Использование коэффициента фрактальной размерности для вибродиагностики технического состояния центробежного насосного агрегата

Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Павленков Д.В.

НПЦ «Динамика», Омск, Россия

Около 80% механического оборудования современных нефтехимических производств составляют центробежные насосные агрегаты (ЦНА). В связи с этим техническое состояние установки во многом определяется техническим состоянием ее насосного парка.

Для внедрения прогрессивной системы обслуживания оборудования по его техническому состоянию, защиты его от аварий необходимо использовать объективные средства его контроля и диагностики.

В настоящее время основным методом определения технического состояния ЦНА является вибродиагностический, при котором состояние определяется путем анализа сигнала вибрации корпуса агрегата. Для формирования экспертных сообщений путем анализа сигнала вибрации, система мониторинга и диагностики содержит в себе специальную экспертную систему, которая путем анализа сигнала формирует набор диагностических признаков по которым, с использованием логических правил формируется экспертное сообщение [1,2].

Для формирования диагностических признаков наиболее часто используют анализ спектральных компонент сигнала вибрации. Однако анализ спектра требует точной информации о конструкции насосного агрегата (числе лопаток на рабочем колесе, типы подшипников), режиме его работы (частота вращения ротора). Отсутствие этой информации или ее несоответствие реальным параметрам приведет к ошибкам определения технического состояния. Таким образом, актуальной является задача исследования новых методов диагностики кавитации с использованием алгоритмов, инвариантных к конструкции и типу агрегата.

Одним из современных и перспективных методов, который только начинает применяться в вибродиагностике, является использование теории фракталов.

Фракталом может называться предмет, обладающий, по крайней мере, одним из указанных ниже свойств [3]:

А) Обладает нетривиальной структурой на всех масштабах. В этом отличие от регулярных фигур (таких, как окружность, эллипс, график гладкой функции): если мы рассмотрим небольшой фрагмент регулярной фигуры в очень крупном масштабе, то он будет похож на фрагмент прямой. Для фрактала увеличение масштаба не ведёт к упрощению структуры, то есть на всех шкалах мы увидим одинаково сложную картину;

Б) Является самоподобным или приближённо самоподобным;

В) Обладает дробной метрической размерностью или метрической размерностью, превосходящей топологическую.

Многие объекты в природе обладают свойствами фрактала: например, побережья, облака, кроны деревьев, снежинки, кровеносная система, система альвеол человека или животных.

Примеры типичных фракталов приведены на рисунке 1.

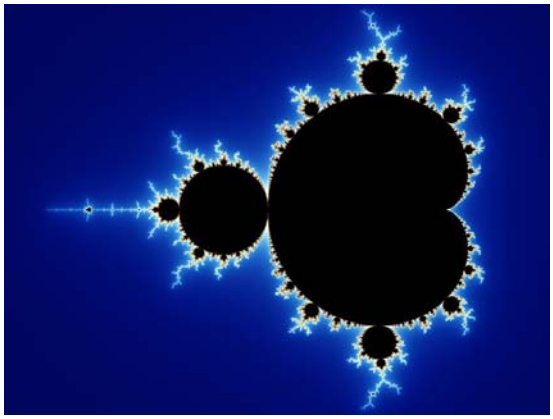
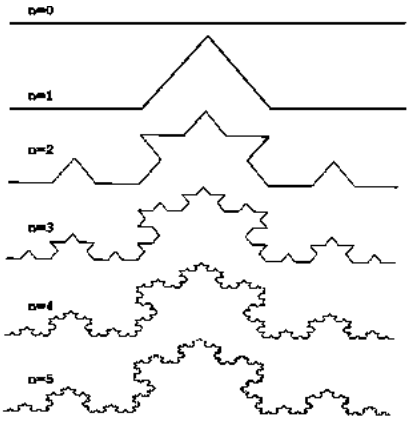
А)  Б) 

Рисунок 1 – Множество Мандельброта (А) Кривая Коха (Б)— классические образцы фракталов.

Основным параметром фрактала является его размерность. Размерность фрактала определяется выражением [4]:

$$D_S = -Ln(N)/Ln(rN), \text{ где} \qquad (1)$$

Ds – размерность

N – число элементов фрактала, покрывающее исходный при уменьшении масштаба

rN – масштабный коэффициент самоподобных элементов фрактала

Например, для кривой Коха (рисунок 1-Б) при n=2 включает в себя 4 элемента меньшего масштаба (при n=1). Масштабный коэффициент, который можно определить по отношению длин фигур, равен 1/3.

Расчет фрактальной размерности

$$D_S = -Ln(4)/Ln(1/3) = -1.386/-1.098 = 1.261$$

Одним из методов определения фрактальной размерности является метод нормированного размаха или метод Хёрста [4]. Суть метода заключается в нахождении нормированного размаха R/S, где R есть разность между максимальным и минимальным накопленным значением на интервале τ

$$R(\tau) = \max_{1<t<\tau} X(t,\tau) - \min_{1<t<\tau} X(t,\tau) \qquad (2)$$

S – стандартное отклонение.

Херст обнаружил, что для многих временных рядов выполняется следующее соотношение:

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{\tau}{2}\right)^{H}, \text{ где} \qquad (3)$$

S – среднеквадратичное отклонение сигнала, R – накопленный размах, τ – интервал наблюдений, H – показатель Херста.

Если в двойных логарифмических координатах построить зависимость R/S как функцию от N, то тангенс угла наклона дает значение показателя Херста H. Построенный в двойном логарифмическом масштабе график зависимости нормированного размаха от числа наблюдений log(R/S) = f(logN) при большом числе наблюдений хорошо аппроксимируется прямой (рисунок 2).

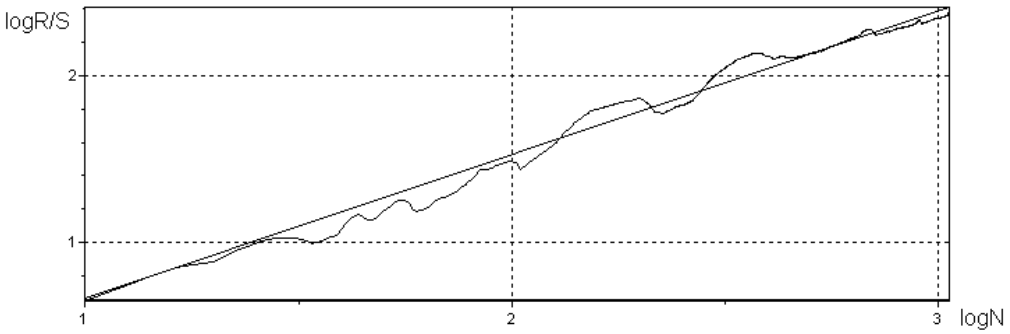


Рисунок 2 – Определение показателя Херста.

Достоинство показателя Херста заключается в том, что по его значению можно судить о степени хаотизации системы в целом.

Если H=0.5, события случайны и некоррелированны. Сигнал можно классифицировать как случайный.

Случай $0.5 < H \leq 1$ указывает на более гладкую, менее “зазубренную” линию, нежели при случайном блуждании.

Случай $H < 0.5$ соответствует более высокой фрактальной размерности и более прерывистой линии, чем случайное блуждание, и характеризует систему, сильнее подверженную переменам.

Фрактальная размерность Ds кривой связана с показателем Херста H формулой

$$D_S = 2 - H \qquad (4)$$

Для исследования чувствительности показателя Херста к дефектам ЦНА на стенде испытаний были проведены эксперименты с воспроизведением недопустимого состояния насоса. В качестве воспроизводимой неисправности использовался кавитационный режим работы насоса, диагностика которого имеет важное значение для безопасной эксплуатации ЦНА. При кавитации происходит интенсивное разрушение поверхности рабочего колеса, трубопроводов, создаются дополнительные вибрационные нагрузки на конструкцию агрегата.

Для исследования чувствительности коэффициента Херста к кавитационному режиму на стенде испытаний насосов (рисунок 3) был проведен эксперимент на трех насосных агрегатах. Каждому насосному агрегату задавались два режима работы – без кавитации и с кавитацией.

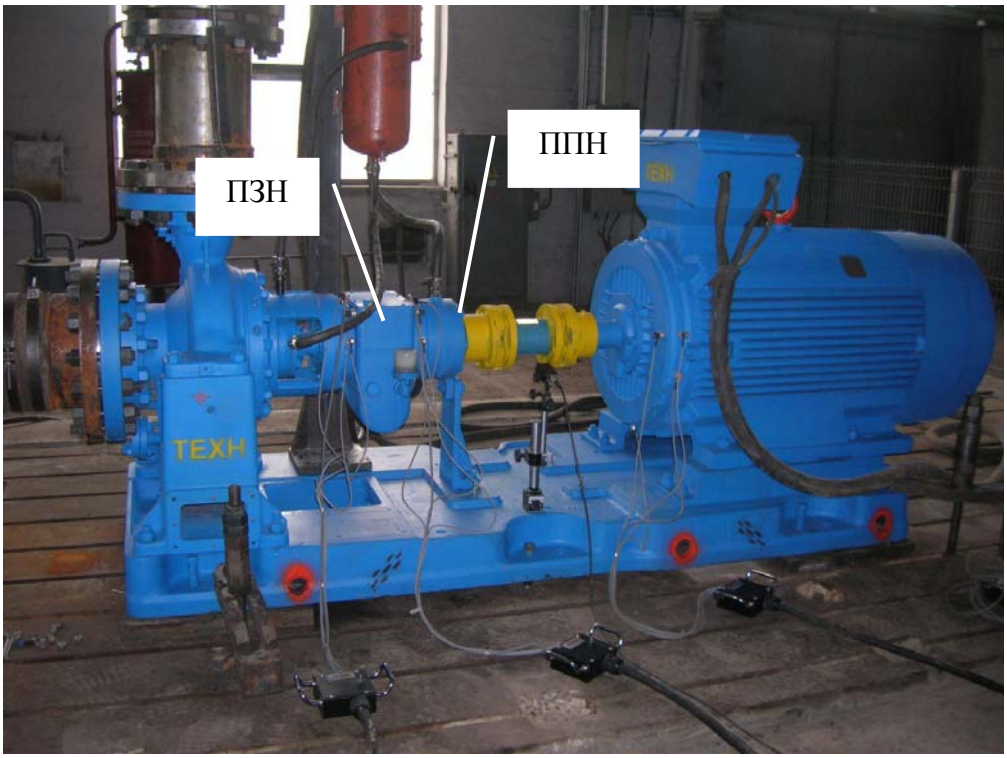


Рисунок 3 – Испытательный стенд с датчиками вибрации на насосе.

Кроме признака коэффициента Херста (Hv) для исследования чувствительности к режиму кавитации рассчитывались также признаки общего уровня виброускорения (Ae), виброскорости (Ve), виброперемещения (Se), огибающей виюроускорения (We), амплитуды виброускорения (Ap) и уровня лопаточных гармоник (Al).

Для оценки различающей способности признака к дефекту, в предположении нормальности распределения, рассчитывалась мера расстояния D, предложенная Костюковым В.Н., по выражению:

$$D = \frac{\overline{Ak} - \overline{Ank}}{s_k + s_{nk}}, \text{ где} \qquad - \qquad (5)$$

$\overline{Ak}$ – среднее значение признаков в режиме кавитации;

$\overline{Ank}$ – среднее значение признаков в режиме без кавитации.

s_k - стандартное отклонение в режиме кавитации

s_{nk} - стандартное отклонение в режиме без кавитации.

Чем больше D, тем лучше различающая способность данного признака.

По значению меры расстояния D рассчитывалась ошибка распознавания, как значение нормальной функции распределения в точке D.

На рисунке 4 приведены результирующие значения меры расстояния D и ошибки распознавания для рассматриваемых диагностических признаков.

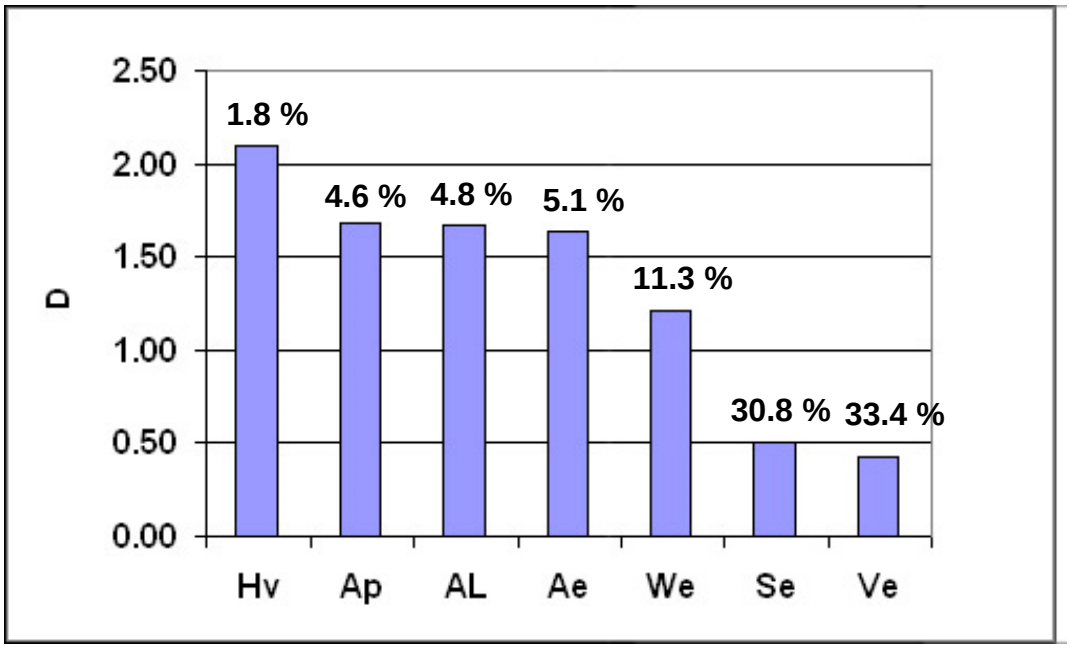


Рисунок 4 – Значения мены расстояния D и ошибки распознавания режима кавитации для рассматриваемых диагностических признаков

Из приведенных данных видно, что наименьшую ошибку распознавания режима кавитации имеет признак показатель Херста (Hv). Далее следуют признаки сигнала виброускорения: амплитуды (Ap), уровня лопаточных частот (Al), общий уровень (Ae).

При кавитации коэффициент Херста снижается, что соответствует теории. Интенсивное схлапывание пузырьков насыщенного пара приводит к возрастанию случайной компоненты сигнала вибрации.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение показателя Херста, наряду с другими диагностическими признаками, позволяет снизить ошибку распознавания кавитационного режима работы насосного агрегата.

Список литературы

1. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. - М.: Машиностроение, 2002. – 224 с.

2. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР - КОМПАКС®)/ Под ред. В.Н. Костюкова. - М.: Машиностроение, 1999. – 163 с.

3. http://ru.wikipedia.org/wiki/Фрактал

4.Федер Е. Фракталы – М: Мир, 1991. – 254 с.

Проведены исследования подшипников без повреждений и подшипников с искусственно внесенными повреждениями, размеры которых, в соответствии с нормативными требованиями, допускают повторное использование этих подшипников в ГТД и редукторах (пограничное повреждение).

Проведенные эксперименты показали, что, несмотря на слабую виброактивность, пограничные локальные повреждения подшипника оказывают существенное влияние на характер и уровень его вибрации. Показано, что это влияние обнаруживается более детальным анализом вибросигнала, например, измерением уровня в октавных полосах частот и анализом формы сигнала, а также анализом огибающей сигнала.

Экспериментально подтверждено, что на характер и уровень вибрации подшипника значительное влияние оказывает положение датчика вибрации относительно места локального повреждения наружного кольца. Это следует учитывать в методах контроля и диагностирования технического состояния подшипников с помощью датчиков, расположенных непосредственно на подшипнике или вблизи него.

Проведенные эксперименты показали значимую разницу частот прокатывания шариков по дорожкам для подшипника с увеличенным радиальным зазором и для подшипников с нормальным радиальным зазором. Такой результат подтверждает возможность вибрационного диагностирования изменения величины радиального зазора путем измерения частот прокатывания шариков по дорожкам.

Таким образом, впервые подтверждены возможности обнаружения пограничных локальных повреждений неразборных шарикоподшипников и увеличенного радиального зазора вибродиагностическими методами в условиях осевого нагружения подшипника.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ХЕРСТА ДЛЯ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА

Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Павленков Д.В.
НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия

ДОКЛАД

В настоящее время основным методом определения технического состояния центробежного насосного агрегата (ЦНА) является вибродиагностический метод, где производится анализ сигналов вибрации корпуса насосного агрегата [1]. При этом чаще всего используется спектральный анализ сигналов, где гармоническим составляющим спектра ставятся в соответствие те или иные дефекты [2, 3]. Однако использование спектрального анализа требует точной информации о типе и конструкции агрегата, режи-

ма его работы, которая в условиях реального производства может быть неточной или вовсе отсутствовать. Это может проводить к ошибкам определения состояния. Таким образом, актуальной является задача исследования новых методов диагностики с использованием алгоритмов, инвариантных к конструкции и типу агрегата.

В докладе рассматривается использование для диагностики ЦНА одного из методов нелинейной динамики – фрактальной размерности, где в качестве диагностического признака используется коэффициент фрактальной размерности Херста (H). Основным достоинством данного признака является инвариантность к уровню анализируемого сигнала, а, следовательно, независимость от размерно-мощностных параметров агрегата.

Приводятся результаты исследований использования коэффициента размерности Херста к выявлению кавитационного режима работы агрегата, которые проводились на системе КОМПАКС-РПГ стенда испытаний насосных агрегатов. Показано, что чувствительность коэффициента находится на уровне, а в некоторых случаях превышает чувствительность основного спектрального признака кавитации – уровня лопаточных гармоник.

Таким образом, использование коэффициента размерности Херста позволяет повысить достоверность вывода экспертной системы диагностики технического состояния центробежного насосного агрегата.

Литература

1. **Костюков В.Н.** Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.

2. **Костюков В.Н., Науменко А.П.** Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200100 – «Приборостроение» и приборостроительным специальностям. Омск: ОмГТУ, 2011. 360 с.

3. **Костюков В.Н., Науменко А.П.** Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования: Учебное пособие / Под ред. В.Н. Костюкова. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 108 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ УЗЛОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ РЕЛЬСОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Костюков Ал.В., Цурпаль А.Е., Басакин В.В.
НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия

ДОКЛАД

В процессе эксплуатации рельсового подвижного состава наиболее ответственные узлы, подверженные внезапным отказам, являются лимитирующими для подвижного состава в целом. К ним в первую очередь относятся узлы электрического и механического оборудования, устранение неисправностей которых в процессе эксплуатации затруднено.

РОССИЙСКОЕ ОБЩЕСТВО ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ (РОНКТД)
THE RUSSIAN SOCIETY FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING AND TECHNICAL DIAGNOSTICS (RSNTTD)

XX ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

ДОКЛАДЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Москва
3 – 6 марта 2014 г.

Спектр
Издательский дом

Москва, 2014

УДК [681.518.54+620.19](035)
ББК 30.82-5я2

XX Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: доклады конференции. Москва, 3 – 6 марта 2014 г. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. [CD]
ISBN 978-5-4442-0064-3
DOI 10.14489/4442-0064-3

Сборник содержит тезисы докладов и доклады, представленные на XX Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике. Изложены результаты работ более 200 российских и зарубежных фирм – мировых лидеров по производству средств неразрушающего контроля и технической диагностики. В состав сборника вошли работы в области техногенной диагностики, антитеррористической диагностики, экологической диагностики, технического регулирования и определения остаточного ресурса.

УДК[681.518.54+620.19](035)
ББК 30.82-5я2

ISBN 978-5-4442-0064-3

© РОНКТД, 2014

XX ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Председатель оргкомитета:
Академик РАН, профессор Клюев В.В.

Члены оргкомитета:
Горкунов Э.С., Мигун Н.П., Щербинин В.Е., Ефимов А.Г., Шевалдыкин В.Г., Бобров В.Т., Артемьев Б.В., Кузелев Н.Р., Матвеев В.И., Шелихов Г.С., Сажин С.Г., Кольцов В.Н., Махутов Н.А, Ковалев А.В., Буклей А.А., Усачев Е.Ю., Кольцов В.Н., Копытов С.Г., Коновалов Н.Н., Муравская Н.П.; Самокрутов А.А.

XX Russian Scientific Conference on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics

Reports

Moscow, 3 – 6 March 2014

The book contains abstracts and scientific papers presented at the 20th Russian Scientific and Technical Conference on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics. There are more than 200 papers of Russian and foreign companies – leading manufacturers of non-destructive testing and technical diagnostics devices and systems. The abstract book includes papers in the field of technological diagnostics, anti-terrorism diagnostics, environmental diagnostics, technical regulation and determination of residual life.

Сорокин К.В., Мурашов В.В. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ УГЛЕПЛАСТИКИ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СЕНСОРАМИ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРЕДДЕФЕКТНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА . . . 339

Ткаченко А.А. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ В ПОТОКЕ ПРОИЗВОДСТВА 343

Филинов М.В., Фурсов А.С. РОЛЬ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ В ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА 345

Секция 8. Вибродиагностика

Руководители секции: Зусман Г.В., Костюков В.Н.

Гетманов В.Г., Фирсов А.А. АППРОКСИМАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ВИБРОСКОРОСТЕЙ ДЛЯ ДОПЛЕРОВСКИХ СИСТЕМ АКУСТИЧЕСКОГО, РАДИО И ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНОВ 347

Зусман Г.В. НОВЫЙ ЭФФЕКТ В ДИНАМИКЕ МЕХАНИЧЕСКОГО КОНТАКТА МЕТАЛЛ-МЕТАЛЛ И ВИБРОДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПЕРЕНОСНЫМИ ПРИБОРАМИ 351

Карасев В.А., Петров Н.И., Николаев С.М., Назаренко Г.М., Лаврентьев Ю.Л., Жильников Е.П., Кондратьев М.И., Волков Е.С. ВИБРОДИАГНОСТИКА ПОГРАНИЧНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 351

Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Павленков Д.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ХЕРСТА ДЛЯ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА 352

Костюков Ал.В., Цурпаль А.Е., Басакин В.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ УЗЛОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ РЕЛЬСОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА 353

Костюков Ал.В., Зайцев А.В., Казарин Д.В. ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ РОТОРНЫХ АГРЕГАТОВ 355

Костюков В.Н. ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА 357

Науменко А.П. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕХНОЛОГИИ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ПОРШНЕВЫХ МАШИН В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ 358

Николаев С.М., Карасев В.А., Петров Н.И., Лаврентьев Ю.Л., Назаренко Г.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОБСТВЕННЫХ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ С ЛОКАЛЬНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ НА ВИБРОСИГНАЛЫ 362

Решетов А.А. УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМАХ 365

Сахаров С.А., Бузанов О.А., Забелин А.Н., Аленков В.В. КРИСТАЛЛЫ ЛГТ И КТГС ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ 369

Соколов Д.В., Мынцов А.А., Кореев А.А. ДООСНАЩЕНИЕ СИСТЕМАМИ ДИАГНОСТИКИ 370

Старых М.Н., Подвальный А.М. ОСОБЕННОСТИ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ В СОБСТВЕННЫХ ОПОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕТОКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ 372

Шорр Б.Ф., Иванов И.И., Карасев В.А., Назаренко Г.М., Петров Н.И. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ НАРУЖНОГО КОЛЬЦА И ТЕЛ КАЧЕНИЯ ПОДШИПНИКА 374

Секция 9. Акустическая эмиссия

Руководители секции: Иванов В.И., Муравьев В.В.

Аугутис В., Ваштакас Э. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ 376

Бахматов П.В., Муравьев В.И., Лончаков С.З., Плетнев Н.О., Пицык В.С. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРОДА В ПОВЕРХНОСТНОМ ДЕФЕКТНОМ СЛОЕ . . . 378

Э		**Я**	
Эпинатьев И.Д.	467	Якубов В.П.	263
Ю			
Юмашев В.М.	205	Якушенко Е.И.	37

David Gilbert	499	Mikel Farley	499
Giuseppe Nardoni	499	Pavel Mazal	499
Hu Xiaowei	201	Purshke Matthias	499
Jennifer Chaline	500	Serge Dos Santos	500
Li Suqi	201	Steffi Dehlau	499
Martin Lints	500	Sun Xiaoming	201
Mihovsky M.	499	Wilfried Hueck	499

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

XX ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

ДОКЛАДЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Москва, 3 – 6 марта 2014 г.

Редакционный совет: **Артемьев Б.В., Елисеев Д.А., Клейзер П.Е.**

Инженеры по компьютерному макетированию
А.И. Евсейчев, Г.Ю. Корабельникова, П.Е. Клейзер
Художественное оформление *Н.И. Смольянина*

ООО «Издательский дом «СПЕКТР»,
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1. Тел.: (495) 514 76 50.
Http://www.idspektr.ru. E-mail: info@idspektr.ru