

ПРИМЕНЕНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗНОСА ПОДШИПНИКОВ

Работа посвящена проблеме контроля износа подшипников в процессе их работы. Приводится описание хорошо известных методов контроля состояния подшипников, направленных на решение данной проблемы. Рассматривается применение технологии идентификационных измерений сигналов для контроля степени износа подшипников.

Ключевые слова: вибросигнал, дефект, износ подшипника, идентификационные измерения, контроль состояния.

Введение. Подшипники используются практически во всех роторных машинах коммерческого и промышленного назначения. Их отказы составляют высокий процент поломок оборудования и во многих ситуациях приводят к катастрофическим последствиям. Согласно последним статистическим данным [1], преждевременный отказ подшипников и шестерней составляет более чем 95 % случаев выхода из строя редукторов ветрогенераторов.

В последние десятилетия был разработан ряд методов анализа вибрации для диагностирования локальных неисправностей подшипников. На начальной стадии неисправности подшипников часто локализируются, так что эти методы можно рассматривать как методы диагностирования начальных неисправностей. Однако диагностирование неисправностей подшипников все еще не является полностью решенной проблемой, особенно в тех случаях, когда вибрационные сигналы содержат импульсный шум. Кроме того, в последние годы увеличивается тенденция применения неформальных подходов, основанных, в частности, на применении искусственных нейронных сетей, нечеткой логики, генетических алгоритмов и др. Несмотря на то, что указанные подходы позволяют в ряде случаев решить поставленные задачи контроля и диагностирования исследуемых объектов, существуют трудности, связанные со сложностью разработки.

Постановка задачи. Разработка и развитие принципиально новых, более эффективных и совершенных методов, направленных на решение задач технического контроля и диагностирования износа подшипников, является актуальной и важной научно-технической задачей.

Обзор известных методов. Методы оценки технического состояния подшипников, основанные на вычислении *пик-фактора* сигнала, известны давно. Все они базируются на вычислении отношения пикового значения к среднеквадратическому значению информативного параметра сигнала [2]. В зависимости от способа сравнения выделяют: метод ПИК/СКЗ; метод HFD (High Frequency Detection); метод SE (Spike Energy); метод SPM (Shock Pulse Measurement).

1-й этап соответствует практически идеальному состоянию подшипника, когда только происходит зарождение дефектов, а общий уровень фона существенно меньше нормируемых значений.

2-й этап соответствует подшипнику с зарождающимися и углубляющимися дефектами. По мере образования дефектов на кинематических узлах подшипника начинают образовываться одиночные короткие импульсы на графике виброускорения, амплитуда которых постепенно увеличивается по уровню.

На 3-м этапе происходит интенсивное углубление дефектов, а также увеличивается их количество. На этом этапе пиковое значение достигает практически максимальных значений.

Этап 4 характеризуется увеличением геометрических зон дефекта настолько, что начинают протекать процессы деградации подшипника. На графиках данный этап выделяется значительным ростом уровня фона (СКЗ), который связан с ростом сил трения.

На последнем этапе развития дефекта графики пикового значения и среднеквадратического начинают превышать нормируемые уровни, что свидетельствует о том, что дефект охватил практически



Рис. 1. График зависимости среднеквадратического значения фона и пиковых значений в дефектном подшипнике

весь подшипник и дальнейшая его эксплуатация опасна.

Существенным *недостатком* метода является неспособность одновременно работать с несколькими дефектами. Методом ПИК/СКЗ можно наблюдать только один дефект, а такое встречается редко.

2. *Метод HFD (High Frequency Detection)* базируется на измерении численных значений высокочастотной вибрации, создаваемой небольшими дефектами, возникающими в диапазоне частот от 5 кГц до 60 кГц. Для измерений высокочастотных колебаний обычно используют резонансную частоту вибродатчика, после чего полученные сигналы нормируются по скорости соударения при учете конструкции подшипника и скорости вращения вала. По количеству и уровню ударных импульсов характеризуют вид и степень развития дефекта [3, 4].

3. *Метод SE (Spike Energy)* был разработан для детектирования сигналов, которые возникают в результате поверхностных дефектов подшипников, зубчатых передач и других изделий, где присутствует контакт металл-металл.

При применении метода SE используется акселерометр для выделения вибросигнала в заранее определенном высокочастотном диапазоне. Механические воздействия возбуждают колебания на собственных частотах акселерометров, а также на собственных частотах элементов и конструкций машин в высокочастотном диапазоне. Эти резонансные частоты действуют как несущие частоты, а частота дефектов подшипника модулирует эти несущие.

Метод SE позволяет выявить ранние признаки неисправностей подшипников качения [2, 5]. К *недостаткам* метода относится сложность процедуры выбора резонансных частот, которые в дальнейшем могут измениться, например, в процессе работы или после ремонта объекта.

4. *Метод SPM (Shock Pulse Measurement)*, или метод ударных импульсов — метод оценки состояния подшипников качения, основанный на регистрации и анализе параметров колебаний (ударных импульсов) на резонансной частоте датчика [6].

С помощью метода SPM возможно определить наличие неисправности в подшипнике, но без специального анализа, проведенного экспертом, идентифицировать дефект нельзя. При этом такие классы неисправностей, как дисбаланс, несоосность, ослабление крепления, неисправности электродвигателя или насосов, не определяются.

Измерения производятся специально разработанным пьезоэлектрическим преобразователем, который воспринимает и усиливает входящие ударные импульсы на своей резонансной частоте 30...

32 кГц. При этом измеряется только первый фронт ударной волны, после чего сигнал поступает на вход фильтра, который пропускает только ударные составляющие сигнала. В результате произведенных операций на выходе измерительного устройства присутствует последовательность импульсов, значения которых, как правило, колеблются относительно некоторого усредненного значения. Техническое состояние подшипников качения оценивается по величине пиков величин отдельных импульсов, выраженных в децибелах [7, 8].

Из всех методов, основанных на пик-факторе, метод SPM получил наибольшее распространение. Однако реально имеет очень ограниченное применение, поскольку с его помощью можно оценить только состояние подшипников и он требует индивидуальной нормировки для каждого местоположения датчика. Даже после замены подшипника необходимо корректировать пороговые уровни. Этот метод требует присутствия специалиста для анализа уровней, сигналов и принятия решения.

К основным *достоинствам* описанных методов следует отнести: высокую чувствительность; обнаружение дефектов на этапе их зарождения; контроль условий работы подшипника (например, смазки); низкая требовательность к квалификации специалистов. К общим *недостаткам* относятся: индивидуальная нормировка для каждого метода, высокая требовательность к параметрам измерительных приборов; невозможность определения типа дефекта; падение чувствительности при росте СКЗ сигнала.

Одним из инструментов обработки нестационарных сигналов является вейвлет-анализ, математический аппарат, разработанный такими учеными, как Морле, Добеши, Малла и другими [9]. Применительно к вибрационной диагностике данный подход еще недостаточно проработан. При этом основной причиной является сложность выбора базисной функции, оказывающей большое влияние на качество вейвлет-анализа. Поэтому данный подход, в основном, применяется только для ручного анализа сигналов и сигналов, полученных в лабораторных условиях.

Теория. Одним из перспективных направлений в области обработки и представления результатов анализа сигналов, полученных от объектов контроля, является применение технологии идентификационных измерений.

Идентификационные измерения (ИИ) — это разновидность измерений, в процессе которых устанавливается нечетко определенный состав и суть обозначений (идентификаторов) категорической измерительной шкалы, а результатом является установление принадлежности объекта контроля одной или нескольким выбранным категориям по критерию близости идентификаторов [10]. Эталонном сравнении для измеряемых величин служит идентификационная шкала (ИШ) эмпирического типа. По форме ИШ похожа на шкалы обычных аналоговых приборов, оцифрованные отметки (идентификаторы) которых дополнены качественными (категорийными) характеристиками объекта контроля, состав и суть которых определяется сертифицированными экспертами. Содержанием теории идентификационных измерений является количественное оценивание (измерение) формы характеристик сигналов [11].

Принципиальная возможность измерения формы характеристик сигналов в системе порядковых

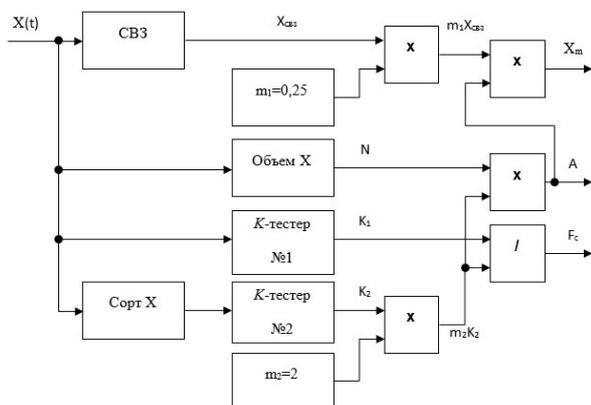


Рис. 2. Структурная схема AF-тестера

измерительных шкал впервые была показана в работах [12, 13]. Применение технологии идентификационных измерений для решения задач контроля и диагностики (например, как это описано в [14, 15]) позволяет представлять результат в простом и наглядном виде.

Предлагается в качестве метода контроля износа подшипников использовать AF-метод [16], который заключается в определении параметров идентификационной модели сигналов:

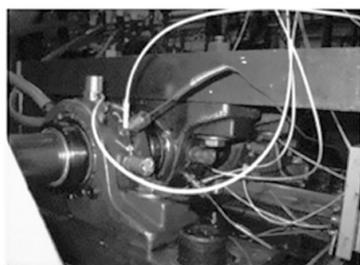
$$X(t) = X_m \text{DSTR}(AF_c t), \quad (1)$$

где X_m — идентификационная амплитуда; *DSTR* — лингвистический терм, обозначающий некое стандартизированное имя сигнала, задающее его форму (например, *sin* — для синусоидального сигнала); A — параметр формы сигнала; F_c — квазичастота; t — время.

Для определения параметров идентификационной модели сигналов применяют AF-тестер, структурная схема которого представлена на рис. 2. На схеме обозначены: «СВЗ» — блок вычисления средневыпрямленного значения сигнала; «Сорт X» — блок ранжирования сигнала по возрастанию; « $m_1=0,25$ » и « $m_2=2$ » — поправочные коэффициенты m_1 и m_2 ; «Объем X» — блок вычисления объема выборки сигнала N ; «К-тестер № 1» и «К-тестер № 2» — К-тестеры; «x» и «/» — блоки умножения и деления.

К-тестеры реализуют функцию над входным сигналом $X(t)$:

$$K = \frac{|\overline{\Delta X(t)}|}{|\overline{X(t)}|} = \omega, \quad (2)$$



а)

где $|\overline{X(t)}|$ — средневыпрямленное значение сигнала, $|\overline{\Delta X(t)}|$ — средневыпрямленное значение приращения сигнала.

Параметры идентификационной модели вычисляются по формулам:

$$A = m_2 K_2 N, \quad (3)$$

$$X_m = 0,25 A |\overline{X(t)}|, \quad (4)$$

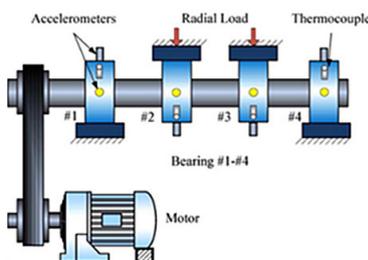
$$F_c = \frac{K_1}{m_2 K_2}. \quad (5)$$

Параметр X_m далее будем также называть идентификационным параметром.

Описание эксперимента. Большинство доступных наборов данных, предназначенных для исследований по диагностике подшипников, включают изучение уже сформировавшихся дефектов подшипников, полученных в результате работы [17, 18], или наборы данных, содержащие дефекты подшипников, полученные искусственным путем [19, 20]. Использование в экспериментах дефектных подшипников не позволяет оценить динамику зарождения дефекта, а также обнаружить естественное распространение дефектов на ранних стадиях. Для анализа возможности применения идентификационных методов для диагностирования степени износа подшипников был выбран «Набор данных интеллектуальных систем технического обслуживания» (IMS) [21].

Как показано на рис. 3, испытательный стенд представляет собой вал с четырьмя исследуемыми двухрядными подшипниками Rexnord ZA-2115. Подшипники имеют 16 роликов в каждом ряду, диаметр шага 2,815 дюйма, диаметр ролика 0,331 дюйма и угол конического контакта 15,171°. На корпусе каждого подшипника был установлен высокочувствительный кварцевый Искс-акселерометр PCB 353B33. Четыре термопары были прикреплены к наружному кольцу каждого подшипника для регистрации температуры. Данные о вибрации собирались каждые 20 минут с помощью карты сбора данных National Instruments DAQCard-6062E. Частота дискретизации данных составляет 20 кГц, а длина данных составляет 20480 точек. Сбор данных осуществляется с помощью программы National Instruments LabVIEW [22].

В ходе эксперимента скорость вращения вала поддерживалась двигателем переменного тока на уровне 2000 оборотов в минуту. Радиальная нагрузка в 2721 кг прикладывается к валу и подшипнику с помощью пружинного механизма. Все



б)

Рис. 3. Стенд для испытания подшипников (а) и схема размещения датчиков (б)

Результаты эксперимента

№ эксп.	Кол-во файлов	Интервал записи (мин.)	Дефект подшипника
1	2156	10 (первые 43 файла записаны с интервалом 5 мин.)	№ 3 (дефект внутреннего кольца) и № 4 (дефект роликового элемента)
2	984	10	№ 1 (дефект внешнего кольца)
3	6324	10	№ 3 (дефект внешнего кольца)

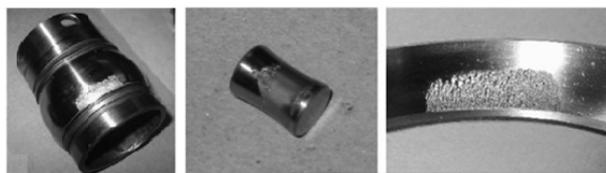


Рис. 4. Изображение компонентов подшипника после испытания: (а) дефект внутреннего кольца в подшипнике 3 (испытание 1), (б) дефект роликового элемента в подшипнике 4 (испытание 1), (в) дефект наружного кольца в подшипнике 4 (испытание 3)

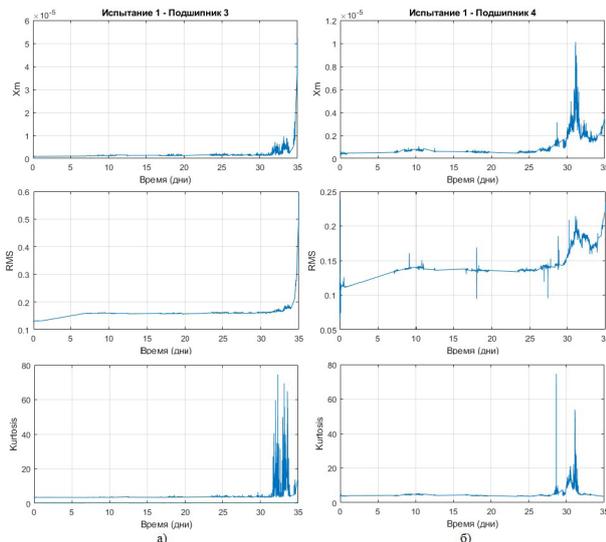


Рис. 5. Временные характеристики идентификационного параметра X_m , среднеквадратичного значения (RMS) и эксцесса (Kurtosis) для подшипника 3 (а) и подшипника 4 (б) при испытании 1

подшипники предварительно смазаны. Система циркуляции масла регулирует поток и температуру смазочного материала [22].

Результаты эксперимента. В ходе эксперимента были проведены 3 серии замеров, испытания проводились, пока на магнитной пробке в маслосистеме двигателя не было обнаружено значительное количество продуктов износа. Параметры записи экспериментов и результаты представлены в табл. 1.

Таким образом, по завершению 1-го испытания были выявлены дефект внутреннего кольца у 3-го подшипника и дефект роликового элемента у 4-го подшипника. Во втором и третьем испытании был выявлен дефект внешнего кольца у 1-го и 3-го подшипника соответственно (рис. 4)

В результате сравнения предлагаемого с известными методами были получены следующие резуль-

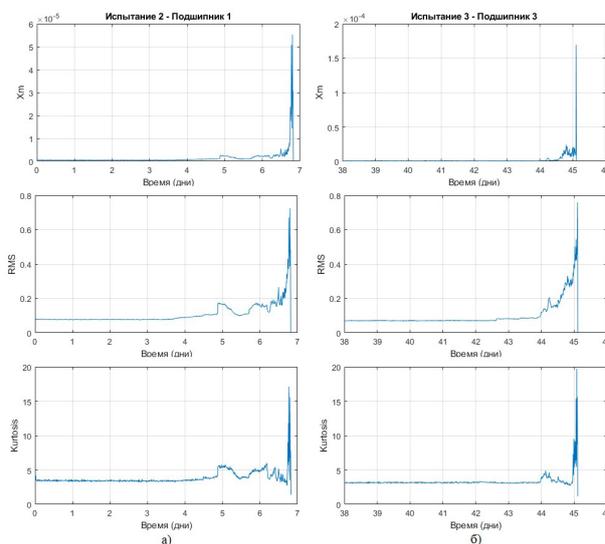


Рис. 6. Временные характеристики идентификационного параметра X_m , среднеквадратичного значения (RMS) и эксцесса (Kurtosis) для подшипника 1 при испытании 2 (а) и подшипника 3 при испытании 3 (б)

таты. Для всего жизненного цикла подшипников 3 и 4 в испытании 1, подшипника 1 в испытании 2 и подшипника 3 в испытании 3 на рис. 5 и рис. 6 показаны временные характеристики идентификационного параметра X_m предлагаемого метода и характеристики параметров известных методов: среднеквадратичного значения (RMS) и эксцесса (Kurtosis) (рис. 5, 6).

На рис. 5а показано, что для дефекта внутреннего кольца изменение параметра X_m можно разделить на два этапа. На первом этапе, в течение первых 30 дней эксплуатации, изменение параметра X_m AF-тестера не наблюдалось. После 30 дней эксплуатации (приблизительно, 86,4 миллиона циклов) показания параметра X_m начало увеличиваться, и скорость изменения также значительно возросла. Аналогичная ситуация для подшипников 1 и 3 в испытаниях 2 и 3 соответственно, показания параметра X_m в первой половине теста практически не изменяются, после чего происходит стремительное увеличение измеряемого параметра. Для подшипника 4, у которого были обнаружены смешанные дефекты роликового элемента и наружного кольца, тенденция параметра X_m увеличилась до определенного уровня, затем уменьшилась и снова выросла. Колеблущуюся тенденцию можно объяснить характером процесса распространения повреждения.

Анализ результатов сравнения характеристик, представленных на рис. 5 и рис. 6, позволяет сделать вывод о том, что предложенный метод, основанный

на идентификационных измерениях, чувствителен к появлению дефектов роликового элемента, внутреннего и внешнего кольца подшипника и обладает сравнительно неплохой помехоустойчивостью.

Заключение. Предложено применение технологии идентификационных измерений в виде AF -метода для контроля износа подшипников. Данный метод имеет ряд достоинств: позволяет обнаруживать и контролировать дефекты на этапе их зарождения; не требуется дополнительных сложных преобразований сигнала; прост в реализации, возможность автоматизации.

На данном этапе исследования к недостаткам предложенного метода можно отнести невозможность определения типа дефекта подшипника и сложность в прогнозировании его остаточного ресурса.

Результаты применения предложенного метода хорошо согласуются с известными, хорошо зарекомендовавшими себя методами диагностики подшипников, что подтверждает его достоверность и перспективность.

Библиографический список

- Sheng S. Report on wind turbine subsystem reliability – a survey of various databases // National Renewable Energy Laboratory. 2013. Corpus ID: 112302697.
- Костюков В. Н., Науменко А. П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. 2-е изд. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. 372 с. ISBN 978-5-7692-1383-0.
- Zusman G. Universal Single Sensor for Machinery Condition Monitoring: Vibration, Bearing Health and Temperature // 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016). 2016. Issue 2016-07. URL: <https://www.ndt.net/search/docs.php?id=19301> (дата обращения: 20.10.2021).
- Scheffer C., Girdhar P. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Newnes, Elsevier Ltd. All, 2004. 272 p. DOI: 10.1016/B978-0-7506-6275-8.X5000-0.
- Xu M. Spike energy measurement and case histories. 2006. Corpus ID: 53601868.
- Davies A. Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology. Springer Science & Business Media, 1997. 318 p. ISBN 9780412613203.
- Бурда Е. А., Зусман Г. В., Кудрявцева И. С., Науменко А. П. Методы контроля состояния и диагностирования подшипников качения центробежных машин и механизмов // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 12. С. 46–62. DOI: 10.14489/td.2021.12.pp.046-062.
- Randall R. B. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Automotive and Aerospace Applications. West Sussex: Wiley, 2011. DOI: 10.1002/9780470977668.
- Добещи И. Десять лекций по вейвлетам / пер. с английского Е. В. Мищенко; под редакцией А. П. Петухова. Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 464 с.
- Губарев В. В., Горшенков А. А., Кликушин Ю. Н., Кобенко В. Ю. Классификационные измерения: методы и реализация // Автометрия. 2013. Т. 49, № 2. С. 76–84.
- Кликушин Ю. Н., Кобенко В. Ю. Основы идентификационных измерений. Омск, 2006. 18 с. Деп. в ВИНТИ, № 1540-B2006.
- Кликушин Ю. Н. Нечеткая идентификация формы распределения вероятности // Измерительная техника. 1992. № 9. С. 4–7.
- Кобенко В. Ю. Фрактальная идентификационная шкала // Омский научный вестник. 2009. № 3 (83). С. 205–213.
- Захаренко В. А., Кликушин Ю. Н., Кобенко В. Ю., Орлов С. А. Технология классификации объектов диагностики с помощью МТШ-90 // Контроль. Диагностика. 2012. № 7. С. 43–49.
- Кликушин Ю. Н., Кобенко В. Ю., Гошенков А. А. Способ компьютерной диагностики болезни Паркинсона // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 10. 14 с.
- Кликушин Ю. Н., Кобенко В. Ю. Идентификационный способ классификации сигналов // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 267–272.
- Data Challenge bearing dataset (IEEE PHM 2012). URL: <https://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/groups/pcoe/prognostic-data-repository/#femto> (дата обращения: 07.04.2022).
- Bechhoefer E. Condition Based Maintenance Fault Database for Testing Diagnostics and Prognostic Algorithms. 2013. URL: <https://www.mfpt.org/fault-data-sets/> (дата обращения: 07.04.2022).
- Bearing DataCenter // Paderborn University. URL: <http://groups.uni-paderborn.de/kat/BearingDataCenter/> (дата обращения: 07.04.2022).
- Bearing Data Center // Case Western Reserve University (CWRU). URL: <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter> (дата обращения: 08.04.2022).
- Lee J., Qiu H., Yu G. [et al.]. Bearing Data Set / Rexnord Technical Services, IMS, University of Cincinnati // NASA Ames Prognostics Data Repository, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA. 2007. URL: <https://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/groups/pcoe/prognostic-data-repository/> (дата обращения: 10.04.2022).
- Qiu H., Lee J., Lin J. Wavelet Filter-based Weak Signature Detection Method and its Application on Roller Bearing Prognostics // Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 289, Issues 4–5. P. 1066–1090. DOI: 10.1016/J.JSV.2005.03.007.

КОБЕНКО Вадим Юрьевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электроника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.
SPIN-код: 9011-1591
AuthorID (SCOPUS): 55674672100
ResearcherID: D-7342-2013

ФРОЛОВ Святослав Олегович, аспирант кафедры «Электроника» ОмГТУ, г. Омск.

ГАНЕЕВ Рафаил Фаридович, магистрант гр. ЭНМ-211 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.

Для цитирования

Кобенко В. Ю., Фролов С. О., Ганеев Р. Ф. Применение идентификационного метода для контроля износа подшипников // Омский научный вестник. 2022. № 3 (183). С. 98–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-98-102.

Статья поступила в редакцию 04.04.2022 г.

© В. Ю. Кобенко, С. О. Фролов, Р. Ф. Ганеев