

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента д.т.н., профессора Шкатова П.П. на диссертационную работу Андросовой Елены Борисовны «Метод контроля шариковых подшипников с учётом виброударного режима» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

*На отзыв представлена диссертационная работа и автореферат. Диссертационная работа изложена на 165 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка и 18 таблиц. Состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников, включающего 204 наименований, и 6 приложений.*

### **1. Актуальность темы диссертации**

Подшипники качения во многом определяют эксплуатационные показатели машин, механизмов и приборных систем. Расчетный срок службы подшипников, как правило, в два - три раза превышает ресурс самих механизмов, в которых они установлены. Основные причины выхода подшипников из строя: высокие нагрузки, неэффективные уплотнения, чрезмерный натяг в посадке и, обусловленный этим, слишком малый зазор, естественная усталость, неудовлетворительное смазывание. Но, анализируя факторы, приводящие к выходу из строя подшипников качения, соискатель выделяет и относит к основным причинам так же и возникновение ударных взаимодействий элементов подшипника, которые ранее считались побочным эффектом.

Различные технологические погрешности изготовления деталей подшипников и сборки их в узел (монтажные перекосы, деформации колец, отклонения от правильной геометрической формы и расположения посадочных поверхностей и т.п.) приводит к перераспределению нагрузки между телами качения, к вибрациям, к ухудшению условий формирования смазочных пленок в зонах трения и, как следствие, к возникновению ударных взаимодействий между деталями подшипника, которые создают характерные шумы. Многочисленные удары с высокой частотой приводят к появлению виброударного режима в подшипнике качения. Работа подшипника происходит в определенных, заранее рассчитанных условиях, а их изменение может привести к преждевременному выходу подшипника из строя. В первую очередь это относится к изменению нагрузки. А именно, возникновение виброударного режима нарушает планируемые законы движения подшипника и увеличивает динамические нагрузки.

Для обеспечения требуемых эксплуатационных показателей, в частности надежности, изготавливаемых или ремонтируемых изделий осуществляют контроль состояния опор качения, исходную информацию для которого дает диагностирование. В процессе изготовления и ремонта машин и механизмов необходимо осуществлять функциональное диагностирование подшипника непосредственно в узле, позволяющее определить реальное состояние подшипника, а конкретно – своевременное выявление возникновения виброударного режима.

Автор предлагает метод объективного контроля технического состояния подшипника качения, позволяющий в дополнение к известным методам получать информацию о виброударных процессах непосредственно по состоянию динамически меняющегося смазочного слоя, что весьма актуально для развития методов и средств диагностирования подшипников и подшипниковых узлов..

## **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

1. В диссертационной работе соискатель показал возможность возникновения виброударного режима в подшипниках качения. Обоснованием этого являются теоретические исследования состояния вопроса. Автором были проанализированы научные публикации, как отечественных, так и зарубежных ученых, монографии, учебная литература и выявлено, что процессы соударения элементов в подшипнике качения – общепризнанный факт и являются побочным эффектом, вызванным рядом факторов, основными из которых являются отклонением форм деталей подшипника от идеальных, кавитация, повреждение смазочного слоя. Для описания виброударного режима и его моделирования соискатель использует классическую теорию удара и волновую теорию, а также базируется на элементах теории виброударных систем. Основной характеристикой удара был принят коэффициент восстановления, характеризующий твёрдость материала, который много ранее был определён экспериментально для различных материалов.

2. Путем систематизации данных литературных источников соискателем приведена классификация известных методов контроля подшипников качения. Из анализа существующих методов соискателем установлено, что диагностирование подшипников качения может осуществляться по различным параметрам, при этом наиболее распространенными и широко применяемыми методами являются электрические, заключающиеся в том, что кольца подшипника являются элементами электрической цепи и процессы, происходящие в подшипнике, меняют значения электрических параметров подшипника, которые являются диагностическими. За основу разработанного метода диагностирования подшипников качения для выявления наличия виброударного режима автор принимает электрорезистивный метод контроля, обосновывая это тем, что электрорезистивные методы по отношению к другим просты в реализации, безопасны в применении, имеют низкий уровень помех, практически безынерционны, быстродействующие, довольно чувствительны и позволяют наиболее просто получить информацию из зон трения.

3. На основе проведённых подробных теоретических исследований соискатель формулирует гипотезу о процессах, происходящих в подшипниках качения, и устанавливает между ними связи, иллюстрируя это графическими и математическими моделями. Согласно эпюре распределения нагрузки в подшипнике качения, автор определяет границы зоны нагружения, в которой возможно возникновение виброударного режима. Обосновываясь на подтверждённых данных из области трибологии, автор доказывает наличие процесса проскальзывания при попадании тела качения подшипника в зону нагружения, что является обоснованным. Также автором разработана и исследована усовершенствованная математическая модель, функционально связывающая электрическое сопротивление подшипника качения с наличием в нём ударных взаимодействий, которые появляются в сигналах

ле электрического сопротивления в виде кратковременных импульсов. Важным результатом диссертационной работы является разделение автором электрических импульсов на импульсы проскальзывания и ударные импульсы, что обосновано проведенными расчётами их длительности. Автором установлено, что ударные импульсы на несколько порядков короче импульсов проскальзывания, что также подтверждено теоретическими графиками зависимости времени импульсов проскальзывания от частоты вращения внутреннего кольца подшипника и радиальной нагрузки.

На основании проведенных с помощью математической модели теоретических исследований влияния параметров процессов, происходящих в подшипнике качения (кавитация, акустическая эмиссия), а также наличие виброударного режима на электрическое сопротивление подшипника осуществлен синтез ряда диагностических параметров, показана их эффективность при решении различных диагностических задач.

Результат диссертационной работы по разработке совокупности математических моделей считаю достаточно обоснованным.

4. Одна из важнейших задач, решаемых при разработке любого метода контроля, заключается в выборе или расчете информативных диагностируемых параметров, поэтому вопросу формирования набора диагностических признаков соискатель уделяет в работе большое внимание. Обосновав и определив электрическое сопротивление подшипника как носителя диагностической информации, а электрические импульсы с определенными характеристиками и частотой следования, как признак виброударного режима, вполне логично в качестве диагностических параметров автор выделяет характеристики импульса: длительность электрического импульса, уровень электрического сопротивления, т.е. амплитуда, скорость падения сопротивления, частота сигнала в импульсе, частота следования импульсов. Проанализировав труды как зарубежных, так и отечественных ученых, автором выявлено, что при наличии виброударного режима в зоне нагружения подшипника может реализоваться граничное трение или смешанное трение, что позволило с помощью математических расчётов оценить значения уровня сопротивления при виброударном режиме по известному параметру  $\lambda$ , характеризующего толщину смазочного слоя. Рассчитав значения основных характеристик электрического импульса, автор определяет и оценивает значения диагностического параметра – скорость падения сопротивления. Виброударный режим, как высокочастотный процесс, соискатель предлагает контролировать по частоте следования электрических импульсов с заданными параметрами, которая будет зависеть, как от кинематики подшипника, так и от наличия соударений элементов для различных серий и типоразмеров подшипников. Выбор этого параметра, как диагностического, соискатель обосновывает расчётами детерминированных частот, отражающих кинематику подшипника, и частот, отражающих процессы, происходящие в зоне нагружения подшипника, в частности виброударный режим. Также на основе расчётов автором смоделирован частотный спектр, в котором присутствуют высокочастотные составляющие, говорящие о наличии ударных процессов.

Выбор соискателем диагностических признаков считаю обоснованным.

5. На основании проведенных исследований соискатель разрабатывает алгоритм контроля виброударного режима в подшипниках качения, который в совокупности с предложенным набором диагностических параметров составляет метод диагностирования. Следует отметить, что разработанный алгоритм контроля шариковых подшипников с учётом виброударного режима, отличающийся использованием предложенного набора диагностических признаков и основанный на статистическом и спектральном анализе временной функции электрического сопротивления, является результатом, обладающим научной новизной. Описанный соискателем оригинальный способ выделения диагностической информации о подшипнике расширяет функциональные возможности электрорезистивного метода и повышает его достоверность.

Соискателем проведена апробация разработанной методики контроля виброударного режима в подшипниках качения на ЗАО «Счётприбор» г. Орла. Приведенные в диссертации акты апробации методики подтверждают работоспособность метода.

Для реализации предложенного алгоритма контроля подшипников качения с учётом виброударного режима разработано и запатентовано (патентом РФ на полезную модель № 130076) устройство контроля и испытаний подшипника.

6. Проведённые автором экспериментальные исследования зависимостей между параметрами ударов и виброударного режима, моделируемых специальными средствами в подшипнике и значениями диагностических параметров подтверждают правильность разработанных теоретических положений. Это подтверждается так же наличием множества экспериментов на реальных подшипниках. Обширная база экспериментальных сигналов и построенных на их основе частотных спектров, использованная автором для подтверждения адекватности математической модели и работоспособности разработанного метода, не вызывает сомнений.

### **3. Достоверность и новизна**

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- получены теоретические зависимости, характеризующие влияние параметров виброударного режима, микропроцессов акустической эмиссии и кавитации, характеристик микротопологии поверхностей трибосопряжений на параметры функции электрического сопротивления подшипника качения;

- разработан метод диагностирования, основанный на физическом принципе получения электрической диагностической информации из зоны трения с помощью синтезированных диагностических параметров;

- разработан оригинальный алгоритм обработки сигнала электрического сопротивления, полученного из зон трения работающего подшипника качения, основанный на статистическом и спектральном анализе временной функции электрического сопротивления, позволяющий установить факт возникновения виброударного режима по флуктуациям функции электрического сопротивления подшипника.

Достоверность проведенных исследований подтверждается корректным выбором методов исследования. Представленные в работе теоретические исследова-



ния базируются на положениях теорий: механических ударов; контактирования шероховатых поверхностей; контактной гидродинамики; упругости; электрической проводимости. Теоретические результаты получены с помощью методов математического анализа, аналитических и численных методов решения систем уравнений. При обработке экспериментальных данных использовались методы спектрального анализа.

Экспериментальные исследования проведены на оригинальных установках с использованием современной измерительной аппаратуры, включающей ряд серийно выпускаемых приборов.

Также новизна результатов исследований подтверждается публикациями в изданиях, рекомендованных ВАК, результаты работы были доложены на научно-технических конференциях и семинарах, получен патент РФ на полезную модель.

Достоверность основных положений также подтверждается результатами опытно-промышленной проверки и внедрения методик на ряде предприятий (ОАО «ГМС Насосы» (г. Ливны), МУП «Трамвайно-троллейбусное предприятие» и ЗАО «Счётприбор» (г. Орёл)).

#### **4. Замечания**

В качестве замечаний по работе следует отметить следующее.

1. Во время работы подшипника в зоне трения возникает термо- и трибо-ЭДС. Как осуществлён учёт влияния этих ЭДС на результаты измерения функции электрического сопротивления? Из текста диссертации этого не видно.

2. Из материалов автореферата и диссертации не ясно для каких видов и типоразмеров подшипников применимы совокупность математических моделей процессов в зоне трения и обобщённая модель сопротивления подшипника, заложенные в основу метода, который предполагает общий подход к диагностированию для всех подшипников качения.

3. В тексте диссертации встречаются стилистические ошибки, неточности и опечатки.

#### **5. Заключение о соответствии диссертации требованиям ВАК**

Диссертационная работа Андросовой Е.Б. на тему «Метод контроля шариковых подшипников с учётом виброударного режима» посвящена решению актуальной научно-технической проблемы.

Выполненные автором исследования, основанные на математическом моделировании сигналов электрического сопротивления подшипников качения при различном сочетании факторов, определяющих возникновение виброударного режима, позволившие по результатам теоретических и экспериментальных исследований создать метод контроля шариковых подшипников с учётом виброударного режима, вносят важный вклад в теорию и практику диагностирования трибо-объектов.

Представленная диссертационная работа является завершённым научно-квалификационным трудом, включающим все необходимые этапы научного исследования. В работе приведены научные результаты, позволяющие их квалифицировать как научно-обоснованные решения. Полученные автором результаты

достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Отмеченные выше замечания по работе не являются принципиальными и не противоречат общей положительной оценке работы.

Текст диссертации написан общепринятым научным языком, содержание автореферата отражает текст диссертации.

Содержание и научные результаты работы соответствуют специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

Диссертационная работа является научно-квалификационной работой, содержащей новое решение важной научно-технической проблемы и предлагающей научно обоснованные технические решения в области диагностирования подшипниковых узлов промышленных предприятий машиностроительной отрасли для обеспечения качества и безопасности производства продукции, и соответствует критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней применительно к диссертациям на соискание степени кандидата наук, а ее автор, Андросова Елена Борисовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Материаловедение и технологии материалов и покрытий»  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет  
приборостроения и информатики»

« 3 » декабря 2014 г.

П.Н. Шкатов

Подпись Шкатова П.Н. заверяю  
Проректор по УР, д.т.н., профессор

В.В. Слепцов

« 3 » декабря 2014 г.



Шкатов Пётр Николаевич  
107996, г. Москва, МГУПИ, ул. Стромьнка, д.20.  
Тел. 8 (499) 268-00-01, e-mail: petr\_shkatov@mail.ru