

УДК 62-233.27

**К ВОПРОСУ О ДИАГНОСТИКЕ НИЗКООБОРОТНЫХ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ
В БУКСАХ МЕХАНИЗМА ПЕРЕДВИЖЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА**

©Чернышенко А. В., Мельниченко А. А.

Українська інженерно-педагогічна академія

В статье проведен обзор основных современных методов диагностики низкооборотных подшипников качения. Предложено оборудование для реализации одного из методов и приведены результаты эксперимента.

Ключевые слова: подшипник, букса, мостовой кран, диагностика.

Чернышенко А. В., Мельниченко А. А. «До питання про діагностику низкооборотних підшипників качення в буксах механізму пересування мостового крана».

У статті проведений огляд основних сучасних методів діагностики низкооборотних підшипників качення. Запропоновано обладнання для реалізації одного з методів і наведені результати експерименту.

Ключові слова: підшипник, букса, мостовий кран, діагностика.

Chernishenko A. V., Melnichenko A. A. “On the diagnostics of low speed rolling in the journal boxes mechanism of movement of the bridge crane”.

In the article the review of basic modern methods of diagnostics of the low-speed rolling bearings is conducted. The equipment is offered for realization of one of methods and the results of experiment are resulted.

Key words: bearing, axle-box, overhead crane, diagnostics.

1. Постановка проблемы

Основные задачи по диагностике подшипников качения в процессе их эксплуатации решаются, как правило, одним из трех способов. Первый способ использует алгоритмы обнаружения дефектов по росту температуры подшипникового узла во время эксплуатации, второй – по появлению в смазке продуктов износа подшипника, а третий – по изменению уровня и свойств вибрации (шума). В буксах крановых колес наиболее полную и детальную диагностику подшипников с обнаружением и идентификацией дефектов на ранней стадии развития можно выполнить по сигналу вибрации подшипника, так как первый способ неприменим из-за особенности эксплуатации большинства крановых механизмов, а второй способ весьма трудоемкий и требует специального дорогостоящего оборудования.

2. Анализ существующих решений

Обнаружение зарождающихся дефектов подшипников качения, в основном, производится двумя методами – по появлению ударных импульсов и по модуляции сил трения. В низкооборотных подшипниках толщина масляного слоя ниже, чем в высокооборотных, а следовательно, разрывы масляной пленки и ударные импульсы возникают

гораздо чаще. Величина ударных импульсов в низкооборотных подшипниках гораздо ниже, но их число гораздо больше, и они накладываются друг на друга [1–4]. Практически таким образом идет процесс формирования сил «сухого» трения качения и, даже если удастся выделить высокочастотную вибрацию подшипника, имеющего естественный износ, обнаружить в нем компоненты, возбуждаемые ударными импульсами, крайне сложно. Это означает, что метод ударных импульсов для диагностики низкооборотных подшипников применим лишь в частных случаях и совершенно неприемлем для диагностики подшипников качения грузоподъемных машин из-за особенности их работы.

Механизм амплитуды модуляции сил трения в подшипниках качения с дефектами одинаков как у высокооборотных машин, так и у низкооборотных. И это несмотря на то, что в высокооборотных подшипниках трение имеет гидродинамическое происхождение, а в большинстве низкооборотных – механическое или, по крайней мере, комбинированное. Поэтому метод спектрального анализа колебаний мощности случайной вибрации, одинаково успешно может применяться для диагностики и высокооборотных, и низкооборотных подшипников качения.

Для оценки технического состояния подшипников качения разработано много методов. Все они различны по теоретическим предпосылкам, имеют разную трудоемкость, достоверность и аппаратное обеспечения. В общем случае можно выделить следующие методы оценки технического состояния подшипников и поиска дефектов [5]:

- по общему уровню вибрации;
- по средне квадратичному значению (СКЗ) виброскорости;
- по спектру вибросигнала;
- по соотношению пик/фон вибросигнала;
- по спектру огибающей сигнала.

Метод диагностики по общему уровню вибрации дает возможность простейшей оценки общего технического состояния. Такая диагностика дает возможность определить дефекты только на самой последней стадии развития, когда они приводят или уже привели к разрушению подшипников, следовательно, к повышению общего уровня вибрации.

Метод диагностики по СКЗ виброскорости позволяет выявлять дефекты подшипников, на самых последних стадиях их развития, когда общий уровень значительно вырастает. По сути применения мало отличается от предыдущего метода но является более точным в следствие применения более чувствительного оборудования. Так же требует минимальных затрат для внедрения и нет необходимости для специального обучения персонала.

Метод диагностики по спектру вибросигнала по сравнению с предыдущими методами позволяет выявить наряду с дефектами подшипников дефекты сопутствующих узлов и механизмов. Он позволяет начать диагностику развития дефектов примерно с середины второй стадии развития, когда энергия резонансных колебаний вырастает настолько, что становится заметна в общей картине частотного распределения вибросигнала. Для реализации данного метода необходим хороший спектроанализатор и подготовленный персонал.

Метод диагностики по соотношения пик/фон разрабатывался несколькими фирмами и имеет различные названия:

- HFD (High Frequency Detection – метод обнаружения высокочастотного сигнала);
- SPM (Shock Pulse Measurement – метод измерения ударных импульсов);
- SE (Spike Energy – метод измерения энергии импульса)

Лучшие разновидности данного метода позволяют выявлять дефекты подшипников качения на достаточно ранних стадиях развития. Приборы, которые реализуют данные методы диагностики, достаточно просты и дешевы.

Метод диагностики по спектру огибающей сигнала позволяет выявить дефекты в подшипниках качения на самых ранних стадиях развития, начиная с выхода дефекта на поверхность тел качения. Основой данного метода является специальный датчик вибросигнала и анализатор спектра, на который подается сигнал из датчика. В настоящее время этот метод считается классическим для анализа вибросигналов в подшипниках качения как самый эффективный из всех перечисленных методов. Так же он позволяет проводить более полный анализ оборудования, что делает его универсальным.

Для диагностики подшипников грузоподъемных машин более всего подходит метод диагностики по спектру огибающей, который позволяет проводить диагностику непосредственно на работающей машине с имитацией рабочих нагрузок.

3. Анализ определения диагностического состояния подшипников качения

В процессе работы состояние подшипников от идеального до полного отказа можно разделить на 5 стадий [5] (рис. 1) По вертикальной оси отложены значения виброскорости, по горизонтальной – стадии развития дефектов. Ломаная линия «1» соответствует уровню фона вибрации, линия «2» – уровню пиков вибрации.

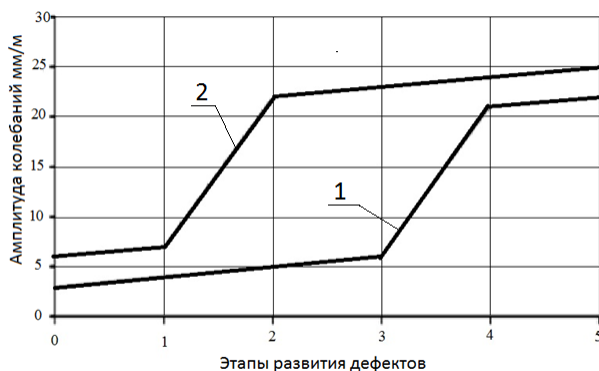


Рис. 1 – Этапы развития дефектов подшипников качения

2 стадия – ударные импульсы в подшипнике почти достигают своего максимального значения. Энергия импульсов уже столь велика, что ее достаточно для расширения зоны дефекта. Величина пиков вибросигнала практически не изменяется, уровень фона сигнала так же меняется мало. Дефект растет и развивается.

3 стадия – зона развития дефекта столь велика, что в подшипнике начинает расти сопротивление вращению, в следствии чего увеличиваются затраты энергии на вращение вала и, как результат увеличивается энергия вибрации в подшипнике, растет уровень фона вибросигнала.

4 стадия – последняя в развитии дефекта, который уже охватывает весь подшипник. Уровень фона вибрации уже почти сравнялся с уровнем пиков сигналов, Работа подшипников в этой зоне недопустима.

5 стадия – ожидание аварии, связанной с отказом подшипника. Возможно заклинивание или разрушение подшипника.

Все эти стадии состояния свойственны всем типам подшипников и видам дефектов. В зависимости от особенности эксплуатации есть некоторые различия в продолжительности развития дефектов в подшипниках, но при этом общая картина одна и та же.

При работе нагруженный подшипник имеет характерные 4 частоты вибрации, которые в дальнейшем можно использовать для диагностики его технического состояния. Эти частоты определяются по уже известным формулам.

Частота перекатывания тел качения по внешней обойме подшипника

$$F_H = \frac{N_{mk}}{2 \cdot F_1 \cdot \left(1 - \frac{D_{mk}}{D_c \cdot \cos(\varphi)}\right)}, \quad (1)$$

где N_{mk} - количество тел качения в одном ряду подшипника;

F_1 – частота вращения вала или оси;

D_{mk} – диаметр тел качения;

D_c – средний диаметр сепаратора

φ – угол контакта тел качения с обоймой.

Частота перекатывания тел качения по внутренней обойме подшипника

$$F_B = \frac{N_{mk}}{2 \cdot F_1 \cdot \left(1 + \frac{D_{mk}}{D_c \cdot \cos(\varphi)}\right)}. \quad (2)$$

Частота вращения сепаратора

$$F_c = \frac{1}{2 \cdot F_1 \cdot \left(1 - \frac{D_{mk}}{D_c \cdot \cos(\varphi)}\right)}. \quad (3)$$

Частота вращения тел качения

$$F_p = \frac{1}{2 \cdot F_1 \cdot \left(1 - \frac{D_{mk}^2}{D_c^2 \cdot \cos^2(\varphi)}\right)}. \quad (4)$$

В таблице 1 приведен перечень дефектов в подшипниках качения, которые диагностируются спектральным методом, и частотный фон каждого из дефектов. Дефекты приведены в «хронологическом» порядке в зависимости от этапов жизненного цикла подшипника. Вначале представлены дефекты монтажа подшипников, далее идут дефекты смазки, а за ними дефекты износа подшипников. Последними представлены аварийные дефекты, такие как раковины и сколы колец подшипников.

Таблица 1 – Распределение частотного фона в зависимости от дефекта в подшипнике качения

Наименование дефекта подшипника	Тип сигнала	Основная частота	Наличие в сигнале гармоник	Порог сильного дефекта
Перекося наружного кольца при посадке	Спектр огибающая ⁺	$k \times F_n$	$k = 1,2$	16 %
Неоднородный радиальный натяг	Спектр огибающая ⁺	$k \times F_1$	$k = 1,2$	13 %
Проскальзывание в посадочном месте	Огибающая	$k \times F_1$	$k = 1,2,3$	9 %
Ослабление крепления подшипника	Спектр	$k \times F_1$	$k = 0.5,1,2,3$	13 %
Заедание в подшипнике и уплотнениях	Спектр	$k \times F_1$	$k = 0.5,1,1.5,2,2.5,3$	13 %
Проблема смазки	Фон вибрации	-	-	20 dB
Увеличенные зазоры в подшипнике	Спектр	$k \times F_1$	$k = 1,2,3,4,5,6$	13 %
Износ поверхности наружного кольца	Огибающая	F_n	-	16 %
Износ поверхности тел качения	Огибающая	F_c или $F_1 - F_c$	$k = 1,2,3$	15 %
Износ поверхности внутреннего кольца	Огибающая	$k \times F_1$	$k = 1,2,3,4,5,6$	13 %
Дефект группы поверхности трения	Огибающая	$F_n + F_v$ и $F_n + F_1$	$k = 1,2,3,4,5,6$	16%
Раковины и сколы на наружном кольце	Огибающая	$k \times F_n$	$k = 1,2,3$	16%
Раковины и сколы на внутреннем кольце	Огибающая	$k \times F_v$	$k = 1,2,3$	15%
Раковины и сколы на телах качения	Огибающая	$k \times F_p$	$k = 1,2,3$	15%

4. Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились на механизме передвижения мостового крана. Особенности работы опорных подшипников в узлах букс механизма передвижения заключаются в следующем:

- скорость вращения опорных подшипников составляет не более 1,5 об/с., что ограничивает возможности применения методов вибродиагностики по высоким частотам;
- большую часть рабочего времени механизм передвижения мостового крана находится в режиме ускорения или торможения, в результате чего изменяется скорость вращения подшипников в буксах крановых колес, что не дает возможности четко определить основные частоты дефектов из за их плавного изменения;
- нагрузка, которую испытывает опорный подшипник качения механизма перемещения, является переменной, так как на нее влияет неровности подкранового пути, прохождение колеса через стыки рельсов, и контакт реборд ходовых колес крана с рельсами;

• время установившегося режима работы, при котором предоставляется возможность наиболее качественно провести вибродиагностическое исследование в подшипников в узлах букс крановых колес ограничено 2-5 оборотами ходового колеса в зависимости от качества подкранового пути.

С учетом всех этих особенностей было подобрано оборудование, в котором предусмотрена возможность регистрации сигнала в течение продолжительного периода времени, с возможностью последующего просмотра записанного сигнала и выбора для анализа участков, при которых подшипники вращаются в установившихся режимах работы, что обеспечит наибольшую достоверность исследования.

Для регистрации вибрации в подшипниках в корпус буксы кранового колеса были установлены два вибродатчика Д 14, которые своими щупами упирались во внешнее кольцо подшипника качения. Первый датчик предназначался для фиксирования осевой вибрации, а второй для фиксирования радиальной вибрации в подшипниках. Сигнал от двух датчиков передавался на двухкаскадный усилитель с последующей трансляции сигнала на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) компьютера.

Установка датчиков для регистрации шума и вибрации подшипника ходового колеса мостового крана приведена на рисунке 2., а принципиальная схема подключения показана на рисунке 3. Интерфейс программы PowerGraph представлен на рисунке 4.

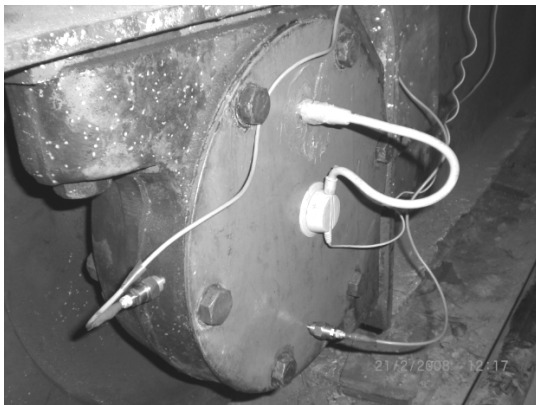


Рис. 2 – Установка датчиков регистрации шума и вибрации на буксу ходового колеса мостового крана

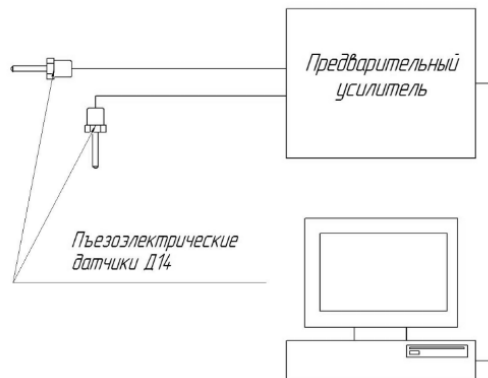


Рис. 3 – Схема подключения вибродатчиков к АЦП компьютера

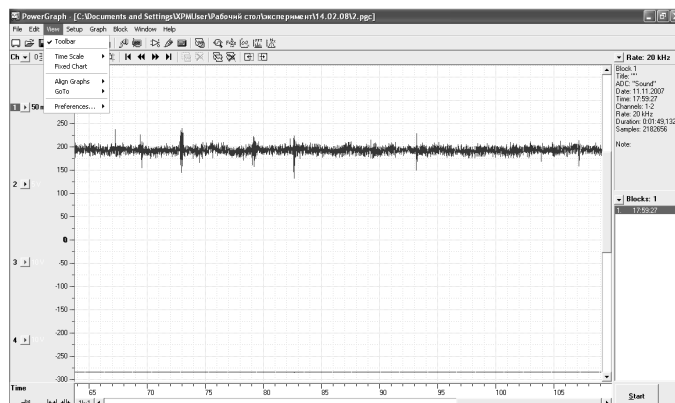


Рис. 4 – Интерфейс программы для регистрации результатов измерений

В качестве программы для регистрации и анализа сигнала была выбрана программа PowerGraph 2.1, которая позволяет не только отображать сигнал в режиме реального времени с возможностью масштабирования, но и позволяет производить оцифровку сигнала с возможностью дальнейшей обработки результатов в различных стандартных приложениях. Так же программа PowerGraph 2.1, позволяет производить запись сигнала, длина записи ограничена только аппаратными возможностями компьютера, и объемом жесткого диска.

5. Результаты экспериментальных исследований

Сущность метода иллюстрируется рисунком 6, на котором показаны сигналы высокочастотной вибрации подшипника качения без дефектов и с дефектами, а также спектральный анализ этих сигналов. В бездефектном подшипнике мощность сигнала не имеет периодических низкочастотных колебаний, а в дефектном эти колебания достаточно сильны и хорошо выделяются в спектре огибающей в виде гармонических составляющих, имеющих подшипниковые частоты или их комбинации. Вид дефекта определяется частотами обнаруживаемых составляющих, величина дефекта – глубиной модуляции мощности вибрации, то есть соотношением амплитуд гармонических и случайных составляющих [6].

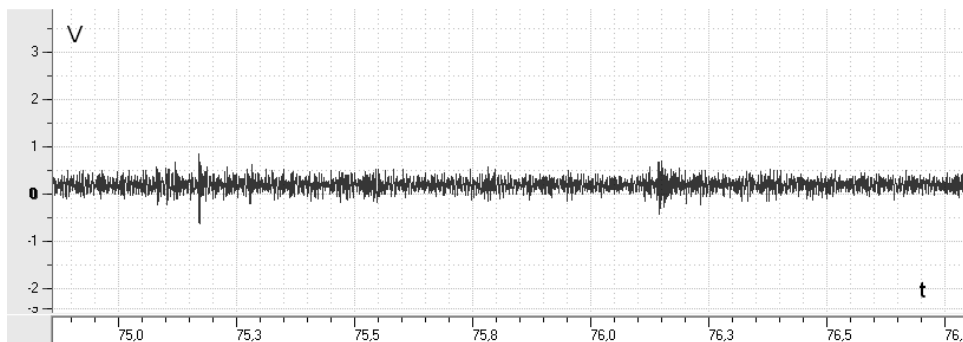


Рис. 6а – Вибрация новых подшипников. Отсутствует модуляция и ударные импульсы

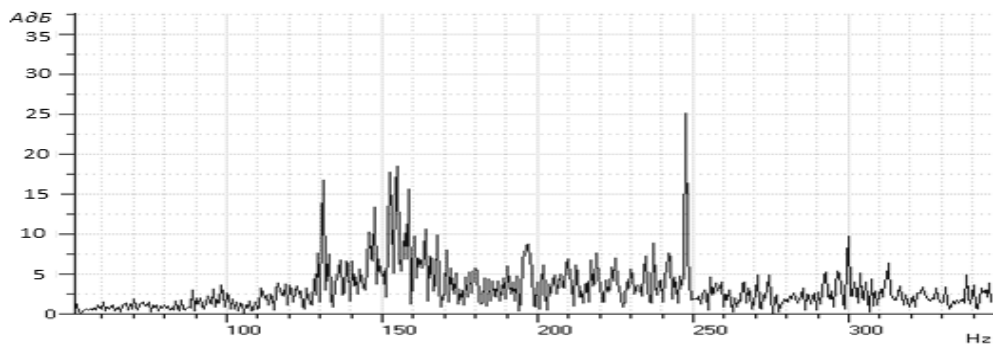


Рис. 6б – Спектральный анализ вибрации новых подшипников

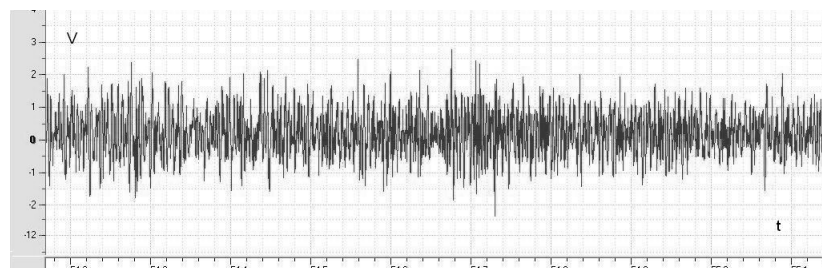


Рис. 6с – Вибрация изношенных подшипников. Модуляция и ударные импульсы ярко выражены

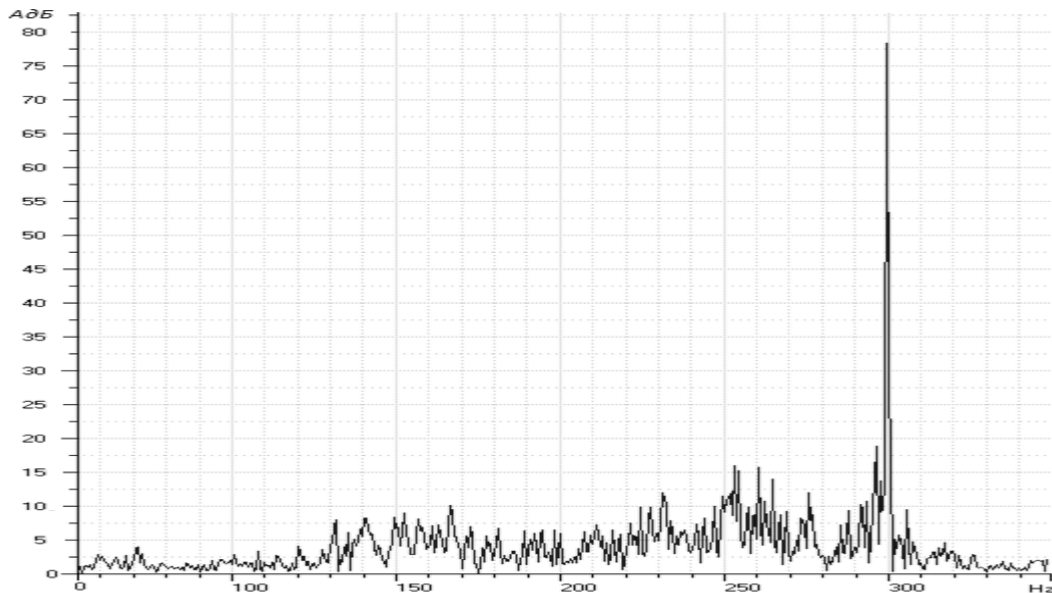


Рис. 6d – Спектральный анализ вибрации изношенных подшипников

Метод позволяет разделить возникающие при эксплуатации дефекты каждой из поверхностей качения на две группы – износ, характеризующийся плавной модуляцией сил трения, и раковины (трещины), характеризующиеся импульсным изменением сил трения. Кроме того метод позволяет обнаружить и определить характер динамических нагрузок, действующих на подшипник со стороны механизма. В список дефектов, обнаруживаемых по динамическим нагрузкам на поверхности качения входят и дефекты монтажа подшипника, такие как перекос колец подшипника, повышенный (неоднородный) радиальный или осевой натяг, и другие.

Выводы

Из известных методов диагностики подшипников качения крановых колес по вибрации наибольшую эффективность имеет первый метод поэтапного накопления результатов спектрального анализа в результате работы подшипников. В результате применения этого метода диагностика проводится с минимальными ошибками.

Основные особенности диагностики низкооборотных подшипников определяются нестабильностью режимов работы машины и низким уровнем высокочастотной вибрации.

Качество диагностики низкооборотных подшипников методом спектрального анализа растет с повышением динамического диапазона и линейности технических средств спектрального анализа сигналов вибрации.

Список использованных источников:

1. Барков А. В. Диагностика и прогноз состояния подшипников качения по сигналу вибрации / А. В. Барков // Судостроение. – 1985. – № 3. – С. 21–23.
2. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования / А. А. Александров, Н. А. Барков, В. А. Баркова, В. А. Шафранский ; науч. ред. А. В. Барков. – Л. : Судостроение, 1986. – 273 с.
3. Barkov A. V. Condition Assessment and Life Prediction of Rolling Element Bearings / А.

V. Barkov, N. A. Barkova, J. S. Mitchell // *Sound & Vibration*. – 1995. – June. – P. 10–17; September. – P. 27–31.

4. Барков А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации : учеб. пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев ; С.-Петербург. гос. морской техн. ун-т. – СПб. : [б. и.], 2000. – 158 с. : ил.

5. Яценко В. А. Особенности определения технического состояния подшипников качения коренного вала подъемных машин / В. А. Яценко, В. А. Пристром, В. Ф. Рубан // Проблемы експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок : зб. наук. пр. – Донецьк: НДІГМ ім. М. М. Федорова, 2007. – С. 84–90.

6. Azotsev A. Y. Improving the Accuracy of Rolling Element Bearing Condition Assessment / A. Y. Azotsev, A. V. Barkov, D. L. Carter // *Proceedings of the 20th Annual Meeting of the Vibration Institute, Saint Louis, Missouri, USA*. – 1996. – P. 27–30.

Стаття надійшла до редакції 14 травня 2014 р.