

DOI: 10.24412/2077-8481-2023-4-41-52

УДК 621.822.6

А. П. ПРУДНИКОВ¹, канд. техн. наук, доц.

Б. М. МОРГАЛИК², канд. техн. наук, доц.

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²РУП Могилевское отделение БелЖД (Могилев, Беларусь)

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ И ДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Аннотация

Изучены основные виброакустические методы диагностирования подшипников качения. Приведены результаты диагностирования рассматриваемыми методами для нового и дефектных подшипников. Выполнено сопоставление результатов диагностирования, полученных с помощью встроенного в виброанализатор программного обеспечения и реализованных математических алгоритмов в Matlab.

Ключевые слова:

вибрация, подшипник, дефект, диагностика.

Для цитирования:

Прудников, А. П. Мониторинг состояния и диагностика подшипников качения / А. П. Прудников, Б. М. Моргалик // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 41–52.

Вибрационная диагностика является одним из основных способов мониторинга технического состояния элементов приводных систем, позволяя обнаруживать скрытые дефекты на всех стадиях их появления без демонтажа технологического оборудования.

Целью данного исследования являлось рассмотрение применения основных виброакустических методов диагностирования подшипников качения.

Объектом исследования являлся шариковый подшипник качения, основные параметры которого приведены в табл. 1.

Для проведения экспериментального исследования и определения параметров вибрационного сигнала от диагностированного подшипника использовался испытательный стенд на базе электродвигателя, порошкового тормоза, цилиндрического редуктора, пьезоакселерометра, датчика крутящего момента и частоты вращения. Технические характеристики испытательного стенда описаны в [1]. Для записи и обработки вибрационных сигналов применялись измерительный комплекс В-363 и ви-

роанализатор BALTECH VP-3470. Оба прибора позволяют измерять виброускорение, виброскорость и виброперемещение.

На рис. 1 приведена используемая точка измерения вибрации на корпусе редуктора вблизи диагностируемого подшипника.

Экспериментальное исследование проводилось с новым подшипником и подшипниками со следующими дефектами:

- на беговой дорожке наружного кольца был нанесен дефект в виде лунки диаметром 1,5 мм и глубиной 0,1 мм (рис. 2, а);
- с износом беговой дорожки внутреннего кольца;
- со сломанным звеном сепаратора (рис. 2, б);
- с некачественной смазкой.

Рассматриваемые дефекты могут возникать в процессе эксплуатации и монтажа в результате образования контактно-усталостных повреждений, попадания в смазку подшипника инородных твердых тел, ударных нагрузок.

Табл. 1. Параметры исследуемого подшипника качения

Параметр	Значение
Обозначение	6207
Внутренний диаметр, мм	35
Наружный диаметр, мм	72
Ширина, мм	17
Количество шариков	9
Диаметр шарика, мм	11,11

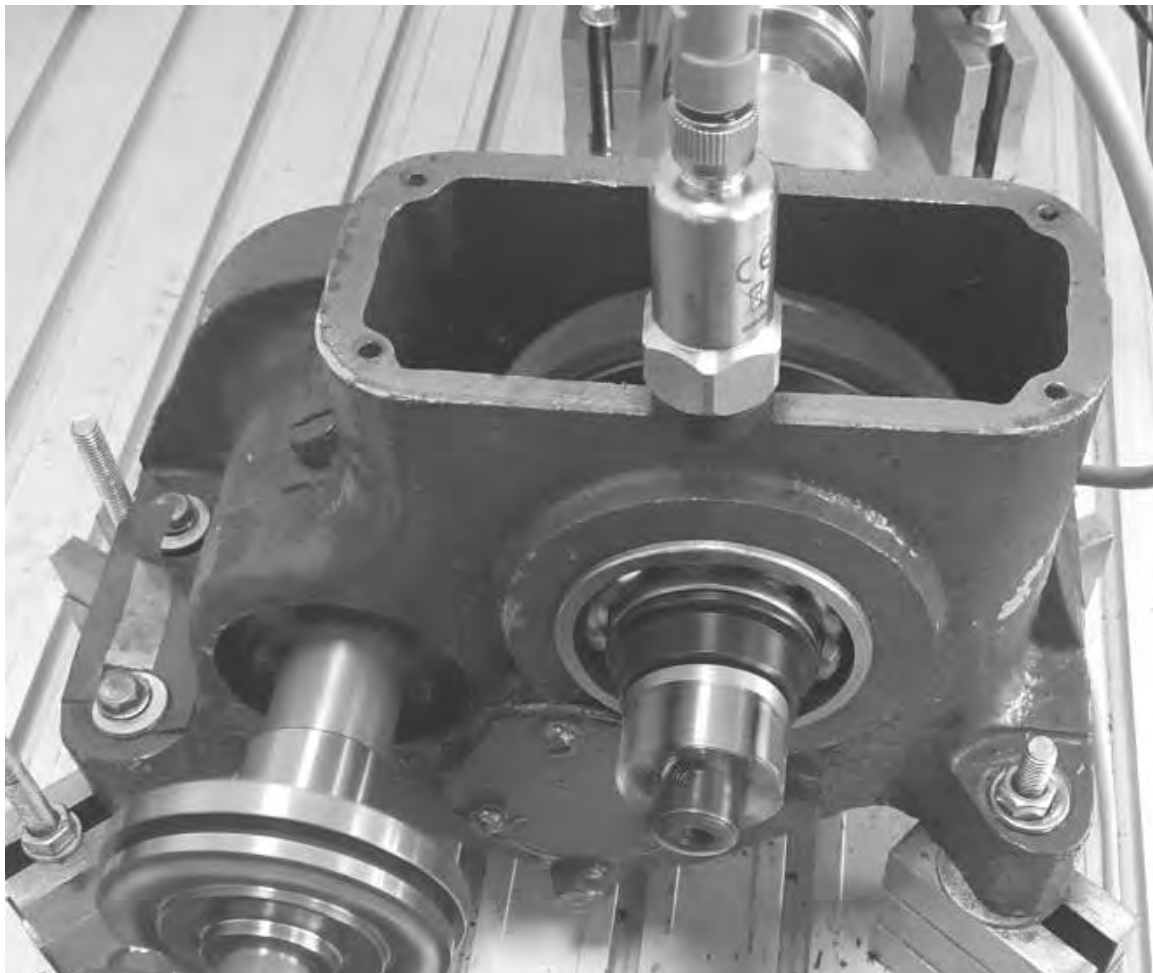


Рис. 1. Контрольная точка измерения вибрации на корпусе редуктора на испытательном стенде

а)



б)



Рис. 2. Нанесенные дефекты на подшипники качения: а – лунка на дорожке качения наружного кольца; б – сломанное звено сепаратора

Рассмотрим основные виброакустические методы диагностирования подшипников качения.

Диагностика по общему уровню вибрации. Данный способ оценки состояния подшипника заключается в контроле среднего квадратического значения (СКЗ) виброскорости. Его преимуществами являются низкие требования к квалификации персонала, проводящего диагностику, и возможность использовать виброметры простой конструкции. К недостатку метода относится возможность выявления дефектов только на последней стадии их развития. Крите-

рием выхода подшипника из строя является превышение уровня вибрации нормативного значения. Стандартами предусмотрено, что изменение уровня вибрации более чем в 1,6 раза свидетельствует об изменении технического состояния механизма [3, с. 16].

Диагностика по методу пик-фактора. Данный метод основывается на оценке отношения пика амплитуды временного сигнала (положительного или отрицательного) к СКЗ сигнала. Возможность обнаружения дефекта связана с тем, что с его развитием СКЗ сигнала возрастает с отставанием от роста пика

амплитуды сигнала. Достижение отношения пика амплитуды к СКЗ сигнала максимального значения характеризует переход дефекта в последнюю стадию развития. В качестве временного сигнала целесообразно использовать виброускорение, лучше всего отражающее дефекты, имеющие ударную природу. Преимуществами данного метода являются: низкие требования к квалификации персонала и техническим характеристикам виброметров; возможность выявления дефектов на середине этапа их развития; в отличие от спектрального анализа, данный метод хорошо обнаруживает дефекты, имеющие ударную природу. Недостатком метода является невозможность определения элемента, для которого возник дефект.

Диагностика по методу эксцесса. Оценка степени развития дефекта в подшипнике выполняется по коэффициенту эксцесса сигнала виброускорения [4, с. 29]. Метод эксцесса позволяет достаточно точно оценить состояние смазки и загрязнения подшипника на всех этапах развития дефектов. Исходя из практики виброакустического диагностирования, были определены следующие пороговые значения для коэффициента эксцесса: менее 2,5 – подшипник исправен; от 2,5 до 5 – состояние подшипника требует регулярного контроля; 5 и более – эксплуатация подшипника недопустима [5].

Диагностика по спектру сигнала. По характерным гармоникам в спектре сигнала можно различить каждый дефект в подшипнике качения. Преимуществом спектрального анализа является то, что он позволяет выявлять большое количество различных дефектов, в том числе и место их возникновения. Недостатком метода являются высокие требования к квалификации персонала, проводящего диагностику.

Диагностика по спектру огибающей сигнала. Большая часть необходимой информации для оценки состояния подшипника находится в низкочастот-

ной модулирующей составляющей спектра вибросигнала. Для получения этой информации и применяется спектральный анализ огибающей вибросигнала. Преимуществами данного метода являются возможность обнаружения дефекта на стадии зарождения, а также определение элемента подшипника качения, на котором расположен дефект.

Каждый из перечисленных методов имеет свои положительные стороны и применение их в совокупности позволяет заблаговременно обнаружить дефектный подшипник, обеспечивая требуемую работоспособность и надежность приводной техники.

Виброанализатор BALTECH VP-3470 позволяет выполнять обработку сигнала вибрации по описанным методам с помощью встроенного программного обеспечения. Его недостатком является то, что анализ полученных данных возможен только в программном обеспечении BALTECH Expert и не позволяет экспортировать данные для обработки в сторонних приложениях.

Вибрационный сигнал, полученный с помощью измерительного комплекса В-363, для вывода необходимой диагностической информации по вышеописанным методам обрабатывался с помощью математического алгоритма, реализованного в пакете прикладных программ Matlab.

Далее представлены результаты вибродиагностики по вышеописанным методам для нового подшипника.

Получение вибрационного сигнала с помощью измерительного комплекса В-363 для случаев без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 0,46 и 0,42 мВ;
 - пик-фактор составил 3,72 и 3,66;
 - коэффициент эксцесса составил 1,12 и 0,96;
 - спектр сигнала приведен на рис. 3.
- Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 1,96 и 2,32.

Результаты обработки вибрационного сигнала с помощью виброанализа-

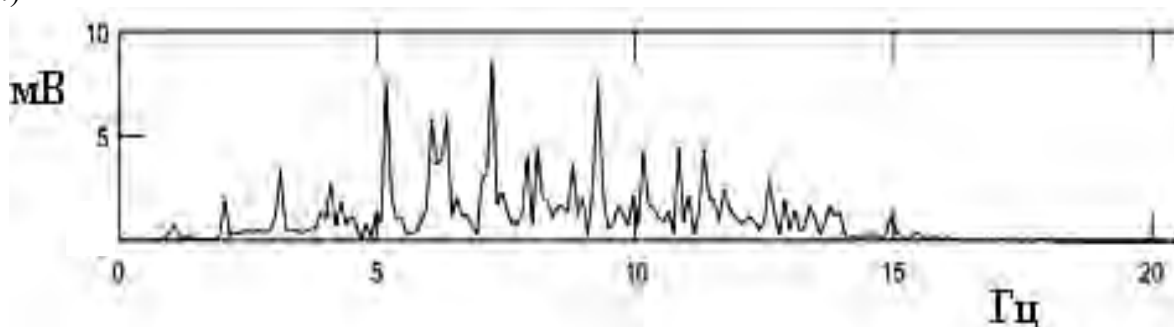
тора BALTECH VP-3470 для случаев без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 1,62 и 1,45 м/с;
- пик-фактор составил 4,49 и 4,53;
- коэффициент эксцесса соста-

вил 0,42 и 0,58;

– спектр огибающей сигнала приведен на рис. 4. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 9,97 и 17,16.

а)



б)

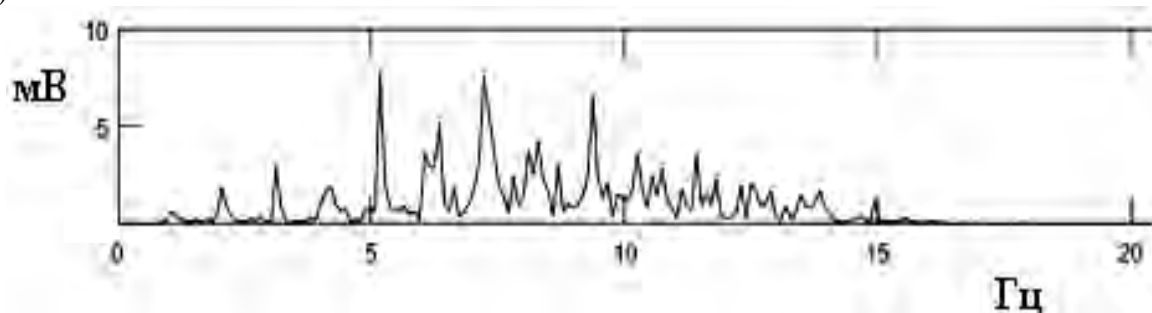
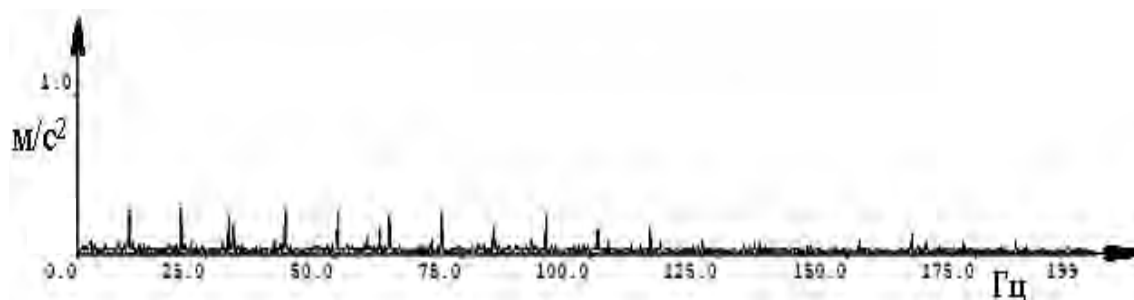


Рис. 3. Спектр сигнала, полученного с помощью измерительного комплекса В-363, для нового подшипника: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

а)



б)

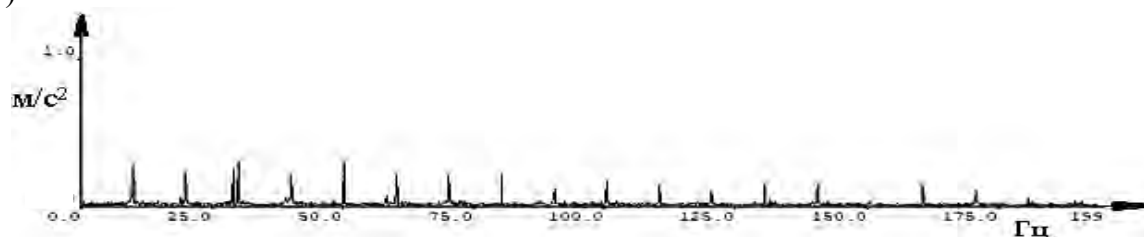


Рис. 4. Спектр огибающей сигнала, полученного с помощью виброанализатора BALTECH VP-3470, для нового подшипника: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

Результаты вибродиагностики по вышеописанным методам для подшипника с нанесенным дефектом в виде лунки на беговой дорожке наружного кольца.

Получение вибрационного сигнала с помощью измерительного комплекса В-363 для случаев без нагрузки

и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 0,44 и 0,46 мВ;
- пик-фактор составил 4,1 и 3,77;
- коэффициент эксцесса составил 1,66 и 1,13;
- спектр сигнала приведен на рис. 5. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 2,05 и 1,62.

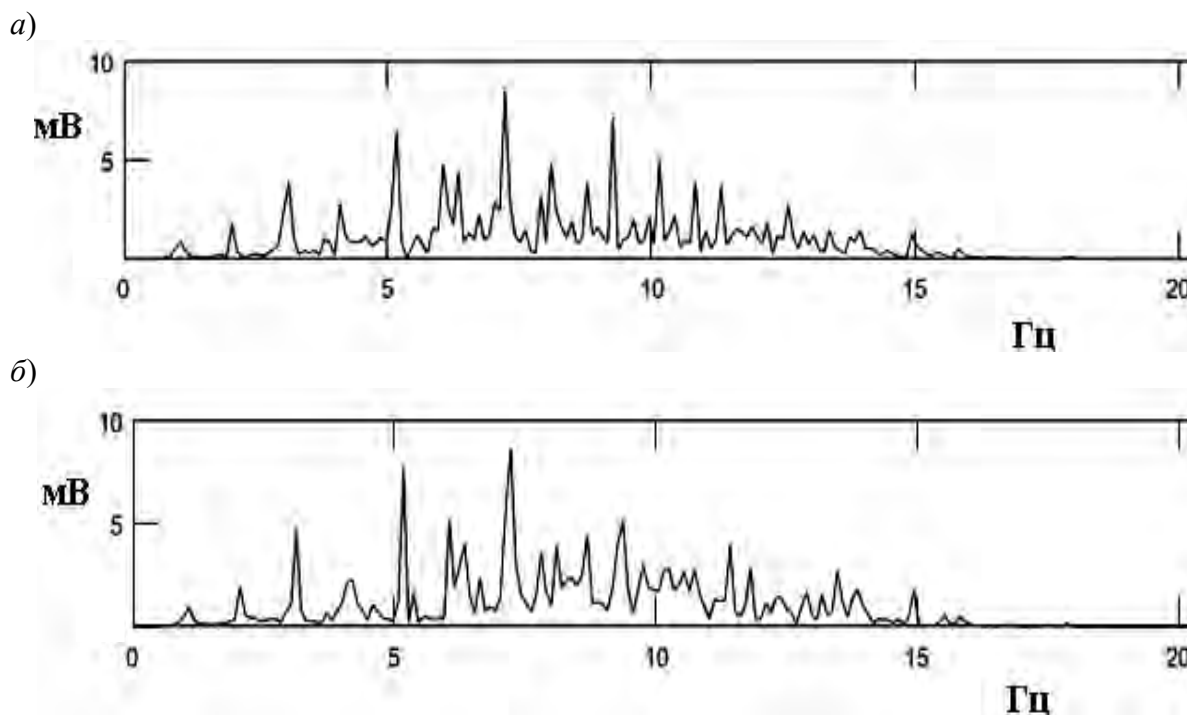


Рис. 5. Спектр сигнала, полученного с помощью измерительного комплекса В-363, для подшипника с дефектом в виде лунки на беговой дорожке наружного кольца: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

Результаты обработки вибрационного сигнала с помощью виброанализатора BALTECH VP-3470 для случаев эксперимента без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 1,47 и 1,54 м/с;
- пик-фактор составил 4,84 и 4,73;
- коэффициент эксцесса составил 0,84 и 0,45;
- спектр огибающей сигнала приведен на рис. 6. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 7,23 и 13,44.

Результаты вибродиагностики по

вышеописанным методам для подшипника с износом беговой дорожки внутреннего кольца.

Получение вибрационного сигнала с помощью измерительного комплекса В-363 для случаев без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 0,43 и 0,48 мВ;
- пик-фактор составил 5,78 и 4,2;
- коэффициент эксцесса составил 1,6 и 1,51;
- спектр сигнала приведен на рис. 7. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 1,88 и 1,62.

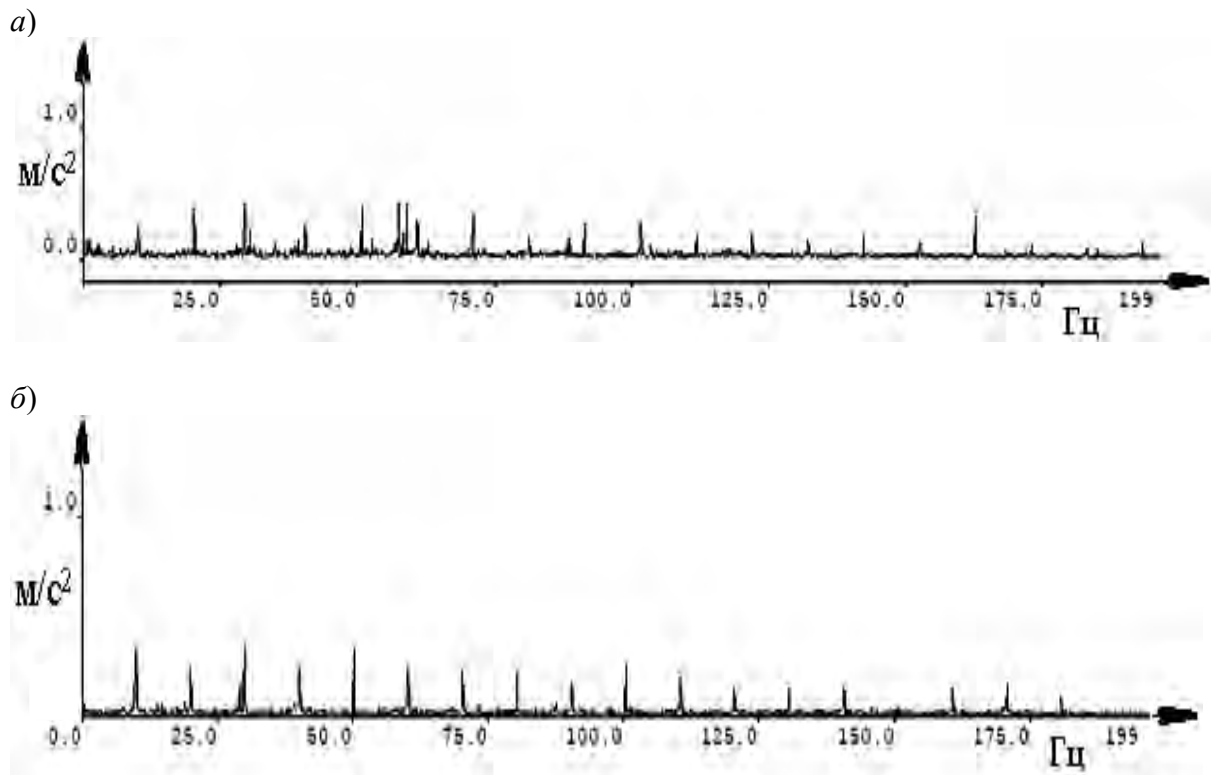


Рис. 6. Спектр огибающей сигнала, полученного с помощью виброанализатора BALTECH VP-3470, для подшипника с дефектом в виде лунки на беговой дорожке наружного кольца: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

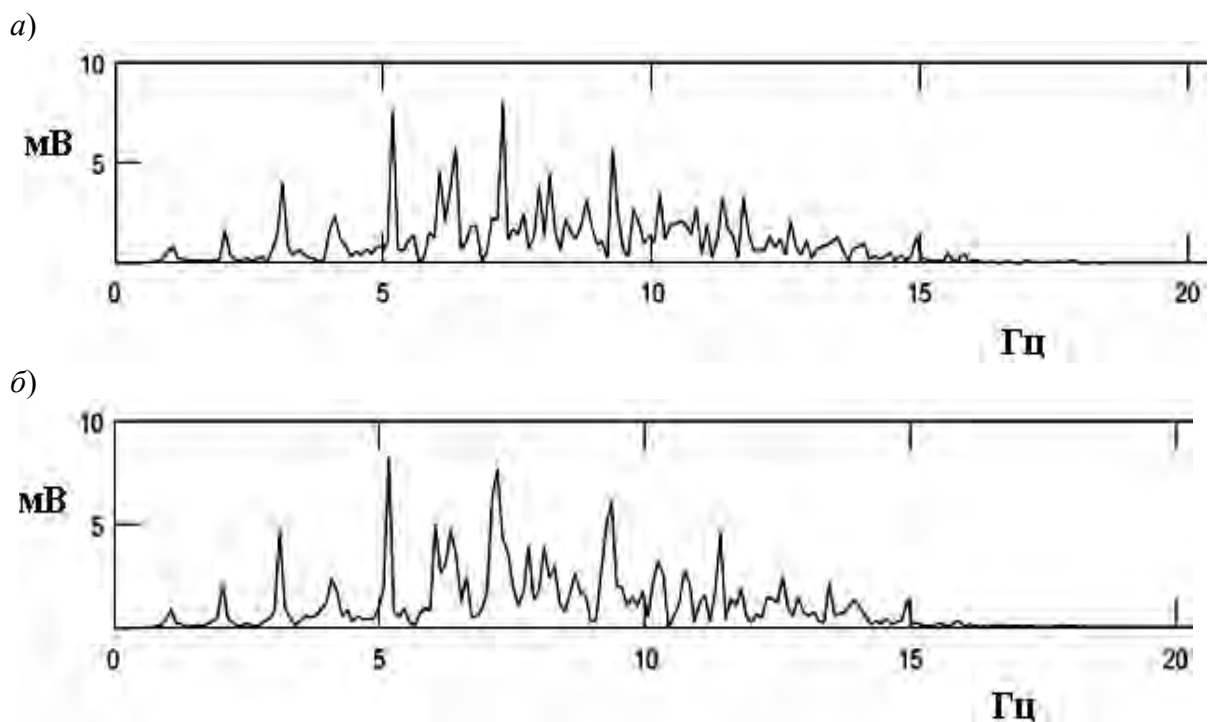


Рис. 7. Спектр сигнала, полученного с помощью измерительного комплекса В-363, для подшипника с износом беговой дорожки внутреннего кольца: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

Результаты обработки вибрационного сигнала с помощью виброанализатора BALTECH VP-3470 для случаев эксперимента без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 0,89 и 1,32 м/с;
- пик-фактор составил 6,96 и 4,86;
- коэффициент эксцесса составил 1,08 и 0,17;
- спектр огибающей сигнала приведен на рис. 8. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 6,59 и 13,82.

Результаты вибродиагностики по вышеописанным методам для подшипника со сломанным звеном сепаратора.

Получение вибрационного сигнала с помощью измерительного комплекса В-363 для случаев без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 0,43 и 0,42 мВ;
- пик-фактор составил 6,19 и 3,87;
- коэффициент эксцесса составил 1,56 и 0,95;

– спектр сигнала приведен на рис. 9. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 1,54 и 2,48.

Результаты обработки вибрационного сигнала с помощью виброанализатора BALTECH VP-3470 для случаев эксперимента без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 1,08 и 1,74 м/с;
- пик-фактор составил 7,43 и 4,03;
- коэффициент эксцесса составил 0,96 и 0,11;

– спектр огибающей сигнала приведен на рис. 10. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 11,95 и 17,86.

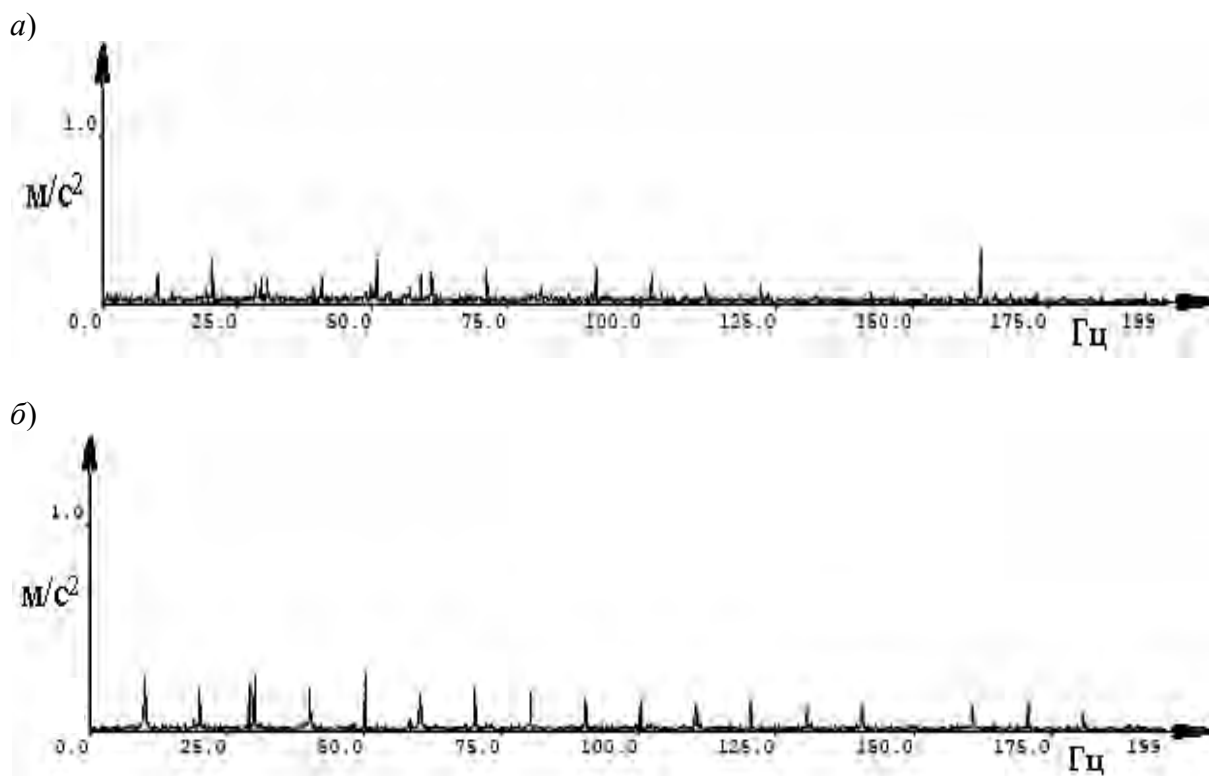


Рис. 8. Спектр огибающей сигнала, полученного с помощью виброанализатора BALTECH VP-3470, для подшипника с износом беговой дорожки внутреннего кольца: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

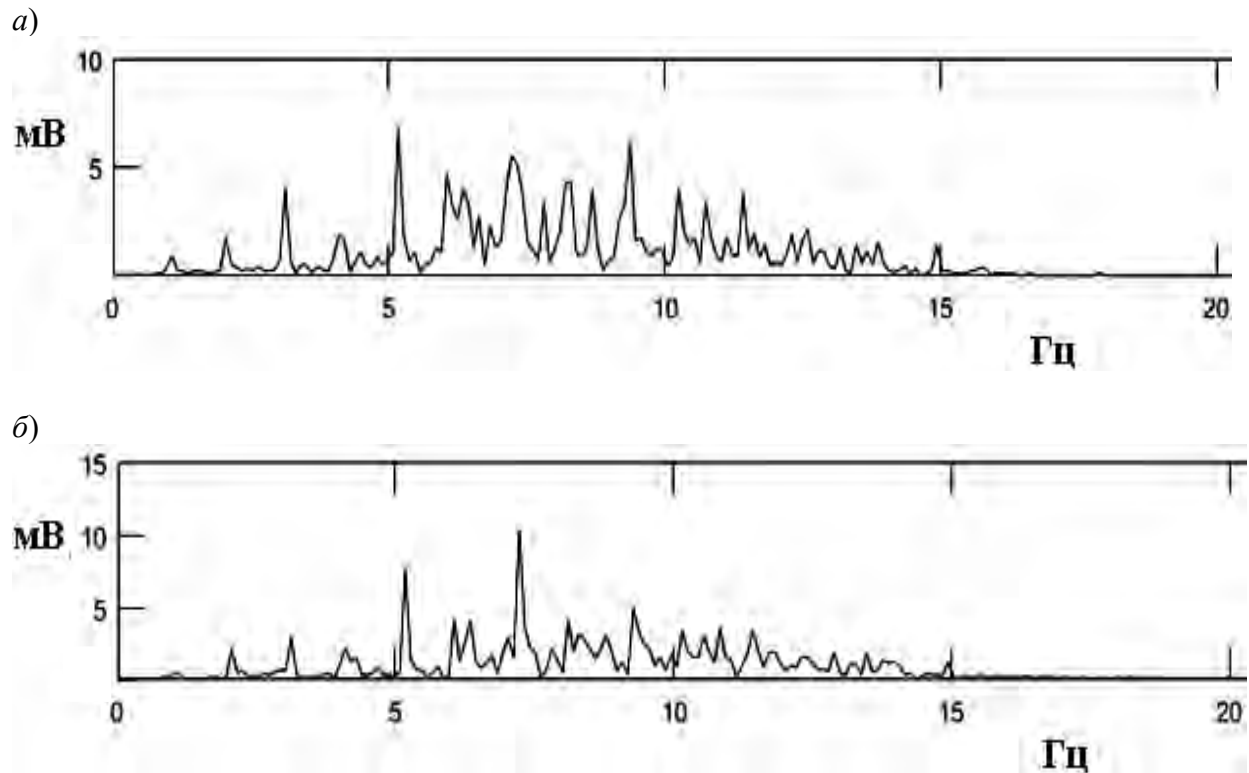


Рис. 9. Спектр сигнала, полученного с помощью измерительного комплекса В-363, для подшипника со сломанным звеном сепаратора: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

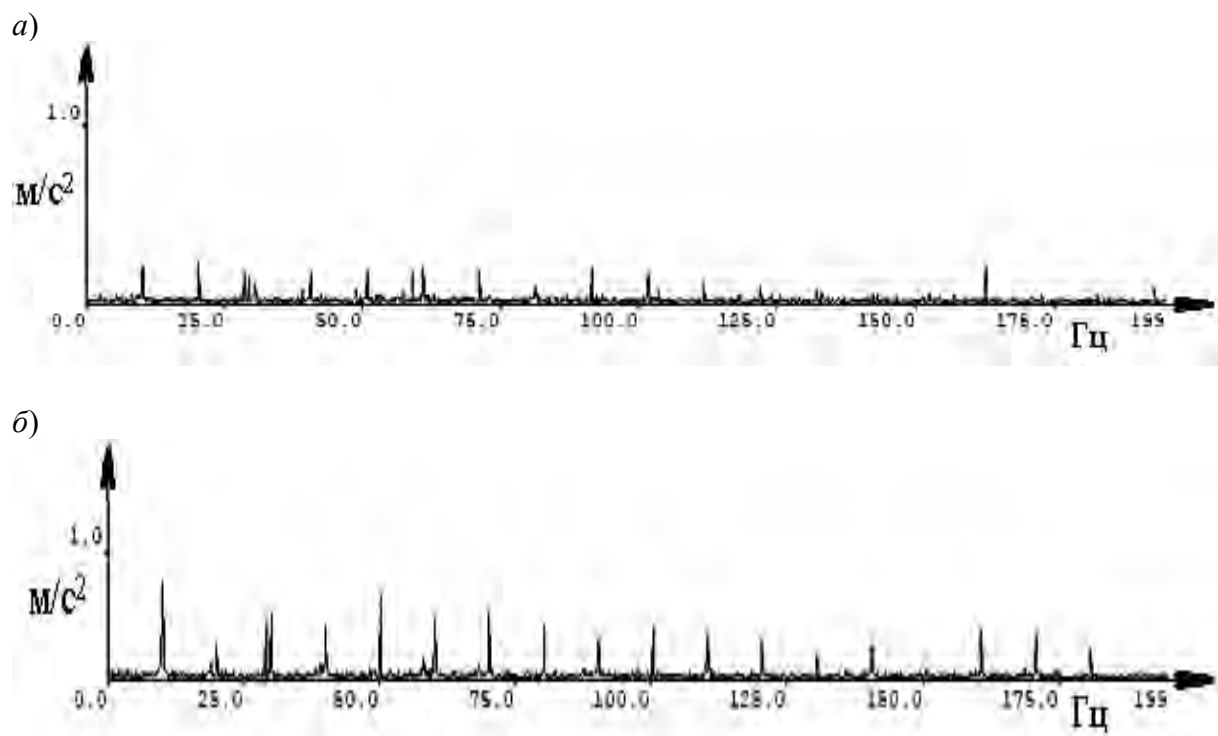


Рис. 10. Спектр огибающей сигнала, полученного с помощью виброанализатора BALTECH VP-3470, для подшипника со сломанным звеном сепаратора: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

Результаты вибродиагностики по вышеописанным методам для подшипника с некачественной смазкой.

Получение вибрационного сигнала с помощью измерительного комплекса В-363 для случаев без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 0,44 и 0,48 мВ;
- пик-фактор составил 3,81 и 4,06;
- коэффициент эксцесса составил 0,98 и 2,37;
- спектр сигнала приведен на рис. 11. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 2,29 и 2,08.

Результаты обработки вибрационного сигнала с помощью виброанализатора BALTECH VP-3470 для случаев эксперимента без нагрузки и с нагрузкой на валу соответственно:

- СКЗ составило 1,26 и 1,37 м/с;
- пик-фактор составил 5,24 и 4,41;
- коэффициент эксцесса составил 0,61 и 2,12;
- спектр огибающей сигнала приведен на рис. 12. Отношение пика амплитуды к СКЗ сигнала составляет 10,36 и 17,15.

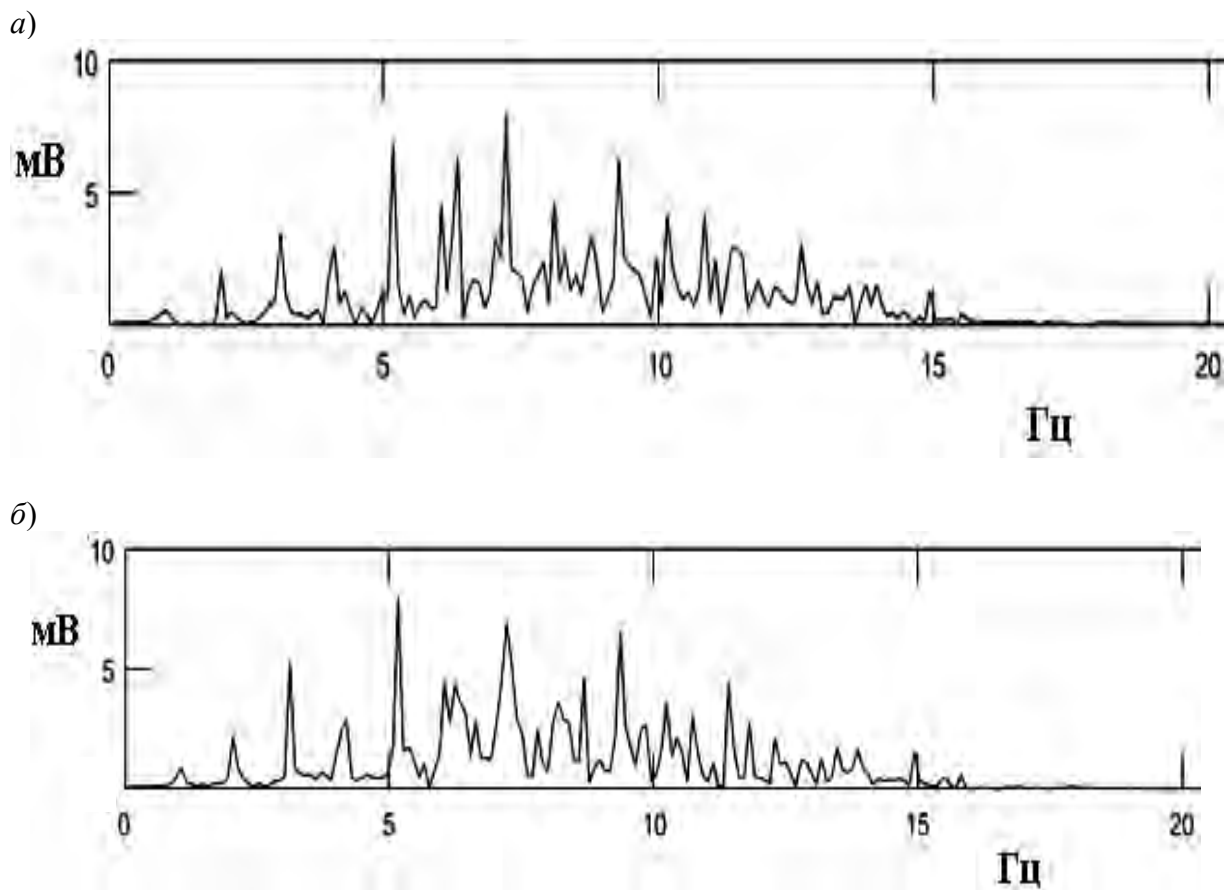


Рис. 11. Спектр сигнала, полученного с помощью измерительного комплекса В-363, для подшипника с некачественной смазкой: а – без нагрузки; б – с нагрузкой

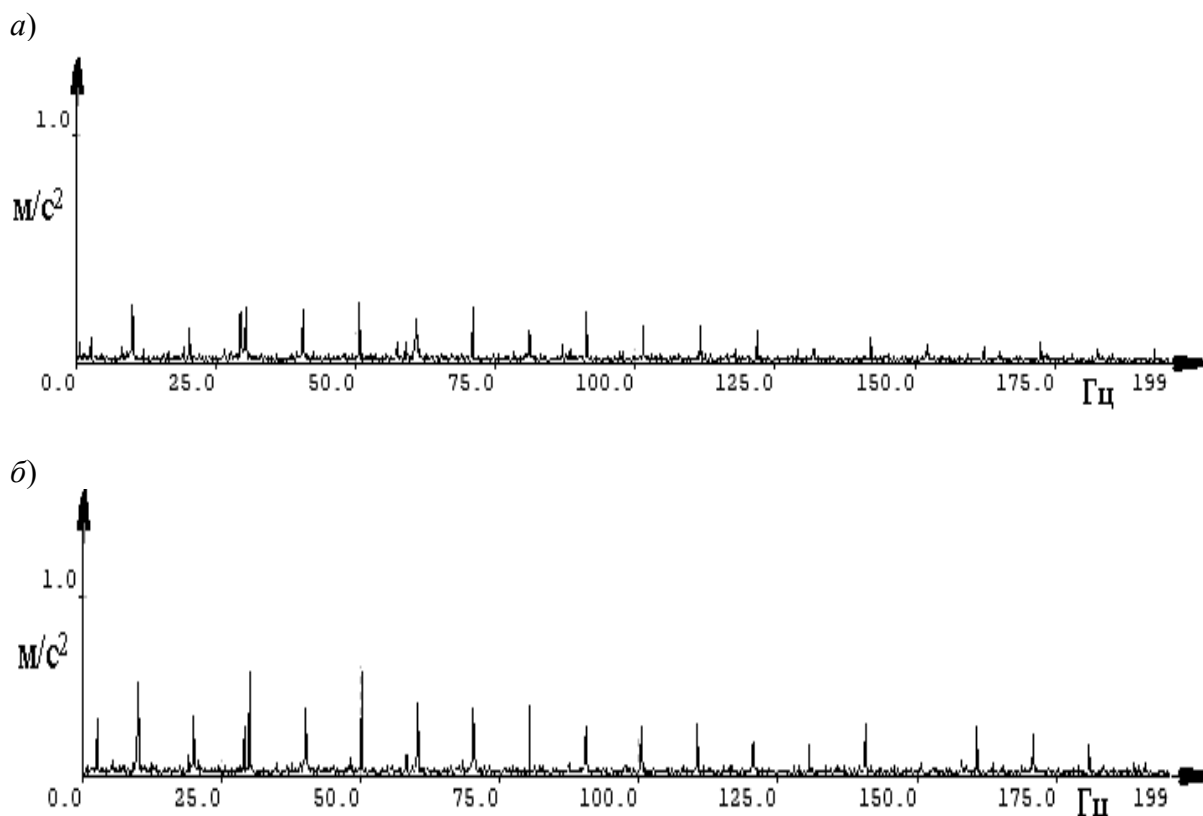


Рис. 12. Спектр огибающей сигнала, полученного с помощью виброанализатора BALTECH VP-3470, для подшипника с некачественной смазкой: *а* – без нагрузки; *б* – с нагрузкой

Анализ полученных результатов показывает, что диагностика по общему уровню вибрации (СКЗ виброскорости) не позволяет выявить приведенные дефекты. Также не удалось выявить ни одним из рассмотренных виброакустических методов диагностирования дефект в виде лунки на беговой дорожке наружного кольца с диаметром 1,5 мм и глубиной 0,1 мм.

Износ беговой дорожки внутреннего кольца проявился при отсутствии нагрузки на валу при диагностике по методу пик-фактора. Превышение величины пик-фактора, по сравнению с новым подшипником, составило 1,6 при анализе сигнала с обоих измерительных приборов.

Дефект в виде сломанного звена сепаратора проявился также при отсутствии нагрузки на валу при диагностике по методу пик-фактора. Превышение

величины пик-фактора, по сравнению с новым подшипником, составило 1,7 при анализе сигнала с обоих измерительных приборов. Диагностика по спектру огибающей сигнала показала превышение, по сравнению с новым подшипником, пика амплитуды к СКЗ сигнала в 12 раз при отсутствии нагрузки на валу и в 18 раз при наличии нагрузки. На графике спектра сигнала для случая с нагрузкой на валу максимальная амплитуда была в 1,5 раза больше по сравнению с новым подшипником.

Диагностика подшипника качения с некачественной смазкой позволила выявить наличие дефекта по коэффициенту эксцесса при наличии нагрузки на валу и по спектру огибающей сигнала (пик амплитуды к СКЗ сигнала превысил эквивалентную величину для нового подшипника в 10 раз при отсутствии нагрузки на валу и в 17 раз при наличии

нагрузки). Также на спектре огибающей сигнала наблюдался пик на оборотной частоте.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило возможность применения методов (пик-фактор, коэффициент эксцесса, спектральный ана-

лиз сигнала) для обнаружения рассмотренных дефектов. Также подтверждена адекватность реализованных математических алгоритмов в Matlab на базе рассмотренных методов для анализа сигнала, полученного с помощью измерительного комплекса В-363.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Моргалик, Б. М.** Виброакустический контроль состояния элементов подшипников качения / Б. М. Моргалик, А. П. Прудников, Д. М. Ковалев // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 3 (76). – С. 60–68.
2. **Гаврилин, А. Н.** Диагностика технологических систем: учебное пособие: в 2 ч. / А. Н. Гаврилин, Б. Б. Мойзес. – Томск: Том. политехн. ун-т, 2014. – Ч. 2. – 128 с.
3. **Бранцевич, П. Ю.** Цифровая обработка вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич. – Минск: Бестпринт, 2022. – 297 с. : ил.
4. **Попов, В. А.** Теория вероятностей: учебное пособие: в 2 ч. Ч. 2: Случайные величины / В. А. Попов. – Казань: Казан. ун-т, 2013. – 45 с.
5. **Дедушев, С.** Экспертные вибродиагностические системы входного контроля подшипников / С. Дедушев // ТехСовет. – 2010. – № 9. – С. 20–22.

Статья сдана в редакцию 12 сентября 2023 года

Контакты:

prudnikovap85@gmail.com (Прудников Александр Петрович);
borismorgalik@gmail.com (Моргалик Борис Маркович).

A. P. PRUDNIKOV, B. M. MORGALIK

CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTICS OF ROLLING BEARINGS

Abstract

The article studies the main vibroacoustic methods for diagnosing rolling bearings. The results of diagnosing a new bearing and defective ones by using the methods under consideration are given. The results of diagnostics obtained using the software built into the vibration analyzer and mathematical algorithms implemented in Matlab are compared.

Keywords:

vibration, bearing, defect, diagnostics.

For citation:

Prudnikov, A. P. Condition monitoring and diagnostics of rolling bearings / A. P. Prudnikov, B. M. Morgalik // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 41–52.