

# МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ, КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ

---

УДК 620.179.118.7 : 621.822.6

## ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ПРИРАБОТКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

*Подмастерьев К.В., Подмастерьев А.К.*

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс  
г. Орел, Российская Федерация  
e-mail: asms-orel@mail.ru

*Обоснована возможность мониторинга процессов приработки подшипников качения с использованием электрорезистивного метода контроля. Описана сущность метода, проанализированы его особенности, обеспечивающие возможность получения объективной информации о состоянии объекта при его приработке. Приведены результаты экспериментальных исследований эффективности различных диагностических параметров, подтверждающие возможность реализации объективного контроля приработки подшипников электрорезистивным методом.*

**Ключевые слова:** электрорезистивный контроль, приработка, подшипник качения.

### Введение

Подшипники качения являются наиболее распространенными узлами механических систем, обеспечивающими точное расположение и взаимное перемещение отдельных деталей в широком диапазоне скоростей и нагрузок. При этом отказ подшипника нередко приводит к аварийным отказам сложных и ответственных изделий с риском для жизни обслуживающего персонала и большими экономическими потерями. В этой связи достижение требуемых эксплуатационных характеристик установленного в изделии подшипника является необходимым условием обеспечения качества машин и механизмов.

Фактическое состояние подшипника в изделии определяется большим числом различных факторов, при этом существенное влияние на это состояние оказывает начальный период эксплуатации – период приработки. При приработке происходят сложные процессы, приводящие к изменению шероховатости и физико-

химических свойств рабочих поверхностей деталей, к перераспределению по поверхностям смазочного материала и изменению его свойств, что проявляется в смятии наиболее высоких неровностей, изменении динамики образования гидродинамических и граничных смазочных слоев, эффективно разделяющих контактирующие поверхности и препятствующие их износу. Таким образом, процесс приработки во многом формирует будущую работоспособность подшипника и, соответственно, всего узла и изделия в целом.

Приработку стремятся завершить до ввода изделия в эксплуатацию, выполняя операции технологической обкатки, прикатки, тренировки и др. Их проводят обычно многоступенчато при последовательном изменении режимов, в частности частоты вращения и (или) нагрузки. При этом изменение режима работы объекта целесообразно осуществлять при стабилизации состояния объекта на предыдущем режиме. Для управления указанными операциями и обеспечения их эффективности необхо-

дим мониторинг фактического состояния объекта в процессе его приработки, а для этого необходимы методы, обеспечивающие получение достоверной информации о процессах, происходящих в подшипнике при приработке.

Анализ состояния вопроса показал, что в настоящее время для этой цели используются, прежде всего, тепловые методы, основанные на оценке температуры подшипников, в отдельных случаях применяют механические (по моменту трения в опоре) и вибрационные методы, а иногда одновременно несколько методов [1–3]. Однако в первом случае методы являются очень инерционными, при этом измеряют обычно не температуру в зонах трения подшипника, до которых добраться не просто, а температуру наружного кольца или даже корпуса узла. Методы второй группы имеют невысокую чувствительность к изменению состояния подшипника при приработке. Поиску более эффективного метода контроля процесса приработки в подшипниках, лишённого указанных недостатков и способного заменить или дополнить существующие методы, посвящена настоящая работа.

### Обоснование физического принципа и описание сущности метода контроля

Известно большое количество различных методов контроля технического состояния трибосопряжений, в частности, подшипников качения, основанных на различных физических принципах, и все эти методы интенсивно разрабатываются [4] (на рисунке 1 в качестве иллюстрации приведены результаты патентного поиска по проблеме). Это обусловлено тем, что, несмотря на кажущуюся простоту, подшипник качения как объект диагностирования является довольно сложной системой, содержащей большое число деталей, совершающих сложные относительные перемещения при взаимодействии друг с другом. Поэтому каждый из методов, характеризуя лишь отдельные стороны этих взаимодействий, в большей или меньшей степени обеспечивает решение частных задач диагностирования и принципиально не может дать исчерпывающей информации о состоянии подшипника. В этой связи различными научными коллективами проводятся исследования по поиску новых принципов выделения информации о состоянии подшипника и поиску наиболее рациональных методов или комбина-

ции методов решения тех или иных задач диагностирования и контроля.

Из представленных на рисунке 1а данных видно, что в качестве наиболее интенсивно развивающихся методов наряду с тепловыми, механическими и вибрационными можно выделить электрические методы, основанные на оценке состояния работающего подшипника по характеристикам изменяющихся электрических параметров объекта или электрических сигналов, генерируемых объектом. При этом среди электрических методов наиболее интенсивно развивающимися являются электрорезистивные методы, основанные на использовании в качестве диагностических параметров различных статистических оценок электрического сопротивления, проводимости или параметров микроконтактирования (рисунок 1б). На наш взгляд именно эти методы могут стать наиболее эффективными для оценки состояния подшипника при его приработке.



Рисунок 1 – Доля защищенных патентами технических решений в период с 2000 по 2013 г. по различным методам трибомониторинга (а) и по электрическим методам, реализующим различные диагностические параметры (б)

Сущность электрорезистивных методов заключается в следующем. При работе подшипника между телами качения и кольцами формируется устойчивая смазочная пленка, на рабочих поверхностях образуются окисные пленки, а также граничные смазочные пленки, в том числе и хемосорбированные. Смазочный материал, как правило, обладает высоким удельным электрическим сопротивлением, поэтому при изменении толщины смазочной пленки и при ее разрушении в контактах наиболее высоких микронеровностей (при микроконтактировании), при изменении свойств и разрушении поверхностных пленок существенно изменяется электрическое сопротивление зоны трения. Электронная измерительная аппаратура, подключаемая к кольцам контролируемого подшипника, анализирует интегральное сопротивление подшипника в целом, определяемое сопротивлениями зон трения каждого из тел качения с каждым из колец согласно эквивалентной электрической схеме замещения, представленной в работах [4, 5].

Эти методы обладают рядом неоспоримых преимуществ, что и обуславливает их выбор как приоритетных. К числу достоинств относятся: универсальность (возможность решения задач контроля и диагностики отдельных элементов узла или узла в целом); безынерционность по отношению к процессу трения; простота реализации (не требуются специальные преобразователи, электронное средство диагностирования подключается непосредственно к деталям контролируемого узла или корпусу и валу узла); простота формирования и обработки сигналов измерительной информации (электрический сигнал о состоянии объекта контроля поступает непосредственно из зон трения, легко преобразуется, оценивается и обрабатывается с помощью типовых электронных цепей, универсальных электроизмерительных приборов и систем).

Предпосылки применения электрорезистивных методов трибомониторинга и контроля заложены в работах [6–8]. Методы получили дальнейшее интенсивное развитие, при этом их теоретическое обоснование наиболее полно представлено в работах [4, 5, 9, 10]. Следует отметить, что на сегодняшний день разработан целый комплекс методов и реализующих их средств, обеспечивающих успешное решение различных научно-производственных задач, среди которых: входной кон-

троль новых подшипников качения при изготовлении и ремонте машин и механизмов с целью выявления подшипников, обладающих потенциально низкой надежностью при использовании в конкретном объекте; контроль качества сборки машин и механизмов с выявлением вида и оценки значения реальных макроотклонений рабочих поверхностей деталей (овальность, огранка); функциональная диагностика состояния подшипников при эксплуатации ответственных изделий с целью предотвращения аварийных отказов; дефектация бывших в эксплуатации подшипников при ремонте машин и механизмов с усредненной комплексной оценкой степени износа и поиском локальных дефектов; оценка вида смазки и эффективности системы минимального смазывания; контроль качества смазочных материалов [4, 5, 11–16].

С учетом указанных выше преимуществ электрорезистивного метода на основе теоретического анализа процессов в зонах трения работающего подшипника нами выдвинуто предположение о возможности решения с помощью данного метода поставленной выше задачи эффективного контроля процесса приработки подшипников. Оно базируется на теоретическом анализе ранее разработанных математических моделей электрического сопротивления зон трения деталей подшипника [6, 9] с выявлением и сравнением факторов, определяющих характер взаимодействия контактирующих поверхностей деталей работающего подшипника и значение электрического сопротивления зоны трения, с одной стороны, и факторов, изменяющихся при приработке подшипника, с другой стороны. В пользу этого предположения свидетельствуют и имеющиеся в литературе отдельные сведения об использовании данных методов.

Ниже приведены факторы, влияющие на электрическое сопротивление зон трения и подшипника в целом, при этом курсивом выделены факторы, изменяющиеся при приработке:

- номинальная макрогеометрия (радиусы кривизны рабочих поверхностей);
- отклонения от номинальной макрогеометрии (овальность, огранка различных порядков), наличие локальных дефектов;
- *шероховатость рабочих поверхностей деталей подшипника*;
- упругие свойства материалов деталей подшипника (модуль Юнга, коэффициент Пуассона), *свойства поверхностных слоев*;

– реологические свойства (вязкость, пьезокоэффициент вязкости) и количество смазочного материала;

– реальные режимы и условия работы подшипника в изделии (характер и значение воспринимаемой нагрузки, направление и частота вращения колец, температура зоны трения и среды и т.п.).

Анализ факторов указывает, что изменение состояния подшипника в процессе его приработки за счет изменения выделенных курсивом факторов должно приводить к адекватному и однозначному изменению электрического сопротивления.

### Результаты экспериментальных исследований

С целью подтверждения выдвинутого предположения, исследования эффективности различных электрорезистивных диагностических параметров и их чувствительности к изменению состояния подшипника при его приработке в настоящее время проводятся комплексные экспериментальные исследования, некоторые предварительные результаты которых приведены ниже.

Для проведения экспериментов разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 2.

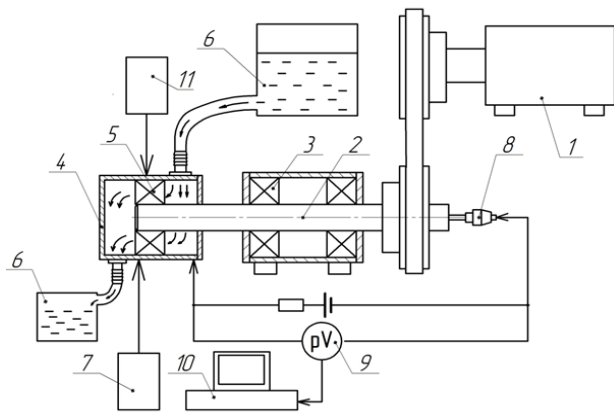


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки:  
1 – регулируемый привод; 2 – вал; 3 – шпиндельный узел; 4 – масляная камера; 5 – контролируемый подшипник; 6 – система смазывания; 7 – устройство радиальной нагрузки; 8 – электрический соединитель; 9 – плата сбора данных (осциллограф);  
10 – компьютер; 11 – виброанализатор

Установка обеспечивает возможность исследования радиальных подшипников различных типоразмеров при вращении внутреннего

кольца подшипника с заданной частотой, заданном радиальном нагружении, использовании жидкого или пластичного смазочного материала, при этом система смазывания, включающая масляную камеру, обеспечивает возможность изменения объема масла и системы его подачи. Регулируемый привод 1 с тахометром передает вращение валу 2 шпиндельного узла 3. На валу 2 крепится внутреннее кольцо контролируемого подшипника 5, установленного в герметичной масляной камере 4. При помощи системы смазывания 6 в камеру 4, подается смазочный материал (масло). Набором грузов 7 создается радиальная нагрузка на подшипник. Испытуемый подшипник подключается последовательно в электрическую цепь с источником постоянного тока при помощи электрического соединителя 8 (ртутный токосъемник – соединитель *Mercotac* 110.). Таким образом, в электрической цепи подшипник выступает в роли плеча резистивного делителя, напряжение с которого снимается при помощи электронной измерительной аппаратуры 9 (плата сбора данных *Ni 6008* или осциллограф *Hantek DSO-2090*) и обрабатывается персональным компьютером 10. Предусмотрена возможность определения в качестве дополнительных диагностических параметров параметров вибрации, измеряемых виброанализатором 11 (СД-21).

Сущность проведенных экспериментальных исследований заключалась в следующем. Новые подшипники одной партии после промывки и просушки смазывались определенным количеством смазочного материала заданного состава, после чего устанавливались на стенд. Включался привод и производился мониторинг состояния подшипника по его электрическому сопротивлению в процессе приработки подшипника, работающего с заданной частотой вращения при нагружении заданной радиальной нагрузкой. Значения электрического сопротивления регистрировались с заданной частотой дискретизации. После регистрации электрического сопротивления осуществлялась статистическая обработка полученных реализаций с вычислением среднего значения, среднего квадратического отклонения, коэффициента вариаций, интегральной и дифференциальной функций распределения сопротивления, спектральных характеристик за заданные интервалы времени.

На рисунке 3 представлены характерные зависимости (фрагменты временной реализа-

ции сопротивления за 1 с и гистограммы распределения сопротивления), полученные для одного из подшипников 1000900 в различные периоды его приработки (до приработки, через 20 мин после начала приработки и после часовой приработки) при радиальной нагрузке 100 Н, частоте вращения 1200 об/мин, при использовании масла индустриального И-20 в количестве 0,1 мл.

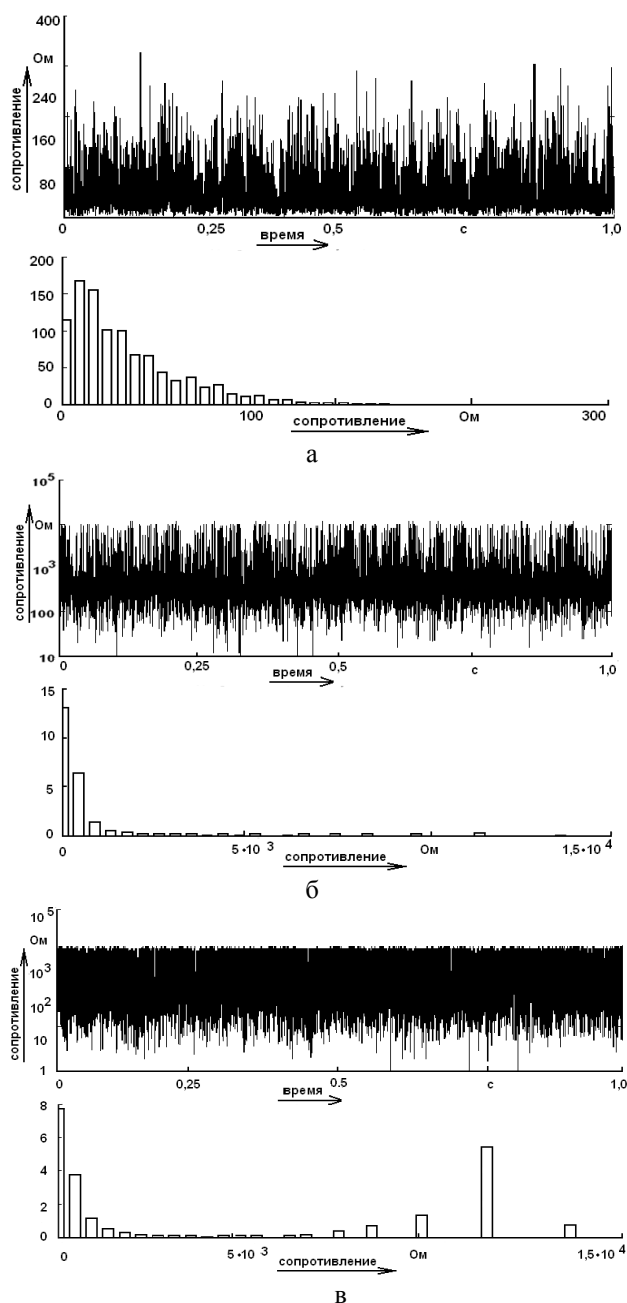


Рисунок 3 – Примеры реализаций функции сопротивления и гистограмм распределения сопротивления для подшипника 1000900 до приработки (а), после приработки в 20 мин (б) и после часовой приработки (в)

Регистрация проводилась с частотой дискретизации – 10 кГц

Анализ проведенных исследований показывает следующее:

1. В зависимости от состояния подшипника в нем может наблюдаться различный режим смазки – от практически жидкостного, когда поверхности трения разделяются слоем смазочного материала, до граничного, когда трение осуществляется по поверхностным слоям. При этом электрическое сопротивление изменяется с высокой частотой случайным образом в очень широких пределах – от единиц ом при микроконтактировании до сотен килоом и даже мегаом при восстановлении масляной пленки.

2. Процесс приработки сопровождается существенным изменением состояния подшипника в зоне трения, что однозначно фиксируется по изменению функции электрического сопротивления подшипника. До приработки сопротивление подшипника составляет несколько десятков ом с редкими короткими импульсами, не превышающими 200–250 Ом. При этом гистограмма распределения вероятности сопротивления свидетельствует о практически граничной смазке в подшипнике с наиболее вероятными значениями сопротивления 20–30 Ом. Через 20 мин после начала приработки характер изменения сопротивления трансформируется – его уровень повысился до тысяч ом с отдельными импульсами до 10 кОм и выше. Это свидетельствует, очевидно, о переходе к полужидкостной (смешанной) смазке. После часовой приработки состояние подшипника еще в большей степени улучшилось – значение сопротивления возросло еще в большей степени с редкими падениями до сотен ом. При этом закон распределения сопротивления становится практически бимодальным, что свидетельствует о смешанной смазке в подшипнике, когда частично осуществляется жидкостная смазка, а частично граничная.

Выявленный характер изменения функции сопротивления подшипника в зависимости от времени его приработки свидетельствует об улучшении состояния подшипника, что может быть вызвано, с одной стороны, улучшением условий формирования гидродинамической смазочной пленки в зонах трения вследствие равномерного распределения смазочного материала по рабочим поверхностям и удаления лишнего материала из этих зон, с другой стороны – изменением свойств поверхностных слоев и пара-

метров шероховатости рабочих поверхностей, смятием наиболее высоких микронеровностей. В обоих случаях полученный результат соответствует реальным триботехническим процессам в подшипнике при его приработке.

С целью выявления наиболее информативных характеристик флуктуирующего сопротивления, несущих информацию о процессе приработки, получены и проанализированы статистические характеристики функции сопротивления. На рисунке 4 представлены зависимости среднего значения сопротивления ( $R_{cp}$ ), среднего квадратического отклонения сопротивления (СКО) и коэффициента вариаций ( $СКО/R_{cp}$ ) от времени приработки, полученные для трех однотипных подшипников из одной партии при одинаковых режимах.

Видно, что несмотря на специфику зависимостей для каждого из подшипников характер изменения  $R_{cp}$  во времени (рисунок 4а) у подшипников идентичен – при приработке подшипника среднее значение сопротивления возрастает по закону, близкому к экспоненциальному. При этом стабилизация среднего значения, очевидно, может свидетельствовать о завершении процесса приработки. Характер изменения СКО (рисунок 4б) в период приработки также идентичен для трех подшипников и аналогичен изменению среднего.

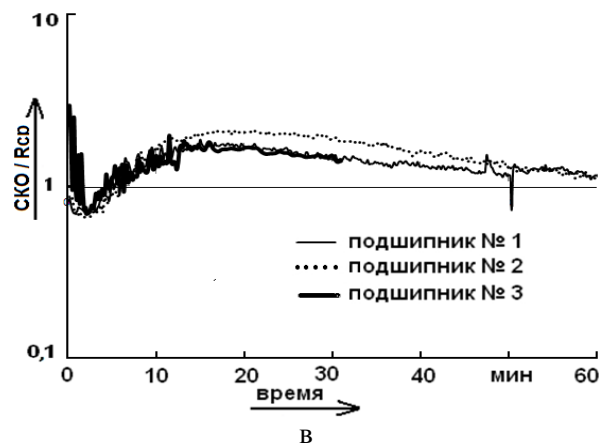
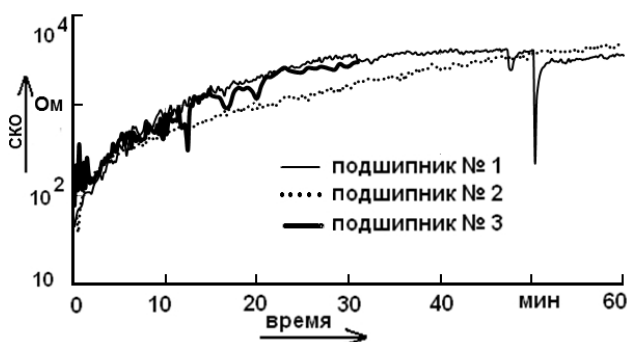
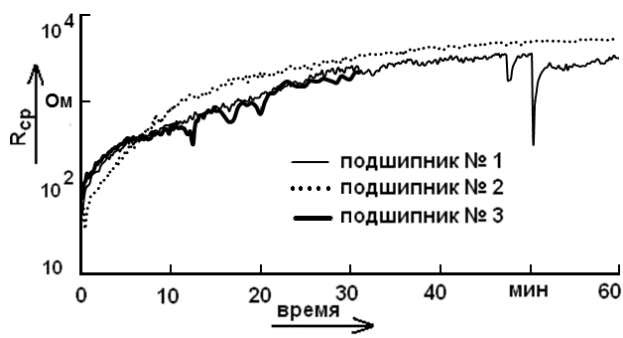


Рисунок 4 – Зависимости среднего значения сопротивления подшипника  $R_{cp}$  (а), среднего квадратического отклонения сопротивления СКО (б) и коэффициента вариаций  $СКО/R_{cp}$  (в) для трех подшипников 1000900 в процессе их приработки

Будучи также идентичными для трех разных подшипников, функции изменения коэффициента вариаций во времени (рисунок 4в) имеют иной характер, свидетельствующий о том, что в процессе приработки степень нестабильности процессов в подшипнике снижается.

### Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Электрическое сопротивление подшипника при его работе изменяется случайным образом (флуктуирует) с высокой частотой в широком диапазоне – от единиц ома при граничной смазке и микроконтактировании до сотен и тысяч килоом при формировании гидродинамической смазочной пленки в зонах трения.

2. В процессе приработки подшипника характер флуктуаций его электрического сопротивления однозначно изменяется, что характеризуется монотонным возрастанием среднего значения сопротивления (практически на два порядка) с последующей его стабилизацией и снижением коэффициента вариаций. Данные изменения свидетельствует об улучшении состояния рабочих поверхностей деталей и условий смазывания в зонах трения работающего подшипника и полностью соответствует реальным триботехническим процессам в подшипнике при его приработке.

3. Электрическое сопротивление подшипника и его статистические параметры – среднее значение, среднее квадратическое отклонение и

коэффициент вариаций, объективно и с высокой чувствительностью характеризуют фактическое состояние подшипника и могут использоваться в качестве диагностических при мониторинге процесса приработки.

4. Полученные результаты подтверждают возможность реализации контроля процесса приработки подшипников электрорезистивным методом и свидетельствуют о целесообразности продолжения экспериментальных исследований в направлении изучения связи различных статистических и спектральных оценок электрического сопротивления с параметрами шероховатости рабочих поверхностей деталей подшипника в процессе его приработки с целью формирования наиболее информативных диагностических параметров.

Исследования проведены с использованием измерительного оборудования Центра коллективного пользования контрольно-измерительным и испытательным оборудованием при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет–УНПК».

#### **Список использованных источников**

1. Патент SU 1663256 Способ приработки радиальноупорных подшипников в дуплексе / И.А. Булавин, А.В. Смолюгов, А.Ю. Груздев, Н.В. Агеев, Н.Е. Паршин, В.П. Адаричев, В.В. Гришин. – Оpubл. 15.07.91. Бюл. № 26.
2. Пыльнова, А.В. Контроль подшипников качения на выбеге в процессе ультразвуковой приработки / А.В. Пыльнова, О.М. Батищева // Надежность и качество. Труды международного симпозиума. – 2010. – Т.2. – С. 124-125.
3. Шуваев, В.Г. Вибрационная диагностика и контроль приработки подшипников качения на основе разделения вибрационных сигналов / В.Г. Шуваев, А.В. Пыльнова // Надежность и качество. Труды международного симпозиума. – 2013. – Т.2. – С. 280-282.
4. Контроль и диагностика при обеспечении качества машиностроительных изделий / М.И. Абашин [и др.]; под ред. А.В. Киричека и К.В. Подмастерьева. – М.: Спектр, 2012. – 338 с.
5. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
6. Елин, Л.В. Электрическое сопротивление пленок смазочного масла «машинное-2» и трансформаторного / Л.В. Елин, Н.В. Захаржевская // Одесский институт инженеров морского флота: Научные труды. – Вып. 8. – М.: Морской транспорт, 1949. – С. 120–134.
7. А.с. 139128 СССР, G 01 I. Устройство для контроля за состоянием подшипников / Н.И. Коровин, А.И. Эйсуевич. – Оpubл. 30.03.61, Бюл. № 12.
8. Кеннел, Дж. Упругогидродинамическая смазка приборного шарикового подшипника / Дж. Кеннел, Д. Снидекер // Тр. амер. о-ва инж.-мех. Сер. Проблемы трения и смазки. – 1976. – № 2. – С. 57–63.
9. Кончиц, В.В. Триботехника электрических контактов / В.В. Кончиц, В.В. Мешков, Н.К. Мышкин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 260 с.
10. Свириденко, А.И. Акустические и электрические методы в триботехнике / А.И. Свириденко [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1987. – 257 с.
11. Подмастерьев, К.В. Исследование влияния макростепеней дорожек качения колец на состояние смазки в подшипнике электрорезистивным методом / К.В. Подмастерьев, В.В. Марков // Трение и износ. 2005. – Т. 26. – № 5. – С. 546-553.
12. Подмастерьев, К.В. Электрический метод и средства поиска локальных дефектов опор качения / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин // Дефектоскопия. – 1998. – № 8. – С. 59–67.
13. Патент № 2124191 РФ, G 01 M13/04. Способ диагностирования тел качения подшипников и устройство для его осуществления / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин. – Оpubл. 27.12.98, Бюл. № 36.
14. Патент 2110053 РФ, G 01 M13/04. Способ диагностирования колец подшипников качения / К.В. Подмастерьев, С.Ф. Корндорф, Е.В. Пахолкин. – Оpubл. 27.04.98, Бюл. № 12.
15. Неразрушающий контроль / В.П. Вавилов [и др.], под общ. Ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – Т.5. Кн. 1. Тепловой контроль. Кн. 2. Электрический контроль (2-е издание, исправленное).
16. Пахолкин, Е.В. Приборы для трибомониторинга / Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев // Датчики и системы. – 2008. – № 3. – С. 16-19.

**ELECTRO-RESISTANCE METHOD OF CHECK A PROCESS GRINDING  
THE ROLLING BEARINGS**

*Podmasteryev K.V., Podmasteryev A.K.*

State Universite – Education-Science-Production Complex, Orel, Russia  
e-mail: asms-orel@mail.ru

**Abstract.** Base a possibility of monitoring processes of grinding the rolling bearings with use electro-resistance method of check. Is write of essence this method, are analyses his peculiarities, which are provide objective information on the condition a object by his grinding. Are consider the results of experimental researches the effective different diagnostically parameters, which are confirm a possibility of realization objective check of grinding the rolling bearings with use electro-resistance method.

**Keywords:** electro-resistance check; grinding; rolling bearing.

**References**

1. Bulavin I.A., Smolyugov A.V., Gruzdev A.YU., Ageev N.V., Parshin N.E., Adarichev V.P., Grishin V.V. *Sposob prirabotki radialnoupornykh podshipnikov v duplekse*. [The way to breaking-in of angular contact bearings in duplex]. Patent SU, no. 1663256, 1991.
2. Pyilnova A.V., Batischeva O.M. [Control of rolling bearings freewheel during ultrasonic breaking-in]. *Nadiozhnost' i kachestvo. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality. Proceedings of the International Symposium]. 2010, no 2, pp. 124–125 (in Russian).
3. Shyvaev V.G., Pyilnova A.V. [Vibration diagnostics and control of the breaking-in of rolling bearings based on the separation of vibrational signals]. *Nadiozhnost' i kachestvo. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality. Proceedings of the International Symposium]. 2013, no. 2, pp. 280–282. (in Russian).
4. Abashin M.I., Barzov A.A., Barinov C.V., Galinovskiy A.L., Ivanov V.P., Kirichek A.V., Lisichkin V.G., Markov V.V., Mishin V.V., Morozova, A.V., Paholkin E.V., Podmasteryev K.V., Solov'ev D.L., Tarasov D.E. Edited by A.V. Kirichek K.V. Podmasteryev. *Kontrol' i diagnostika pri obespechenii kachestva mashinostroitelnykh izdelij* [Control and diagnostics while providing quality engineering products. Kollektive]. Moscow, Izdatelskiy dom Spektr Publ., 2012. 338 p. (in Russian).
5. Podmasteryev K.V. *Elektroparametricheskiye metody kompleksnogo diagnostirovaniya opor kacheniya*. [Electroparametrical methods of complex diagnosing of rolling bearing supports]. Moscow, Mechanical engineering-1 Publ., 2001. 376 p. (in Russian).
6. Elin L.V., Zaharzhvetskaya N.V. [Electrical resistance of the oil film of lubricants «mashinnoe-2» and transformer oil]. *Odesskiy institut inzhenerov morskogo flota: Nauchnyye trudy* [Odessa Institute of Marine Engineers. Scientific proceedings]. Edition 8. Moscow, Morskoj transport Publ., 1949. pp. 120–134 (in Russian).
7. Korovin N.I., Eysurovich A.I. *Ustrojstvo dlya kontrolya za sostoyaniyem podshipnikov* [The device for monitoring the state of bearings] Patent SU, no. 139128, 11961.
8. Kennel J., Snideker D. [Elastohydrodynamic lubrication of instrument ball bearings] *Trudy amerikanskogo obschestva inzhenerov-mekhanikov. Seriya. Problemy treniya i smazki*, 1976, no. 2, pp. 57–63 (in Russian).
9. Konchits V.V., Meshkov V.V., Myishkin N.K. *Tribotekhnika elektricheskikh kontaktov* [Tribotechnology of electrical contacts]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1986. 260 p. (in Russian).
10. Sviridenok A.I., Myishkin N.K., Kalmykova T.F., Xolodilov O.V. *Akusticheskie i elektricheskiye metody v tribotekhnike* [Acoustic and electric methods in tribotechnology]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1987, 257 p.
11. Podmasteryev K.V., Mishin V.V., Markov V.V. [Investigation of the influence of deviations form the raceway rings on the condition of the lubricant in the bearing by electric resistance method]. *Trenie i iznos*, 2005, Vol. 26, no. 5, pp. 546-553 (in Russian).



12. Podmasteryev K.V., Paholkin E.V. [Electric method and means to identify local defects in rollings]. *Defectoscopya*, 1998, no. 8, pp. 59–67 (in Russian).
13. Podmasteryev K.V., Paholkin E.V. Sposob diagnostirovaniya tel kacheniya podshipnikov i ustroystvo dlya ego osuschestvleniya [The way to diagnosing rolling elements of bearings and device for its implementation]. Patent RF, no. 2124191, 1998.
14. Podmasteryev K.V., Korndorf S.F., Paholkin E.V. Sposob diagnostirovaniya kolets podshipnikov kacheniya [The way to diagnosing of rings of the rolling bearings]. Patent RF, no. 2110053, 1998.
15. Vavilov V.P., Podmasteryev K.V., Sosnin F.R., Korndorf S.F., Nogacheva T.I., Paholkin E.V., Bondareva L.A., Muzhitskiy V.F. *Nerazrushayuschiy kontrol. Spravochnik v 8 tomah pod obschey redaktsiey V.V. Klyueva. T. 5 Kniga 1. Teplovoy kontrol. Kniga 2. Elektricheskiy kontrol* [Nondestructive testing. Handbook in 8 volumes / Edited by V.V. Klyuev. Vol. 5. Book 1. Thermal Testing. Book 2. Electrical Testing]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 2006. 688 p. (in Russian).
16. Paholkin E.V., Podmasteryev K.V. [Devices for tribomonitoring] *Datchiki i sistemy*, 2008, no. 3, pp. 16–19 (in Russian).

*Поступила в редакцию 01.02.2015.*