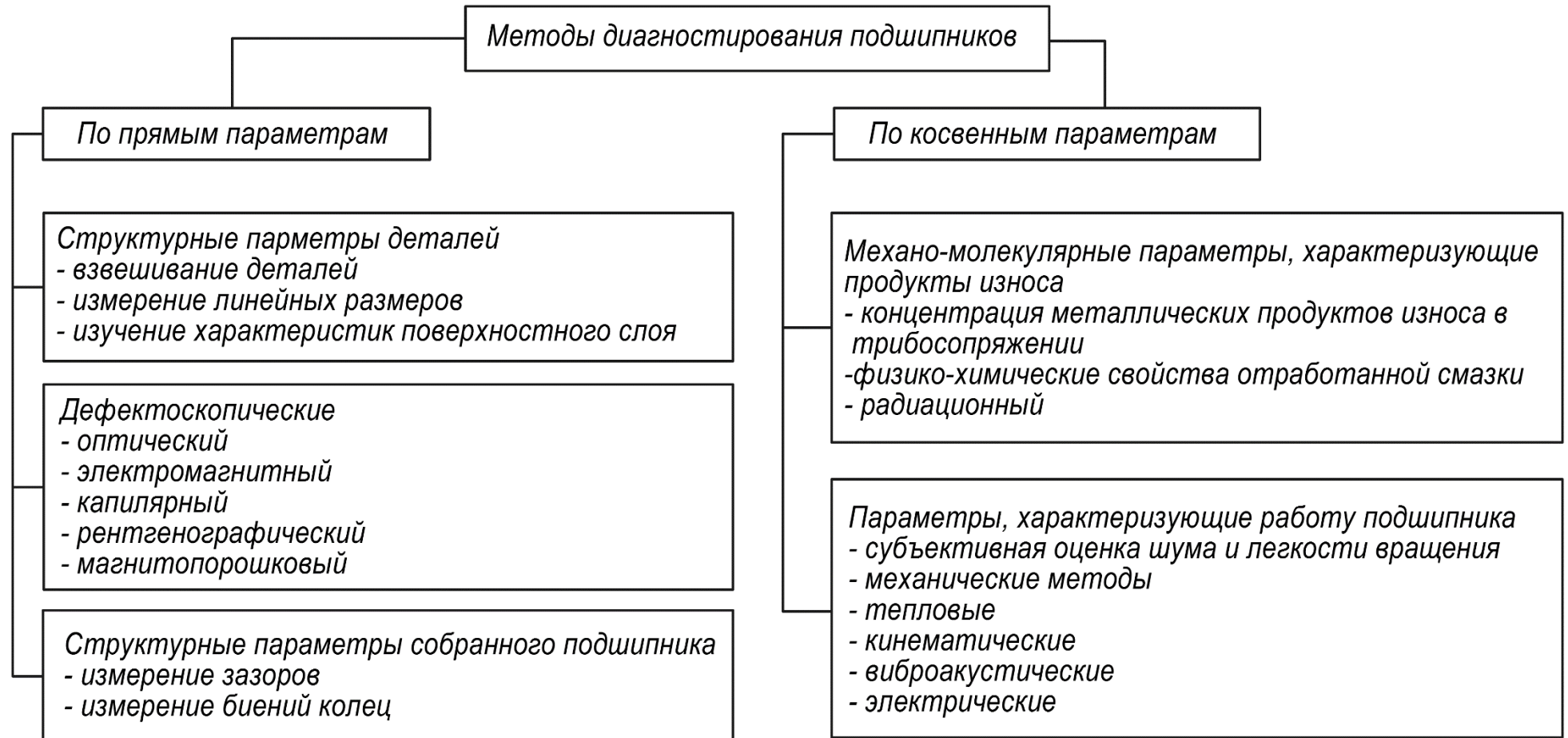


Рисунок 1.7 – Классификация методов диагностирования подшипников

В процессе использования этого метода возникают определенные проблемы, связанные с тем, что передаваемый по каналу вибросигнал является сочетанием реального чистого сигнала и помех. Источниками помех являются колебания, генерируемые из-за неуравновешенности отдельных деталей агрегатов или механизмов [79]. Также источниками помех могут быть упругие волны, генерируемые в процессе работы привода, а также собственные колебания деталей, совершающих вращательные движения. Затрудняет использование виброакустических методов то, что во многих случаях соотношение амплитуд чистого сигнала и помех бывает незначительным при идентичных частотных спектрах [63, 76, 77]. В таких случаях использование подобных методов является практически невозможным. Поэтому даже учитывая все преимущества и позитивные стороны виброакустического метода, иногда он не может дать достоверную информацию о техническом состоянии тробосопряжения, особенно если механические повреждения являются незначительными. Кроме этого, в силу высокой инерционности трибоузлов и первичных преобразователей, чувствительность виброакустического метода в зоне трения и в самой смазке весьма ограничена [78]. Учитывая технические особенности измерительного канала, придется отказаться и от анализа вибраций трибоузлов на ультранизких частотах.

Согласно [74] частотный диапазон при контроле уровня вибрации разделен на три полосы (50-300, 300-1800 и 1800-10000 Гц). Производят измерения виброскорости наружного кольца, вращая внутреннее с частотой 25-30 с⁻¹. Также производят контроль общего уровня вибрации, измеряя виброскорость или виброускорение в частотном диапазоне от 50 до 10000 Гц, или контролируя виброускорение в трех полосах.

Метод акустической эмиссии приобретает все большую популярность при диагностировании опор качения. Этот метод основан на измерении и идентификации упругих волн, образующихся при зарождении и развитии дефекта на элементе подшипника. Так как спектр акустической эмиссии опре-

деляется высокочастотными гармониками, этот метод значительно лучше ведет себя в условиях фона и высокого уровня шумов. Так как спектр акустических сигналов лежит в относительно высокочастотной полосе, следовательно, наблюдается высокая чувствительность метода при обнаружении даже стадии зарождения дефектов. Однако использование этого метода для диагностирования ступичных подшипников не представляется возможным, в следствии с конструктивными особенностями узла [79].

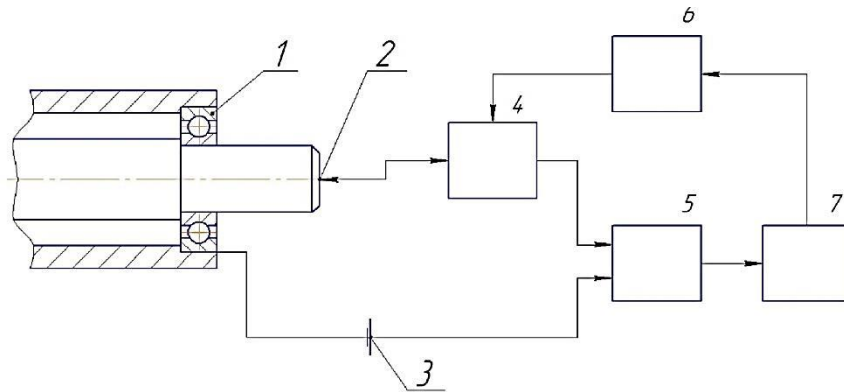
Электрические методы широко применяются при диагностике различных трибосопряжений на протяжении многих десятилетий. Их сущность заключается в определении технического состояния по значениям параметров электрических процессов в зоне трения. В результате этого происходит либо электризация зоны трения, либо изменение электрических параметров трибосопряжения.

Объект контроля подключается к средству диагностирования напрямую и позволяет измерить характеристики флуктуаций ЭДС или электрических параметров. Важным моментом является, то что диагностическая информация поступает непосредственно из трибосопряжения, что значительно расширяет динамический диапазон метода [8, 25].

Одним из часто используемых методов оценки вероятности микроконтактирования является метод измерения нормированного интегрального времени микроконтактирования НИВ, реализация которого заключается в измерении времени импульсов низкого электрического сопротивления с усреднением по времени [8, 12, 25]. Усредненная по времени оценка длительности микроконтактирования полностью характеризует состояние смазочной пленки в трибосопряжении [33].

Другой подход к диагностированию подшипников электропараметрическими методами заключается в измерении и оценке функции сопротивления подшипника. $R(t)$. Определение реализации функции $R(t)$ производится измерением мгновенных значений сопротивления подшипника. Для этого

применяют устройство, структурная схема, которого представлена на рисунке 1.8.



1 - подшипник; 2 - токосъемники; 3 - источник напряжения; 4 - коммутатор; 5 - преобразователь «сопротивление-напряжение»; 6 - устройство управления; 7 - цепь дальнейшего преобразования сигнала

Рисунок 1.8 - Устройство измерения сопротивления подшипника

Устройство подключается к диагностируемому подшипнику через ртутные токосъемники для обеспечения контакта с вращающимся кольцом. Если представить подшипник как эквивалентное сопротивление, то для измерения необходимо обеспечить стабильный ток проходящий через него. Это обеспечивается источником стабильного тока. После чего снимая сигнал напряжения с подшипника пропорциональный сопротивлению. Достоинство данного метода в том, что работать с сигналами напряжения намного проще, так как с применением аналогово-цифровых преобразователей можно производить цифровую обработку диагностической информации [36].

Электрические методы эффективно используются для решения таких задач, как: диагностирование контакта и режима трения (измерение трибоэдс и триботоков, переходного сопротивления контактов, интенсивности экзэмиссии, электродных потенциалов при трении); оценка триботехнических характеристик материалов и смазочных сред (измерение работы выхода электронов у материалов деталей, электропроводности граничных слоев, оценка

температурной стойкости материалов и смазочных сред); мониторинг изнашивания (магнитный, электромагнитный и фотоэлектрический анализ смазочной среды, поляризация трущихся сопряжений)[33].

Применительно к ступичным подшипникам с помощью электрических методов также решается целый комплекс диагностических задач, однако присутствуют определенные особенности, связанные с конструктивом и сложностью объекта контроля.

Электрические методы диагностирования трибосопряжений являются флуктуационными методами, поскольку о состоянии подшипника судят по флуктуациям параметров таких величин, как ЭДС, емкость, активное, комплексное или магнитное сопротивление. Такие методы имеют ряд неоспоримых преимуществ перед другими методиками диагностики. Заключаются они в том, что информация о техническом состоянии трибосопряжений поступает непосредственно из зоны трения деталей в виде электрического сигнала, который хорошо поддается оцифровке и дальнейшему анализу. Сигнал, который поступил из зоны трения, в этом случае имеет частоту в несколько десятков МГц, что не реально получить ни в каком другом методе. Кроме этого, при использовании электрического метода, нет необходимости в применении первичного электронного преобразователя, подключаемого к трибозулу посредством коммутации с корпусом узла и валом. Это позволяет реализовать слабоинерционные и чувствительные диагностические методы анализа технического состояния трибосопряжений, и способствует дальнейшему развитию этого направления [46, 47].

Физический принцип электрического метода диагностики основан на нескольких положениях. Гидродинамическая пленка смазочного материала представляет собой диэлектрический материал [33]. В процессе смазки поверхностей электрическое сопротивление отдельного участка цепи трибоконтакта будет зависеть от толщины смазочной пленки и свойств самой смазки (ее удельное сопротивление может составлять значения от 108 до 1022 Ом·м)[39]. Электросопротивление в этой области довольно высокое.

Если же на участке происходит разрыв смазочной пленки, иными словами наблюдается микроконтактирование, то естественно значения сопротивления значительно уменьшаются [22]. В момент разрыва смазочной пленки электрическое сопротивление будет определяться размером контактирующих площадок, сопротивлением поверхностного слоя и остатка смазочного материала, а также сопротивлением стягивания [33]. Эффект резкого уменьшения сопротивления позволит сделать выводы о состоянии смазочного слоя, величине его разрушения и возможности микроконтактирования. По вероятности возможного микроконтактирования выбранном временном промежутке можно будет судить о качестве работы трибоузла. Выполнив такую оценку на начальном этапе эксплуатации трибоузла можно говорить о качестве его сборки.

Объединить разные физические принципы, заложенные в основу двух методов в единый комплексный подход можно путем выполнения анализа определенных математических моделей, которые и будут описывать электрические и вибромеханические процессы, проходящие в подшипнике качения. Базируясь на полученных данных, можно будет сформировать единую теоретическую модель, выходными параметрами которой будут временные зависимости электрического сопротивления и вибросигнала. На базе такой модели разрабатывается метод диагностирования, который включит в себя и анализ вибраций, и анализ электросопротивления трибосопряжения [46].

Следует также отметить, что все процессы, происходящие в зоне трения отдельных деталей подшипника, определяют его состояние в определенный момент и довольно сложно описываются с помощью математических моделей. Поэтому, использование ни одного из существующих методов не может в полной мере гарантировать получение исчерпывающей и достоверной информации о состоянии объекта в определенный момент времени [28, 29].

Каждый из существующих методов в той или иной степени позволяет анализировать сложные процессы, протекающие при взаимодействии составных частей подшипника. Исходя из поставленной задачи диагностики, тот

или иной метод может быть более или менее эффективен. Исходя из этого, следует отметить, что использование только одного из известных методов имеет принципиальное ограничение, которое невозможно преодолеть.

В связи с этим, интенсивно проводятся работы по поиску оптимального сочетания диагностических параметров, которые максимально смогут дать информацию о состоянии объекта и построению на их основе новых методов и инструментов для диагностики [33, 46].

В последнее время, кроме совместного использования различных электрических методов диагностирования, широко используют такие методики, в которых получаемые электрические параметры, хорошо сочетаются и дополняются параметрами иного плана, например, такими как виброакустическими, кинематическими или механическими параметрами. В таких случаях комплексное сочетание разных по своей природе принципов получения информации об объекте в добавок к оригинальным алгоритмам, разработанным по математическим моделям, гарантирует решение таких диагностических задач, которые в принципе не могут решаться с применением одного диагностического метода.

Учитывая вышесказанное, можно прийти к заключению, что использование только одного из методов диагностирования неизбежно приведет к снижению достоверности получаемых результатов.

Поэтому в последнее время интенсивно ведутся различные исследования по созданию комплексного подхода и комплексных методик диагностирования, на основе уже существующих методов [8, 36, 47]. Для этого требуется провести теоретические исследования возможности получения диагностических данных в процессе комплексного измерения вибрационных и электрических параметров трибосопряжений. Также потребуется выполнить ряд экспериментальных исследований и сопоставить сигналы электрической природы и вибросигналы, получаемые из зоны трения трибоузлов. Это поможет проанализировать корреляцию результатов, получаемых разными ме-

тодами, и определить чувствительность к факторам, которые определяют качество сборки трибоузлов.

Различают несколько подходов построения методов диагностики по определенным параметрам. Рассмотрим главные из них с использованием конкретных примеров [8, 27].

Первый из таких подходов предусматривает применение разных параметров диагностики для поиска решений для одной и той же диагностической задачи

Положительный результат такого подхода достигается путем сочетания преимуществ разных методов, а также компенсации недостатков одних методик за счет других. Подобный принцип используется и измерительной аппаратурой с компенсированием, когда одна и та же величина измеряется несколькими приборами, принцип действия которых основан на разных физических процессах.

Исходя из этого предложено устройство, в котором одновременно реализованы электрические и виброакустические методы. Чтобы гарантировать достоверность полученных результатов о качестве поверхностей трения и наличии на них дефектов сопоставляют временную зависимость амплитуд импульсных вибраций и величину электрического сопротивления (наличия эффекта контактирования). Достоверно известно, что источником вибрации может служить дефектная деталь. В то же время наличие дефекта спровоцирует прорыв смазочной пленки и уменьшение электрического сопротивления. Сопоставив эти два фактора, можно более точно судить о состоянии поверхностей подшипника.

Второй подход основан на одновременном применении разных диагностических параметров для накопления измерительных результатов, характеризующих исследуемый объект с разных сторон [8].

Например, если провести отдельно измерения среднего значения проводимости, а также амплитудную зависимость ее флуктуаций, можно получить информацию о состоянии поверхности трения и используемой смазки. Если

измерить среднее сопротивление подшипника и его емкости можно судить о том, какая толщина пленки смазки и вторичных структур. Полученная дополнительная информация позволит более точно судить о состоянии поверхности исследуемых деталей.

В основу третьего подхода положено объединение параметров с разных диагностических методов, что позволит получить качественно новую информацию об исследуемом объекте, которую в принципе не даст ни один метод, применяемый отдельно [8]. Например, можно следующим образом совмещать различные диагностические параметры и алгоритмы:

- электрические диагностические параметры применяются для оценки режимов смазывания в подшипниках при его работе или настройке, а с помощью иных параметров решают диагностическую задачу, применяемую для этого режима смазки;

- применяя электрические параметры, обеспечивают управление алгоритмами измерения диагностических параметров иных видов;

- нужная информация об объекте получается посредством суммарной обработки результатов по нескольким диагностическим параметрам.

Согласно [80], все вышеперечисленные факты обобщаются в формулировках стандарта и для повышения достоверности диагностирования рекомендуется:

- а) провести повторные измерения для сравнения полученных результатов и подтверждения обоснованности индикации достижения уровня предупреждения;

- б) сравнить результаты текущих измерений с предшествующими;

- в) уменьшить интервал между измерениями;

- г) провести дополнительные измерения в тех же или других точках;

- д) использовать более информативные методы обработки данных;

- е) использовать другие методы анализа для сравнения результатов;

- ж) изменить режим работы машины или ее конфигурацию для получения дополнительной диагностической информации;

з) обратиться к опыту эксплуатации данной машины и исследовать записи о предыдущих неисправностях.

1.4 Обзор реализаций синтеза диагностической модели на основе алгоритмического обучения

Процесс диагностики ступичных подшипников состоит из трех основных стадий, представленных на рисунке 1.9 [47]:

- получение измерительной информации от объекта в виде сигнала;
- задача обработки сигнала, которая включает извлечение из полученного сигнала информации, характеризующей объект диагностирования, и выделение полезного сигнала на фоне помех;
- задача классификации сигналов, полученных в результате первой стадии.

Основными методами первичной обработки сигнала являются [43]:

- временные, основанные на анализе статистических параметров (среднего значения сигнала, его дисперсии, СКО, эксцесса и др.);
- частотные (преобразование Фурье, анализ спектра мощности сигнала, преобразование Гильберта);
- частотно-временные (вейвлет-анализ).

Для построения диагностических моделей существует ряд способов и возможностей, связанных с применением специализированных алгоритмов распознавания и принятия решений с учетом параметров, описывающих разнородные процессы, характеризующие техническое состояние объекта контроля.

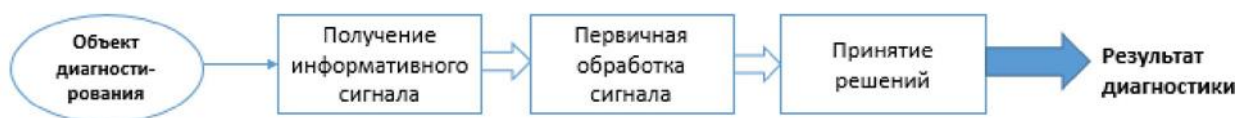


Рисунок 1.9 – Структура диагностической модели

Так как в задачи синтеза модели диагностики подшипника входит решение и аппроксимации многомерной системы рассмотрим наиболее используемые для этого алгоритмы.

Для осуществления анализа процессов необходимо четкая формализации связанной информации с анализом внутренних характеристик синтезированной модели.

Сложность математического моделирования процессов и систем напрямую зависит от их размера и глубины.

Это связано с увеличением числа переменных и параметров, повышением сложности измерения отдельных переменных. В результате, создание адекватной модели становится практически невозможным. Была предложена [81] лингвистическая модель, которая использует не математические выражения, а слова, отражающие качество. Применение словесной модели не обеспечивает точность, аналогичную математическому моделированию, однако создание хорошей, качественной модели возможно. В этом случае предметом обсуждения становится нечеткость слов языка описания системы.

Достоинства нечеткой логики, наиболее ярко проявляющиеся на примере общей задачи нечеткого управления. Вместо одного четкого обобщенного правила нечеткая логика оперирует со множеством частных правил. При этом для каждой локальной области распределенного информационного пространства, для каждой регулируемой величины, для каждой цели управления задаются свои правила. Это позволяет отказываться от трудоемкого процесса свертки целей и получения обобщенного целевого критерия, что, в свою очередь, дает возможность оперировать даже с противоположными целями.

Таким образом, существенные общие черты нечеткой логики и мышления человека, поэтому методы управления на основе нечеткой логики можно считать во многом эвристическими.

Развитием эвристических алгоритмов обработки нечетких данных можно считать самоорганизующиеся системы. В общем случае можно пред-

ложить следующую схему реализации процесса управления: распознавание - предсказание - идентификация - принятие решения - управление.

Эффективность такой интеграции нашла практическое подтверждение в разработке соответствующих инструментальных средств. Несмотря на известные общие подходы к интеграции генетических алгоритмов и нечеткой логики, по-прежнему актуальна задача определения наиболее значимых параметров операционного базиса генетических алгоритмов с целью их адаптации в процессе работы за счет использования нечеткого продукционного алгоритма.

Нейронные сети — это совокупность математических моделей, имеющих в своей структуре аналогии с анатомическим строением нервной системы, предназначенная для анализа данных, после прохождения этапа получения априорной информации – обучения.

Одним из наиболее известных подходов к решению задачи построения ДМ на основе ИНС в автоматическом режиме, обеспечивающий обобщение данных, является использование кластер-анализа [3] для выделения правил как центров кластеров, получаемых по выборке данных с последующим отображением правил в структуру ННС и ее обучением на основе градиентных методов [4]. Недостатками такого подхода являются его неопределенность в числе искомым кластеров и начальных значениях их координат, высокая итеративность и сохранение всего набора признаков и термов в результирующем разбиении признакового пространства и получаемом наборе правил, и, как следствие, низкий уровень обобщения данных, а также избыточность получаемой ДМ и ее недостаточная интерпретабельность.

В [48,54, 62, 65] предложен комплекс методов построения диагностической модели в виде НС на основе стохастического поиска. Данные методы позволяют синтезировать диагностическую модель с учетом модели качества НС [5], что позволяет обеспечить требуемые свойства у результирующей диагностической модели. Однако данный подход является высокоитеративным и медленным, но, в отличие от предыдущего подхода, позволяет решать за-

дачи отбора признаков, выделения правил и формирования структуры НС в автоматическом режиме.

Синтезированная модель подвергается процессу обучения. Каждые нейроны итеративно обрабатывают входные данные и корректируют свои весовые коэффициенты для приведения выходного сигнала к требуемому при обучении уровню [81].

Полученная сеть после обучения представляет собой элемент модели зависимости между переменными. Но представлены эти зависимости в неявном виде – в виде распределения весовых функций по каждому элементу в сети.

При оптимальном выборе архитектуры нейронные сети могут характеризовать собой диагностическую модель очень высоких порядков, с большим количеством входных параметров и возможных диагностических решений [82].

Для хранения информации используются величины интенсивности межнейронных соединений, которые называются синаптическими весами.

Однако, как отмечается в [81] большинство существующих нейросетевых программ работают на однопроцессорных компьютерах. По его мнению, существенно ускорить работу можно не только за счет разработки программного обеспечения, использующего преимущества многопроцессорных систем, но и с помощью создания более эффективных алгоритмов обучения.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Существующие нормативная база и методики, регламентирующие диагностирование ступичных подшипников автомобилей, включает операции, использующие органолептические методы диагностики, а также методы измерения геометрических параметров, которые не коррелируют с парамет-

рами состояния внутренних поверхностей и параметрами состояния смазочного материала.

2. Наблюдается тенденция унификации и интеграции элементов ступичных узлов, что влечет за собой необходимость применения неразрушающих методов контроля и диагностики ступичных подшипников.

3. Техническое состояние подшипника качения может быть охарактеризовано прямыми, либо косвенными диагностическими параметрами. При этом косвенные параметры являются более предпочтительными за счет того, что комплексно характеризуют состояние опоры качения и более просты в измерении.

4. Применение диагностической модели на основе алгоритмического обучения оправдывается в связи с комплексностью входящих в нее параметров, анализ которых является сложной задачей формализации.

5. Предлагается использование искусственной нейронной сети для синтеза диагностической модели, которая по выборке комплексного измерения в автоматическом режиме формирует разбиение признакового пространства. Обучение нейронной сети производится соответствующими алгоритмами на основе данных математических моделей вибрационных и электрофлуктуационных процессов в трибосопряжении ступичного подшипника.

Глава 2. Математическое моделирование процессов в ступичном подшипнике

2.1 Основные задачи моделирования

Формулирование метода диагностирования ступичного подшипника качения предполагает теоретические исследования и анализ зависимостей характеристик информативных сигналов от наличия локальных дефектов на поверхностях качения и состояния смазочного материала в трибосопряжении. Для этого объект диагностирования характеризуется рядом свойств и действующих на него внешних факторов: нагрузками и давлением в контакте, жесткостью (радиальной и осевой), состоянием смазочного материала в контакте, кинематикой элементов конструкции и т.п. Как было отмечено ранее, объект диагностирования представляет собой многомерную структуру, которая не позволяет проводить необходимые экспериментальные исследования, что, в свою очередь, делает необходимым проводить математическое моделирование процессов [8].

Следует отметить, что большинство работ по описанию вибрационных и электрофлуктуационных характеристик затрагивает только однорядные подшипники, которые не используются в ступичных узлах автомобилей (самым распространенным типом подшипника в ступичном узле являются двухрядные радиально-упорные).

Принимая во внимание факторы влияния геометрии элементов и рабочих поверхностей ступичного подшипника, условий и режимов работы, а также предпосылки создания комплексного метода диагностирования, при математическом моделировании необходимо учесть:

- кинематику элементов подшипника;
- свойства параметров смазочного материала, а также учет специфики загрязнения продуктами износа и элементами извне;

- динамику и смещение центров тел качения, углов контакта, статического преднатяга и т.п.

- микрогеометрические особенности (наличие и размеры локальных дефектов, их положение и возможные комбинации) элементов ступичного подшипника;

- макрогеометрию дорожек и тел качения подшипника.

Сложные для описания и моделирования процессы и явления в трибосопряжениях ступичного подшипника накладывают на аналитическое описание ряд ограничений и допущений:

- контактное взаимодействие элементов подшипника упругие, формализуемые теорией контакта Герца;

- описание шероховатости поверхностей произведем с учетом того, что моделью единичной неровности будет являться сегмент сферы, описание контакта шероховатых поверхностей произведем с учетом приведенных характеристик опорной кривой;

- электрическое сопротивление трибосопряжения будем рассматривать как совокупность сопротивления стягивания и сопротивления смазочной пленки;

- моделирование производится без учета влияния гироскопических моментов.

2.2 Моделирование вибрационных процессов ступичного подшипника

Математическая модель двухрядных радиально-упорных шарикоподшипников подобна модели подшипникового узла с двумя однорядными, с точки зрения конструкции и функционирования [66]. В большинстве случаев двухрядные радиально-упорные шарикоподшипники конструктивно выполнены со сдвоенными внутренним и внешним кольцами, однако большинство ступичных подшипников автомобилей имеют разделенное внутреннее коль-

цо, что обеспечивает простоту создания предварительного натяга с помощью затяжной гайки оси ступицы [6, 7].

Контроль состояния и диагностика подшипниковых узлов сопряжен с необходимостью идентификации причин возникновения вибрационных процессов, которые можно классифицировать как распределенные (макроотклонения) и локальные дефекты [8]. К распределенным дефектам можно отнести шероховатость, волнистость поверхностей качения, несоответствие номинальным значениям макрогеометрических параметров подшипника качения. Локальные дефекты, напротив, включают в себя трещины, вмятины, вызванные разного рода деформациями и износом элементов качения.

Рисунок 2.1 иллюстрирует распределение сил, которые приложены к колесу автомобиля. В связи с тем, что кинематика подвески имеет сложную структуру, ступичный подшипник подвергается действиям боковых сил [52].

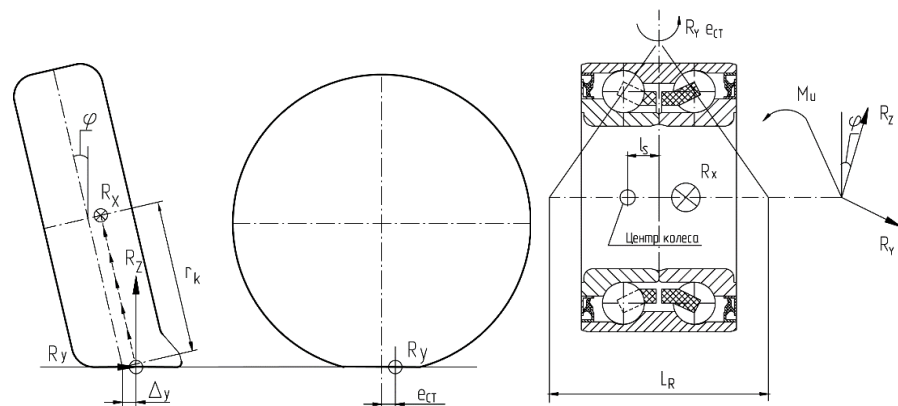


Рисунок 2.1 – Схема сил, действующих на колесо и ступичный подшипник

В связи с присутствием развала колеса ступичный подшипник подвергается действию силы с составляющими: $R_{YA} = R_Y \cos \varphi$ и $R_{YZ} = -R_Y \sin \varphi$.

Согласно [61] радиальные и осевые реакции рядов подшипника рассчитываются отдельно, что приведено в приложении А.

Математические модели вибрации подшипников качения и расчет вибрационных параметров широко изучены. Большое количество исследований было направлено на исследование и моделирование вибрационных процессов подшипников качения, в частности, в работе [66] была впервые представлена

математическая модель вибрации подшипника с учетом наличия локальных дефектов на дорожках и телах качения. Подшипник был смоделирован как система с двумя степенями свободы, которая включала особенности девиации нагрузки по теории контактов Герца, но не учитывала инерционные свойства элементов качения.

В работе [83] учитывались эффекты при различных режимах движения тел качения (качение, скольжение, кручение), изменение радиального зазора при расчете вибрационных процессов.

Основываясь на предыдущих исследованиях [66], предполагается создать математическую модель, показанную на рисунке 2.2, для определения вибрации дефектного подшипника для последующего выделения информативных признаков и параметров для комплексного диагностирования.

Проведя обзор литературы по моделированию вибрационных процессов [11,63] можно выделить основные элементы моделей:

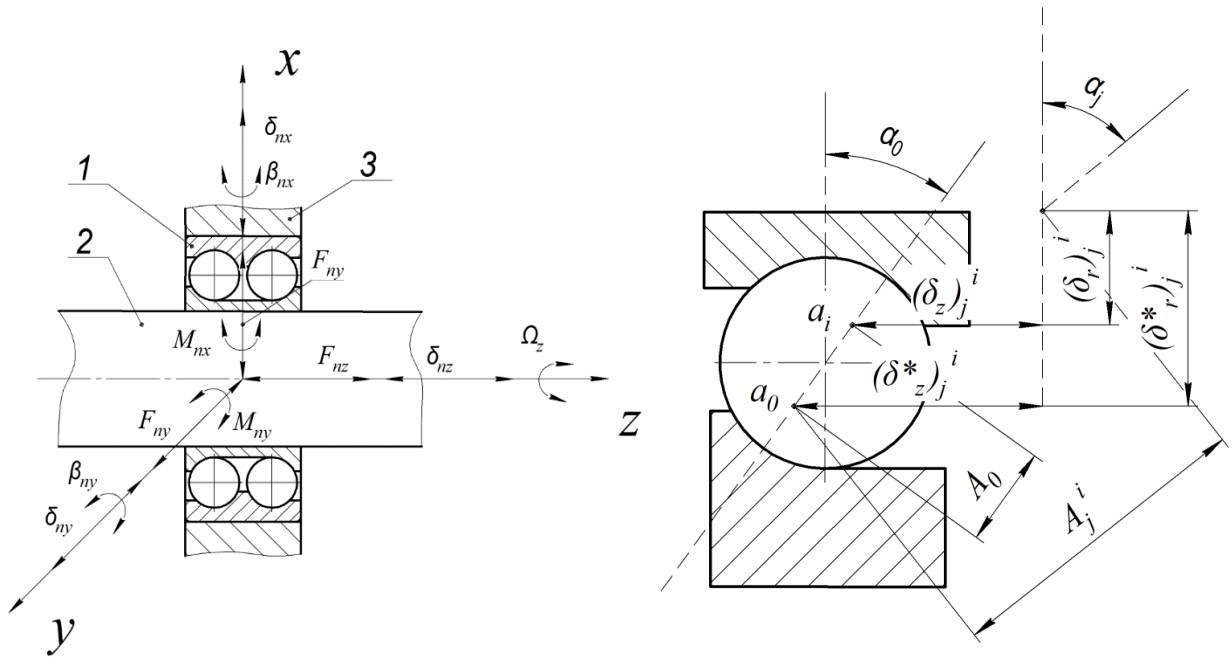
- а) трехмерная модель;
- б) отклонения макрогеометрии подшипника;
- в) гидродинамические свойства трибосопряжения;
- г) учет влияния сепаратора;
- д) влияние температуры;
- е) учет влияния деформации наружного кольца подшипника;
- ж) адекватность модели подтверждена экспериментально.

В таблице 2.1 представлены работы по данной тематике и отображено содержание элементов моделей.

Таблица 2.1 – Обзор литературы по моделированию вибропроцессов

Автор(ы) модели	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж
Санерсон, 1978	-	-	-	-	+	-	+
Гупта, 1979	+	-	+	+	-	-	-
Мэер, Алгрэн, Вейброд, 1980	-	+	-	-	-	+	-
Гоар, 1990	+	-	-	-	-	-	+
Лим, Синг, 1990	+	-	-	-	+	-	+
Су, Лин, Ли, 1993	+	-	+	+	-	-	+
Хендрикс, 1998	+	+	-	-	+	-	+

Схема рассматриваемого двухрядного радиально-упорного подшипника изображена на рисунке 2.1.



а – общий вид рассматриваемой системы (1 – радиально-упорный подшипник, 2 – вал, 3 – корпус (поворотный кулак), б – упругая деформация элемента качения под нагрузкой

Рисунок 2.2 – Схема кинематических параметров для аналитической модели радиально-упорного подшипника

Для построения математической модели вибрации воспользуемся уравнениями Лагранжа. Будем учитывать следующие упрощения: шарики в подшипнике движутся без проскальзывания, внутренне кольцо подшипника жестко закреплено.

Вычислим кинетическую и потенциальную энергии двухрядного радиально-упорного подшипника. Для расчета кинетической энергии принимаются во внимание скорости внешнего кольца и скорости элементов качения подшипника. Потенциальная энергия состоит из двух компонентов: гравитационного потенциала внешнего кольца и элементов качения; потенциальная энергия контакта, вызванная контактной деформацией при взаимодействии внутреннего и внешнего колец и элементов качения.

Зададимся тремя степенями свободы системы, исключив вращения вокруг осей x и y . Три степени свободы необходимы для описания аксиальных перемещений внешнего кольца относительно вала. Тогда общую кинетическую энергию можно записать как:

$$T = \frac{m_{\text{внеш.}} + m_{\text{вн.}}}{2} \left(\dot{x}_{\text{внеш.}}^2 + \dot{y}_{\text{внеш.}}^2 + \dot{z}_{\text{внеш.}}^2 \right) + \left\{ \sum_{j=1}^{N_{\text{ш}}} \frac{1}{2} m_j \left(\dot{\zeta}_j^2 + (\zeta_j \cos \alpha_j)^2 \dot{\theta}_j^2 \right) + \left[\dot{\theta}_j \cos \alpha_j \left(1 + \frac{R_{\text{д}}}{D_{\text{ш}} / 2} \right) \right]^2 \right\} + \frac{1}{2} I_{\text{в}} \dot{\theta}_{\text{в}}^2, \quad (2.1)$$

где $x_{\text{внеш.}}$, $y_{\text{внеш.}}$, $z_{\text{внеш.}}$ - перемещения внешнего кольца относительно осей x , y и z ;

ζ_j - радиальное перемещение j -го тела качения;

θ_j - угловое смещение j -го тела качения;

α_j - угол между осью контакта и вертикальной осью для j -го тела качения;

$m_{\text{внеш.}}$, $m_{\text{вн.}}$, m_j - массы внешнего, внутреннего колец и j -го тела качения соответственно;

$I_{\text{в}}$, $\theta_{\text{в}}$ - момент инерции и угол поворота внешнего кольца;

$N_{\text{ш}}$ - число тел качения.

Для нахождения угла между осью контакта и вертикальной осью для j -го тела качения воспользуемся следующим уравнением [45]:

$$\alpha_j = \alpha_n + \frac{z_{\text{внеш.}} (-1)^j}{R_{\text{д}} - r_{\text{ш}}}, \quad (2.2)$$

где α_n - номинальный угол контакта;

$R_{\text{д}}$ - радиус дорожки качения;

$r_{\text{ш}}$ - радиус тела качения;

$(-1)^j$ - оператор для учета влияния факта наличия пары тел качения в каждой угловой позиции.

Вычислим потенциальную энергию с учетом типа контакта (для радиально упорного шарикоподшипника – точечный) [63]:

$$V = (m_{\text{вн.}} + m_s)gy_{\text{вн.}} + \sum_{j=1}^{N_r} m_j g \zeta_j \cos \alpha \sin \theta_j + \sum_{j=1}^{N_r} \frac{2}{5} k_{\text{вн.}} \delta_{\text{вн.}}^2 + \sum_{j=1}^{N_r} \frac{2}{5} k_{\text{внеш.}} \delta_{\text{внеш.}}^2 \quad (2.3)$$

где $\delta_{\text{вн.}}$, $\delta_{\text{внеш.}}$ - контактные деформации внутреннего и внешнего колец;

$k_{\text{вн.}}$, $k_{\text{внеш.}}$ - эквивалентные контактные жесткости контактов «шарик-внутренне кольцо» и «шарик-внешнее кольцо» соответственно.

Эквивалентные контактные жесткости также с учетом типа контакта вычислим как [63]:

$$\begin{aligned} k_{\text{вн.}} &= k_{\text{конт.}} \sqrt{\delta_{\text{вн.}}}, \\ k_{\text{внеш.}} &= k_{\text{конт.}} \sqrt{\delta_{\text{внеш.}}}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Контактные деформации представим в виде:

$$\delta_{\text{вн.}} = \begin{cases} R + r_{\text{ш}} - \beta_j, & \text{если } R + r_{\text{ш}} > \beta_j, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\delta_{\text{внеш.}} = \begin{cases} \zeta_j + r_{\text{ш}} - R, & \text{если } R < (\zeta_j + r_{\text{ш}}), \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.6)$$

где β_j - перемещение j -го тела качения относительно движущийся дорожки, которое вычисляется как:

$$\begin{aligned} \beta_j &= [x_{\text{внеш.}}^2 + y_{\text{внеш.}}^2 + z_{\text{внеш.}}^2 + \zeta_j^2 - 2\zeta_j x_{\text{внеш.}} \cos \alpha \cos \theta_j - \\ &\quad - 2\zeta_j y_{\text{внеш.}} \cos \alpha \sin \theta_j - 2(-1)^j \zeta_j z_{\text{внеш.}} \sin \alpha]^{1/2}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Угловое смещение тел качения запишем как:

$$\theta_j = (N-1) \frac{4\pi}{N_{\text{ш}}} + \omega_c t, \text{ при } j = 2N, 2N-1, N < (N_{\text{ш}} / 2 + 1) \quad (2.8)$$

Уравнения (2.1) - (2.8) выявляют влияние на значение угла контакта, вызванное аксиальными смещениями внешнего кольца, а также различными комбинациями положения пар тел качения.

2.3 Моделирование волнистости дорожек качения ступичного подшипника

Одним из первичных источников вибрации является волнистость тел и дорожек качения подшипника [38].

На рисунке 2.2 изображен характер это вида макрогеометрических отклонений. Волнистость можно описать как выражение двух параметров: длины волны λ и ее амплитуды κ . Амплитуду волнистости можно записать как:

$$\kappa_i = \kappa_0 + \kappa_p \sin(2\pi L / \lambda) , \quad (2.9)$$

где κ_0 - постоянный зазор в подшипнике;

κ_p - максимальная амплитуда волны;

L – длина дуги волнистой поверхности дорожки качения.

Длину дуги волнистой поверхности дорожки качения запишем как:

$$L = r\theta_j , \quad (2.10)$$

где r – радиус дорожки качения.

Длину волнистости дорожки качения найдем как:

$$\lambda = \frac{2\pi r}{N_w} , \quad (2.11)$$

где N_w - число волн на дорожке качения.

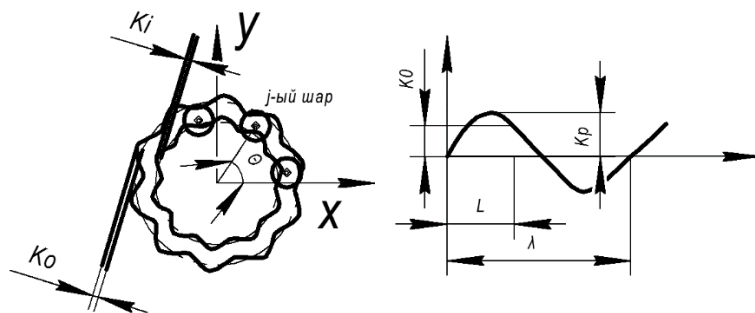


Рисунок 2.2 – Волнистость дорожек качения ступичного подшипника

Тогда принимая во внимание (2.10) - (2.11) перепишем (2.9) с учетом характеристик рассматриваемого подшипника запишем:

$$R_{\text{вн.}} = \kappa_{\text{вн.0}} + \kappa_{\text{вн.p}} \sin(N_{\text{вн.}} \theta_{\text{вн.j}}) , \quad (2.12)$$

$$R_o = \kappa_{внеш.0} + \kappa_{внеш.p} \sin(N_{внеш.} \theta_{внеш.j}), \quad (2.13)$$

где $\kappa_{вн.0}, \kappa_{внеш.0}$ - исходные амплитуды волнистости внутреннего и внешнего колец;

$\kappa_{вн.p}, \kappa_{внеш.p}$ - максимальные амплитуды волнистости внутреннего и внешнего колец;

$N_{вн.}, N_{внеш.}$ - волновые числа для описания волнистости внутреннего и внешнего колец;

$\theta_{вн.j}, \theta_{внеш.j}$ - угол контакта внутреннего и внешнего кольца с j -ым шариком.

Также применяя такой же подход запишем выражение для вычисления волнистости тел качения:

$$\gamma_{ш} = \kappa_{ш0} + \kappa_{шp} \sin(N_{ш} \theta_{шj}), \quad (2.14)$$

где $\kappa_{ш0}$ - исходная амплитуда волнистости тела качения;

$\kappa_{шp}$ - максимальная амплитуда волнистости тела качения;

$N_{ш}$ - волновое число для описания волнистости тела качения;

2.4 Моделирование локальных дефектов ступичного подшипника

Локальные дефекты, как показано в главе 1, появляются вследствие различных причин и факторов.

Для упрощения моделирования, в качестве моделируемого локального дефекта был выбран точечный, описывающийся тремя параметрами: угловое положение дефекта относительно оси вращения подшипника, касательный размер дефекта и радиальная глубина дефекта. Таким образом дефект можно моделировать следующим уравнением:

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

где θ_{pd} - угол центра дефекта;

θ_e - половина угла касательного размера дефекта.

Соответствующие контактные усилия вычисляются в соответствии с контактной теорией Герца, где отношение углового размера дефекта к его глубине значительно больше 10 [63, 86]. Такой подход значительно облегчает вычисления, но позволяет смоделировать только относительно большие локальные дефекты, что следует учесть при дальнейших исследованиях.

2.5 Уравнения движения

Определим характеристику затухания, которая соотносит контактную демпфирующую силу с эквивалентной контактной жесткостью и деформацией контакта.

Для этого для j -го тела качения, принимая во внимание эквивалентную контактную жесткость пары качения, равную $\frac{3}{2}k_{\text{конт.}_-вн.} \delta_{вн.}^{0,5j}$ [84-86], найдем силу демпфирования для систем «тело качения-внутреннее кольцо» и «тело качения-внешнее кольцо»:

$$F_{d_вн.}^j = \frac{3}{2} k_{\text{конт.}_-вн.} \delta_{вн.}^{0,5j} \dot{\delta}_{вн.}^j = \begin{cases} \frac{3}{2} k_{\text{конт.}_-вн.} \delta_{вн.}^{0,5j} \left(\dot{R}_i - \dot{\gamma}_{r_вн.} - \dot{\beta}_j \right), & \text{если } \dot{\delta}_{вн.}^j > 0 \text{ и } \delta_{вн.}^j > 0, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$F_{d_внеш.}^j = -\frac{3}{2} k_{\text{конт.}_-внеш.} \delta_{внеш.}^{0,5j} \dot{\delta}_{внеш.}^j = \begin{cases} \frac{3}{2} k_{\text{конт.}_-внеш.} \delta_{внеш.}^{0,5j} \left(\dot{R}_0 - \dot{\zeta}_j - \dot{\gamma}_{r_внеш.} \right), & \text{если } \dot{\delta}_{внеш.}^j > 0 \text{ и } \delta_{внеш.}^j > 0, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (2.16)$$

где $k_{\text{конт.}_-вн.}$, $k_{\text{конт.}_-внеш.}$ - контактная жесткость системы «тело качения-внутреннее кольцо» и «тело качения-внешнее кольцо».

Принимая во внимание рекомендации по моделированию процессов в трибосопряжении, учтем характеристики и свойства смазочного материала, который обладает значительным влиянием на параметры матрицы демпфирования и жесткости подшипника [87]. Для этого рассчитаем жесткость смазочного слоя. Слой смазки в трибосопряжении практически разделяет контактирующие поверхности [63]. В связи с этим, необходимо рассчитать жесткость смазочного слоя, в соответствии с рисунком 2.3.

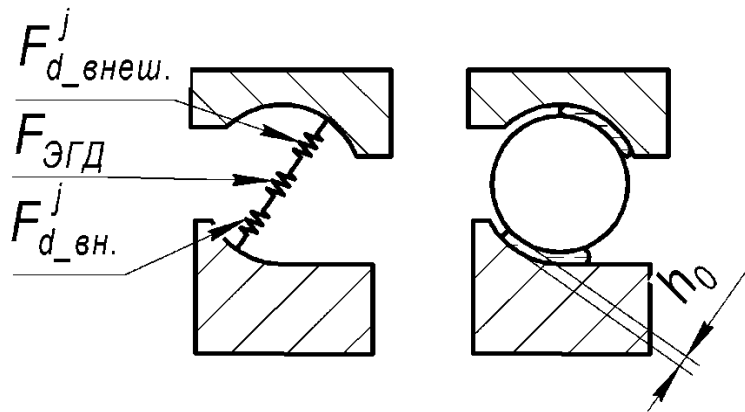


Рисунок 2.3 – Схема жесткости подшипника с учетом смазочного слоя

Данные исследования [88] показывают, что в случае установившейся гидродинамической пленки смазочного материала процессы в ней описываются как:

$$\frac{1}{12\eta} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[h^3(x, y) \left(\frac{\partial P(x, y)}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h^3(x, y) \frac{\partial P(x, y)}{\partial y} \right] \right\} =$$

$$= \omega_j x - \frac{\omega_j}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h(x, y) [h(x, y) - h_0] \right\}, \quad (2.17)$$

где $P(x, y)$ - давление в смазочном слое;

$h(x, y)$ - толщина слоя смазки;

η - вязкость смазки;

ω_q - мгновенная угловая скорость тела качения относительно точки соприкосновения со слоем смазки на кольце.

Тогда толщина смазочного материала описывается как:

$$h(x, y) = h_0 + \sum_{S=1} a_{jS} x_S^2 \quad (2.18)$$

где a_{jS} - приведенная кривизна контактирующих поверхностей в направлении качения ($S = 1$) и в перпендикулярном направлении ($S = 2$)[88];

h_0 - толщина смазочной пленки в минимальном сечении.

Произведем расчет давления в трибосопряжении для определения жесткости смазочного материала:

$$P_0(x, y) = -\frac{1}{\alpha} \ln[1 - \alpha P(x, y)]. \quad (2.19)$$

В исследованиях, приведенных в работе [86], получена аппроксимационная зависимость:

$$P(x, y) = \frac{3\omega_j \eta}{2\alpha} \frac{x}{(h_0^* + a_j x^2)^2}, \quad (2.20)$$

$$0 \leq x \leq \left[\delta - \frac{h_0}{a_j} \right]^{1/2}, \quad (2.21)$$

где h_0^* , a_j - параметры, зависящие от условий работы подшипника и характеристик смазочного материала.

Демпфирующая сила смазочной пленки определяется как:

$$F_{\text{ЭГД}} = \frac{\omega_q \eta}{a_q^2 h_0} \sqrt{\frac{\delta - h_0}{a_q}} \left[1 + \frac{h_0}{2(\delta - h_0)} \ln \left(\frac{1 - \sqrt{\frac{\delta - h_0}{\delta}}}{1 + \sqrt{\frac{\delta - h_0}{\delta}}} \right) \right]. \quad (2.22)$$

Таким образом для расчета жесткости пленки смазочного материала воспользуемся следующим выражением:

$$\frac{\partial F_{\text{ЭГД}}}{\partial \delta_{\text{внеш.}}} = \frac{a_j^2 \sqrt{a_j}}{\omega_j \eta \sqrt{\delta_{\text{внеш.}}}} h_{0i} \quad (2.23)$$

где $\partial \delta_{внеш.} = \delta - h_{0j}$ - деформация смазочного слоя.

Сложив (2.15), (2.16) и (2.22) получим общую силу демпфирования j -го тела качения:

$$F_d^j = F_{d_вн.}^j + F_{d_внеш.}^j + F_{ЭГД} . \quad (2.24)$$

Обобщенный вектор перемещения $\{q\}$ Лагранжа представим как:

$$\{q\} = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_{N_r}, x_{внеш.}, y_{внеш.}, z_{внеш.}]^T . \quad (2.25)$$

Для получения уравнений движения системы подшипника воспользуемся уравнением Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\{q\}}} - \frac{\partial T}{\partial \{q\}} + \frac{\partial V}{\partial \{q\}} = \{f\} , \quad (2.26)$$

где T – кинетическая энергия,

V – потенциальная энергия,

$\{q\}$ – обобщенный вектор перемещения,

$\{f\}$ – обобщенный вектор силы.

Принимая во внимание (2.1) - (2.4) получим:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\{q\}}} = \begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \dot{\zeta}_j} = m_j \dot{\zeta}_j, \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_{вн.}} = (m_{вн.} + m_s) \dot{x}_{вн.}, \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_{вн.}} = (m_{вн.} + m_s) \dot{y}_{вн.}, \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{z}_{вн.}} = (m_{вн.} + m_s) \dot{z}_{вн.}, \end{cases} \quad (2.27)$$

Продифференцировав (2.16) получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial \{\zeta_j\}} = m_j \zeta_j (\cos \alpha_j)^2 \dot{\theta}_j^2, \\ \frac{\partial T}{\partial x_{вн.}} = \frac{\partial T}{\partial y_{вн.}} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial z_{вн.}} = - \sum_{j=1}^{N_r} \left\{ m_j \zeta_j^2 \dot{\theta}_j^2 + I_j \left[1 + \frac{R_i}{D/2} \right]^2 \right\} \cos 2\alpha_j \frac{\partial \alpha_j}{\partial z_{вн.}} = \\ = \sum_{j=1}^{N_r} \frac{1}{2} \left\{ m_j \zeta_j^2 \dot{\theta}_j^2 + I_j \left[1 + \frac{R_i}{D/2} \right]^2 \right\} \frac{(-1)^{j+1} \sin 2\alpha_j}{R_{\delta_вн.} + R_{\delta_внеш.} - 2R_{ш}}. \end{array} \right. \quad (2.28)$$

Проводя дальнейшие упрощения (2.21) получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V}{\partial x_{вн.}} = \sum_{j=1}^{N_r} \left(\frac{2}{5} \frac{\partial k_{вн.}}{\partial x_{вн.}} \delta_{вн.}^2 + \frac{4}{5} k_{вн.} \delta_{вн.} \frac{\partial \delta_{вн.}}{\partial x_{вн.}} \right) = -k_{конт._вн.} \sum_{j=1}^{N_r} \delta_{вн.}^{3/2} \frac{\partial \beta_j}{\partial x_{вн.}}, \\ \frac{\partial V}{\partial y_{вн.}} = \sum_{j=1}^{N_r} \left(\frac{2}{5} \frac{\partial k_{вн.}}{\partial y_{вн.}} \delta_{вн.}^2 + \frac{4}{5} k_{вн.} \delta_{вн.} \frac{\partial \delta_{вн.}}{\partial y_{вн.}} \right) = (m_{вн.} + m_s) g - k_{конт._вн.} \sum_{j=1}^{N_r} \delta_{вн.}^{3/2} \frac{\partial \beta_j}{\partial y_{вн.}} \\ \frac{\partial V}{\partial z_{вн.}} = \sum_{j=1}^{N_r} \left(\frac{2}{5} \frac{\partial k_{вн.}}{\partial z_{вн.}} \delta_{вн.}^2 + \frac{4}{5} k_{вн.} \delta_{вн.} \frac{\partial \delta_{вн.}}{\partial z_{вн.}} \right) + \\ + \sum_{j=1}^{N_r} \frac{(-1)^{j+1}}{R_{вн.} + R_{внеш.} - 2R_{ш}} m_j g \zeta_j \sin \alpha_j \sin \theta_j = \\ = -k_{конт._вн.} \sum_{j=1}^{N_r} \delta_{вн.}^{3/2} \frac{\partial \beta_j}{\partial z_{вн.}} + \sum_{j=1}^{N_r} \frac{(-1)^{j+1}}{R_{вн.} + R_{внеш.} - 2R_{ш}} m_j g \zeta_j \sin \alpha_j \sin \theta_j \end{array} \right. \quad (2.29)$$

Далее уравнение движения тела качения определяется как:

$$\begin{aligned} m_j \ddot{\zeta}_j + m_j g \cos \alpha_j \sin \theta_j - m_j \zeta_j (\cos \alpha_j)^2 \dot{\theta}_j^2 - k_{конт._вн.} \delta_{вн.}^{j3/2} \frac{\partial \beta_j}{\partial \zeta_j} \varepsilon_{вн.}^j + \\ + k_{конт._внеш.} \delta_{внеш.}^{j3/2} \frac{\partial \delta_{внеш.}}{\partial \zeta_j} \varepsilon_{внеш.}^j = F_d^j, \end{aligned} \quad (2.30)$$

где m_j - масса j -го тела качения,

F_d^j - общая сила упругого взаимодействия j -го тела качения с внешним и внутренним кольцом,

α_j - угол между осью контакта и вертикальной осью для j -го тела качения,

β_j - перемещение j -го тела качения относительно внутреннего кольца,
 θ_j - угол контакта между j -ым телом качения и фиксированным кольцом.

Как показывает (2.23) движение тела качения является результатом действия силы непосредственно в контакте с дорожками качения и силы демпфирования.

Уравнение движения внешнего кольца запишем как:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{\text{вн}} \ddot{x}_{\text{вн}} - k_{\text{конт.вн.}} \sum_{j=1}^N \delta_{\text{вн}}^{3/2} \frac{[x_{\text{вн}} - \zeta_j \cos \alpha_j \cos \theta_j]}{\beta_j} = \sin(\omega_g t) + F_{d_вн}^x \\ m_{\text{вн}} \ddot{y}_{\text{вн}} + m_{\text{вн}} g - k_{\text{конт.вн.}} \sum_{j=1}^N \delta_{\text{вн}}^{3/2} \frac{[y_{\text{вн}} - \zeta_j \cos \alpha_j \sin \theta_j]}{\beta_j} = 1 + \sin(\omega_g t) + F_{d_вн}^y \\ m_{\text{вн}} \ddot{y}_{\text{вн}} - \sum_{j=1}^N \frac{1}{2} \left\{ m_j \zeta_j^2 \dot{\theta}_j^2 + I_j \left[\dot{\theta}_j \left(1 + \frac{R_i}{D_{\text{вн}} / 2} \right) \right]^2 \right\} \frac{(-1)^{j+1} \sin 2\alpha_j}{R_r - R_{\text{вн}}} - \\ - k_{\text{конт.вн.}} \sum_{j=1}^N \delta_{\text{вн}}^{3/2} \left[\frac{z_{\text{вн}} - (-1)^j \zeta_j \sin \alpha_j}{\beta_j} + \frac{(-1)^j}{R_r - R_{\text{вн}}} \times \right. \\ \left. \times \frac{\zeta_j x_{\text{вн}} \sin \alpha_j \cos \theta_j + \zeta_j y_{\text{вн}} \sin \alpha_j \sin \theta_j - (-1)^j \zeta_j z_{\text{вн}} \cos \alpha_j}{\beta_j} \right] + \\ \left. + \sum_{j=1}^N \frac{(-1)^{j+1}}{R_r - R_{\text{вн}}} m_j g \zeta_j \sin \alpha_j \sin \theta_j = F_z + F_{d_вн}^x \right. \end{array} \right. \quad (2.31)$$

Следует отметить, что F_z определяет внешние аксиальные силы, которые могут быть как динамическими, так и статическими. Также по уравнениям движения, представленным выше, можно сделать вывод, угол контакта имеет значительные девиации при незначительных перемещениях дорожек качения.

2.6 Моделирование сопротивления ступичного подшипника

Использование для диагностирования значений функции электрического сопротивления подшипника дает наиболее достоверную информацию о его техническом состоянии. Для их применения в качестве диагностических параметров необходимо провести теоретические исследования и найти связь между функцией сопротивления и конструктивными параметрами подшипника, а также с условиями его работы.

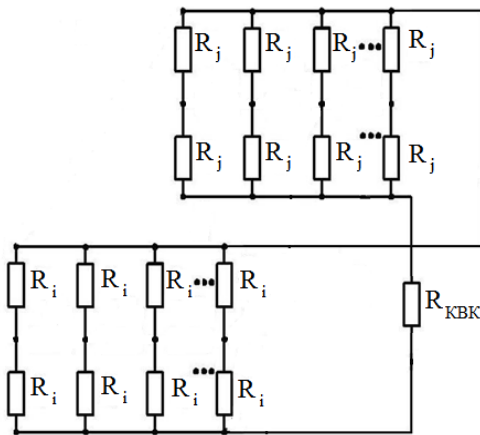
Математическая модель сопротивления подшипника базируется на положениях теорий электропроводности контакта двух шероховатых тел и контакта реальных поверхностей. Первая [33] описывает зависимости сопротивления трибосопряжения от размера фактической площади контакта. Вторая теория определяет влияние закона распределения материала по высоте шероховатого слоя на фактическую площадь контакта пары трения [28, 31, 33]. Однако уровень проработки этих теорий не позволяет исследовать взаимосвязь сопротивления подшипника с его внутренними параметрами и режимами эксплуатации.

Вследствие сложности описания процессов, происходящих во время работы подшипника, при разработке математической модели приняты следующие допущения:

- основными составляющими электрического сопротивления подшипника являются сопротивление стягивания и сопротивление смазочной пленки;
- для описания деформации при контактировании используются формулы Герца;
- закон распределения неровностей рабочих поверхностей – нормальный;
- результаты математического моделирования справедливы при воздействии на подшипник статических нагрузок.

При математическом моделировании электрического сопротивления двухрядного подшипника представим его как суммы параллельно соединенных сопротивлений контактов по каждому из тел качений, как показано на рисунке 2.4. При этом контакт тела качения рассматривается как с внутренним, так и с наружным кольцом.

Обобщенная структура математической модели сопротивления подшипника на примере сопротивления трибосопряжения представлена на рисунке 2.5.



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 2.4 - Упрощенная эквивалентная схема подшипника

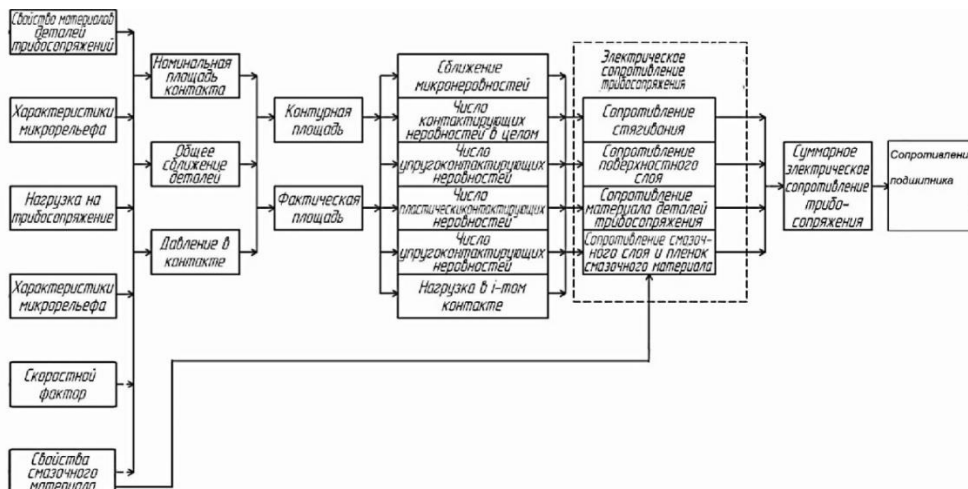


Рисунок 2.5 - Структура математической модели сопротивления подшипника

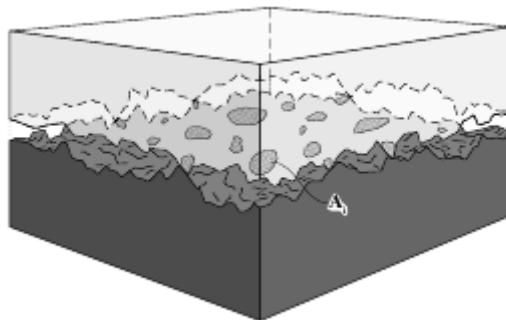
Однако процессы в зоне трения подшипников качения очень сложны для формализации и не изучены достаточно, что накладывает ряд ограничений и предположений для описания математической модели сопротивления.

Экспериментальные исследования, накопленные по теории расчета фактической площади контакта, позволяет охарактеризовать главные особенности процесса их формирования, которые сводятся к следующему [8, 33]:

- 1) контакт поверхностей дискретен;
- 2) в результате пластических и упругих деформаций возникают фактические пятна контакта;
- 3) при увеличении нагрузки в зонах контакта размер фактического контакта увеличивается только из-за образования новых пятен контакта.

Первый пункт указывает, что модель шероховатого тела может быть представлена набором вершин с детерминированными параметрами геометрии. Исследования рельефа поверхностей различными средствами дают представления о форме и размерах этих выступов.

Согласно теории электропроводности шероховатых тел, величина электрического сопротивления контакта двух поверхностей, изготовленных из электропроводных материалов, определяется фактической площадью контакта [33]. При рассмотрении процесса контактирования двух шероховатых поверхностей различают номинальную, фактическую и контурную площади контакта, представленные на рисунке 2.3.



A_r - фактическая площадь контакта

Рисунок 2.3 - Схема фрикционного контакта твердых тел

В подшипниках качения величина контурной площади контакта определяется размерами герцевских площадок. Фактическая площадь контакта обычно составляет от номинальной десятые и сотые доли процента, а контурная - несколько процентов [37]. В первом приближении можно допустить, что в пределах фактической площади контакта непроводящих пленок и включений нет, и она вся электропроводна [34]. Тогда электрическое сопротивление фрикционного контакта будет определяться его фактической площадью.

Величина фактической площади контакта определяется геометрическими параметрами рабочих поверхностей деталей подшипника (шероховатостью, параметрами макрогеометрии) и механическими свойствами материалов, из которых они изготовлены, которые, в свою очередь, зависят от режимов обработки.

Таким образом, основным параметром математической модели является фактическая площадь контакта.

Для моделирования электрического сопротивления необходимо задать параметры элементов качения, в частности микрогеометрию поверхностей, макроотклонения.

Применяя выкладки (2.15) – (2.24), используемые при расчетах вибрации определяем контактные жесткости элементов трибосопряжения.

Для установления режима трения ступичного подшипника определяем распределение нагрузки по телам качения с учетом толщины пленки, используя уравнение (2.17).

Вычисляем сопротивления фрикционных контактов с учетом их режима трения.

Главными компонентами электрического сопротивления подшипника R_s , как отмечалось выше, считаются сопротивление смазочной пленки $R_{СП}$ и сопротивление стягивания $R_{СТ}$:

$$R_s = R_{СТ} + R_{СП} \quad (2.32)$$

Сопротивление смазочного слоя определяется толщиной гидродинамической пленки, разделяющей рабочие поверхности и удельным электрическим сопротивлением смазочного материала [33]. В условиях смешанной и жидкостной смазки сопротивление смазочной пленки будет основной составляющей сопротивления фрикционного контакта между телом качения и кольцом подшипника:

$$R_{СП} = \frac{\rho_{СМ}}{\rho} \cdot \frac{h_0}{r_k} \cdot \frac{A_r}{A_c - A_r} \cdot R_M, \quad (2.33)$$

где h_0 - минимальная толщина смазочной пленки;

$\rho_{СМ}$ - удельное сопротивление смазочного материала (составляет 10^5 - 10^{13} Ом·м для пластичных смазочных материалов [33]);

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:

$$R_{П} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{ОЭi}} \right)^{-1} + \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{ОЭj}} \right)^{-1} + R_{КВК}, \quad (2.34)$$

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:

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{Rq_1^2 + Rq_2^2}}, \quad (2.35)$$

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 – $3 \leq \lambda$.

Площадь фактического контакта A_r вычисляется по формуле:

$$A_r = \frac{n_a n_b}{n_\delta} \cdot A_c \cdot \frac{r}{r_{np} + r_{non}} \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot K_1 \cdot \delta^{m_1}, \quad (2.36)$$

где r_{np}, r_{non} - соответственно радиус скругления вершин неровностей в продольном направлении и радиус скругления вершин неровностей в поперечном направлении;

$r_n = \sqrt{r_{np} \cdot r_{non}}$ - радиус скругления вершин;

K_1 - коэффициент, учета способа обработки поверхностей;

m_1 - коэффициент, учета структуры неровностей [41];

$N_1 = \frac{b_1 \cdot v_1 \cdot (v_1 - 1)}{R_{z1}^{v_1}}; N_2 = \frac{b_2 \cdot v_2 \cdot (v_2 - 1)}{R_{z2}^{v_2}}$ - коэффициенты, для учета качества

обработки поверхностей, где b_1, v_1, b_2, v_2 - параметры, описывающие опорную поверхность;

n_a, n_b, n_δ - коэффициенты из таблицы [33].

Контактная контурная площадь рассчитывается как:

$$A_c = \pi \cdot n_a \cdot n_b \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot F_r}{E \cdot \sum \rho}\right)^2}, \quad (2.37)$$

где F_r – радиальная нагрузка;

E – приведенный модуль упругости;

$\sum \rho$ – сумма кривизны тел в сопряжении в точке касания.

2.8 Результаты теоретического моделирования вибрации и электрического сопротивления ступичного подшипника

На основе математической модели разработана прикладная программа численного расчета детерминированной составляющей сопротивления и вибрации при различных значениях влияющих факторов. Данная программа написана на языке MATLAB. Для обеспечения универсальности получаемых результатов выходным параметром программы является зависимость R_{om} угловой координаты сепаратора (при равномерном вращении эквивалентно функции сопротивления от времени $R(t)$) и временной функции вибрации. Данное обстоятельство позволяет проводить совместные расчеты сопротивления подшипника и вибрации.

Условия моделирования – двухрядные радиально-упорные шариковые подшипники при частоте вращения кольца $n = 100 \text{ мин}^{-1}$, радиальной нагрузке $F_r = 1000 \text{ Н}$ [21, 27, 28].

Параметры ступичного подшипника 537907 представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Параметры ступичного подшипника 537907

Параметр подшипника	Значение
Внутренний диаметр (d)	34 мм
Наружный диаметр (D)	64 мм
Ширина (H)	37 мм
Масса	0,445 кг
Диаметр шарика	9,525 мм
Грузоподъемность статическая	27,9 kN
Номинальная частота вращения	6000 об./мин.
Количество шариков	28 шт.
Грузоподъемность динамическая	31,5 kN

Теоретические спектры виброскоростей ступичного подшипника с моделированием локального дефекта (квадратная лунка размером 120 мкм), волнистости дорожки качения (длина волны не более 1 мкм) на внутреннем

кольце подшипника, а также изменением количества смазочного материала в трибосопряжении, представлены на рисунках 2.4, 2.5.

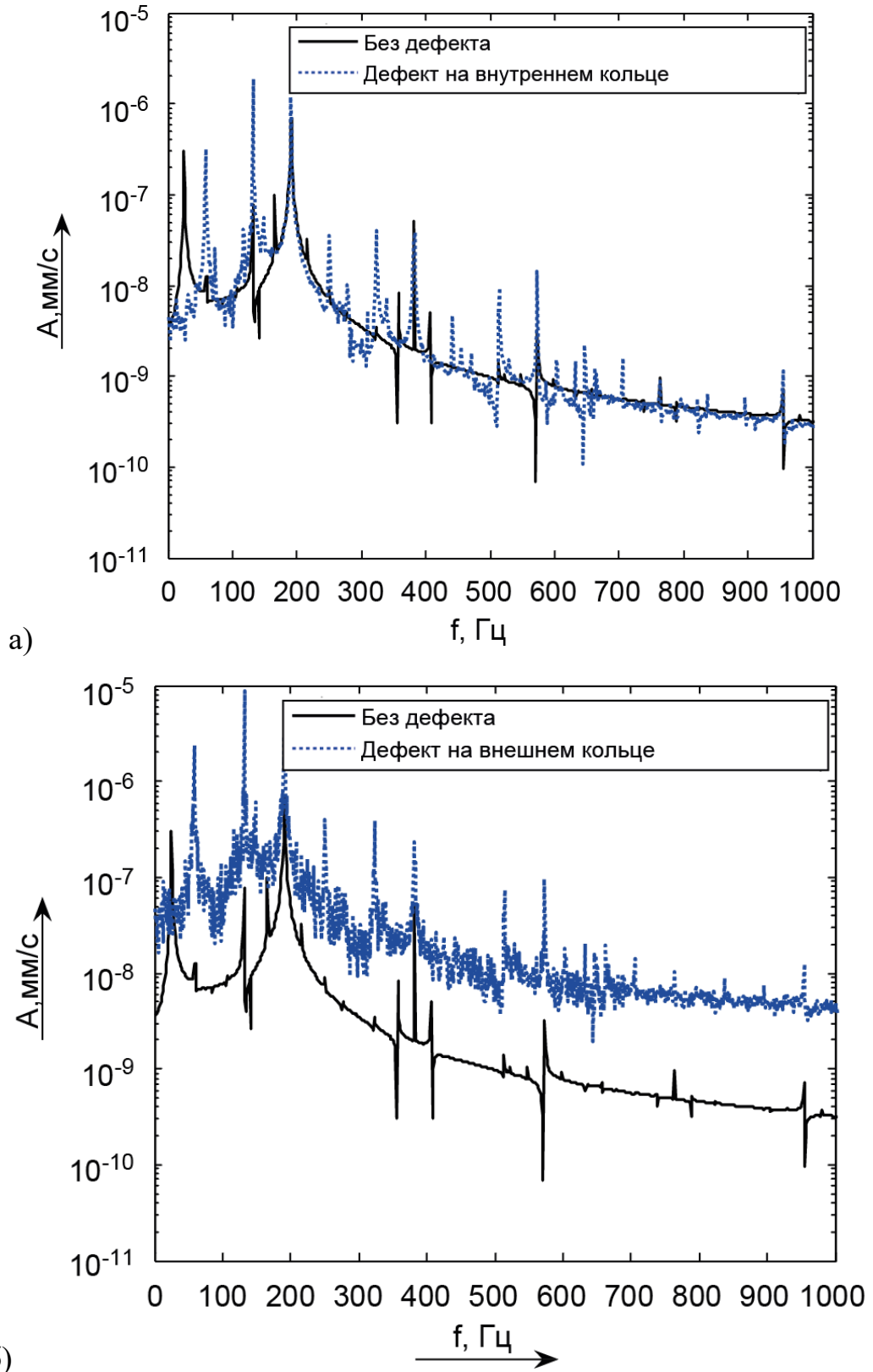


Рисунок 2.4 – Спектры виброскорости ступичного подшипника с моделированием локального дефекта на внутреннем а) и внешнем б) кольцах

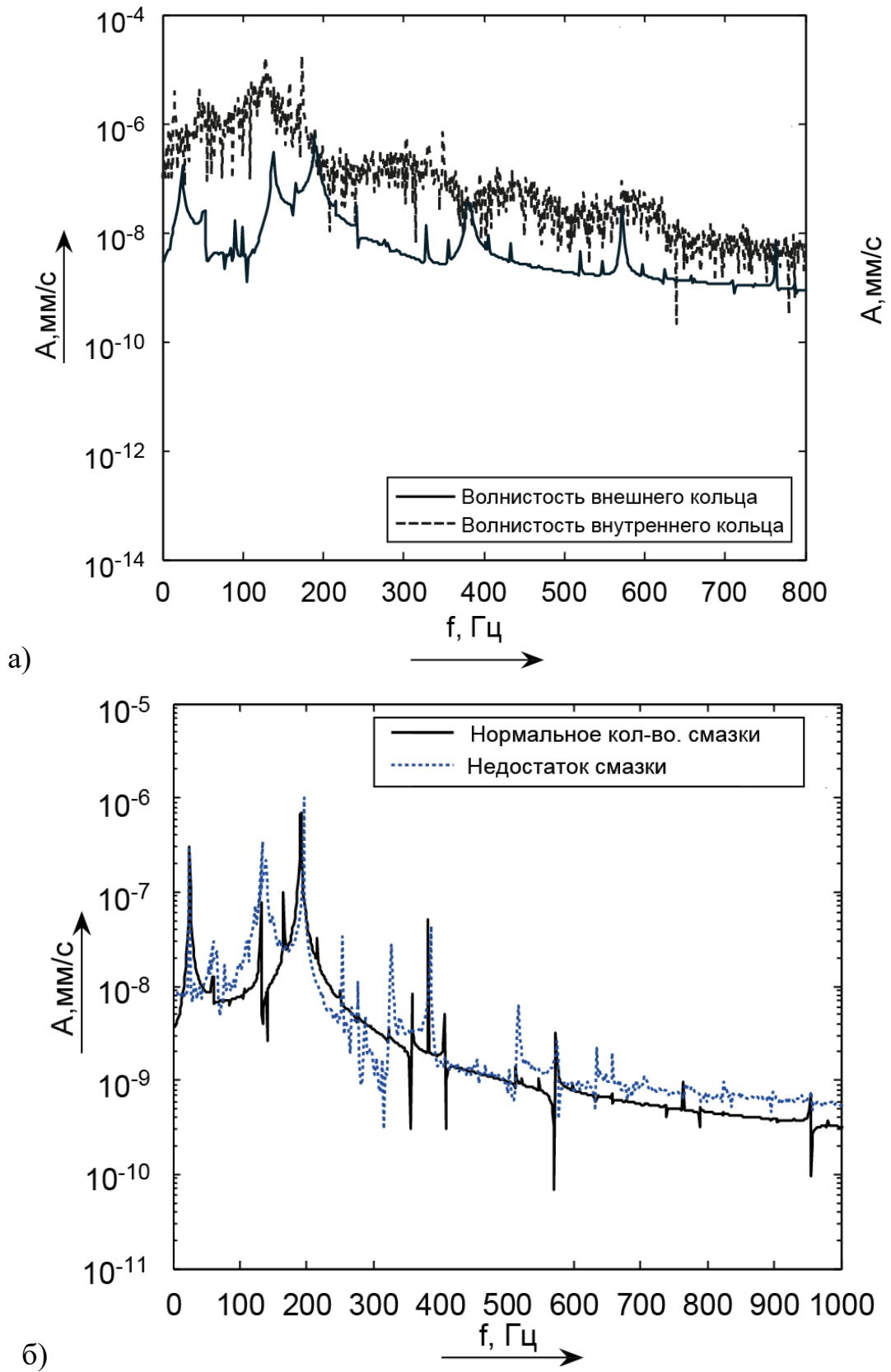


Рисунок 2.5 - Спектры виброскорости ступичного подшипника с моделированием волнистости и изменением количества смазочного материала

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.

Анализ данных показывает, что при изменении параметров смазки сигналы виброскорости изменились незначительно, что подтверждает выкладки о том, что вибрационные процессы не чувствительны к режимам смазки ступичного подшипника.

При исследовании характера изменения сопротивления подшипника при его работе в условиях отсутствия макроотклонений рабочих поверхностей деталей установлено, что сопротивление работающего подшипника периодически изменяется даже при «идеальных», не имеющих отклонений формы рабочих поверхностях деталей. На рисунке 2.8, представлены примеры частотных спектров для этого случая.

Из рисунка видно, что при работе подшипника с «идеальными» рабочими поверхностями, при постоянной нагрузке и рабочих режимах имеет место выраженная периодичность функции сопротивления. Ее присутствие объясняется, прежде всего, плавным перераспределением нагрузки между телами качения: в различные моменты времени в зоне нагружения подшипника находится различное количество тел качения и воспринимаемая ими нагрузка имеет различные значения.

Как видно из графиков, локальные дефекты рабочих поверхностей поразному влияют на сопротивление контакта в зависимости от вида контактирующих деталей.

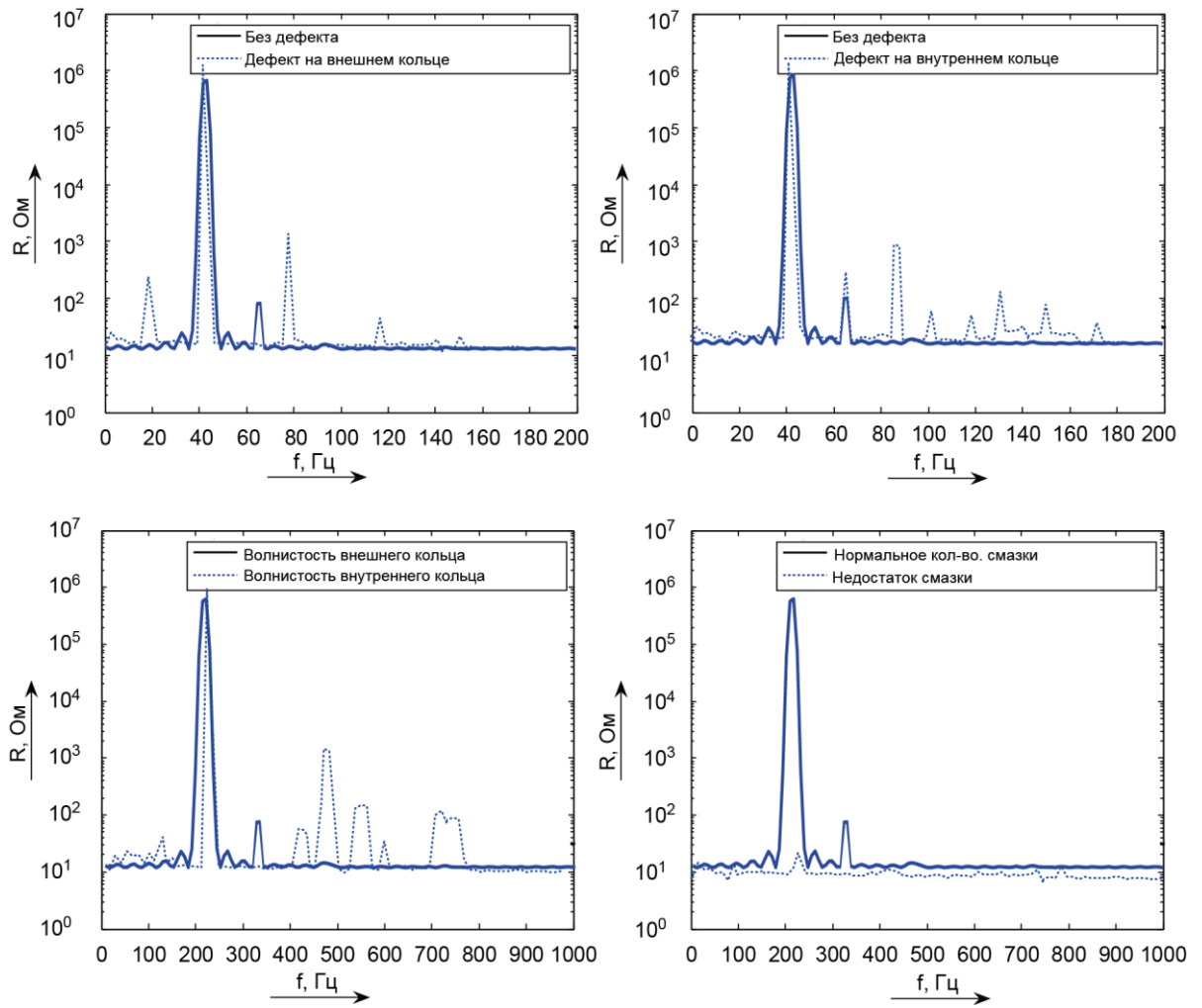


Рисунок 2.8 - Спектры функции сопротивления с моделированием наличия локальных дефектов, волнистости и недостатка смазочного материала

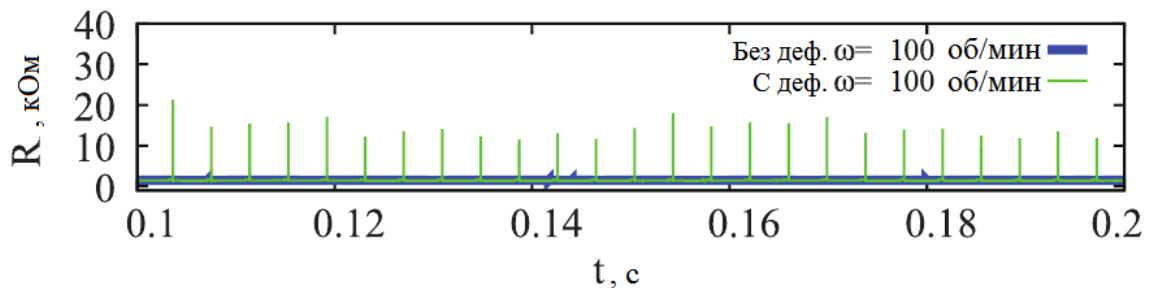


Рисунок 2.9 – Временной сигнал сопротивления ступичного подшипника с моделированием локальных дефектов

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Разработанные математические модели позволяют исследовать влияние локальных дефектов, волнистости, состояния смазочного материала на сигналы вибрации и сопротивления ступичного подшипника.

2. При математическом моделировании электрического сопротивления двухрядного подшипника, оно представляется как суммы параллельно соединенных сопротивлений контактов по каждому из тел качений.

3. Предложены уравнения моделирования волнистости дорожек качения и локальных дефектов ступичного подшипника.

4. При работе подшипника его электрическое сопротивление и параметры вибрации непрерывно изменяются, при этом функция изменения сопротивления во времени имеет две характерные составляющие: детерминированную, несущую информацию о виде и значении макроотклонений и локальных дефектов дорожек качения, и случайную, несущую информацию о состоянии тел и дорожек качения, а также состоянии смазочного материала.

5. Среднее сопротивление подшипника и параметры вибрации объективно и комплексно характеризует качество ступичного подшипника.

Глава 3. Метод диагностирования ступичного подшипника

3.1 Комплексирование измерительной информации

Критериями оценки комплекса могут быть следующие показатели: число каналов измерения в составе комплекса, вычислительные затраты, стоимость, степень неопределенности типа объекта (энтропия) на выходе системы распознавания, вероятность правильной идентификации, быстродействие. При комплексировании следует добиваться минимизации первых четырех показателей и достижения максимумов быстродействия и вероятности правильной идентификации [16].

При использовании в качестве критерия энтропии оценивается степень неопределенности физической системы, состоящей из совокупности распознаваемых объектов. Состояниями этой системы являются предъявления для распознавания объектов разных типов. Априорную энтропию данной физической системы обозначим $H(\omega)$. Из теории вероятностей известно, что для состояний объектов $\omega = \overline{1, N}$:

$$H(\omega) = - \sum_{\omega=1}^N P(\omega) \log P(\omega). \quad (3.1)$$

Другой физической системой является совокупность X' каналов измерения с состояниями, представляющими собой сочетания их выходных сигналов.

Эти две физические системы зависимы. При отборе датчиков используется оценка $H(\omega/X')$ — условная энтропия системы распознаваемых объектов при условии получения информации с системы каналов измерения X' .

Логарифмы в выражении (3.1) и других формулах расчета энтропии могут быть взяты при любом основании, так как изменение основания приводит лишь к другому масштабу измерения.

Упомянутые выше критерии дают односторонние характеристики комплекса. Для более полной оценки можно использовать величину

$$W(X') = \eta_1 H(\omega / X') + \eta_2 C(X') \quad (3.2)$$

где η_1, η_2 - весовые множители;

$C(X')$ - стоимость средств распознавания, с каналами измерения X' .

Рассмотрим процедуру комплексирования системы распознавания по информационным характеристикам. Такими характеристиками являются условная энтропия $H(\omega / X')$ и вероятность правильной идентификации объектов $P_{ПР}$.

Пусть для номенклатуры распознаваемых состояний $\omega = \overline{1, N}$ можно использовать каналы измерения множества $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ с q_i состояниями. Количество информации $I(x_i)$, получаемой с канала x_i равно уменьшению энтропии, т. е.

$$I(x_i) = H(\omega) - H(\omega / x_i), \quad (3.3)$$

где $H(\omega / x_i)$ - условная энтропия физической системы распознаваемых объектов при условии получения данных с канала измерения x_i . Величина

$$H(\omega / x_i) = - \sum_{l=1}^{q_i} P(x_i^{(l)}) \sum_{\omega=1}^N P(\omega / x_i^{(l)}) \log(\omega / x_i^{(l)}), \quad (3.4)$$

где $P(x_i^{(l)})$ - вероятность того, что с измерительного канала x_i снимается сигнал $x_i^{(l)}$.

Исходными данными для расчета информационных характеристик каналов являются величины $P(x_i^{(l)}, \omega)$ - вероятности того, что распознается объект типа ω и с измерительного канала x_i снимается сигнал $x_i^{(l)}$.

На основе этих данных рассчитываются условные вероятности $P(\omega / x_i^{(l)})$ принадлежности объекта типу ω при съеме с канала измерения x_i сигнала $x_i^{(l)}$. Величины $P(\omega / x_i^{(l)})$ определяются из соотношения:

$$P(x_i^{(l)}, \omega) = P(x_i^{(l)}) P(\omega / x_i^{(l)}), \quad (3.5)$$

полученному на основе теоремы умножения вероятностей. Из формулы (3.5)

$$P(\omega / x_i^{(l)}) = P(x_i^{(l)}, \omega) / P(x_i^{(l)}). \quad (3.6)$$

Величина $P(x_i^{(l)})$ рассчитывается по формуле:

$$P(x_i^{(l)}) = \sum_{\omega=1}^N P(x_i^{(l)}, \omega). \quad (3.7)$$

В процессе комплексирования множество каналов измерения X' изменяется. Отобранные каналы должны учитываться в информационных оценках оставшихся.

Введем следующие обозначения: $H(\omega / X' x_i)$ - условная энтропия физической системы распознаваемых объектов при условии получения информации с измерения множества X' и x_i ; $I(x_i / X')$ - количество информации с канала x_i при условии, что ранее была получена информация с каналов множества X' ; $\overline{X'}$ — сочетание сигналов с отобранных каналов; $P(\overline{X'} x_i^{(l)}, \omega)$ - вероятность того, что распознается объект до и с каналов снимается определенное сочетание сигналов $\overline{X'} x_i^{(l)}$.

С учетом введенных обозначений соотношения (3.3)-(3.7) принимают следующий вид:

$$I(x_i / X') = H(\omega / X') - H(\omega / X' x_i); \quad (3.8)$$

$$P(\overline{X'} x_i^{(l)}) = \sum_{\omega=1}^N P(\overline{X'} x_i^{(l)}, \omega). \quad (3.9)$$

При пошаговом отборе каналов с расширением множества X' энтропия $H(\omega / X')$ уменьшается. Отбор производится до тех пор, пока энтропия $H(\omega / X')$ не становится равной нулю или уменьшается до некоторого заранее заданного малого значения, либо вероятность $P_{\text{пр}}$ достигает допустимого значения.

Комплексирование системы диагностирования начинается с выявления возможного набора каналов [60]. Каждый канал соответствует определенному различительному физическому признаку. Эти признаки разделяются на интегральные и локальные. Интегральные признаки характеризуют объект в

целом; локальные — описывают отдельные (характерные) параметры объекта.

Исходная совокупность различительных признаков находится на основе анализа объектов и особенностей постановки конкретной задачи распознавания. Полученные результаты определяют совокупность датчиков $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$.

Материалом для выполнения алгоритма комплексирования служат результаты статистических испытаний объектов [39]. Используя эти данные, рассчитываются необходимые информационные характеристики.

Применим метод максимума информативности для отбора признаков диагностической системы ступичного подшипника. Вероятность правильной идентификации должна быть не менее 0,980. Для определения значений статистических вероятностей были проведены испытания, состоящие в фиксации типа дефекта и признаков, снимаемых с каналов измерения.

3.2 Комплексный метод диагностирования ступичного подшипника автомобиля

Комплексный метод, основанный на синтезе математической модели, объединяющей в себе зависимости параметров вибрационных и электрофлуктуационных процессов, позволит улучшить качество диагностирования, позволит получить новую информацию для проведения прогнозирования технического состояния ступичных подшипников.

Для решения данной задачи предполагается строить метод диагностирования на основе структурной схемы, изображенной на рисунке 3.1.

Задача, решаемая нейросетью, заключается в кластеризации входного вектора диагностических признаков, т.е. разбиении множества состояний объекта на несколько групп со сходными параметрами.

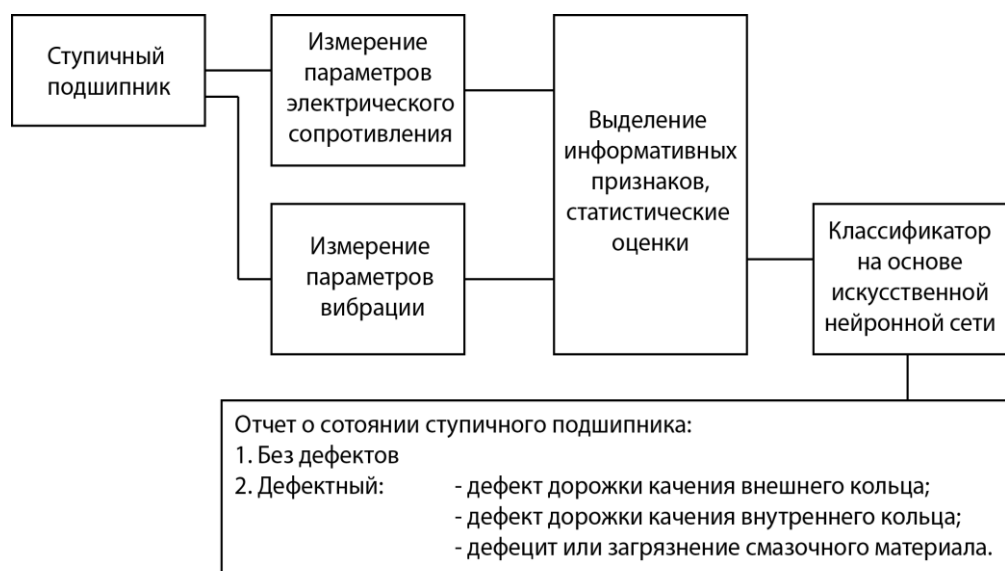


Рисунок 3.1 – Структурная схема метода диагностирования ступичного подшипника

На основании априорной информации выдается суждение о том, какому техническому состоянию подшипника соответствует каждая группа.

Ранжирование параметров по техническому состоянию поясняется в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Диагностируемые дефекты ступичного подшипника

Тип дефекта	Возможное состояние	Интервалы параметров	Примечания
1	2	3	4
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	$\lambda < 1$	

Параметры в таблице 3.1 и доверительные границы выбирались исходя из рекомендаций ГОСТ Р ИСО 13373-2009, который регламентирует вибро-диагностические измерения, а также рекомендаций [23] о выборе допустимой волнистости дорожек качения.

В результате решения задачи кластеризации выявляется скрытая структура данных и обнаруживаются неочевидные закономерности в данных.

Применение кластерного анализа в общем виде сводится к следующим этапам [54]:

- идентификация и отбор входных векторов для кластеризации;
- определение пространства переменных для ранжирования переменных в выборке;
- идентификация значений меры сходства элементов;
- реализация метода кластеризации входных данных;
- визуализация полученных классов.

В работах [44-46] показана связь между параметрами дефектов и электрическими диагностическими параметрами, следовательно, с помощью разрабатываемого метода принципиально возможно определять наличие дефектов в подшипнике.

При подготовке данных для обучения нейронной сети необходимо обращать внимание на следующие существенные моменты [50-53]:

1. Количество наблюдений в наборе данных. Следует учитывать тот фактор, что чем больше размерность данных, тем больше времени потребуется для обучения сети.
2. Работа с выбросами. Следует определить наличие выбросов и оценить необходимость их присутствия в выборке.
3. Обучающая выборка должна быть репрезентативной.
4. Обучающая выборка не должна содержать противоречий, так как нейронная сеть однозначно сопоставляет выходные значения входным.

5. Нейронная сеть работает только с числовыми входными данными, поэтому важным этапом при подготовке данных является преобразование и кодирование данных. При использовании на вход нейронной сети следует подавать значения из того диапазона, на котором она обучалась. Поэтому необходимо проводить нормализацию данных. Целью нормализации значений является преобразование данных к виду, который наиболее подходит для обработки, т.е. данные, поступающие на вход, должны иметь числовой тип, а их значения должны быть распределены в определенном диапазоне.

Кластеризация или естественная классификация - это процесс объединения в группы объектов, обладающих схожими признаками. В отличие от обычной классификации, где количество групп объектов фиксировано и заранее определено набором идеалов, здесь ни группы и ни их количество заранее не определены и формируются в процессе работы системы исходя из определённой меры близости объектов [50].

Для решения задач кластеризации используются следующие подходы [46]:

- метод нечеткой кластеризации С-средних (C-means);
- нейронная сеть Кохонена;
- генетический алгоритм.

Наиболее распространенным средством являются самоорганизующиеся карты Кохонена (SOM), поэтому выбран тип сети – нейросеть Кохонена.

Искусственная нейронная сеть Кохонена или самоорганизующаяся карта признаков (SOM) была предложена финским исследователем Тойво Кохоненом в начале 1980-х годов. Она представляет собой двухслойную сеть, представленную на рисунке 3.2. Каждый нейрон первого слоя соединен со всеми нейронами второго слоя, которые расположены в виде двумерной решетки [52].

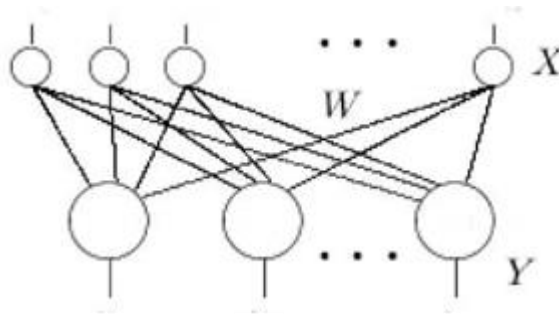


Рисунок 3.2 - Топология нейронной сети Кохонена

Нейроны выходного слоя называются кластерными элементами, их количество определяет максимальное количество групп, на которые система может разделить входные данные. Увеличивая количество нейронов второго слоя можно увеличивать детализацию результатов процесса кластеризации.

Система работает по принципу соревнования - нейроны второго слоя соревнуются друг с другом за право наилучшим образом сочетаться с входным вектором сигналов, побеждает тот элемент-нейрон, чей вектор весов ближе всего к входному вектору сигналов. За меру близости двух векторов можно взять квадрат евклидова расстояния [51].

Для обучения сети Кохонена используется соревновательный метод [52]. В процессе обучения таких сетей на входы подаются данные, но сеть при этом подстраивается не под эталонное значение выхода, а под закономерности во входных данных. Начинается обучение с выбранного случайным образом выходного расположения центров. На каждом шаге обучения из исходного набора данных случайно выбирается один вектор. Затем производится поиск нейрона выходного слоя, для которого расстояние между его вектором весов и входным вектором - минимально.

По определённому правилу производится корректировка весов для нейрона-победителя и нейронов из его окрестности, которая задаётся соответствующей функцией окрестности.

Основной итерационный алгоритм Кохонена последовательно проходит ряд эпох, на каждой из которых обрабатывается один пример из обуча-

ющей выборки. Входные сигналы последовательно предъявляются сети, при этом желаемые выходные сигналы не определяются. После предъявления достаточного числа входных векторов синаптические веса сети становятся способны определить кластеры. Веса организуются так, что топологически близкие узлы чувствительны к похожим входным сигналам.

В результате работы алгоритма центр кластера устанавливается в определенной позиции, удовлетворительным образом кластеризующей примеры, для которых данный нейрон является "победителем". В результате обучения сети необходимо определить меру соседства нейронов, т.е. окрестность нейрона-победителя, которая представляет собой несколько нейронов, которые окружают нейрон-победитель.

Алгоритм обучения сети Кохонена выглядит следующим образом [51]:

1. Инициализировать матрицу весов малыми случайными значениями (на отрезке $[-1,1]$). Весовым коэффициентам всех нейронов присваиваются малые случайные значения и осуществляется их нормализация. Выбирается соответствующая потенциальная функция $f(d)$ и назначается начальное значение коэффициента усиления α_0 .

2. Построить очередь из элементов входного множества, расположив их в случайном порядке, пометить их все как необработанные.

3. Выбрать первый необработанный элемент из x очереди.

4. Для каждого выхода j вычислить расстояние d_j между его вектором весов и входным вектором x .

$$d_j = \rho(w_j, x). \quad (3.10)$$

5. Найти номер выходного нейрона j с минимальным расстоянием d_j :

$$j_m = \arg \min(d_j). \quad (3.11)$$

6. Вычислить изменение весов $\Delta W = \{\Delta w_u\}$ для всех нейронов u выходного слоя

$$\Delta w_u = (\Delta w_u - x) \cdot h(u, c, t) \cdot \mu \quad (3.12)$$

где c - номер (пара индексов) нейрона победителя j_m в двумерной решетке второго слоя; u - номер (пара индексов) нейрона с вектором весов w_u в двумерной решетке второго слоя; w_u - вектор весовых коэффициентов связи входного слоя и выходного нейрона номер u ; x - текущий вектор входов; $h(u, c, t)$ - значение функции окрестности для нейрона номер u в момент времени t ; μ - коэффициент скорости обучения.

7. Скорректировать матрицу весов

$$W = W - \Delta W \quad (3.13)$$

8. Пометить элемент входной очереди x как обработанный.

9. Если в очереди остаются не обработанные точки, то переход на п.3.

10. Если критерий останова обучения не достигнут, то переход на п.2.

11. Конец.

В качестве критериев останова процесса обучения обычно используют следующие:

- количество полных циклов обучения ограничено константой, например, количество циклов равно количеству элементов во входном множестве.

- выход сети стабилизируется, т.е. входные вектора не переходят между кластерными элементами.

- изменения весов становятся незначительными.

Уникальность метода самоорганизующихся карт состоит в преобразовании n -мерного пространства в двумерное. Имея такое представление данных, можно визуально определить наличие или отсутствие взаимосвязи во входных данных.

Таким образом, карты Кохонена можно отображать:

- в двумерном виде, тогда карта раскрашивается в соответствии с уровнем выхода нейрона;

- в трехмерном виде.

В результате работы алгоритма получают карты [50]:

а) Карта входов нейронов.

Веса нейронов подстраиваются под значения входных переменных и отображают их внутреннюю структуру, рисунок 3.3. На одной из карт выделяют область определенного цвета - это означает, что соответствующие входные примеры имеют приблизительно одинаковое значение соответствующего входа. Цветовое распределение нейронов из этой области анализируется на других картах для определения схожих или отличительных характеристик.

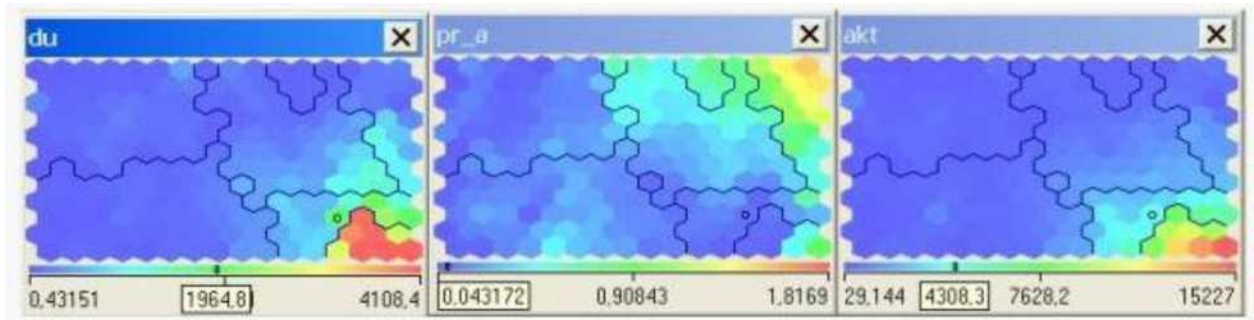


Рисунок 3.3 - Пример карт входов нейронов

б) Карта выходов нейронов.

На карту выходов нейронов проецируется взаимное расположение исследуемых входных данных. Нейроны с одинаковыми значениями выходов образуют кластеры - замкнутые области на карте, которые включают нейроны с одинаковыми значениями выходов.

в) Специальные карты.

Это карта кластеров, матрица расстояний, матрица плотности попадания и другие карты, которые характеризуют кластеры, полученные в результате обучения сети Кохонена.

Между всеми рассмотренными картами существует взаимосвязь – все они являются разными раскрасками одних и тех же нейронов. Каждый пример из обучающей выборки имеет одно и то же расположение на всех картах.

Полученную карту можно использовать как средство визуализации при анализе данных. В результате обучения карта Кохонена классифицирует входные примеры на кластеры (группы схожих примеров) и визуально отображает многомерные входные данные на плоскости нейронов.

Программное обеспечение, позволяющее работать с картами Кохонена, сейчас представлено множеством инструментов. Это могут быть как инструменты, включающие только реализацию метода самоорганизующихся карт, так и нейропакеты с целым набором структур нейронных сетей, среди которых - и карты Кохонена; также данный метод реализован в некоторых универсальных инструментах анализа данных.

К инструментарию, включающему реализацию метода карт Кохонена, относятся MATLABNeuralNetworkToolbox, SoMine, Statistica, NeuroShell, NeuroScalp, Deductor и множество других.

Обработка измерительной информации в соответствии с алгоритмом обучения нейросети при решении задачи диагностики подшипников будет выглядеть следующим образом:

1. Т.к. снятые с подшипника сигналы представляет собой функцию напряжения в виде кодовой комбинации, необходимо пересчитать его в функцию сопротивления $R(t)$ и виброскорости $V(t)$.

2. Провести гармонический анализ сигналов и определить следующие параметры, которые будут являться признаками нейронов сети:

- математическое ожидание (среднее значение) сигнала;

$$m_x(t) = M\{X(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} xP(x, t)dx. \quad (3.14)$$

- дисперсия сигнала сопротивления:

$$\bar{X} = \frac{1}{T \int_0^T x(t) dt}. \quad (3.15)$$

Дисперсия характеризует среднюю мощность отклонений случайного сигнала сопротивления от его среднего значения. Она является численной характеристикой степени флуктуации сигнала сопротивления.

- среднее квадратическое отклонение (стандартное отклонение):

$$\sigma_x(t) = \sqrt{M\{X^2(t)\} - m_x^2(t)}. \quad (3.16)$$

- корреляционная функция детерминированного сигнала с конечной энергией представляет собой интеграл в бесконечных пределах от произведения двух копий сигнала, сдвинутых друг относительно друга на время τ :

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot x(t - \tau) dt. \quad (3.17)$$

В случае периодического сигнала (сигнала с бесконечной энергией) корреляционная функция определяется как интегральная функция с усреднением за период:

$$R_x(\tau) = 1/T \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot x(t - \tau) dt. \quad (3.18)$$

3. Сформировать векторы входных признаков.

Обучающая выборка представляет собой совокупность сигналов, снятых с подшипников с известными дефектами. Число групп дефектов равно 4, число сигналов в каждой группе равно 10, поэтому обучающая выборка состоит из 40 сигналов:

«Сигнал 1» ($\bar{R}_1, \bar{V}_1, D_{1R}(t), D_{1V}(t), \sigma_{1R}(t), \sigma_{1V}(t), R_{1R}(\tau), R_{1V}(\tau)$);
 «Сигнал 2» ($\bar{R}_2, \bar{V}_2, D_{2R}(t), D_{2V}(t), \sigma_{2R}(t), \sigma_{2V}(t), R_{2R}(\tau), R_{2V}(\tau)$);
 «Сигнал 3» ($\bar{R}_3, \bar{V}_3, D_{3R}(t), D_{3V}(t), \sigma_{3R}(t), \sigma_{3V}(t), R_{3R}(\tau), R_{3V}(\tau)$);
 ...
 «Сигнал 40» ($\bar{R}_{40}, \bar{V}_{40}, D_{40R}(t), D_{40V}(t), \sigma_{40R}(t), \sigma_{40V}(t), R_{40R}(\tau), R_{40V}(\tau)$).

Таким образом, входной слой нейросети состоит из 5 нейронов, на которые поступает по 40 значений признаков (по числу подаваемых сигналов): Число кластеров равно четырем, соответственно, выходной слой состоит из пяти нейронов:

«Дефект внешнего кольца» (1 , 0 , 0 , 0 , 0);
 «Дефект внутреннего кольца» (0 , 1 , 0 , 0 , 0);
 «Волнистость» (0 , 0 , 1 , 0 , 0);
 «Дефект смазки» (0 , 0 , 0 , 1 , 0);
 «Исправное состояние» (0 , 0 , 0 , 0 , 1).

4. Подать векторы на вход сети.

5. Задать время обучения сети (число эпох), значение ошибки, выбрать форму вывода результатов.

6. Получить и проанализировать результаты.

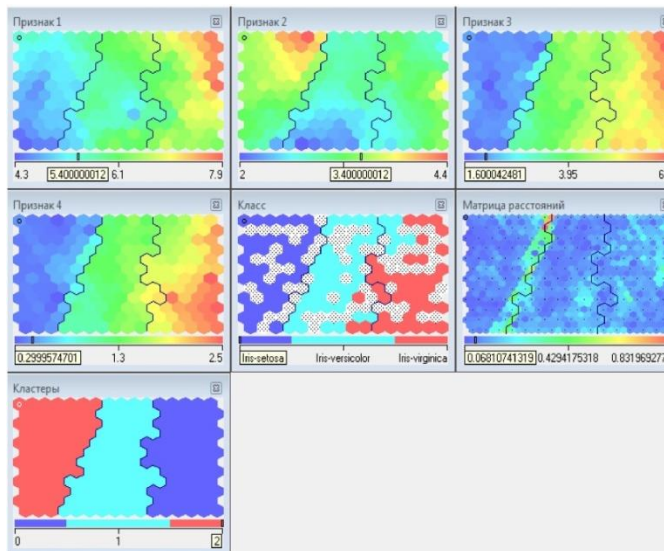


Рисунок 3.4 - Пример результатов кластеризации

7. Провести валидацию сети. Для этого на вход обученной сети подается сигнал известной категории и определяется, к какой группе его отнесла сеть. В случае получения неудовлетворительных результатов обучение повторяют.

3.3 Оценка точности распознавания дефектов ступичного подшипника

Поиск наиболее простых процедур принятия решений с точки зрения производительности и скорости перестройки на выполнение новых технологических операций привел к разработке геометрических методов распознавания [51]. Эти методы основаны на вычислении некоторой функции, определяющей меру близости неизвестного объекта к каждому из эталонов. Они вытекают из байесовского подхода с учетом ограничений, которые накладываются на параметры классифицируемых объектов реальными условиями производства наличием малой дисперсии значений признаков и, как правило, одинаковых значений вероятностей появления деталей, кроме того, независимостью признаков объектов, если они вычисляются как спектральные инварианты. В результате решающее правило при классификации вырождается в определение среднеквадратического расстояния между значениями призна-

ков предъявляемой для классификации детали и значениями этих признаков у эталона. Рассмотрим этот подход более подробно. Пусть требуется классифицировать N типов объектов при наличии n предварительно вычисленных признаков. Строится таблица размерами $n \times N$.

На пересечении i -й строки и j -го столбца записывают значение m_{ij} (среднее значение i -го признака для j -й детали). Путем эксперимента определяют среднеквадратические отклонения каждого признака.

На рабочем этапе вычисляют признаки неизвестного объекта $Y(y_1, y_2, \dots, y_n)$. Используя некоторую предварительно принятую метрику, в пространстве признаков определяют расстояние между неизвестным объектом и эталонными. Если неизвестный объект ближе всего к объекту с номером j , выносится решение о том, что в поле зрения распознающей системы находится деталь j -го типа.

Достаточность выбранных признаков может быть оценена на основе критерия Фишера [11], который может служить одномерным критерием достаточности j -го признака для разделения классов объектов k и l :

$$\Phi_F = (m_k^j - m_l^j)^2 / (\sigma_k^{(j)2} + \sigma_l^{(j)2}), \quad (3.19)$$

где m_k^j, m_l^j - средние значения j -го признака;

$\sigma_k^{(j)2}, \sigma_l^{(j)2}$ - дисперсия значения j -го признака.

Если дисперсии значений признаков одинаковы у различных объектов и не зависят от номера признака $\sigma_k^{(j)2} = \sigma^2 (k = \overline{1, N}, j = \overline{1, n})$, то в этом случае критерий Фишера вырождается:

$$\Phi_F = |m_k^j - m_l^j|. \quad (3.20)$$

Задавая некоторое пороговое значение Δ , можно положить, что j -й признак достаточен для разделения классов k и l , если выполняется условие $\Phi_F \geq \Delta$.

Погрешность предложенного метода диагностирования ступичного подшипника обусловлена:

- погрешностью диагностических моделей (комитет деревьев решений), аппроксимирующие зависимость вероятности граничного и жидкостного режима трения от гистограммы распределения логарифма сигнала сопротивления, обусловленной несовершенством алгоритма обучения;

- конечностью обучающей выборки и погрешностью средств измерения сопротивления.

Погрешность диагностических моделей следует оценивать непосредственно по результатам экспериментальных исследований с использованием скользящего контроля на обучающей выборке. В данном разделе определим точность и достоверность уравнения расчета вибрации и сопротивления трибосопряжения с учетом погрешности измерения сопротивления, в рамках приняты физических допущений.

Поскольку функции влияния не могут быть выражены алгебраическими функциями, оценку отклонений параметров, произведем с использованием метода статистических испытаний. В таблице 3.2 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 3.2 – 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%

На рисунке 3.5 представлены результаты классификации исследуемых образцов.

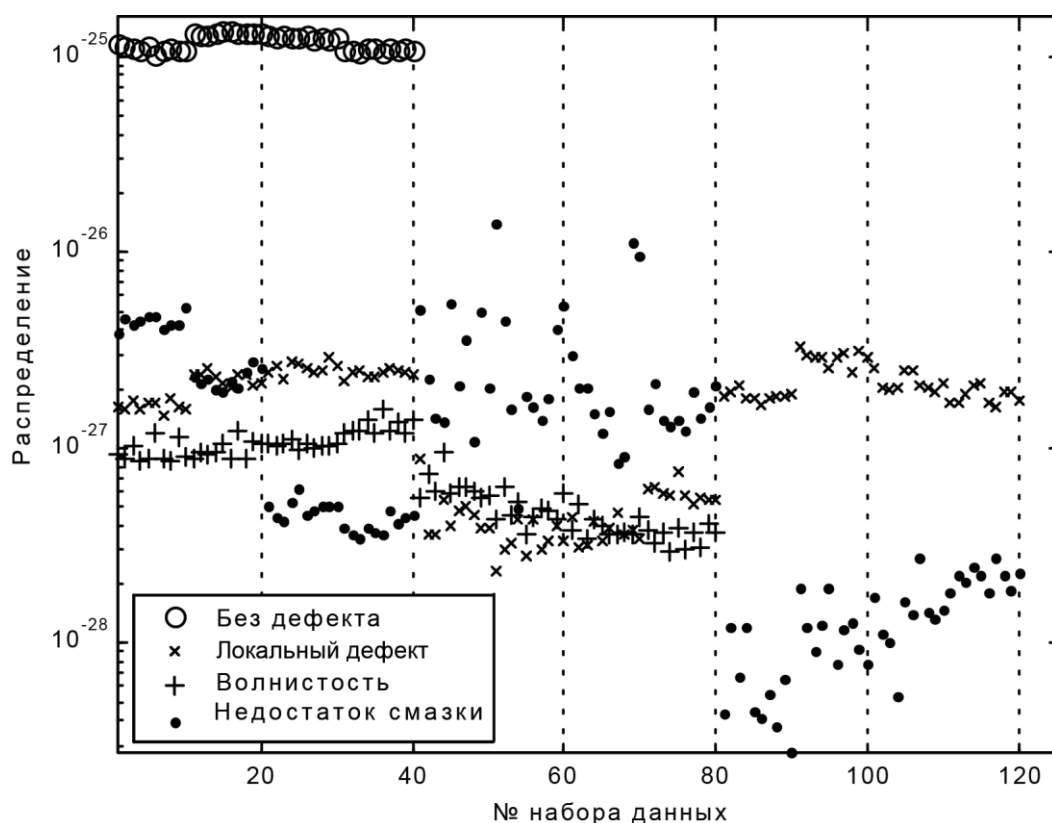


Рисунок 3.5 – Результаты классификации

На диаграмме хорошо иллюстрированы области, группирующиеся в четкие различимые классы, что указывает на эффективность выбора оценок процессов вибрации и сопротивления. В дальнейших исследованиях планируется использование генетических алгоритмов для выбора оценок с целью максимизации чувствительности.

Выводы по главе 3

1. Разработан метод диагностирования ступичных подшипников на основе алгоритмического обучения с применением нейронных сетей, основанный на комплексном вибрационном и электрорезистивном принципе получения диагностической информации, заключающийся в том, что качественные оценки сигналов измерительного тракта.

2. Предложен комплексный вектор-параметр, сочетающий в себе информацию вибрационных и электрорезистивных процессов в зоне трения.

3. Разработанные в рамках создания метода диагностирования алгоритмы позволяют осуществлять как усредненную комплексную оценку технического состояния ступичного подшипника по критерию толщины смазочной пленки в зонах трения, так и определение наличия локального дефекта или ненормативной волнистости дорожек качения.

4. Выбрана и обоснована архитектура нейросетевого классификатора, с формулировкой принципов построения обучающей выборки.

5. Выполненный метрологический анализ подтверждает, что разработанный метод обладает приемлемыми метрологическими характеристиками, позволяющими однозначно трактовать результаты диагностирования.

Глава 4. Средство диагностирования ступичного подшипника автомобиля. Экспериментальные исследования

4.1 Устройство диагностирования ступичного подшипника автомобиля

Метод диагностики, разрабатываемый в работе, нацелен на применение в условиях автосервисного производства. Объектом диагностики являются, в рамках данных экспериментальных исследований, двухрядные радиально-упорные подшипники задней ступицы легковых автомобилей ВАЗ (переднеприводных моделей - 2114, 21111, 21112) 256706 (ГОСТ 520-2002).

Для измерения используемых в математической модели параметров электрического сопротивления подшипника необходимо осуществлять оценку временной функции сопротивления $R(t)$.

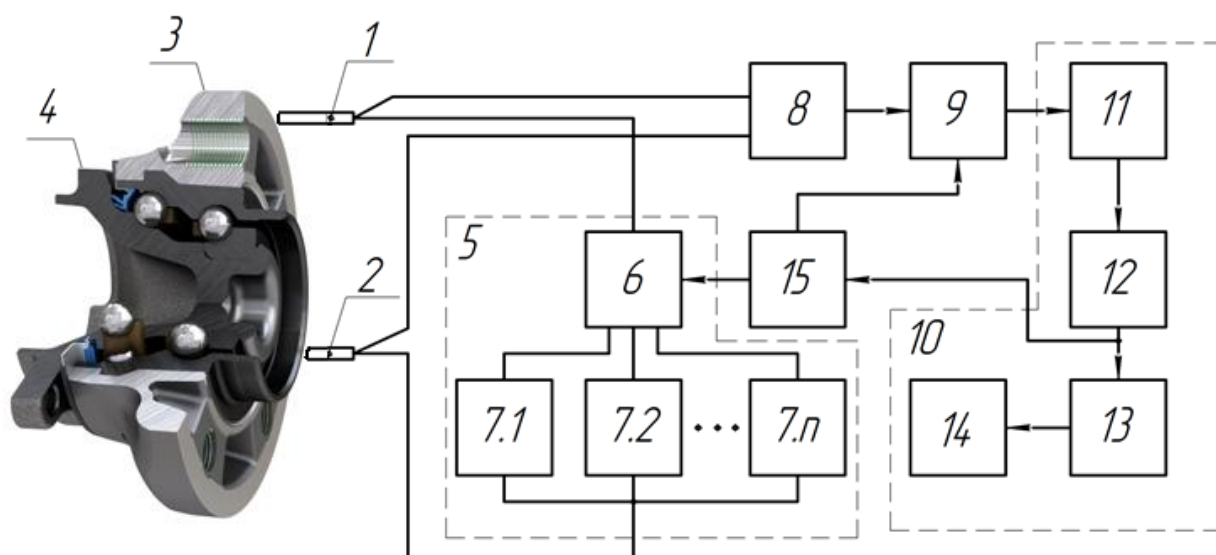
Особенности измерения мгновенных значений сопротивления подшипника являются причиной замены действительной, непрерывной функции изменения сопротивления во времени, измеренной – дискретной во времени функцией $R(t)$, период дискретизации которой определяется, с одной стороны, из условия обеспечения требуемой точности оценки сопротивления подшипника, а с другой стороны – возможностью восстановления функции $R(t)$ по мгновенным значениям сопротивления R_i .

При измерении сопротивления подшипник, в зависимости от задачи диагностирования и измеряемого параметра (сопротивление, проводимость), может быть включен, либо в цепь источника тока либо в цепь источника напряжения.

Для измерения сопротивления ступичного подшипника предложено устройство, изображенное на рисунке 4.1. Токосъемники выполнены с возможностью электрического контакта с кольцами диагностируемого ступич-

ного подшипника. В частности, были выбраны ртутные токосъемники Mercotak 205 с удельным сопротивлением порядка 1 мОм, граничной частотой 200 МГц и максимальной частотой вращения 1000 об/мин, что является оптимальными показателями для экспериментальных исследований.

Так же в схеме использованы источник электрической энергии, состоящий из коммутирующего устройства и стабильных источников тока, настроенных на разные номиналы тока в соответствии с измеряемыми диапазонами. Дифференциальный усилитель, нормирующий усилитель с переменным коэффициентом усиления и блок измерения диагностического параметра.



1,2 – токосъемники, 3 – внешнее кольцо ступичного подшипника, 4 – внутреннее кольцо СП, 5 – источник электрической энергии, 6 – коммутатор, 7 – источник тока, 8 – дифференциальный усилитель, 9 – усилитель с переменным коэффициентом усиления, 10 – блок измерения диагностического параметра, 11 – УВХ, 12 – АЦП, 13 – дешифратор, 14 – отсчетное устройство, 15 – устройство управления

Рисунок 4.1 – Устройство измерения сопротивления трибосопряжения ступичного подшипника

Закрепление токосъемника производится на вращающемся внешнем кольце ступичного подшипника с помощью мощного магнита и гибкого электропроводного вала.

Схема также позволяет регистрировать и общий уровень электрических шумов подшипника. Изготовленный макет измерителя сопротивления, изображенного на рисунке 4.3, работает в диапазоне сопротивлений от 41 кОм до 1 МОм и в частотном диапазоне до 1 МГц.

Измерение сопротивления таким способом снижает входное сопротивление модуля, улучшает защиту от помех за счет уменьшения на низком входном сопротивлении помех и влияния термоЭДС трибосопряжения. Для улучшения метрологических характеристик предусмотрено несколько стабильных источников тока. Выбор элементной базы стабилизатора тока позволяет обеспечить стабильность выходного тока при высокой частоте изменения сопротивления плеч мостовой схемы.

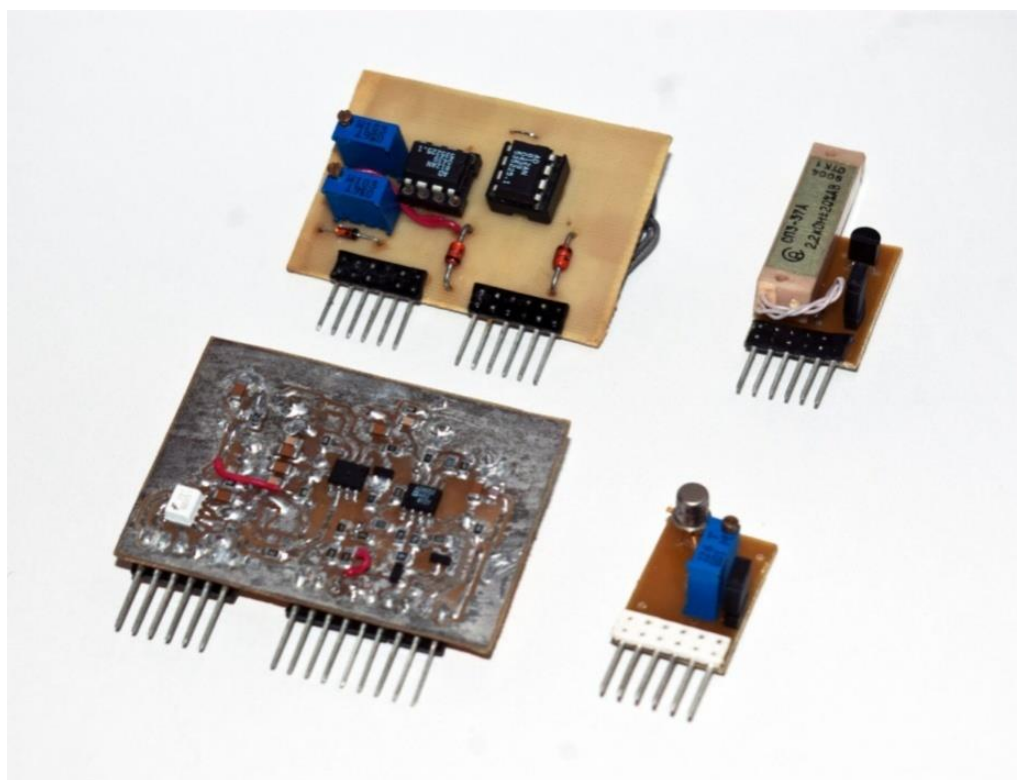


Рисунок 4.2 – Внешний вид модуля измерения сопротивления в SMD исполнении

Дифференциальный усилитель, построенный на планарной элементной базе обладает широким динамическим диапазоном (сотни МГц) , а также высокими импульсными характеристиками. Данная конструкция обеспечивает минимальные эффекты влияния на параметры процессов трибосопряжения. Аналогово-цифровой преобразователь оцифровывает сигналы и посылает сигнал далее в компьютер. Для этого используется цифровой модуль для регистрации сигналов AD USB-4001, имеющий следующие характеристики:

- интерфейс USB 2.0 (не требует внешнего питания);
- частота дискретизации 100 МГц (100 Мвыб/с) в реальном времени, полоса пропускания 40 МГц.
- 23 функции измерения, самопроверка;
- средняя форма сигнала, интенсивность, инвертирование, эмуляция электронного люминофора, сложение, вычитание, умножение, деление, X-Y график;
-
- поддержка Labview\VB\VC\Delphi\C++Builder;
- каналов: 2;
- импеданс: 1 МОм, 25пФ;
- вертикальное разрешение: 12 бит;
- диапазоны: 10 мВ-12 В;
- точность по постоянному току: $\pm 3\%$;
- полоса пропускания: до 40 МГц;
- частота дискретизации (выборки в секунду): 100 МГц (100 Мвыб/с) в одноканальном режиме, 50 Мвыб/с при двухканальном режиме.

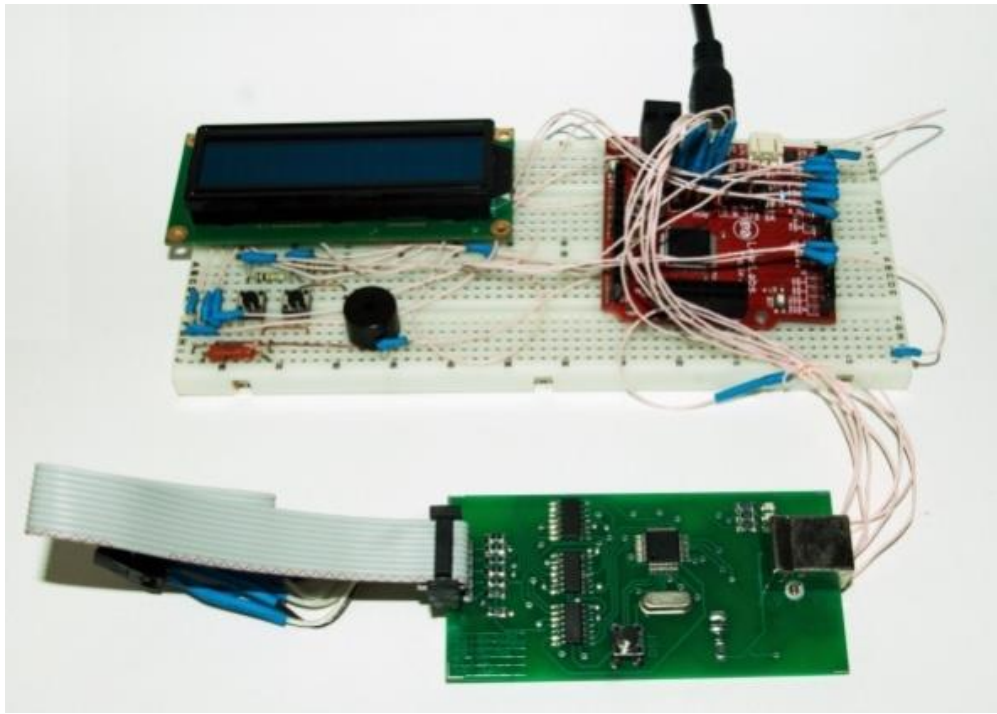


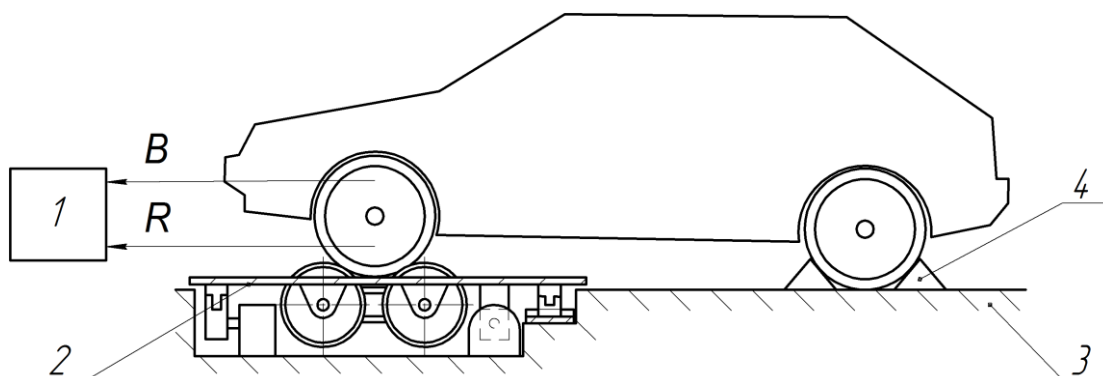
Рисунок 4.3 – Внешний вид макета модуля (разные исполнения)

4.2 Механическая часть устройства диагностирования

Предлагаемый стенд позволит упростить процесс диагностики ступичного узла и повысить точность определения технического состояния. Это достигается за счет интеллектуализации анализа диагностических параметров, получаемых одновременно из узла. Ими являются параметры вибрационных процессов, протекающих в ступичном узле, и электрофлуктуационные параметры, в частности электрическое сопротивление, трибосопряжения ступичного подшипника. Таким образом, использование принципа комплексирования диагностических параметров, за счет чего достигается сочетание преимуществ и компенсация недостатков отдельных методов, поможет наиболее достоверно оценивать техническое состояние ступичного подшипника. А использование системы распознавания дефектов на основе нейросетевых технологий из полученной диагностической информации позволяет решать прямую задачу диагностики. Возникает возможность применения такой системы

как для доэксплуатационного, так и текущего контроля (в том числе экспресс-контроля).

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, согласно полезной модели, 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, что изображено на рисунках 4.4, 4.5.



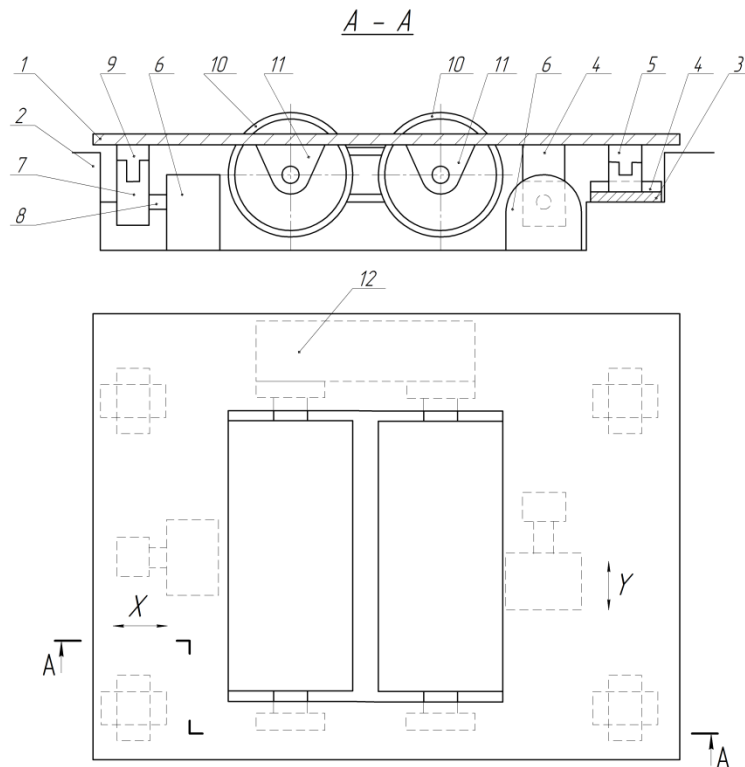
1 – блок сбора и анализа информации, 2 – подвижная опора с беговыми барабанами, 3 – основание, 4 – колесные упоры

Рисунок 4.4 – Внешний вид стенда диагностики ступичного подшипника

Автомобиль устанавливают на опорно-беговые барабаны, закрепляют упорами. После чего запускается электродвигатель и опорно-беговые барабаны передают вращающий момент колесу автомобиля.

Так как опорные барабаны обеспечивают равномерное вращение диагностируемого ступичного узла, а пневмоцилиндры, обеспечивающие аксиальное движение стола с беговыми барабанами, что вкпе дает возможность

подвергать ступичный узел нагрузкам, которые могут возникнуть в период эксплуатации.



1 – стол, 2 – основание, 3-5,9 – элементы зубчатой рейки, 6-8 – элементы пневмоцилиндра, 10 – опорно-беговые барабаны, 11 – стойка, 12 - электропривод

Рисунок 4.5 – Подвижный стол с беговыми барабанами

4.3 Экспериментальные исследования работоспособности метода

Экспериментальные исследования проводились с целью определения работоспособности метода, для оценки влияния характеристик реальных дефектов на параметры вибрационных и электрофлуктуационных процессов.

Основными задачами экспериментальных исследований являлись:

- синтез схем проведения экспериментальных исследований;
- выбор экспериментального оборудования и проведение необходимой модернизации;

- экспериментальные исследования ступичного подшипника для выявления эффективности информативных признаков вибрационных и электрофлуктуационных параметров в трибосопряжении.

Экспериментальная установка представлена на рисунке 3.1. За основу установки принят тормозной стенд СТМ-3500.



Рисунок 4.6 – Экспериментальная установка

Автомобиль устанавливают на опорно-беговые барабаны, закрепляют упорами. После чего запускается электродвигатель и опорно-беговые барабаны передают вращающий момент колесу автомобиля.

Блок сбора диагностической информации собирает данные с вибродатчика ДН-3 с магнитным основанием, установленного на ступичном узле, и с преобразователя сопротивления трибосопряжения ступичного подшипника, который подключен к внешнему и внутреннему кольцам подшипника с использованием ртутного токосъемника. Это позволяет производить параллельные измерения диагностических параметров, что положительно влияет на достоверность диагностики. Решающее устройство в этом блоке построено на основе искусственной нейронной сети, обученной на сигналах, полученных с помощью математической модели ступичного узла.

Была собрана база экспериментальных образцов ступичных подшипников для проведения диагностирования. В частности, было использовано 4 группы ступичных подшипников по пять образцов в каждой. Круглограммы и виды дефектов представлены в приложении В. Характеристики образцов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики экспериментальных образцов

№ образца	Наличие лок. деф.	Наличие волнистости	Повреждения уплотнителя	Параметры дефекта	Примечание
1	2	3	4	5	6
1	-	-	-	-	новый со смазкой
2	-	-	-	-	новый со смазкой
3	-	-	-	-	новый со смазкой
4	-	-	-	-	новый со смазкой
5	-	-	-	-	новый со смазкой
6	+	-	+	a=31 мкм b=42 мкм h=20 мкм	Лок. деф. Вида «впадина», присутствие повреждения уплотнителя
7	+	-	-	a=11 мкм b=38 мкм h=15 мкм	Лок. деф. Вида «впадина», наличие коррозии
8	+	+	-	a=22 мкм b=12 мкм h=21 мкм	Лок. деф. Вида «впадина», наличие абразивного износа
9	+	-	-	a=51 мкм b=13 мкм h=5 мкм	Лок. деф. Вида «впадина», усталостное выкрашивание
10	+	+	-	a=20 мкм b=42 мкм h=3 мкм	Лок. деф. Вида «впадина», наличие абразивного износа
11	-	+	-	H_{max} - 10,9 мкм	повреждения при сборке
12	-	+	+	H_{max} - 40,1 мкм	наличие абразивного износа
13	-	+	-	H_{max} - 19 мкм	наличие абразивного износа бриннелирование
14	-	+	-	H_{max} - 20 мкм	наличие абр. износа

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6
15	-	+	-	$H_{\max} - 12,1$ мкм	наличие абразивного износа
16	-	-	+		присутствие повреждения уплотнителя, наличие абразивного износа
17	-	-	+		присутствие повреждения уплотнителя, наличие абразивного износа
18	-	-	+		присутствие повреждения уплотнителя, наличие абразивного износа
19	-	-	+		присутствие повреждения уплотнителя, наличие абразивного износа
20	-	-	+		присутствие повреждения уплотнителя, наличие абразивного износа

Первый этап экспериментов проводился с установкой на автомобиль нового ступичного подшипника. Результаты измерений представлены на рисунке 4.7.

На графиках изображены значения гармоник основных резонансных частот подшипника (частота прохождения шариков через зону нагружения, частота вращения сепаратора).

Одновременно с этим составлялся массив вектор-параметров, характеризующих оценки вибрационных для дальнейшей кластеризации и распознавания.

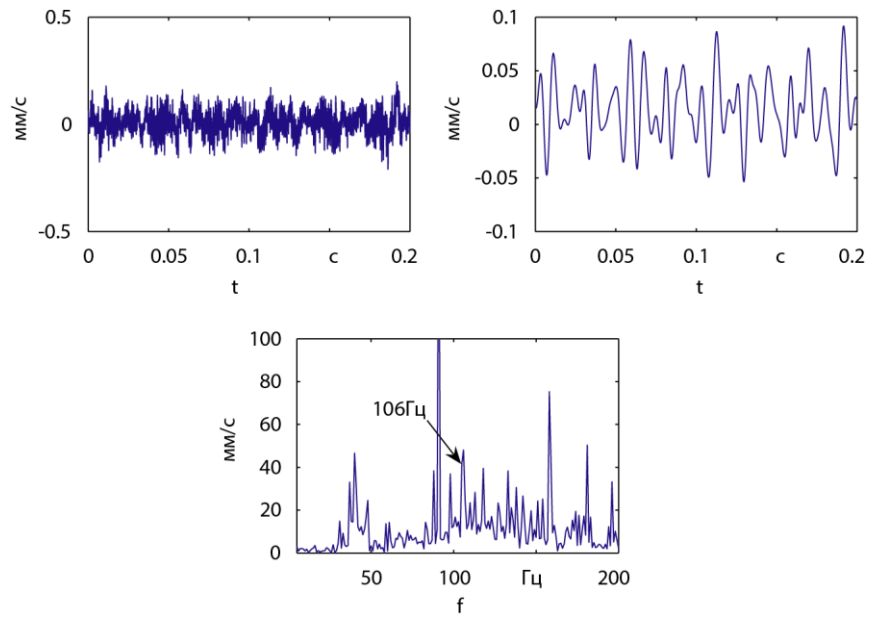


Рисунок 4.7 – Экспериментальные зависимости виброскорости нового ступичного подшипника

Далее устанавливался ступичный подшипник с заведомо известными дефектами, производилось измерение сопротивления и виброскорости.

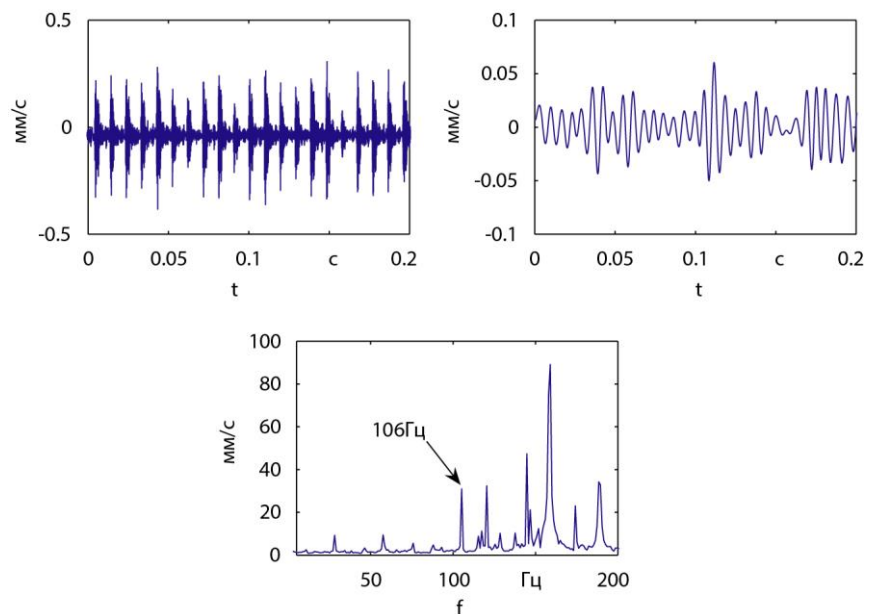


Рисунок 4.8 – Экспериментальные зависимости виброскорости с локальным дефектом на внешнем кольце

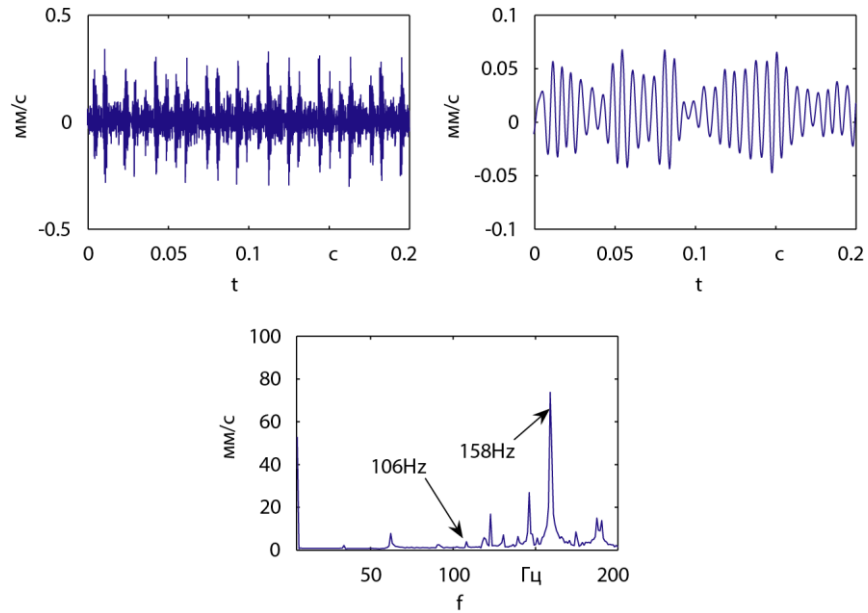


Рисунок 4.9 – Экспериментальные зависимости виброскорости волнистостью дорожки качения

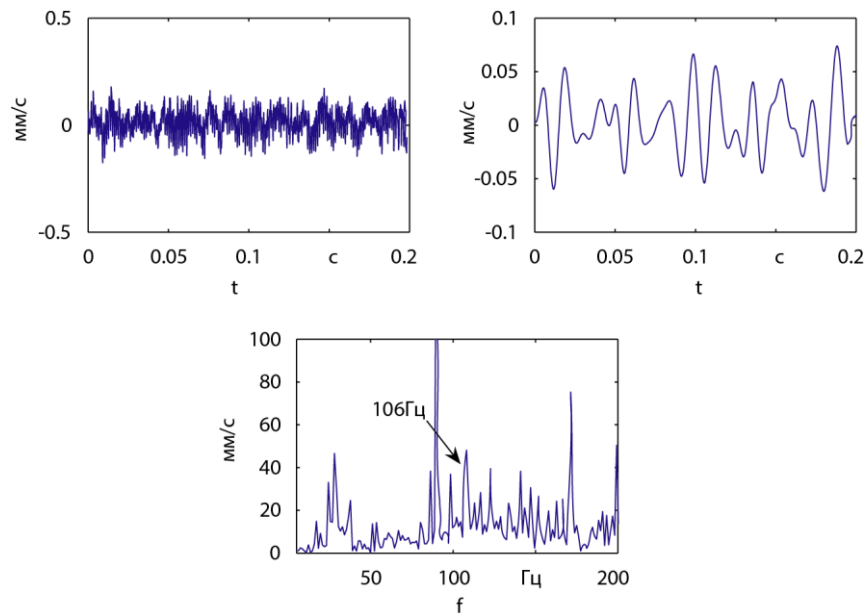
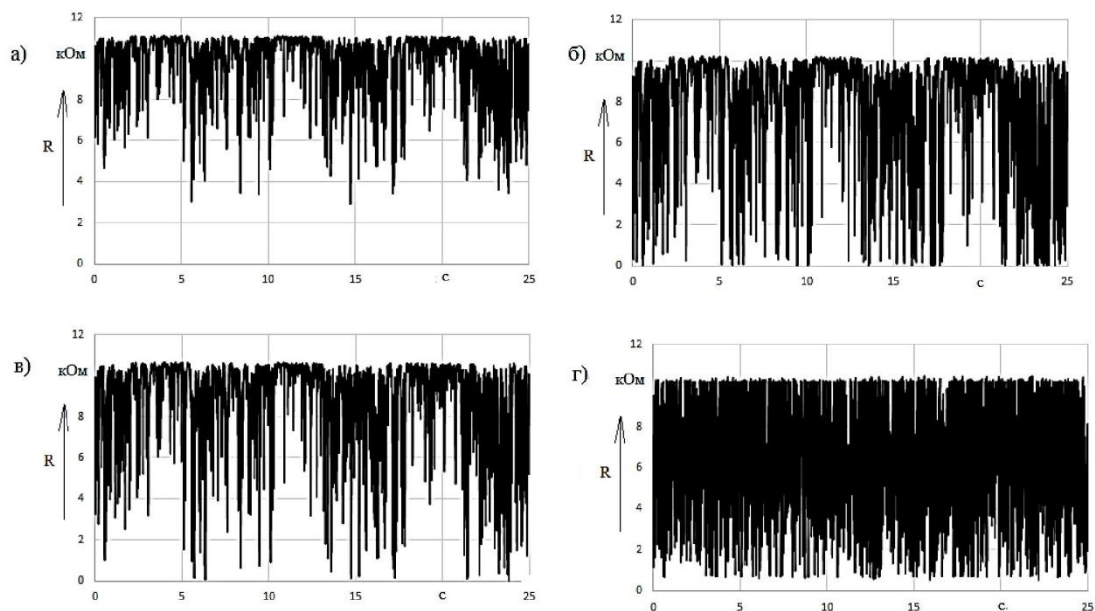


Рисунок 4.10 – Экспериментальные зависимости виброскорости с недостаточным количеством смазочного материала

Сравнивая экспериментальные данные с теоретическими зависимостями, можно убедиться, что в низкочастотном диапазоне наблюдается полное соответствие частот высших гармоник. Однако в более высокочастотной области наблюдается подъем уровня. Анализ показал, что следствием этому являются вибрации передающиеся в трибоузел от внешних источников.

Для подтверждения возможности диагностирования ступичного подшипника по параметрам временной функции электрического сопротивления проведены исследования его сопротивления.



а) новый ступичный подшипник; б) ступичный подшипник с дефектом внешнего кольца; в) ступичный подшипник с волнистостью; г) ступичный подшипник с недостаточным количеством смазки

Рисунок 4.11 – Экспериментальные зависимости сопротивления ступичного подшипника

Наличие значительного количества уровней низкого сопротивления до 0,3 кОм характеризует присутствие в зоне трения преобладающих пластических деформаций с разрушением поверхностных слоев и прочих структур «третьего тела». Наличие зоны высокого сопротивления (выше 4 кОм) свидетельствует о вхождении трибосопряжения в режим жидкостного трения в некоторые интервалы времени.

Сравнивая полученные данные с теоретическим моделированием и анализируя модели на адекватность по критерию Фишера, убеждаемся в адекватности математической модели.

Каждый сигнал был описан вектором параметров и представлен в виде строки обучающей выборки.

Полученные данные были обработаны в предпроцессоре MATLAB. За ранее нейросетевой классификатор был обучен сигналами математических моделей.

Карты признаков, представленные на рисунке 4.12, показывают распределение интенсивности параметров, по которым проводится кластеризация. Красный цвет соответствует высокому значению параметра, а синий – низкому.

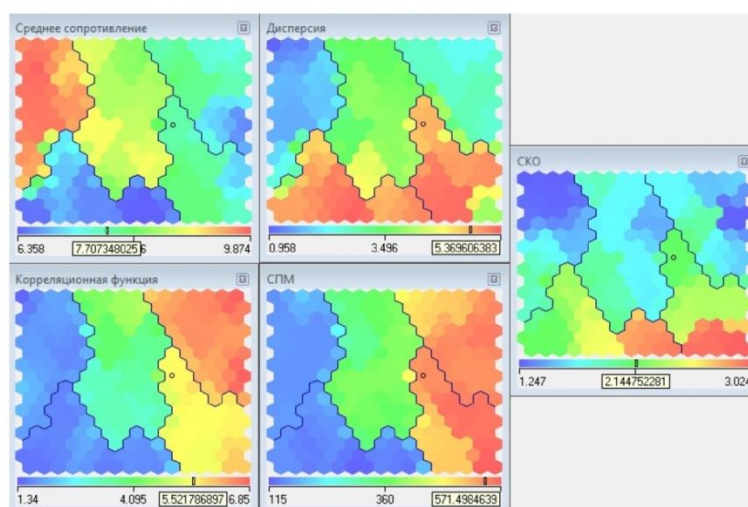


Рисунок 4.12– Карты признаков

Проекция Саммона и карта кластеров приведены на рисунке 4.13.

Карта кластеров отображает полученные кластеры в виде областей разных цветов с указанием четкой границы между ними. На проекции Саммона видно, как группировались примеры в пространстве в процессе настройки весов сети.

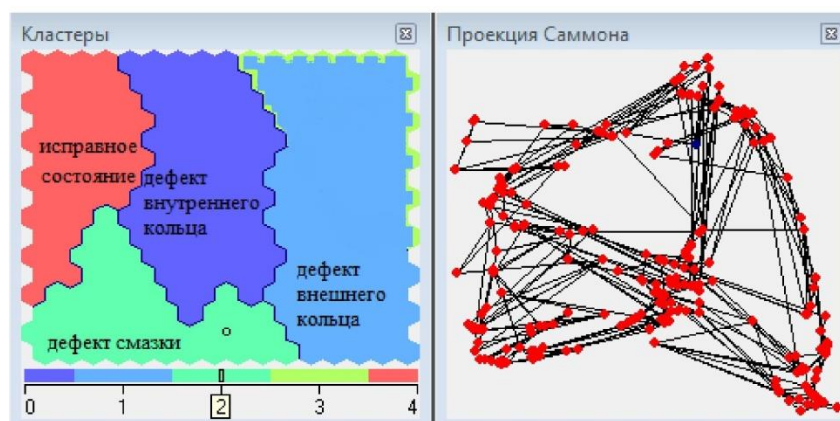


Рисунок 4.13– Результаты разделения на кластеры и проекция Саммона

Оценка погрешности распознавания и идентификации групп показала следующее: погрешность правильности идентификации группы – 3% . В случаях перекрестного состояния групп как в образцах №6, 10, 12 соотнесение к классу производится по относительной близости к доверительной границе, однако этот факт не повлиял на точность идентификации.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что цель исследования достигнута. Точность распознавания примеров удовлетворяет требованиям.

На основе экспериментальных исследований и особенностей работы стенда диагностики была составлена методика диагностирования, реализующая разработанный метод, которая представлена в приложении Д.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Экспериментальное оборудование обеспечивает возможность одновременного синхронного измерения параметров вибрации и сопротивления ступичного подшипника.

2. Разработанная и собранная принципиальная схема источника тока обеспечивает питание измерительной цепи током силой 1 мкА 10 %.

3. Полученные экспериментальные зависимости диагностических параметров от наличия локальных дефектов, волнистости дорожек качения и состояния смазочного материала подтверждают результаты теоретических исследований математических моделей ступичного подшипника.

4. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность, универсальность и эффективность предложенного комплексного метода контроля состояния ступичного подшипника.

5. Разработана методика диагностирования ступичного подшипника автомобиля.

Глава 5. Организационно-экономическое обоснование разрабатываемого метода диагностирования

5.1 Определение периодичности диагностирования ступичного подшипника

Разработка методов технического обслуживания и ремонта автомобилей при плановом функционировании уделяет особое внимание профилактическим работам. Но данный вид работ также требует затрат фонда времени. Очевидно, что повышение временных затрат влечет за собой ухудшение показателей использования автотранспорта [10].

Математические методы теории надёжности машин позволяют получить статические данные по законам распределения отказов на различных наработках АТС, предсказать потребность в ТО, ремонтах, запасных частях и т.д. Однако в силу статистического характера эти данные не могут быть применены к каждому автомобилю в отдельности, что значительно снижает их практическую ценность [70].

При формировании системы по «состоянию» главное внимание обращают на режимы ТО и ремонта (число видов обслуживания, периодичность, перечень и трудоёмкость выполняемых работ) на основе полученной информации об объекте. При этом руководствуются следующим: число видов ТО должно быть минимальным и зависеть от изменения технического состояния автомобиля; следует избегать ненужных разборок сопряженных пар, предусматривать возможность механизации и автоматизации необходимых операций [35, 40].

Для этого некоторые изделия с учетом их состояния по экономическим соображениям было бы целесообразно обслуживать реже, например, через одно ТО ($2l_{\text{ТО}}$), как показано на рисунке 5.1.

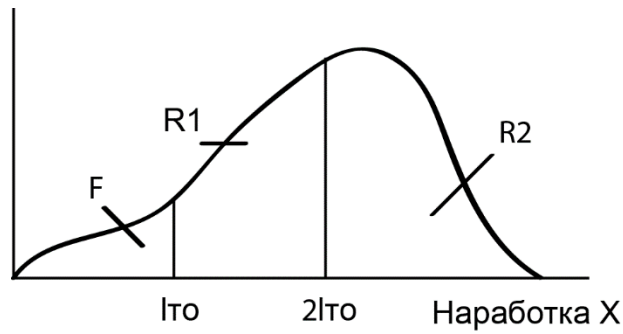


Рисунок 5.1 - Система ТО и ремонта по «состоянию»[56]

С этой целью необходимо при каждом ТО осуществлять контроль технического состояния всех агрегатов, узлов, систем (элементов) АТС и разделить их на две группы. Первая группа имеет потенциальную наработку на отказ, не превышающую очередную периодичность ТО (от $L_{то}$ до $2L_{то}$). Эти элементы с вероятностью требуют не только контроля, но и выполнения работ, обеспечивающих восстановление номинальных или близких к ним значений параметров технического состояния. Если такие работы не будут выполнены, то эта группа элементов с вероятностью $R1$ откажет в интервале наработки от $L_{то}$ до $2L_{то}$. Вторая группа элементов с вероятностью $R2$ имеет потенциальную наработку на отказ $X > 2L_{то}$, то есть они могут безотказно проработать до очередного ТО. Поэтому для таких элементов достаточно ограничиться контролем (диагностикой) технического состояния, а исполнительную часть отложить до следующего обслуживания.

При такой системе обслуживания необходимо также основной акцент делать на проведение регулировочных операций, благодаря чему при каждом цикле обслуживания происходит полная или частичная компенсация износа и достигается возможность увеличения наработки до предельного состояния и уменьшения числа межремонтных пробегов. Применение такой тактики обслуживания способствует более полному использованию потенциального ресурса конкретных деталей с учетом вариаций изменения их фактического состояния .

Периодичность технических воздействий — это нормативная наработка (в километрах пробега или часах работы) между двумя последовательно

проводимыми однородными работами Д или ТО [68]. Корректирование должно быть направлено на увеличение роли и значения диагностических работ за счёт сокращения работ по ТО и ремонту.

Для установления периодичности технических воздействий необходимо иметь данные о состоянии отдельных элементов транспортного средства в функции пробега. Предельная и допустимая периодичности ТО определяются из выражений [30]:

$$L_{np} = L_i \sqrt{\frac{x_i - x_0}{x_{np} - x_0}}; l_{д} = L_{np} - \Delta l, \quad (5.1)$$

где L_{np} - предельная периодичность данного элемента, соответствующая предельному состоянию;

L_i - текущий-пробег транспортного средства между техническими воздействиями;

x_{np}, x_0, x_i - предельное, начальное, промежуточное состояние элемента;

$l_{д}$ - допустимая периодичность ТО.

Количество отказов и периодичность ТО определяются на основе анализа статистических данных об отказах узлов и систем АТС, а также, наработок на эти отказы. При сокращении увеличивается работа, узла и одновременно затраты на саму профилактику, которую приходится проводить чаще. Увеличение периодичности, сокращает затраты на диагностику и ТО, но одновременно увеличивает риск отказа, поэтому важным элементом в обеспечении работоспособности изделия является определение рациональной периодичности ТВ [10].

Для повышения объективности оценки технического состояния подвижного состава, проходящего техническое обслуживание и ремонт, а также для информационного обеспечения подготовки производства, на автотранспортных предприятиях проводится диагностирование Д-1 и Д-2.

При диагностировании Д-1, выполняемом, как правило, перед и при ТО-1, определяется техническое состояние агрегатов и узлов, обеспечивающих безопасность движения и пригодность автомобиля к эксплуатации [40].

При диагностировании Д-2, выполняемом, как правило, перед ТО-2, определяется техническое состояние агрегатов, узлов, систем автомобиля, уточняются объемы технического обслуживания и потребность в ремонте. Контрольное (диагностическое) оборудование используется также при выполнении текущего ремонта и оценке качества работ.

Подшипники ступиц являются составными частями автомобиля, техническое состояние которых непосредственно влияет на безопасность движения и на топливную экономичность.

Согласно положению о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта Р 3112199-0240-84 существуют следующие рекомендации по определению перечня и периодичности выполнения работ по ТО и плановому предупредительному ремонту:

1. Организация выполнения работ технического обслуживания и планово-предупредительного ремонта имеет целью:

- повышение безотказности работы автомобилей на линии;
- сокращение удельных затрат (по сравнению с проведением ремонта по потребности).

2. Для обоснования перечня и определения периодичности выполнения работ технического обслуживания и планово-предупредительного ремонта необходимо получение следующих данных:

- наработки на один случай текущего ремонта l_m ;
- коэффициента (или степени) вариации наработки на случай текущего ремонта, выбираемого по таблице 5.1;
- трудовых и материальных затрат на планово-предупредительный ремонт и потерь от простоев подвижного состава при его выполнении;

3. Работы текущего (планово-предупредительного) ремонта малой трудоемкости, технологически связанные с техническим обслуживанием, реко-

мендуется выполнять совместно с ним с отнесением ремонта к конкретному виду обслуживания, выполняемому с установленной в Положении периодичностью. При этом соответственно изменяются трудоемкости соответствующего вида технического обслуживания.

4. Методические указания по определению перечня и периодичностей выполнения работ технического обслуживания и планово-предупредительного ремонта утверждаются в установленном порядке.

Таблица 5.1. Диапазоны значений коэффициентов (степени) вариации наработок на один случай текущего ремонта

Виды разрушений	Коэффициент вариации	Степень вариации
Износ трущихся пар (подшипники скольжения, поршневые кольца, гильзы цилиндров, фрикцион-	0,1-0,3	Малая
Усталостный излом при изгибе и кручении, износ подшипников скольжения. Поверхностное усталостное выкрашивание, разрушение зубчатых передач. Комплексное разрушение (сочетание износа, усталости, коррозии)	0,3-0,7	Средняя
Разрушение по причинам ослабления крепежных соединений. Отказы системы питания по причине засорения топливных жиклеров, фильтров, магистралей. Отказы элементов электрооборудования по причинам ослабления и коррозии токопроводящих контактов	0,7-0,9	Большая

Так же в положении о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта Р 3112199-0240-84 приведенный примерный перечень рекомендуемых для выполнения при ТО-2 работ включает в себя группу работ по диагностике и обслуживанию ходовой части автомобиля, в который включены операции диагностирования подшипника ступицы колеса.

Основным критерием установления периодичности максимально раннего выполнения профилактического технического воздействия по системе технического обслуживания и ремонта на основе регламентированного профилактического технического обслуживания узла машины является минимум затрат на техническое обслуживание и эксплуатацию (регламентное обслуживание) машин C_{po} . Величина C_{po} определяется как сумма затрат на техническую эксплуатацию машин в случае позднего обнаружения дефектов C_{no} и затрат в случае раннего обнаружения C_{np} , характеризующих недоиспользование ресурса машины. Таким образом, если t_{np} - периодичность выполнения профилактических технических воздействия, то функция затрат в общем случае имеет вид [53-54].

Расчетный 90-процентный ресурс подшипника L_{S90} , выраженный в километрах пробега автомобиля, определяется для наиболее нагруженного ряда шариков подшипника по формуле [68]:

$$L_{S90} = \left(\frac{C_{D1}}{R_{\Sigma}^{eq} \cdot K_{\sigma}} \right)^3 \cdot 2000 \cdot \pi \cdot r_k \quad (5.2)$$

где K_{σ} – коэффициент безопасности; в данном расчете следует принимать $K_{\sigma} = 1,6$ [68];

R_{Σ}^{eq} - эквивалентная динамическая нагрузка самого нагруженного ряда подшипника;

r_k – радиус колеса, м;

C_{D1} – динамическая грузоподъемность одного ряда шариков подшипника.

При подстановке параметров ступичного подшипника автомобиля ВАЗ-2114 расчетный 90-процентный ресурс подшипника составил 118600 км.

Произведем расчет периодичности проведения диагностики ступичного подшипника по технико-экономическому методу.

Минимальным удельным затратам соответствует оптимальная периодичность операции - l_o . При этом удельные затраты на ТО составляют [71]:

$$C_{TO} = \frac{S_{TO}}{l}, \quad (5.3)$$

где l - периодичность ТО; S_{TO} -стоимость ТО.

При увеличении периодичности ТО разовые затраты (S_{TO}) или остаются постоянными, или незначительно возрастают, а удельные затраты значительно сокращаются. Увеличение периодичности ТО повышает вероятность отказа элементов автомобиля, а следовательно увеличивает затраты на текущий ремонт (ТР) C_{TP} . Поскольку абсолютные затраты на ТР практически пропорциональны вероятности отказов, то удельные затраты составляют

$$C_{TP} = \frac{S_{TO}P(l)}{l} \quad (5.4)$$

где S_{TO} - стоимость устранения отказа, $P(l)$ - вероятность отказа.

Определить минимум

$$C_{\Sigma} = C_{TO} + C_{TP} \quad (5.5)$$

можно графически или аналитически при известных формах зависимостей.

При формировании структуры системы ТО и ремонта следует учитывать, что в ТО входят 8-10 видов работ (контрольно-диагностические, регулировочные, крепежные, смазочные и другие) по 150-300 элементов автомобиля. Каждый из этих элементов имеет свою оптимальную периодичность, определяемую по методам, приведенным выше. Однако выполнять ТО при этой периодичности практически невозможно из-за организационных сложностей и больших простоев в ТО, особенно на подготовительно-заключительных операциях. Кроме того, объектом воздействий будет не автомобиль в целом, а отдельные его элементы. Поэтому целесообразно производить группирование операций в виды ТО [56].

Следует отметить, что также рекомендовать проведение диагностирования ступичного подшипника при заявочном диагностировании (ДЗВ), которое производится по заявкам клиентов, в основном как предварительное воздействие. Этот вид диагностирования предназначается для определения мощностных и экономических показателей автомобиля, а также выявления

конкретных неисправностей, их места, характеры, причины и способы устранения. Основной целью данного вида диагностирования является поиск неисправностей, устранение которых требует выполнения ремонтных работ большой трудоёмкости, которые нецелесообразно совмещать с работами по ТО [30].

Кроме отбора трудоёмких работ в зону ТР при диагностировании ДЗВ производятся предусмотренные технологией диагностирования нетрудоёмкие регулировочные работы, а также определяются виды регулировочных и ремонтных работ, которые допускается совмещать с проведение ТО [49].

При проведении диагностирования ДЗВ проверяются эффективность рабочих процессов по тяговым показателям, расходу топлива, по величине механических потерь, утечек, по вибрации, уровню шума, стукам, по составу отработавших газов и другим признакам, определяющим работоспособность, долговечность и безотказность автомобилей. При этом диагностируется двигатель и его системы, агрегаты трансмиссии и ходовой части, электрооборудование, проверяются установка фар, исправность контрольно-измерительных приборов и др. Проводиться также поэлементная проверка таких элементов, влияющих на безопасность движения, как усилители рулевого управления, шкворневые соединения, карданные передачи.

В связи с этим рекомендуется использовать данный метод диагностирования во время проведения ТО-2, при заявочном диагностировании а так же при контроле замены ступичного подшипника автомобиля, с целью минимизировать возможности неправильной установки.

5.2 Экономический эффект внедрения методики диагностирования ступичного подшипника

Экономическая эффективность применения метода диагностирования ступичных подшипников автомобилей в диссертации рассчитывалась на примере легковых машин, обсуживающихся в сервис-центрах региона.

Годовой экономический эффект от внедрения методики и метода диагностирования ступичного подшипника формируется за счет уменьшения затрат на внеплановый ремонт автомобилей по системе технического обслуживания и ремонта на основе регламентированной периодичности профилактических технических воздействий, а также группирования операций ТО:

$$\mathcal{E}_e = \Sigma \mathcal{E}_{\text{ЭК}} + \Sigma \mathcal{E}_{\text{ГО}} - \Sigma \mathcal{Z}_d, \quad (5.6)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ЭК}}$ - экономия за счет снижения затрат на внеплановый ремонт, руб./год;

$\mathcal{E}_{\text{ГО}}$ - экономия за счет группирования операций ТО, руб./год;

\mathcal{Z}_d - затраты на диагностику автомобиля, руб./год.

В диссертации годовой экономический эффект определялся на основе значений себестоимости 1 нормо-часа.

Экономия за счет снижения затрат на внеплановый ремонт $\mathcal{E}_{\text{ЭК}}$ может быть определена следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\text{ЭК}} = \Delta \mathcal{Z}_p + \Delta \mathcal{Z}_{\text{ЗЧ}} + \Delta V_{\text{дон}} \quad (5.7)$$

где $\Delta \mathcal{Z}_p$ - уменьшение затрат на проведение ремонтов при увеличении периодичности выполнения профилактических технических воздействий, руб.;

$\Delta \mathcal{Z}_{\text{ЗЧ}}$ - уменьшение затрат на запасные части при проведении технического обслуживания и ремонтов, руб.;

$\Delta V_{\text{дон}}$ - экономия за счет выполнения дополнительного объема работ за счет сокращения времени выполнения ТО и Р, руб.

Экономия средств за счет технического обслуживания и ремонтов машин может быть определена по зависимости:

$$\Delta \mathcal{Z}_p = C_{\text{мч}} n \Delta t \quad (5.8)$$

где $C_{\text{мч}}$ - заработная плата с начислениями ремонтников на 1 нормо- час работы диагноста;

n - число ремонтного персонала для выполнения работ по ТО и Р (принимается n равно 1 чел.);

Δt - увеличение наработки машин за счет внедрения технической диагностики. Принимаем по оценке экспертов [91] в среднем 10 % от наработки машин до внедрения диагностирования. При среднем значении наработки, например,

$\Delta Z_p = 66,58 \cdot 1 \cdot 56 = 3728,48$ руб./год (используя данные частного авто-сервиса).

Годовая экономия за счет снижения затрат на запасные части может быть определена по формуле

$$\Delta Z_{зч} = Z_p * \Delta t \quad (5.9)$$

Тогда годовая экономия за счет снижения затрат на запасные части составит [92]:

$$\Delta Z_{зч} = 159,93 \cdot 46 = 7356,78 \text{ руб./год};$$

Экономия $\Delta V_{дон}$ за счет выполнения дополнительного объема работ за счет сокращения времени выполнения ТО и Р составит 3258,55 рублей, основываясь на данные и нормативы сервисного предприятия.

Затраты на диагностику автомобилей в первом приближении можно определить по зависимости

$$Z_d = C_d * H_a^d + Z_{пл} + Z_{эн} , \quad (5.10)$$

где C_d - стоимость диагностического оборудования, руб.;

H_a^d - норма амортизации диагностического оборудования. Принимаем 10% год;

$Z_{пл}$ - заработная плата оператора диагностического оборудования, руб./год;

$Z_{эн}$ - затраты на энергоресурсы при выполнении технической диагностики, руб./год.

Приобретение одного комплекта диагностического оборудования с учетом стоимости компьютера составляет примерно $C_0 = 73$ тыс. руб. Норма амортизации комплекта диагностического оборудования при сроке службы примерно 5 лет равна 10 %.

Годовая заработная плата одного операторов диагностического оборудования должна быть не ниже, чем машинистов строительных и дорожных машин. Тогда при нормальном режиме работы (в одну смену продолжительностью 8 ч/смену) и часовой тарифной ставке с начислениями, равной 61,81 руб./ч величина $Z_{пл}$ составит 1660 руб.

Затраты на энергоресурсы при выполнении технической диагностики составят 126,125 руб.

В результате затраты на диагностику в соответственно

$$Z_0 = 73000 * 0,1 + 1660 + 126,125 = 9086,125 \text{ руб./год};$$

Тогда годовой экономический эффект от внедрения методики диагностирования ступичного подшипника составит 35442 руб./год.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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 поверхностей качения 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 поверхностей качения 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.

Литература

1. Heiβing, B. Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives [Текст] / В. Heiβing, М. Ersoy. – Fachbuch: Teubner Verlag. – 2011. – 591 P.
2. Power the Future Report: Bearings with brains make intelligent machines. SKF Insight introduction 2014. [Электронный ресурс] .– Режим доступа: <http://www.skf.com/m/news-and-media> (дата обращения: 20.08.2014).
3. Мирошников, Л.В. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях [Текст] / А.П. Болдин, В.И. Пал. – М.: Транспорт, 1977.– 264 С.
4. SKF hub units equipped with tapered roller bearings [Электронный ресурс] /SKF // SKF materials. 2008. – №16698 EN. – Режим доступа: <http://www.skf.com/files/686799.pdf>
5. Бейзельман, Р.Д. Подшипники качения: Справочник [Текст] / Р.Д. Бейзельман, Б.В. Цыпкин, Л.Я. Перель.– М.: Машиностроение, 1975. - 527 С.
6. NSK. General Cataloge. [Электронный ресурс] .– Режим доступа: <http://www.nsk.com/> (дата обращения: 20.08.2014).
7. SKF. General Cataloge 4000E. 20154. [Электронный ресурс] .– Режим доступа:<http://www.skf.com/cat> (дата обращения: 20.08.2014).
8. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст] / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 С.: ил.
9. Евстигнеев, М.Ю. Использование электрических явлений для диагностики механических узлов: Метод. Рекомендации [Текст]/ М.Ю. Евстигнеев. – М.:ЭНИМС, 1982. – 16с.
10. Савич, Е.Л. Обслуживание и ремонт легковых автомобилей [Текст] :

учебник для студентов вузов специальности "Эксплуатация транспортных средств" / Е. Л. Савич, М. М. Болбас, В. К. Ярошевич. - Минск : Вышэйшая школа, 2000. – 381С. : ил.

11. Бальмонт, В.Б. Вибрация подшипников шпинделей станков [Текст] / В.Б. Бальмонт, Е.Н. Сарычева // Обзор. М.: НИИМаш, 1984. - 64 С.

12. Мишин, В.В. Метод и средства диагностирования подшипниковых узлов с учетом макрогеометрии дорожек качения: Дис. ... канд. техн. наук. [Текст]/ Мишин В.В.-Орел, 1999.

13. Подмастерьев, К.В. Электрический метод и средства диагностирования подшипников качения (при ремонте и изготовлении машин и механизмов): Дисс. канд. техн. наук. [Текст]/ Подмастерьев К.В. - М., 1986. - 244 С.

14. Рудзит, Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей [Текст] / Я.А. Рудзит . - Рига : Зинатне, 1975. - 357 С. : ил.

15. Гаевик, Д. Т. Подшипниковые опоры современных машин [Текст] / Д. Т. Гаевик. - М. : Машиностроение, 1985. - 247 С. : ил.

16. Castejon C, Lara O., Garcia-Prada J.C. Automated diagnosis of rolling bearings using MRA and neural networks [Текст] // Mechanical systems and Signal Processing-2010.-N24.-P.289- 299.

17. Явленский, А.К. Теория динамики и диагностики систем трения качения [Текст]/ А.К. Явленский, К.Н. Явленский. - Ленинград: Изд. ЛГУ, 1978. –184 С.

18. Гришкевич, А. И. Автомобили: Теория [Текст] / А. И. Гришкевич. – Мн.: Выш. шк., 1986. – 208 С.

19. Ротенберг Р. В. Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода [Текст] / Р. В. Ротенберг. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 С.

20. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х кн. [Текст] / Под ред. В.В. Ключева. - Кн. 1. - М.: Машиностроение, - 1976. – 412 С.

21. Н. Prashad, The effect of cage and roller slip on the measured defect frequency response of rolling-element bearings - ASLE transactions, 1987
22. Н. Prashad, Diagnosis of rolling-element bearings failure by localized electrical current between track surfaces of races and rolling-elements - Journal of tribology, 2002
23. Подшипники качения: справочник-каталог [Текст] / под ред. В.Н. Нарышкина и Р. В. Коросташевского. - М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.
24. Рагульскис К.М., Юркаускас А.Ю Вибрация подшипников / Под ред. К.М. Рагульскиса — Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1985. —119 с., ил. — (Библиотека инженера. Вибрационная техника; Вып. 4)
25. Корндорф С.Ф., Подмастерьев К.В. О возможности дефектации неразборных подшипников качения электрически методом [Текст] // Дефектоскопия. —1985. — 5. — С. 88—90.
26. Гришкевич А. И. Автомобили. Конструкция, конструирование и расчет. Системы управления и ходовая часть [Текст] / А. И. Гришкевич, Д. М. Ломако, В. П. Автушко и др.; под ред. А. И. Гришкевича. – Мн.: Выш. шк., 1987.– 200 с.
27. Подмастерьев К.В. Выбор критерия комплексной оценки качества опор качения // Новое в теории точности и качества машин и приборов. /Институт проблем машиноведения РАН, Вып. 6. - Препринт 132. — С. Петербург. — 1996 — С.32-28.
28. Демкин Н.Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология [Текст] // Трение и износ. - 1995., Т. 16, - № 6, - С. 1003—1024.
29. Мышкин Н.К., Свириденко А.И., Кончиц В.В. Контакт шероховатых тел и его проводимость [Текст] // Трение и износ. 1983., Т. 4, № 5, С. 845—854.
30. Хазаров, А.М. Диагностирование легковых автомобилей на станциях технического обслуживания [Текст]: учеб.пособие для вузов / А.М. Хазаров,

- А.М. Кривенко Е.И.- М.: Высшая школа, 2007. - 146 с.
31. Кончиц, В.В. Триботехника электрических контактов / В.В. Кончиц, В.В. Мешков, Н.К. Мышкин - Минск: Наука и техника, - 1986. - 260 с.
32. Матвейкин, В.Г. Информационные системы интеллектуального анализа [Электронный ресурс] / В.Г. Матвейкин, Б.С. Дмитриевский, Н.Р. Ляпин. Научное издание. – М.: Машиностроение, 2008. – 92 с. – Режим доступа: <http://www.tstu.ru/education/elib/pdf/2008/lapin-a.pdf>
33. Мышкин Н.К. Электрические контакты / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный: ИД «Интеллект». – 2008. – 280 с.
34. Дёмкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Дёмкин, Э.В. Рыжов - М.: Машиностроение, - 1981. – 244 с.
35. Кузнецов, Е.С. Управление технической эксплуатацией автомобилей. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
36. Майоров, М.В. Исследование особенностей диагностирования ступичного подшипника автомобиля [Текст] / М.В. Майоров, В.В. Мишин, А.В. Селихов, Е.Б. Андросова// «Мир транспорта и технологических машин» — Орёл: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет — УНПК». — 2013. — № 4(42) — С. 9-16.
37. Дунин-Барковский, И.В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. - М.: Машиностроение, 1978. - 232 с.: ил.
38. Лоповок, Т.С. Волнистость поверхности и ее применение. М.: Изд. стандартов, 1973.- 184 с.
39. 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. — № 3(41) — С. 9-16.
40. Техническая эксплуатация автомобилей: Учебник для вузов / Е.С. Кузнецов, В.П. Воронов, А.П. Болдин и др.; Под ред. Е.С. Кузнецова. – 3-

е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1991. – 413 с.

41. Галахов, М.А. Расчет подшипниковых узлов [Текст] / М.А. Галахов, А.Н. Бурмистров. — М.: Машиностроение, 1988. — 272 с.
42. Перель, Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник: - М.: Машиностроение, 1983. - 543 с.: ил.
43. T. Denton Advanced Automotive Fault Diagnosis, 2nd Ed. BA, MSAE, MITRE, Open University, 2006
44. Чернышов, В.Н. Экспериментальное исследование сигнала активного сопротивления подшипника в режиме сухого трения [Текст] / В.Н. Чернышов, В.В. Мишин, М.В. Майоров, // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» — ФГБОУ ВПО «Государственный университет — УНПК». — 2013.— № 1. — С. 145-151.
45. 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
46. 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 техно-логии. – 2011. –№2/3 (286). – с. 145-150
47. 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 Орел-ГТУ №2-4/274(560), 2009 – с.
48. Котов А., Красильников Н. Кластеризация данных [Текст]: А. Котов. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 2005. — 254 с.
49. J.Erjavec Automotive Technology. A Systems Approach. 2010
50. Руденко О.Г., Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети

[Текст]: О. Руденко. - Харьков, 2005. - 407с.

51. Уоссермен, Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика [Текст]: Ф. Уоссермен. — М.: Мир, 1992. — 240 с.

52. Kohonen, T. Learning Vector Quantization, Neural Networks, 1 (suppl 1), 303.

53. Горбань А.Н. Обучение нейронных сетей [Текст]: А.Н. Горбань. - М.: СП "Параграф", 1990. - 159 с.

54. Кластеризатор на основе нейронной сети Кохонена [Электронный ресурс]. URL: <http://mechanoid.kiev.ua/neural-net-kohonen-clusterization.html> (дата обращения: 14.06.2014).

55. РД 37.001.010-83 (с попр. 2004) Выбор и расчет подшипников качения автомобилей

56. Денисов, А.С. Основы работоспособности технических систем / А. С. Денисов ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Саратов. гос. техн. ун-т. - Саратов : СГТУ, 2014. - 310, [1] с. : ил. ; 21 см. - Библиогр.: с. 299-308. Сервис и техническая эксплуатация транспортных и технологических машин и оборудования / В.А. Каргин, А.Л. Манаков, А.Д. Абрамов. Новосибирск, 2002. С.33.

57. В. Heissing, M. Ersoy Chassis Handbook, 2011

58. Reimpell, Stoll, Betzler - The Automotive Chassis (2nd Edition) 2011

59. Баранов А.В. Надежность и диагностика технологических систем. - Рыбинск: РГАТА, 2006. – 138 с.

60. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.

61. A. Bradly Quality control of chasis systems // Automotive testing technology international – 2012

62. Куминов А.С. Распределенные системы диагностирования и диагностические модели на нейронных сетях.- Хабаровск: Вычислительный центр ДВО РАН. - 2003.- 28 с.

63. Вибрации в технике: Справочник: В 6 т. / Ред. совет: В.Н. Челомей. М.: Машиностроение, 1981. Т. 5: Измерения и испытания / Под ред. М.Д. Генкина. 496 с.
64. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. М.: Мир, 1980. - 650 с.
65. Галушкин А.И. Перспективные проблемы теории нейронных сетей // Научная сессия МИФИ - 2001. III Всероссийская научно-техническая конференция "Нейроинформатика-2001": Сборник научных трудов. В 2-х частях. Ч.1. – М.: МИФИ, 2001. – 304 с.
66. Петрухин В.В., Петрухин С.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации: учеб. пособие. Москва: Инфа-Инженерия, 2010. 176 с.
67. Аринин И.Н. Диагностирование на автомобильном транспорте [Текст] / И.Н. Аринин. – М.: Высшая школа, 1985. – 80 с.
68. Мирошников, Л.В. Теоретические основы технической диагностики автомобилей [Текст] / Л.В. Мирошников. - М. : Высшая школа, 1976. - 128 с.
69. G.McNeil Artificial neural networks technology // Rome Laboratory RL/C3C Griffiss AFB, NY 13441-5700, 1992
70. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ Петербург, 2006. 704 с.
71. Говорущенко Н.Я. М. - Место и роль диагностики в условиях новой концепции ее развития. - М., 1991. - 52 с.
72. ИСО 8402-94 Управление качеством и обеспечение качества – Словарь [Текст]. Введен 01.04.1994. – М. Госстандарт России. – 16 с.
73. ИСО 9000:2010 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь [Текст]. Введен 15.08.2001. – М.: Госстандарт России. – 16 с.
74. ГОСТ 520—2002 Подшипники качения. Общие технические условия

- [Текст]. Введен 19.06.2002. – М.: Госстандарт России. – 21 с.
75. ГОСТ 4252-75 Подшипники шариковые радиально-упорные двухрядные. Основные размеры [Текст]. Введен 21.11.1975. – М.: Госстандарт России. – 38 с.
76. ГОСТ Р 52545.1-2006 (ИСО 15242-1:2004) Подшипники качения. Методы измерения вибрации. Основные положения [Текст]. Введен 12.06.2006. – М.: Госстандарт России. – 26 с.
77. В.Н. Костюков, А.П. Науменко. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования: Учеб. пособие. Омск: Издательство ОмГТУ, 2002. - с.108
78. Диментберг Ф. М., Колесников К. С. Вибрации в технике. Справочник. М.: Машиностроение, 1980, т. 3, 544 с.
79. Крючков Ю. С. Влияние зазора на вибрацию и шум подшипников качения. Вестник машиностроения, 1959, №8, с. 30-33.
80. ГОСТ ИСО 17359-2009 Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство по организации контроля состояния и диагностирования [Текст]. Введен 15.12.2009. – М.: Госстандарт России. – 20 с.
81. Барсегян А. А. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / Барсегян А. А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И. 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2007. - 382 с.
82. Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностирования и распознавания образов: монография / С.А. Субботин, Ан.А. Олейник, Е.А. Гофман, С.А. Зайцев, Ал.А. Олейник; под ред. С.А. Субботина. — Харьков: ООО «Компания Смит», 2012. — 317 с.
83. К. С. Gryllias, С. Yiakopoulos, I. Antoniadis Automated diagnostic approaches for defective rolling element using vibration pattern recognition// Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management,

Athens, Greece 28 - 30 September 2009

84. S.P. Harsha. Nonlinear dynamic analysis of rolling element bearings due to cage run-out and number of balls. *Journal of Sound and Vibration*, 289:360–381, 2006.
85. J. Sopenan and A. Mikola. Dynamic model of a deep-groove ball bearing including localized and distributed defects—part 2: implementation and results. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers K—Journal Multi-body Dynamics*, 217:213–223, 2003.
86. P.D. McFadden and J.D. Smith. The vibration produced by multiple point defect in a rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration*, 98:263–273, 1985
87. N. Tandon and A. Choudhury. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, 32:469–480, 1999
88. T. A., Harris. *Rolling bearing analysis*. John Wiley and Sons, 2001
89. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. Пермь: ПВФ «Вибро-Центр», 1996, 167 с.
90. IM Howard, NS Swansson. *Vibration and Noise-measurement Prediction and Control; Preprints of Papers. Demodulating High Frequency Resonance Signals for Bearing Fault Detection// Australian Vibration and Noise Conference 1990*, P 36 -42.
91. Буркинский, Б.В. Экономическая эффективность новой техники / Б.В. Буркинский, П.С. Мирошников, С.В. Золотарев. Киев: Наукова думка, 1987.
92. Коновова Г.А. Экономика автомобильного транспорта. - М.: Академия, 2005.

Приложение А. Расчет осевых и радиальных реакций ступичного подшипника

1. Радиальные реакции от действия тяговых сил

$$\text{для левого ряда шариков} \quad R_{X1}^I = \frac{0,5 \cdot L_R + l_S - \Delta y_T \cdot \cos \varphi}{L_R} \cdot P_X^{eq},$$

где l_S – расстояние от центра колеса до центра подшипника, мм ($l_S > 0$, если подшипник смещен вправо – внутрь автомобиля)

$$\text{для правого ряда шариков} \quad R_{X1}^{II} = P_X^{eq} - R_{X1}^I$$

2. Радиальные реакции от действия стабилизирующего момента шины

$$\text{для левого ряда шариков} \quad R_{X2}^I = -\frac{e_{CT}}{L_R} \cdot R_Y$$

$$\text{для правого ряда шариков} \quad R_{X2}^{II} = \frac{e_{CT}}{L_R} \cdot R_Y$$

3. Радиальные реакции от действия вертикальной силы

$$\text{для левого ряда шариков} \quad R_{Z1}^I = \frac{0,5 \cdot L_R - r_K \cdot \tan \varphi - \Delta y_T \cdot \cos \varphi + l_S}{L_R} \cdot R_Z \cdot \cos \varphi$$

$$\text{для правого ряда шариков} \quad R_{Z1}^{II} = R_Z \cdot \cos \varphi - R_{Z1}^I$$

4. Радиальные реакции от действия боковой силы

$$\text{для левого ряда шариков} \quad R_{Z2}^I = -\frac{0,5 \cdot L_R - r_K \cdot \tan \varphi - \Delta y_T \cdot \cos \varphi + l_S}{L_R} \cdot R_Y \cdot \sin \varphi$$

$$\text{для правого ряда шариков} \quad R_{Z2}^{II} = -R_Y \cdot \sin \varphi - R_{Z2}^I$$

5. Радиальные реакции от воздействия изгибающего момента

$$\text{для левого ряда шариков} \quad R_{Z3}^I = -\frac{r_K}{L_R \cdot \cos \varphi} \cdot R_Y$$

$$\text{для правого ряда шариков} \quad R_{Z3}^{II} = \frac{r_K}{L_R \cdot \cos \varphi} \cdot R_Y$$

6. Суммарные радиальные реакции подшипника

$$\text{для левого ряда шариков} \quad R_R^I = \sqrt{(R_{X1}^I + R_{X2}^I)^2 + (R_{Z1}^I + R_{Z2}^I + R_{Z3}^I)^2}$$

$$\text{для правого ряда шариков} \quad R_R^{II} = \sqrt{(R_{X1}^{II} + R_{X2}^{II})^2 + (R_{Z1}^{II} + R_{Z2}^{II} + R_{Z3}^{II})^2}$$

Осевые составляющие для реализации радиальных реакций определяются по формулам:

$$\text{для левого ряда шариков} \quad S_R^I = -e \cdot R_R^I,$$

$$\text{для правого ряда шариков} \quad S_R^{II} = e \cdot R_R^{II},$$

где e – коэффициент осевого нагружения. Для радиально-упорных шарикоподшипников с углом контакта $\alpha=12^\circ$ и $\alpha=15^\circ$ значение коэффициента e рассчитывается по формулам:

$$\text{при } \alpha=12^\circ \quad \log_{10} e = [\log_{10}(R_R / C_0) - 1,44] / 4,729$$

$$\text{при } \alpha=15^\circ \quad \log_{10} e = [\log_{10}(R_R / C_0) - 1,766] / 7,363$$

Осевые реакции подшипника вычисляются по следующим формулам:

- для боковой силы, направленной вправо:

$$\text{при } |S_R^I| \leq S_R^II + R_Y \quad R_A^I = -S_R^II - R_Y, \quad R_A^II = S_R^II$$

$$\text{при } |S_R^I| > S_R^II + R_Y \quad R_A^I = S_R^I, \quad R_A^II = -S_R^I - R_Y$$

- для боковой силы, направленной влево:

$$\text{при } S_R^II \leq |S_R^I + R_Y| \quad R_A^I = S_R^I, \quad R_A^II = -S_R^I - R_Y$$

$$\text{при } S_R^II > |S_R^I + R_Y| \quad R_A^I = -S_R^II - R_Y, \quad R_A^II = S_R^II$$

Суммарные эквивалентные динамические нагрузки на подшипник рассчитываются с учетом распределения общего пробега автомобиля:

- Прямолинейное движение с боковой силой вправо – 45%;
- Прямолинейное движение с боковой силой влево – 45%;
- Движение с правым поворотом – 5%;
- Движение с левым поворотом – 5%;

Используется следующая формула:

$$R_{\Sigma}^{eqI(II)} = \sqrt[3]{\frac{45 \cdot (R_{SR}^{eqI(II)})^3 + 45 \cdot (R_{SL}^{eqI(II)})^3 + 5 \cdot (R_L^{eqI(II)})^3 + 5 \cdot (R_R^{eqI(II)})^3}{100}}$$

где

- $R_{SR}^{eqI(II)}$ - эквивалентная динамическая нагрузка на левый (правый) ряд подшипника при прямолинейном движении и боковой силой, направленной вправо;
- $R_{SL}^{eqI(II)}$ - эквивалентная динамическая нагрузка на левый (правый) ряд подшипника при прямолинейном движении и боковой силой, направленной влево;
- $R_L^{eqI(II)}$ - эквивалентная динамическая нагрузка на левый (правый) ряд подшипника при повороте налево;
- $R_R^{eqI(II)}$ - эквивалентная динамическая нагрузка на левый (правый) ряд подшипника при повороте направо.

Приложение Б. Экспериментальные данные.

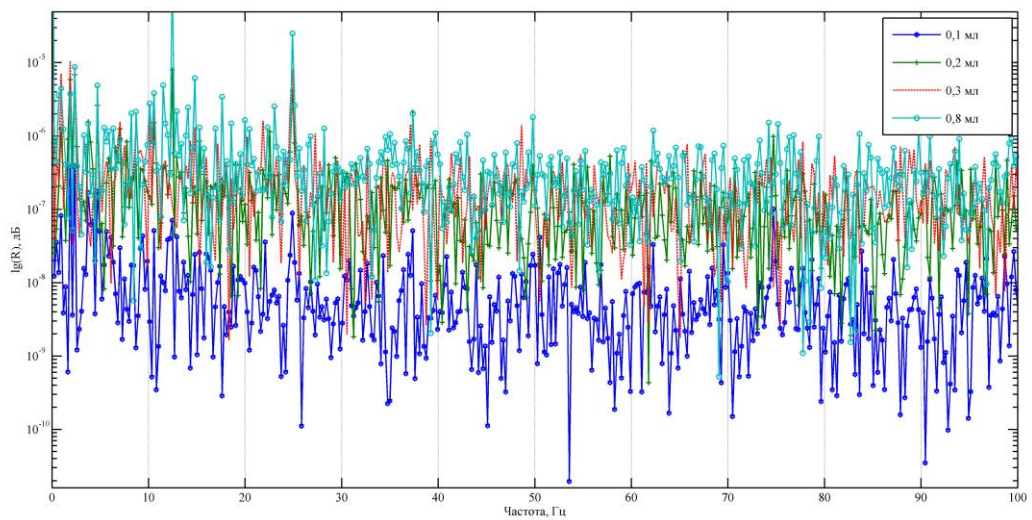
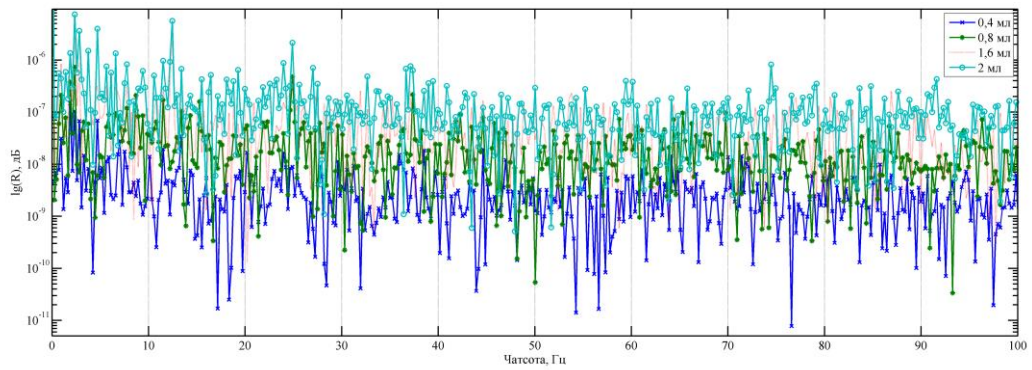
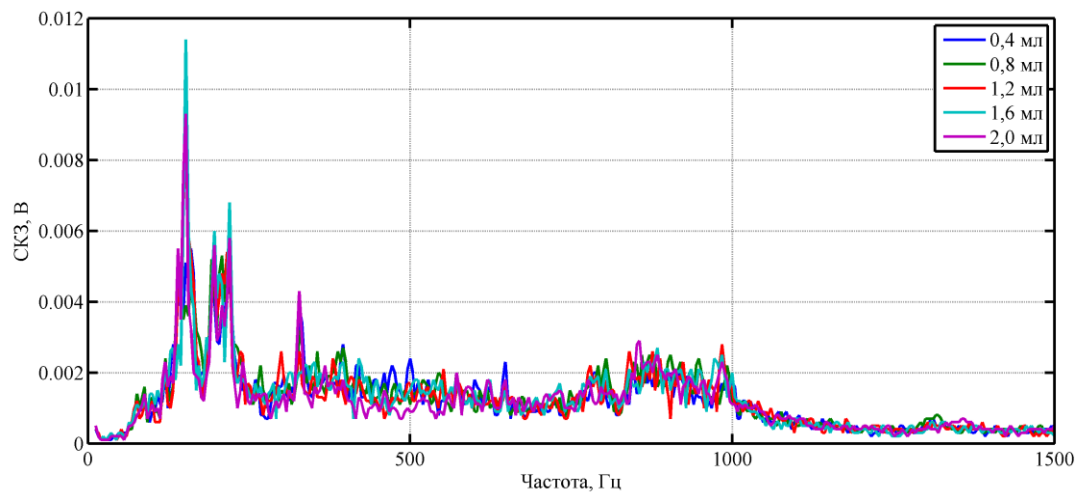


Рисунок Б.1 - Канал сопротивления. Обобщенные данные.

**Приложение В. Виды дефектов ступичного подшипника при
экспериментальных исследованиях.**



Рисунок В.1 - Дефекты на кольцах.

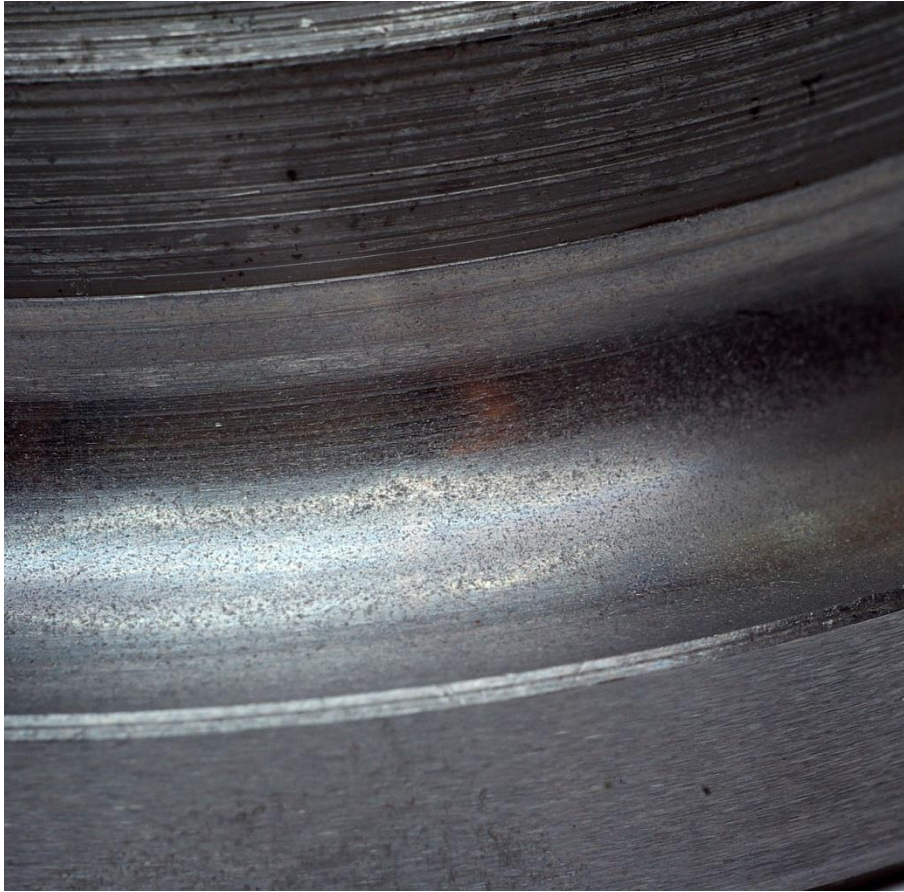


Рисунок В.2 - Дефекты при абразивном изнашивании

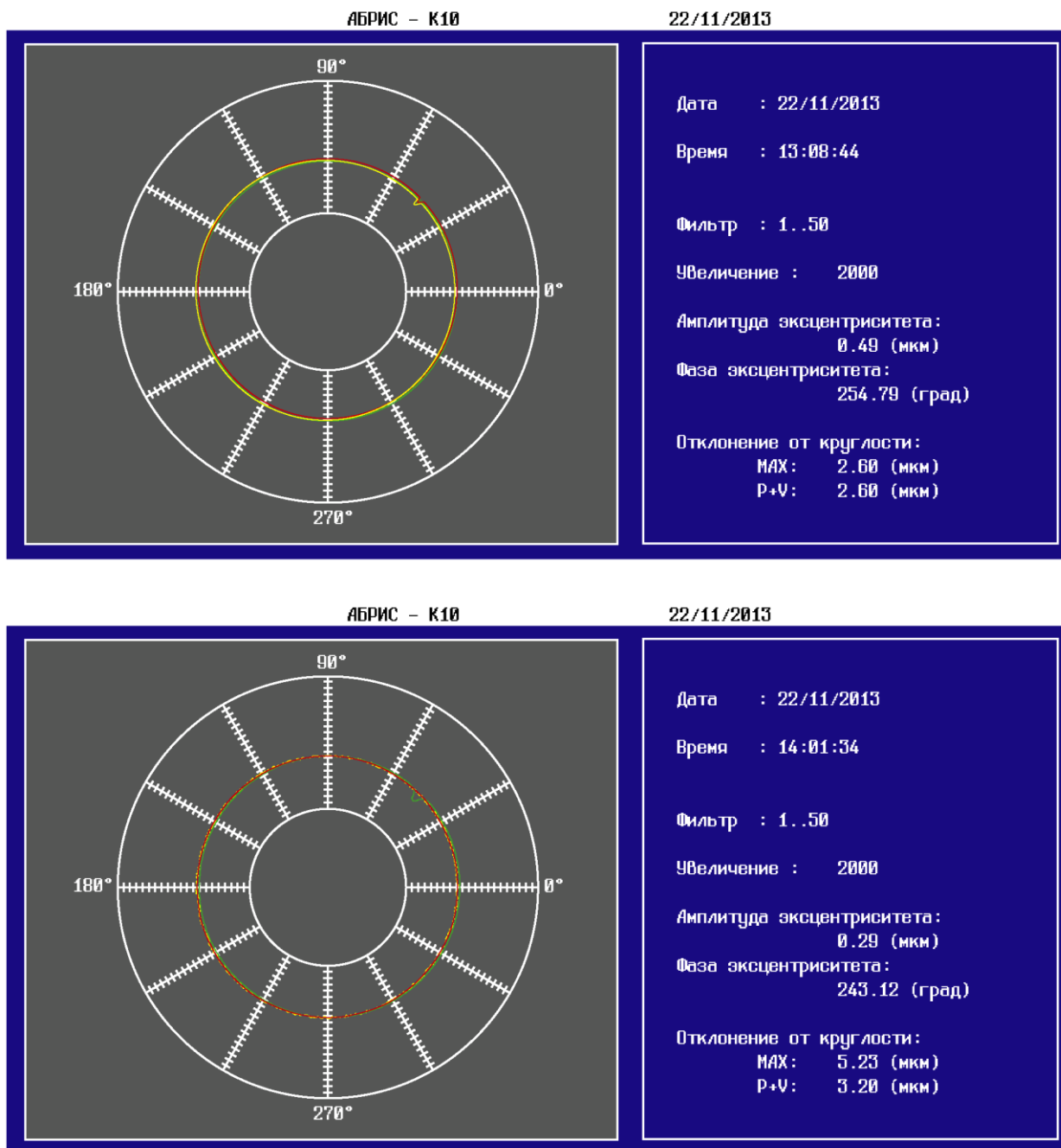


Рисунок В.3 - Круглограммы ступичных подшипников локальным дефектом



Рисунок В.4 - Круглограммы ступичных подшипников с волнистостью

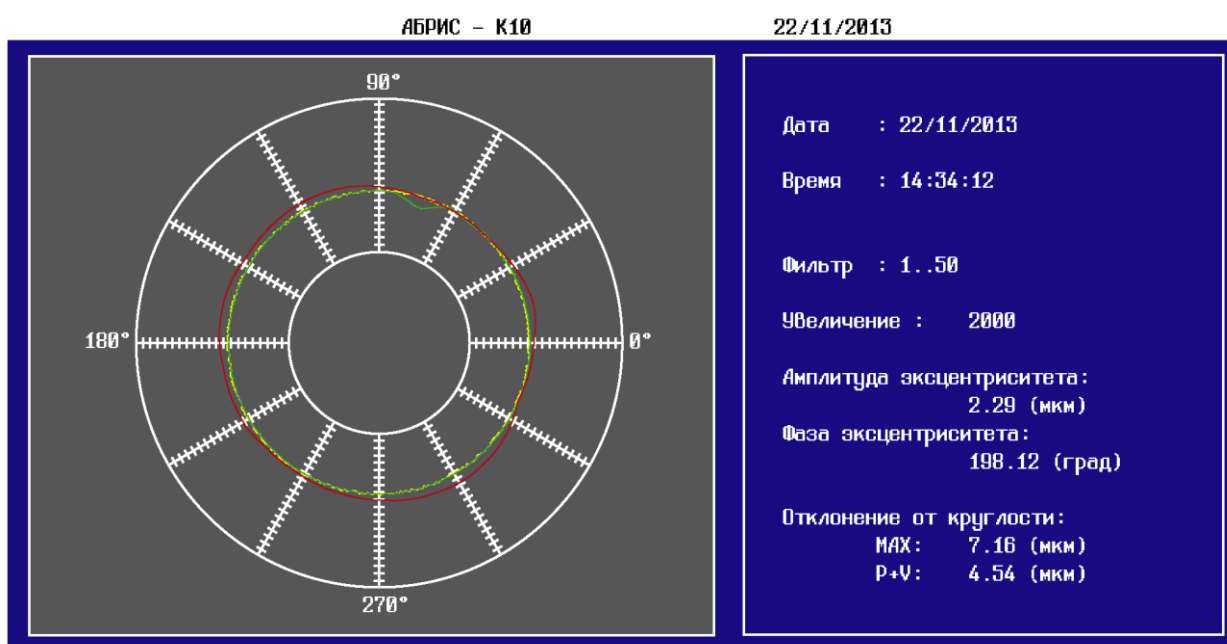


Рисунок В.5 - Круглограммы ступичных подшипников локальным дефектом

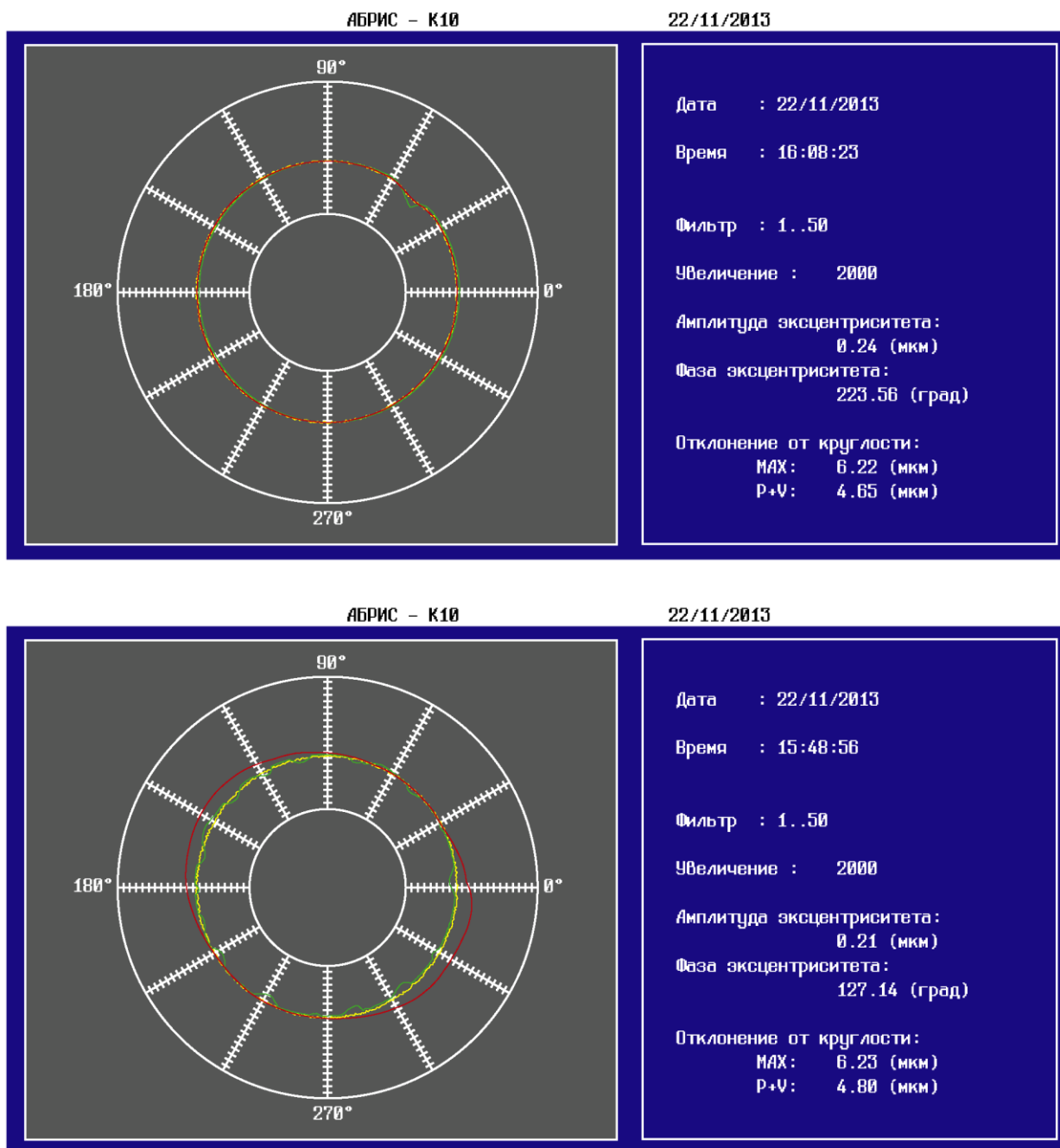


Рисунок В.6 - Круглограммы ступичных подшипников локальным дефектом

Приложение Г. Акты внедрения предложенного метода в производство

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по ИР
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»
Радченко С.Ю.

«__»

2015



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание»
Мавлюбердинов В.А.

«07» августа 2015 г.



Акт

внедрения результатов научно-исследовательской работы

В период с 3 08 2015 по 7 08 2015 научным сотрудником НОЦ «ДИАТРАНСПРИБОР», ассистентом кафедры «Сервис и ремонт машин» ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» Майоровым М.В. произведены научно-исследовательские работы по апробации и внедрению результатов исследований по диагностике ступичных подшипников автомобилей на производственной базе ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание». В ходе выполнения работ отмечено:

- метод и средство комплексного диагностирования ступичных подшипников автомобиля позволяют повысить эффективность ремонтных работ производственно-технологической базы ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание»;

- предложенные методики диагностирования ступичных подшипников, контроля процесса сборки ступичного узла могут быть адаптированы для использования на предприятиях автотранспорта;


- разработанные прототипы средств диагностирования ступичных подшипников в полной мере реализуют предлагаемые методы и методики, прошли опытно промышленную апробацию на производственной базе ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание» и, в случае их промышленного исполнения, могут быть рекомендованы к внедрению на предприятии.


Все виды работ по апробации и внедрению вышеуказанных методов, методик и средств диагностирования выполнены НОЦ

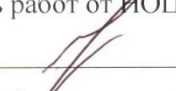
«ДИАТРАНСПРИБОР» ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК» и ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание» на безвозмездной основе и без финансовых расчетов.


Члены комиссии от
НОЦ «ДИАТРАНСПРИБОР»

Члены комиссии от
ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание»

Научный руководитель по напр.
«Транспортные системы и технологии»
Новиков А.Н. 

Научный руководитель по напр.
«Приборостроение и техническая диагностика»
Подмастерьев К.В. 

Руководитель работ от ИОЦ
Мишин В.В. 

Ответственный исполнитель
Майоров М.В. 

Генеральный директор
Мавлюбердинов В.А.



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по НР
ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК»

С. Ю. Радченко
« » 2013 г.

МП

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
МУП "Трамвайно-троллейбусное
предприятие"

А.Я. Коровин
« » 2013 г.

МП

Акт
об опытно-промышленной апробации результатов НИР

В период с 01.09.2013 по 4.10.2013 сотрудниками ФГБОУ ВПО «Государственный-УНПК», профессором кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», к.т.н. Мишиным В.В., аспирантами кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация» Селиховым А.В., Подмастерьевым А.К., научными сотрудниками кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация» Андросовой Е.Б., Майоровым М.В., Чернышовым В.Н. произведены научно-исследовательские работы по апробации и внедрению результатов исследований по диагностике трибообъектов на производственной базе МУП «Трамвайно-троллейбусное предприятие». В ходе выполнения работ отмечено:

- разработанные коллективом представителей кафедры «ТМиС» ФГБОУ ВПО «Государственный-УНПК» методы и средства комплексного и функционального диагностирования подшипников качения и подшипниковых узлов позволяют повысить эффективность ремонтных работ производственно-технологической базы МУП "Трамвайно-троллейбусное предприятие";

- предложенные методики входного контроля подшипников качения, контроля процесса сборки подшипникового узла, мониторинга процесса стендовой и функциональной приработки подшипников и узлов могут быть адаптированы для использования на предприятиях электротранспорта и, в частности, в ремонтных службах;

- разработанные коллективом ФГБОУ ВПО «Государственный-УНПК» макеты средств диагностирования подшипников качения и подшипниковых узлов в полной мере реализуют предлагаемые методы и методики, прошли опытно-промышленную апробацию на производственной базе МУП «Трамвайно-троллейбусное предприятие» и, в случае их промышленного исполнения, могут быть рекомендованы к внедрению на предприятии.

Все виды работ по апробации и внедрению вышеуказанных методов, методик и средств диагностирования выполнены ФГБОУ ВПО «Государственный-УНПК» и МУП "Трамвайно-троллейбусное предприятие" на безвозмездной основе и без финансовых расчетов.

Руководитель работ от
ФГБОУ ВПО «Государственный-УНПК»

В.В.Мишин

Исполнители:

Селихов А.В.

Андросова Е.Б.

Майоров М.В.

Подмастерьев А.К.

Чернышов В.Н.

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по НР
ФБГОУ ВПО «Орелский университет-УНПК»
Радченко С.Ю.
«_____» _____ 2015 г.



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание»
Мавлюбердинов В.А.
«07» августа 2015 г.



МЕТОДИКА

ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СТУПИЧНОГО ПОДШИПНИКА АВТОМОБИЛЯ ДЛЯ АВТОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

«СОГЛАСОВАНО»

Члены комиссии от
НОЦ «ДИАТРАНСПРИБОР»

Научный руководитель по напр.
«Транспортные системы и технологии»
Новиков А.Н.
Научный руководитель по напр.
«Приборостроение и техническая диагностика»
Подмастерьев К.В.
Руководитель работ от НОЦ
Мишин В.В.
Ответственный исполнитель
Майоров М.В.

Члены комиссии от
ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание»

Генеральный директор
Мавлюбердинов В.А.



Орел 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Состояние вопроса
2. Цель и задачи методики
3. Методика диагностирования ступичного подшипника с применением комплексного диагностического параметра
4. Заключение

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Разработка и внедрение новых методов, средств диагностирования автомобилей является важнейшей задачей на данном этапе развития автомобильной промышленности. Применение интеллектуальных средств диагностирования также является одной из приоритетных задач современной техники. Несмотря на высокую оснащенность оборудованием диагностических участков автотранспортных предприятий, затраты на контрольно-регулирующие работы, выполняемые вручную, довольно высоки.

Ступичный подшипник автомобиля является сложным объектом диагностирования, на который влияет большое число внешних факторов. Внутренние параметры процессов, происходящих в зоне трения подшипника, являются нелинейными и сложными для описания процессами.

Анализ показал, что диагностирование ступичных подшипников на автотранспортных предприятиях зачастую проводится с помощью органолептических методов диагностирования, что не дает объективной и количественной оценки состояния объекта контроля. В связи с чем, невозможно спрогнозировать состояние или определить наличие зарождающихся дефектов на элементах ступичного подшипника.

Руководящая документация ОСТ 37.001.700-2008, регламентирующая технические требования и методы испытаний ступичных подшипников колес автомобилей предполагает использование методов контроля, проводимых с разборкой узла, что влечет за собой увеличение материальных затрат.

На данном этапе развития известно большое количество инструментальных методов диагностирования подшипников и подшипниковых узлов, основывающихся на каких-либо диагностических параметрах и решающих конкретные задачи.

Однако ни один из них в отдельности не позволяет получить исчерпывающей информации об объекте контроля. Поэтому реализуют

комплексный подход диагностирования, который заключается в одновременном использовании методов, основанных на измерении диагностических признаков различной природы.

В данной методике предлагается, при проверке ступичных подшипников автомобиля, использовать неразрушающий метод на основе комплексного диагностического параметра, включающего информационную составляющую вибрационных и электрофлуктуационных процессов в зоне трения.

2. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ МЕТОДИКИ

Целью работы, на основе которой составлена данная методика, является увеличение достоверности диагностирования ступичного подшипника в процессе технического обслуживания автомобиля на автотранспортных предприятиях.

Задачи методики - регламентировать дополнительные способы и методы диагностирования ступичных подшипников автомобиля при проведении технического обслуживания автомобилей по методикам автотранспортных предприятий, в связи с невозможностью осуществления и определения ряда дефектов, предусмотренными общими методиками.

3. МЕТОДИКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СТУПИЧНОГО ПОДШИПНИКА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА

3.1. Перед диагностированием с применением комплексного диагностического параметра ступичный подшипник автомобиля подвергается диагностированию согласно общим методикам автотранспортных предприятий. При диагностировании применяют органолептические методы с использованием люфт-детекторов и вспомогательного контрольно-измерительного инструмента.

3.2. Перед операцией диагностирования автомобиль устанавливается на стенд с беговыми барабанами. По схеме на ступичный узел устанавливаются вибрационные датчики и токосъемники на соответствующие места, как показано на схеме для конкретного автомобиля.

3.3. Производится инициализация программного обеспечения диагностики с выбором конкретного автомобиля и уточнением используемых датчиков, режимов измерения.

3.4. Беговые барабаны приводятся во вращение с постоянной скоростью 100 оборотов в минуту, программное обеспечение переводится в режим сбора информации для последующего анализа.

3.5. Процесс сбора данных 10 секунд при постоянной скорости вращения беговых барабанов.

3.6. После сбора данных программное обеспечение переводится в режим анализа данных с применением классификатора на основе искусственной нейронной сети, заранее обученной для конкретного типа ступичного подшипника.

3.7. Программное обеспечение делает вывод о состоянии ступичного подшипника и предлагает рекомендации по дальнейшему обслуживанию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Указанная методика составлена на основании результатов научно-исследовательской работы, проведенной в рамках НОЦ «ДИАТРАНСПРИБОР».

При выполнении этой научно-исследовательской темы были разработаны устройство и программное обеспечение для диагностирования ступичного подшипника автомобиля, с применением комплексного диагностического параметра.

Приложение Д. Патенты

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

Статус: по данным на 28.09.2015 - может прекратить свое действие

(19) RU⁽¹¹⁾133298⁽¹³⁾ U1(51) МПК
G01M13/04 (2006.01)

(21), (22) Заявка: 2013118870/28, 23.04.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.04.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.04.2013

(45) Опубликовано: 10.10.2013

Адрес для переписки:

302020, Орловская обл., г. Орел, Наугорское ш., 29,
ФГБОУ ВПО "Госунiversитет - УНПК"

(72) Автор(ы):

Майоров Максим Валерьевич (RU),
Мишин Владислав Владимирович (RU),
Селихов Алексей Владимирович (RU),
Рыбакова Наталья Владимировна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Государственный университет - учебно-
научно-производственный комплекс"
(ФГБОУ ВПО "Госунiversитет - УНПК") (RU)(54) УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ ПОДШИПНИКА
КАЧЕНИЯ

Формула полезной модели

Устройство измерения сопротивления трисопряжения подшипника качения, содержащее два токосъемника, источник электрической энергии, дифференциальный усилитель, нормирующий усилитель и блок измерения диагностического параметра, состоящего из последовательно соединенных устройства выборки-хранения, аналого-цифрового преобразователя, дешифратора и цифрового отсчетного устройства, где источник электрической энергии и дифференциальный усилитель подключены к токосъемникам, в свою очередь, имеющим электрическое соединение с внутренним и внешним кольцами подшипника, выход дифференциального усилителя подключен к входу нормирующего усилителя, выход которого соединен с блоком измерения диагностического параметра, отличающееся тем, что источник электрической энергии состоит из последовательно соединенных коммутирующего устройства и источников стабильного тока, используется нормирующий усилитель с переменным коэффициентом усиления, а также снабжено устройством управления, соединенного с выходом аналого-цифрового преобразователя, с входом управления коммутирующего устройства и входом управления коэффициентом усиления нормирующего усилителя.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

Статус: по данным на 28.09.2015 - может прекратить свое действие

(19) RU⁽¹¹⁾ 133299⁽¹³⁾ U1

(51) МПК
G01M13/04 (2006.01)
G01M17/04 (2006.01)

(21), (22) Заявка: 2013118864/11, 23.04.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.04.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.04.2013

(45) Опубликовано: [10.10.2013](#)

Адрес для переписки:

302020, г. Орел, Наугорское ш., 29, ФГБОУ ВПО
"Госунiversитет - УНПК"

(72) Автор(ы):

Майоров Максим Валерьевич (RU),
Чернышов Виктор Николаевич (RU),
Мишин Владислав Владимирович (RU),
Рыбакова Наталья Владимировна (RU)

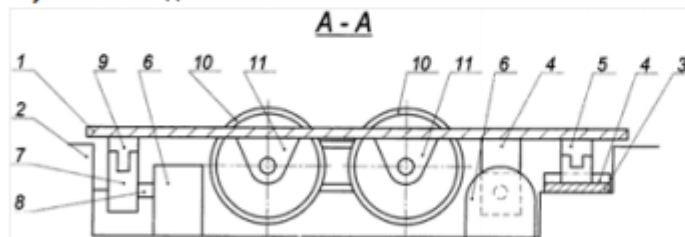
(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Государственный университет - учебно-
научно-производственный комплекс"
(ФГБОУ ВПО "Госунiversитет - УНПК") (RU)

(54) СТЕНД ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ИСПЫТАНИЯ СТУПИЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Формула полезной модели

Стенд для диагностики и испытания ступичных подшипников, содержащий 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, отличающийся тем, что конструкция подвижного стола содержит опорно-беговые барабаны с электроприводом для установки исследуемой оси транспортного средства и электронный диагностический блок, анализирующий информацию, поступающую с датчиков канала измерения вибрации и электрических параметров трибосопряжения диагностируемого ступичного подшипника.



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**133300** (13) **U1**(51) МПК
G01M13/04 (2006.01)
G01M17/04 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ(12) **ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ**

Статус: по данным на 28.09.2015 - может прекратить свое действие

(21), (22) Заявка: **2013118873/11**, **23.04.2013**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.04.2013

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **23.04.2013**

(45) Опубликовано: [10.10.2013](#)

Адрес для переписки:
**302020, г. Орел, Наугорское ш., 29, ФГБОУ ВПО
"Госуниверситет - УНПК"**

(72) Автор(ы):
**Майоров Максим Валерьевич (RU),
Чернышов Виктор Николаевич (RU),
Мишин Владислав Владимирович (RU),
Подмастерьев Константин Валентинович
(RU),
Рыбакова Наталья Владимировна (RU),
Крутикова Валентина Юрьевна (RU)**

(73) Патентообладатель(и):
**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Государственный университет - учебно-
научно-производственный комплекс"
(ФГБОУ ВПО "Госуниверситет - УНПК") (RU)**

(54) **УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ СТУПИЧНОГО ПОДШИПНИКА**

Формула полезной модели

Устройство диагностики состояния ступичного подшипника, содержащее канал измерения электрического диагностического параметра, подключающийся к внутреннему кольцу ступичного подшипника через токосъемники, подключающиеся к преобразователю сопротивление-напряжение, и канал измерения вибрационного диагностического параметра, включающий в себя последовательно соединенные вибропреобразователь и блок преобразования вибрационного сигнала, отличающееся тем, что диагностическое решение о состоянии подшипника определяется блоком, который собирает и подготавливает диагностическую информацию, которую передает на заранее обученную искусственную нейронную сеть, используемую для принятия решения о техническом состоянии ступичного подшипника.