

УДК 004.9:621.822.6

Т.В. ФЕДОРОНЧАК<sup>1</sup>, В.Н. ХАРИТОНОВ<sup>2</sup>, В.И. ДУБРОВИН<sup>1</sup><sup>1</sup> Запорожский национальный технический университет, Украина<sup>2</sup> ГП ЗМКБ «Прогресс» им. Ивченко, Запорожье, Украина

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

*В статье рассматривается эффективность двух методов диагностирования технического состояния подшипников качения на основе анализа вибрационных сигналов. В методе диагностики, основанном на статистическом анализе вибрации подшипников, производится оценка эксцесса сигнала в четырех частотных диапазонах, что позволяет обнаружить появление дефекта. Метод диагностики на основе S-дискриминант по значению параметра позволяет оценить степень отклонения текущего состояния подшипника от нормального, а по форме его поведения - определить дефектный элемент подшипника.*

**Ключевые слова:** подшипник качения, диагностирование, вибрационный сигнал, эксцесс, S-дискриминант.

### Введение

Подшипники качения являются наиболее распространенными и в то же время уязвимыми элементами роторных механизмов. Подшипники осуществляют пространственную фиксацию вращающихся роторов и воспринимают основную часть статических и динамических усилий, возникающих в механизме. Техническое состояние подшипников является важнейшей составляющей, определяющей работоспособность механизма в целом. Одним из распространенных методов обнаружения дефектов в подшипниках качения является вибродиагностика. В вибрационном сигнале подшипника содержится достаточно большой объем диагностической информации – это общий уровень вибрации, уровни вибрации в определенных полосах частот, соотношение между этими уровнями, амплитуды, частоты и начальные фазы каждой составляющей спектра частот, соотношение между амплитудами и частотами. Кроме того, в отличие от других методов, вибродиагностика позволяет производить диагностику оборудования без его остановки и разборки.

### 1. Методы анализа вибрационных сигналов подшипников качения

Существует две группы методов диагностирования технического состояния подшипников качения по их вибрационным сигналам [1]:

1) выделение и анализ дискретных составляющих вынужденных колебаний либо на основных частотах возбуждения колебаний в подшипниках, либо на частотах возбуждения, которые возникают по причине появления различных дефектов элементов подшипников. На их основе возможно диагностирование местонахождения повреждения. Для

этого используются спектры вибросигналов в низкочастотном диапазоне (до 50-ой гармоники частоты вращения ротора) и спектры амплитудной огибающей вибросигнала на резонансных частотах подшипникового узла (1 – 20 кГц) или на резонансной частоте вибродатчика (30 – 50 кГц).

2) методы диагностирования технического состояния подшипников в целом, позволяющие оценить степень развития деградационных процессов в подшипнике и остаточный ресурс: характеристики амплитудного распределения, моментные характеристики (дисперсия, эксцесс, корреляционные и регрессионные зависимости, амплитудные дискриминанты, различные параметры с применением пикфактора, сопоставление различных параметров вибраций в различных частотных полосах.

В статье рассматривается эффективность двух методов диагностирования технического состояния подшипника качения: метод, основанный на статистическом анализе вибрации подшипников [2], и метод на основе «S-дискриминант» [3].

#### 1.1. Метод диагностики, основанный на статистическом анализе вибрации подшипников

В методе диагностирования технического состояния подшипников качения, основанном на статистическом анализе вибрации подшипников, проводится оценка эксцесса сигнала в четырех частотных диапазонах вибрации: 3 Гц-5 кГц, 5-10 кГц, 10-15 кГц, 15-20 кГц. При отсутствии дефекта эксцесс стремится к 0 во всех полосах частот. Начальное повреждение вызывает изменения главным образом в полосах низких частот, а более развитое – влияет на высокие частоты, возвращая эксцесс в области низких частот снова к исходному состоянию [2].

## 1.2. Метод диагностики на основе S-дискриминант

Общая постановка задачи обнаружения эксплуатационных дефектов базируется на том, что с развитием деградационного процесса в оборудовании наблюдается изменение формы волны вибрационного сигнала. На рис. 1 представлены графики временных сигналов виброускорения тестовой установки в бездефектном и дефектном состоянии подшипника качения. Как видно, при развитии деградационных процессов в подшипниках наблюдается рост амплитуды выбросов сигнала с одновременным ростом их числа в единицу времени.

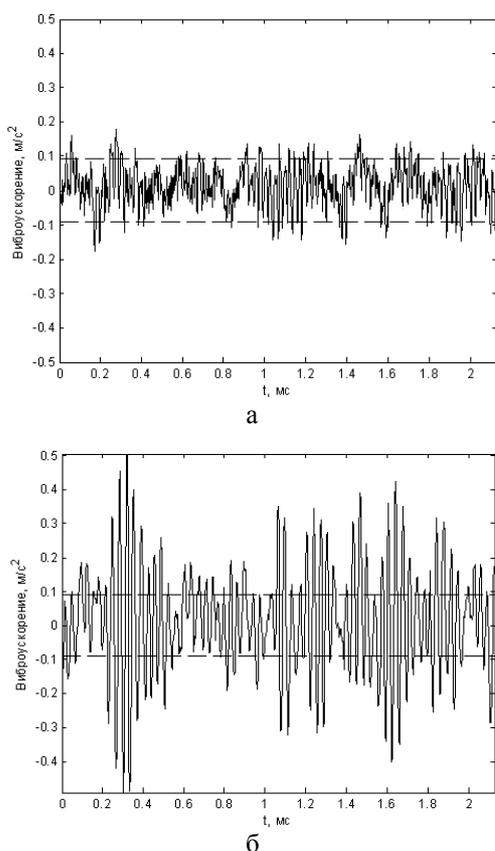


Рис. 1. Графики вибросигналов:  
а – бездефектный подшипник,  
б – подшипник с дефектом

В работе [3] было предложено использовать безразмерные S-дискриминанты клипированного по амплитуде сигнала для обнаружения отклонения состояния оборудования от нормального.

Пунктирные линии на рис. 1 проведены на уровне  $1.5\sigma_n$  (где  $\sigma_n$  – стандартное отклонение от среднего эталонной вибрации бездефектного подшипника). Они определяют порог клипирования вибросигнала по амплитуде. В формуле S-дискриминанта используется информация, содержащаяся в отчетах амплитуды выше и ниже порога

клипирования P. Таким образом отсекается помеха от собственной вибрации машины и повышается чувствительность параметра к выбросам амплитуды сигнала.

В данной работе используется наиболее простой и эффективный в реализации безразмерный индекс превышения сигналом порога клипирования P по “дисперсии” или же другими словами по энергии выбросов:

$$I_d = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x_i)_{(t)} - P]^2}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(x_j)_{(0)} - P]^2} \cdot \frac{K_{(t)}}{K_{(0)}}, \quad (1)$$

где  $(x_i)_{(t)}$  и  $(x_j)_{(0)}$  – отсчеты дискретных значений амплитуд текущего и опорного сигналов;  $K_{(t)}$  и  $K_{(0)}$  – количество выбросов превышающих порог P клипирования текущего и опорного вибросигналов; N – общее число отсчетов сигналов; P – порог клипирования амплитуд сигналов, который определяется следующим соотношением:

$$P = \lambda \sigma_n, \quad (2)$$

где  $\lambda = 0,5..3$  – коэффициент пропорциональности, определяющий чувствительность дискриминантов к отклонениям параметров технического состояния от нормы;  $\sigma_n$  – стандартное отклонение (СКЗ) сигнала, соответствующего эталонному состоянию сигнала при нормальном функционировании машины.

Для дальнейшей экспресс-диагностики оборудования предлагается использовать слежение за поведением параметра S-дискриминанта. Близость S-дискриминанта к единице характеризует нормальное состояние машины, в то время как нарастание значений дискриминанта со временем наработки характеризует степень развития эксплуатационного повреждения.

## 2. Экспериментальные данные

В качестве исходных данных были использованы тестовые вибрационные сигналы [4].

Эксперименты были проведены при помощи электродвигателя мощностью 2 лошадиные силы. На подшипниках двигателя при помощи электроэрозионного станка были искусственно нанесены дефекты различного размера (0.007, 0.014, 0.021 дюймов в диаметре) отдельно на внутреннюю дорожку качения, элемент качения (т.е. шарик) и внешнюю дорожку качения. Дефектные подшипники были установлены в тестовый двигатель, после чего были сняты вибросигналы. Данные о вибрации были собраны при помощи акселерометров, прикрепленных к корпусу двигателя при помощи магнитов. Цифровой сигнал был собран с частотой дискретизации 48000 Гц в течение 10 секунд времени.

На рис. 2 приведены примеры использованных вибросигналов с бездефектными и дефектными подшипниками качения.

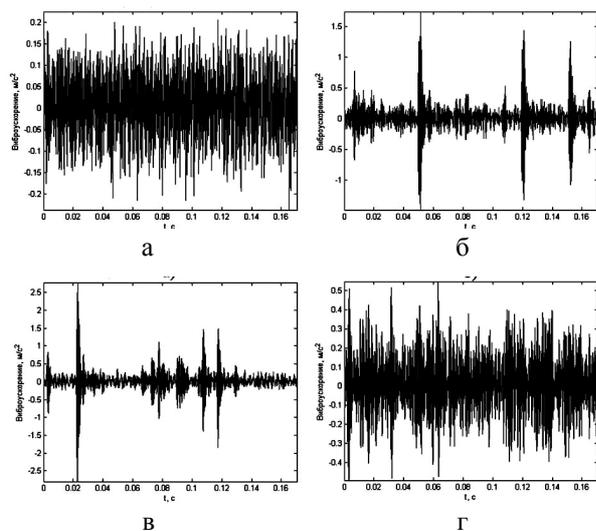


Рис. 2. Примеры вибросигналов:  
а – подшипник без дефектов;  
б, в, г – подшипники с дефектами размером 0,014”

Для тестовых сигналов были проведены статистические проверки при помощи критерия согласия Хи-квадрат, критерия серий и критерия инверсий [5].

При помощи критерия согласия хи-квадрат было установлено, что вибросигналы подшипников качения не подчиняются нормальному закону распределения даже для бездефектных подшипников. Полученная функция распределения более острая, чем у нормального закона.

Для выяснения, являются ли наблюдения статистически независимыми или же они подвержены тренду, был проведенный анализ вибросигнала при помощи критерия инверсий и критерия согласия, которые являются свободными от распределения или же другими словами непараметрическими методами. Критерий серий показал наличие тренда, в то время как критерий инверсий показал независимость наблюдений. Так как критерий инверсий является более мощным по сравнению с критерием серий при обнаружении монотонного тренда в последовательности наблюдений, однако не столь эффективным при выявлении тренда типа флуктуаций, то можно сделать вывод о наличии в вибросигналах подшипников качения тренда типа флуктуаций.

### 3. Анализ полученных результатов

При помощи изложенных методов диагностики технического состояния подшипника в данной работе был проведен анализ тестовых вибросигналов подшипников качения.

Рассмотрим результаты применения метода основанного на статистическом анализе вибрации подшипника. Для сигналов с бездефектными подшипниками был рассчитан эксцесс в четырех частотных диапазонах. Как и ожидалось, полученные значения близки к 0 (табл. 1).

Таблица 1

Эксцесс вибросигнала бездефектного подшипника качения

Частотный диапазон	весь сигнал	3-5000 Гц	5-10 кГц	10-15 кГц	15-20 кГц
Величина эксцесса	-0.0749	-0.0235	-1.0445	0.1196	0.0506

Появление дефектов вызывает изменения главным образом в полосах низких частот. С развитием дефектов увеличиваются значения эксцесса в высокочастотных диапазонах, в области же низких частот эксцесс возвращается к исходному состоянию. На рис. 3 показано поведение эксцесса для сигналов с дефектами различных размеров на внутренней дорожке качения и на шарике. На всех графиках в качестве точки с нулевым размером дефекта показан результат анализа бездефектного сигнала подшипника.

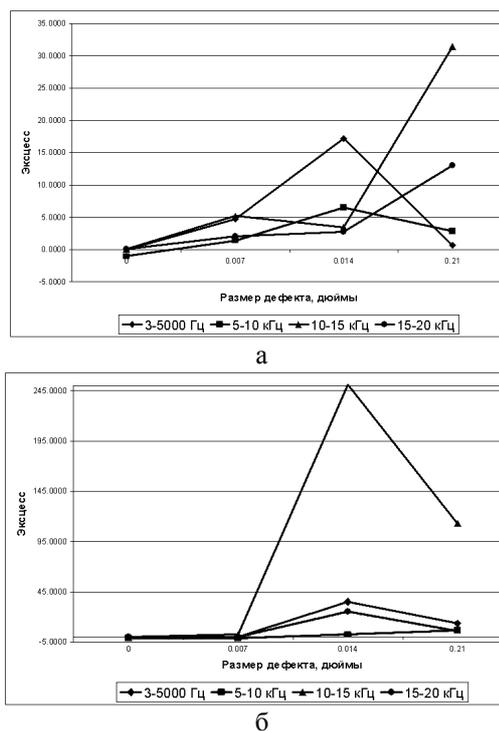


Рис. 3. Поведение эксцесса вибросигнала, отфильтрованного в четырех диапазонах частот:  
а – дефект на внутренней дорожке качения,  
б – дефект на шарике

Дефект внешней дорожки качения является стационарным дефектом, поэтому его положение относительно зоны нагрузки подшипника имеет прямое влияние на вибрационный отклик системы двигатель/подшипник. Поэтому в тестах с дефект-

ной внешней дорожке качения сигналы снимались непосредственно в зоне нагрузки подшипника, а также в точках расположенных ортогонально и противоположно к ней. Результаты анализа показали, что наиболее чувствительной к зарождению дефекта на внешней дорожке качения является точка, расположенная в районе нагруженной зоны подшипника.

На рис. 4 показано поведение эксцесса для сигналов с дефектами различных размеров на внешней дорожке качения.

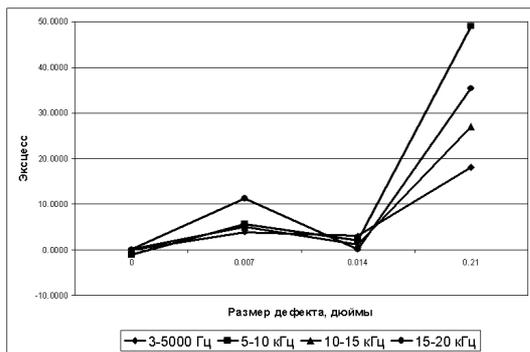


Рис. 4. Поведение эксцесса вибросигнала, отфильтрованного в четырех диапазонах частот, для подшипника с дефектом на внешней дорожке качения

Как видно из графиков, полученные результаты анализа вибрации подшипников качения позволяют

судить о том, что дефект на внешней дорожке качения менее ярко выражен, чем дефект такого же размера на внутренней дорожке или шарике.

Рассмотрим поведение безразмерного S-дискриминанта Id для тестовых сигналов при пороге пропорциональности равном 0,5. В результате работы была обнаружена закономерность в поведении S-дискриминанта для дефектов на различных элементах подшипника (рис. 5).

В качестве опорного эталонного сигнала был выбран сигнал с бездефектным подшипником. Анализ сигналов был проведен без фильтрации, в широком диапазоне частот. Кроме того возможно наблюдение за поведением сигнала в некотором узкополосном диапазоне частот, например, в области характерных дефектных частот подшипника.

В работе было исследовано влияние длины обрабатываемого сигнала (количество точек) на поведение S-дискриминанта.

Для каждого файла весь сигнал длиной в 10 секунд времени (480000 точек) разбивался на участки, размер которых соответствовал времени одного оборота ротора, помноженного на простое число. В каждом таком окне рассчитывалось значение S-дискриминанта, после чего находилось среднее и дисперсия полученных результатов. На рис. 6 приведено поведение S-дискриминанта для сигналов с дефектной дорожкой качения при различных размерах окон.

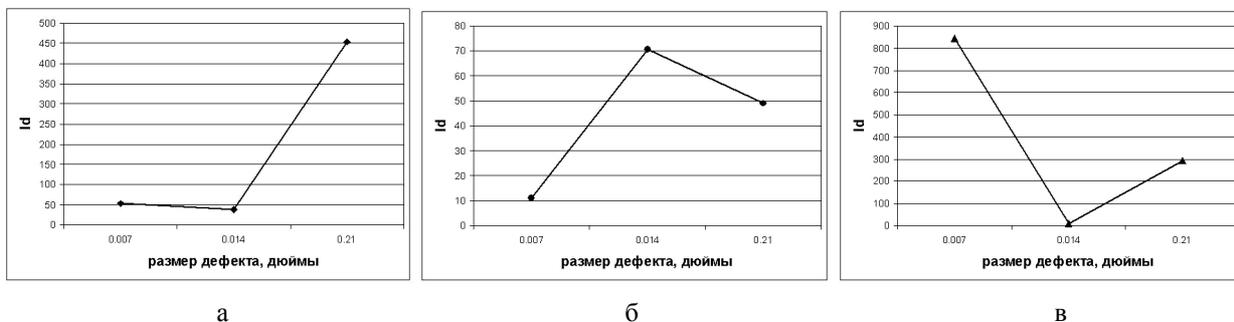


Рис. 5. Поведение S-дискриминанта для сигналов подшипников с дефектами: а – на внутренней дорожке качения, б – на шарике, в – на внешней дорожке качения

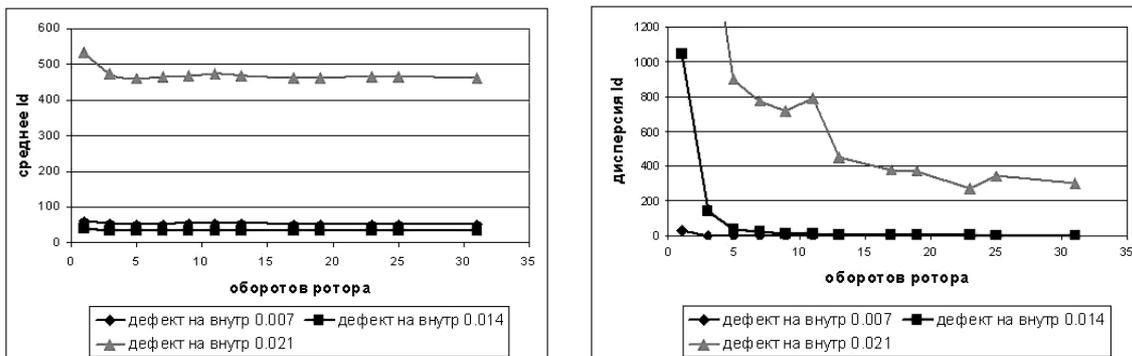


Рис. 6. Поведение S-дискриминанта при различных размерах обрабатываемого сигнала: а – среднее значение, б – дисперсия

## Заключение

Результаты исследования показали, что метод диагностики подшипников качения, основанный на статистическом анализе вибрации подшипников, позволяет обнаружить появление дефекта, однако он не позволяет оценить степень развития деградационных процессов, а также местоположение дефекта. Анализ метода диагностики на основе S дискриминант позволяет сделать вывод, что кроме самого значения S-дискриминанта, которое позволяет судить об отклонении состояния подшипника от нормального, форма кривой изменения значения S-дискриминанта также может быть использована для определения местоположения дефекта в подшипнике.

Кроме того, было исследовано влияние размера обрабатываемого сигнала на поведение значения S-дискриминанта.

Результаты анализа показали, что с увеличением размера окна среднее значение S-дискриминанта перестает изменяться и разброс значений уменьшается. Однако с другой стороны, при выборе большого количества малых окон возникает возможность найти специфические участки сигнала и определить время возникновения резких изменений в сигнале подшипника. Этот факт говорит о том, что от субъ-

екта диагностики требуется опыт и определенный навык при обработке сигнала.

## Литература

1. *Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд. испр. Т.7.: В 2 кн. Кн.1: Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Балицкий. Ф.Я., Барков А.В., Барков И.А. и др. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.*
2. *Генкин М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г.Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 282 с.*
3. *Соколова А.Г. Вибромониторинг машинного оборудования и раннее обнаружение эксплуатационных повреждений / А.Г. Соколова, Ф.Я. Балицкий // Вестник научно-технического развития. – 2008. – № 7 (11). – С. 45-50.*
4. *Case Western Reserve University Bearing Data Center. Seeded Fault Test Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.eecs.case.edu/laboratory/bearing/welcome\\_overview.htm](http://www.eecs.case.edu/laboratory/bearing/welcome_overview.htm).*
5. *Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.*

Поступила в редакцию 1.06.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Технологии авиадвигателей» А.Я. Качан, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

## ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

*Т.В. Федорончак, В.Н. Харитонов, В.І. Дубровін*

У статті розглядається ефективність двох методів діагностування технічного стану підшипників кочення на основі аналізу вібраційних сигналів. У методі діагностики, заснованому на статистичному аналізі вібрації підшипників, виконується оцінка ексцесу сигналу в чотирьох частотних діапазонах, що дозволяє виявити появу дефекту. Метод діагностики на основі на S-дискримінант за значенням параметру дозволяє оцінити ступінь відхилення поточного стану підшипника від нормального, а за формою його поведінки – визначити дефектний елемент підшипника.

**Ключові слова:** підшипник кочення, діагностування, дефект, вібраційний сигнал, ексцес, S-дискримінант.

## ROLLING BEARING CONDITION DIAGNOSTICS

*T.V. Fedoronchak, V.N. Haritonov, V.I. Dubrovin*

Performance of two rolling bearing vibration monitoring methods are researched in the article. The first method is based on statistical analysis of bearing vibrations in four frequency bands and it allows discovering presence of a fault. The second one is based on nondimensional S-discriminants. It allows estimating bearing degradation based on the value of the parameter and detecting defective element of the bearing based on its curve behavior.

**Key words:** rolling bearing, diagnostics, fault, vibrations, kurtosis, S-discriminant.

**Федорончак Татьяна Васильевна** – аспирант кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: [tetyana.fedoronchak@gmail.com](mailto:tetyana.fedoronchak@gmail.com).

**Харитонов Виктор Николаевич** – инженер-конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: [03510@ivchenko-progress.com](mailto:03510@ivchenko-progress.com).

**Дубровин Валерий Иванович** – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: [vdubrovin@gmail.com](mailto:vdubrovin@gmail.com)