



На правах рукописи

Акутин Михаил Викторович

**МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ
КАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ
ВЕЙВЛЕТ СКЕЙЛОГРАММ**

05.11.13. – Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий

**Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук**

Казань – 2009

Работа выполнена в
ГОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Ваньков Юрий Витальевич

Научный консультант: кандидат технических наук
Кондратьев Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Белов Евгений Валентинович

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000525833

кандидат технических наук
Аскаров Рафаэль Рафилевич

Ведущая организация: ОАО КПП «АВИАМОТОР»

Защита состоится «20» марта 2009 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.082.01 при ГОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
по адресу: 420066, Казань, Красносельская 51, тел., факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета, с авторефератом – на сайте <http://www.kgeu.ru>

Автореферат разослан «11» февраля 2009г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.082.01
к.ф.-м.н., доцент

Батанова Н.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Известно, что на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях используется большое количество насосно-компрессорного оборудования. Основную часть роторного оборудования составляют насосные агрегаты, из которых лидирующую роль занимают центробежные насосы (более 65,0%). Анализ статистических данных по отказам насосов, выявленных в процессе ремонта, позволил установить, что наряду с уплотняющими устройствами наибольшим отказам подвержены подшипники качения (порядка 31% от всех выявленных дефектов).

Подшипник качения является наиболее распространенным элементом конструкции любого роторного механизма и, в то же время, наиболее уязвимым элементом, который определяет работоспособность и долговечность оборудования. Например, анализ надежности работы ГТУ НК-12 показал, что значительная доля выходов их из строя (от 40 до 50%) происходит по причине разрушения подшипников качения, при этом двигатель в среднем вырабатывает не более 2000 часов, что составляет 50% гарантийного и 18,2% межремонтного ресурса двигателя. Особенностью разрушения подшипников качения является то, что оно происходит внезапно, без появления существенных признаков, предшествующих разрушению, что влечет за собой не запланированные трудозатраты, связанные с аварийными остановками, сбои в работе оборудования, высокую стоимость ремонта.

Вышесказанное обуславливает **актуальность** диагностирования состояния подшипников методами безразборного контроля. Решение проблемы раннего диагностирования подшипников позволит решить задачу обоснованного прогнозирования сроков безотказной работы оборудования и назначения их ресурса в соответствии с фактическим состоянием подшипниковых узлов.

Цель и задачи работы. Целью исследования является разработка метода и информационно-измерительной системы для контроля технического состояния подшипников по параметрам вибрации на основе статистических критериев сравнения скейлограмм непрерывного вейвлет анализа.

Цель достигается решением следующих задач:

1. Определить наиболее информативные критерии, позволяющие обнаруживать дефекты в подшипнике по анализу его вибрации.
2. Разработать алгоритм обнаружения дефектов в подшипниках по параметрам их вибраций, позволяющий проводить контроль изделий в автоматическом режиме.
3. Разработать опытную установку и провести экспериментальные исследования параметров вибраций подшипников.
4. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработать метод контроля подшипников с использованием созданного алгоритма и выбранных критериев сравнения.

Метод исследования. При выполнении работы применялись вероятностно-статистические методы математической обработки. Результаты теоре-

тических исследований подтверждены и дополнены результатами экспериментальных исследований, проведенных на специально разработанной установке с использованием аттестованных контрольно-измерительных приборов.

Достоверность полученных результатов. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций подтверждается результатами экспериментальных исследований, сходимостью результатов с исследованиями, полученными другими авторами; совпадением результатов, полученных аналитическими и инструментальными методами.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в разработке алгоритма анализа виброакустических сигналов, разработке и изготовлении измерительного комплекса, в создании программного обеспечения для анализа данных, проводил все измерения, первичную и статистическую обработку и анализ экспериментальных данных.

На защиту выносятся:

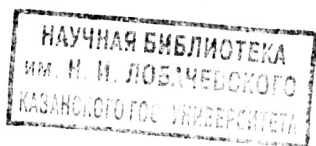
- разработанный и изготовленный для реализации предлагаемой методики экспериментальный виброакустический диагностический комплекс;
- результаты экспериментальных исследований для подшипников качения типоразмеров 207-409;
- метод оценки технического состояния подшипников качения на основе анализа скейлограмм непрерывного вейвлет преобразования виброакустических сигналов.

Научная новизна заключается в том, что:

- разработан новый алгоритм анализа виброакустических сигналов подшипников качения с использованием вейвлет-преобразования;
- разработан и изготовлен измерительно-диагностический комплекс (ИДК) для контроля подшипников;
- экспериментально получены и проанализированы скейлограммы колебаний подшипников качения;
- разработана методика диагностики подшипников, позволяющая автоматизировать процесс обнаружения дефектов, повысить разрешающую способность при проведении контроля виброакустическим методом.

Практическая ценность состоит в том, что:

- разработанная методика диагностики подшипников виброакустическим методом и изготовленный экспериментальный диагностический комплекс позволяют проводить безразборный контроль технического состояния подшипника в составе изделия;
- применение алгоритмов анализа виброакустических параметров с использованием вейвлет-преобразования позволяет выявлять дефекты подшипников качения на ранней стадии зарождения;
- построенный по предлагаемой методике комплекс может быть использован как на эксплуатируемом оборудовании, так и в мобильном исполнении;



- создан банк данных скэйлограмм исправных и дефектных подшипников.

Реализация работы. Разработанная методика и измерительно-диагностический комплекс внедрены на предприятиях ОАО «ТФК КАМАЗ» и ОАО КМПО, что подтверждено соответствующими актами реализации научных исследований.

Апробация работы. Основные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVIII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-18», Казань 2005г., XII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва 2006г., Международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National instruments», Москва 2006г., Всероссийской научной молодежной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам, посвященной 75-летию МарГТУ, Йошкар-Ола 2007г., Симпозиуме «Надежность и качество 2008» Пенза, 2008г., VIII - XI Международных научно-практических конференциях «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики», г. Сочи, 2005 – 2008 гг., научной конференции КВАКУ 2008 г., научных конференциях и семинарах КГЭУ в 2005 - 2008 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 печатные работы, в том числе работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ - 3, публикаций в сборниках докладов и тезисов международных и российских конференций - 17, патент на полезную модель - 1, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ - 1.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав, заключения, библиографического списка и приложения. Работа содержит 107 страниц машинописного текста, 36 рисунков, 7 таблиц и 5 приложений на 25 страницах. Библиографический список включает 125 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, научная и практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведена краткая характеристика работы.

Первая глава посвящена обзору литературы по существующим методам неразрушающего контроля подшипников, дана оценка состояния вопроса на данный момент, сформулированы цель и задачи исследования.

Состояние подшипника качения, развитие его дефектов за весь период его службы можно разделить на пять этапов. До начала первого этапа общее техническое состояние подшипника идеальное. На первом этапе в подшипнике появляется и начинает развиваться какой-либо дефект, возникают ударные виброимпульсы, растущие по величине. На втором этапе ударные импульсы в подшипнике достигают по своей энергии практически максимального значения. Количественное значение максимума энергии импульсов оп-

ределяется типом подшипника и условиями его эксплуатации. На третьем этапе зона развития дефекта столь велика, что подшипник начинает "терять" свое основное назначение - обеспечивать вращение валов с минимальным трением. Четвертый этап - это последний этап развития дефекта, когда он охватил весь подшипник. Пятый этап - это этап ожидания аварии.

Благодаря работам М.Д. Генкина, А.Г. Соколовой, В.В. Яблонского достигнуты значительные успехи в области контроля машин по вибрации, анализ которой позволяет оперативно обнаружить развивающуюся неисправность, оценить степень ее значимости и предпринять меры к предотвращению незапланированной остановки производственного процесса. Наиболее значимые исследования в области виброакустической диагностики подшипников качения приведены в работах А.В. Фролова, А.В. Баркова, Н.А. Барковой, В.А. Русова. Практически все известные виброакустические методы контроля основаны на анализе либо самого сигнала, либо на анализе его частотных характеристик. Обычно вибрация подшипника регистрируется вибрационным датчиком, установленным на корпусе подшипника, где датчик дополнительно собирает сигналы с других механических компонентов - источников вибрации. Работа подшипника в составе механизма предполагает сигнал с большим уровнем шума, поэтому вибрационная характеристика подшипника распределена в широкой полосе частот, на которую накладываются шум и низкочастотные эффекты.

В последнее время активно развиваются методы контроля подшипников качения, основанные на анализе и сравнении узкополосных составляющих спектров. В то же время в работах А.Е. Яблокова, И.Г. Давыдова, Л.М. Лынькова показана возможность применения непрерывного вейвлет преобразования для анализа вибрационных сигналов подшипников качения.

Анализ литературных данных показал, что вибродиагностики ожидают наибольшей достоверности и наибольшего эффекта при внедрении диагностики подшипников качения по спектрам вибросигналов. В этом случае заранее прогнозируемы ошибки ранних диагнозов. Спектр есть, по своему определению, распределение мощности исходного временного вибросигнала в частотной области. Поэтому появления явно выраженных узких пиков на спектре в зоне характерных частот того или иного элемента подшипника качения, имеющих не только большую амплитуду, но и существенную мощность, следует ожидать только в том случае, когда дефект разовьется до такой степени, что его мощность будет соизмерима с мощностью четко диагностируемых пиков на спектре. Иными словами, дефект должен быть достаточным развита, тогда его будет видно на спектре.

Во второй главе проведен анализ статистических методов сравнения амплитудных спектров и вейвлет скейлограмм сигналов вибрации подшипников качения, выбор наиболее эффективного из них для оценки технического состояния подшипников. Выполнено моделирование дефектов подшипников качения путем синтеза сигналов с частотными составляющими, характерными для дефектов.

Обычно «классические» критерии сравнения амплитудных спектров явно включают предположение, что исследуемые случайные величины распределены по некоторому известному закону. Такие критерии называются параметрическими. Как правило, непараметрические критерии имеют дело не с численными значениями измеренных величин, а с их рангами. Для сравнения спектров в работе использовались коэффициент корреляции спектров и ранговая корреляция спектров Спирмена.

Вейвлетный анализ представляет собой особый тип линейного преобразования сигналов и отображаемых этими сигналами физических данных о процессах и физических свойствах природных сред и объектов. Первые теоретические работы по основам вейвлетных преобразований были выполнены в 90-х годах двадцатого века Мейером (Meyer Y.), Добеши (Daubechies I.) и Маллатом (Mallat S.A.). Базис собственных функций, по которому проводится разложение сигналов, обладает многими специальными свойствами и возможностями. Они позволяют сконцентрировать внимание на тех или иных особенностях анализируемых процессов, которые не могут быть выявлены с помощью традиционных преобразований Фурье и Лапласа.

Результатом непрерывного вейвлет-преобразования одномерного числового ряда (сигнала) является двумерный массив амплитуд – значений коэффициентов $C(a, b)$:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) |a|^{-1/2} \psi_0[(t-b)/a] dt,$$

где $s(t)$ – сигнал; $\psi(t)$ – базисная функция вейвлета; a – временной масштаб; b – временная локализация. Распределение этих значений в пространстве (a, b) дает информацию об изменении относительного вклада вейвлетных компонент разного масштаба во времени и называется спектром коэффициентов вейвлет-преобразования, масштабно-временным (частотно-временным) спектром, вейвлет-спектром (wavelet spectrum) и скейлограммой.

Сравнение скейлограмм, полученных непрерывным вейвлет преобразованием, проводилось при помощи PSNR-метрики. Аббревиатура PSNR (peak signal-to-noise ratio) является термином, означающим соотношение между максимумом возможного значения сигнала и мощностью шума, искажающего значения сигнала, и рассчитывается по формуле

$$PSNR = 20 \times \log \left(\frac{\text{Max value}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{\min(b^s, b)} \sum_{j=f_1}^{f_2} (c_i[j] - c_i[j])^2}} \right),$$

где Max_value – амплитуда сигнала максимально возможной мощности, допустимая в данном представлении звукового сигнала; $c_i^s[j]$ и $c_i[j]$ – значения амплитуд скейлограмм эталонного и исследуемого подшипника; b^s и b – количество сдвигов вейвлет базиса для первого и второго сигнала соответственно; f_1 и f_2 – параметры, отфильтровывающие из общей скейлограммы частотную полосу для исследования. Преимуществом применения PSNR-метрики является то, что она позволяет рассматривать изменения в отдельных частотных диапазонах и, в то же время, не чувствительна к фазе сигнала.

Для классификации подшипников на классы “бездефектный” или “дефектный” (рис. 1) предложен подход, характерный для процедур отбраковки аномалий. Алгоритм анализа интерпретирует совокупность вычисленных значений некоторой статистики ($p_1, p_2, \dots, p_m$) как множество измеренных значений абстрактного параметра и применяет к этой совокупности следующую процедуру: вычисляется оценка положения $\bar{p}$; вычисляется оценка разброса S как медиана абсолютных отклонений относительно оценки положения; для заданного уровня значимости α строится доверительный интервал

$$\bar{p} \pm S \cdot t\left(1 - \frac{\alpha}{2}, m - 2\right),$$

где $t(\alpha, m)$ – α -квантиль распределения Стюдента с m степенями свободы. Подшипники с результатами сравнения, попавшими в доверительный интервал, считаются бездефектными, не попавшими – дефектными.

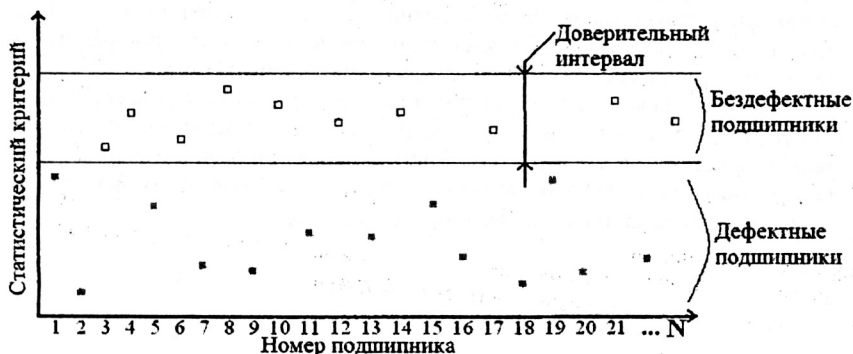


Рис. 1 Классификация подшипников “бездефектный” или “дефектный”

Для исследования критериев сравнения спектров и скейлограмм подшипников в программной среде LabView была разработана программа моделирования дефектов подшипников качения. С помощью нее были сгенерированы сигналы подшипников как бездефектных, так и с различными типами

дефектов. Значения амплитуд частот подшипниковой вибрации определялись по известным формулам. Так как в реальных условиях подшипники качения в роторных машинах являются источником подшипниковых вибраций с широким спектром частот (от нескольких Гц до десятков кГц), близких по своему характеру к стохастическим, дополнительно на каждый сигнал было наложено несколько типов шумов.

На рис. 2 показаны характерные спектры смоделированных сигналов с амплитудой шумовой составляющей ниже амплитуды частот дефектов (а - оборудование с низким уровнем шумов или дефект на поздней стадии развития) и выше амплитуды частот дефектов (б - оборудование с высоким уровнем шумов или дефект на ранней стадии развития).

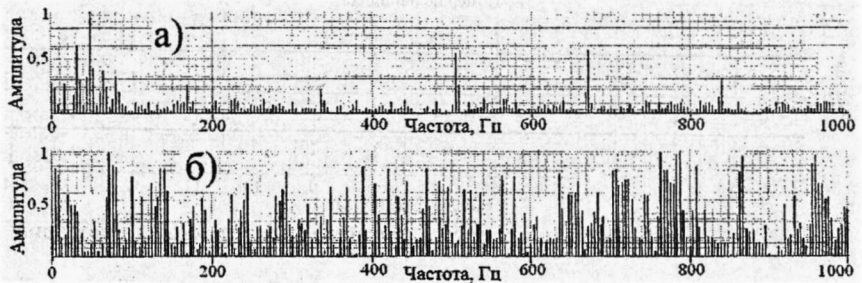


Рис. 2 Спектры смоделированных сигналов

На рис. 3, 4 показано по пять результатов сравнения смоделированных сигналов бездефектных (номера подшипников 1-2) и дефектных подшипников качения (3-14) с амплитудой шумовой составляющей ниже (а) и выше (б) амплитуды частот дефектов. Подшипники с номерами 3-4 соответствуют началу второго этапа развития дефекта внешнего кольца подшипника (задир более 0,1 мм), 5-6 – началу третьего этапа развития дефекта внешнего кольца (трещина), 7-8 – второму этапу развития дефекта шариков качения (задир более 0,1 мм), 9-10 – третьему этапу развития дефекта шариков качения (скол более 0,2 мм), 11-12 – второму этапу развития дефекта внутреннего кольца подшипника (задир более 0,1 мм), 13-14 – третьему этапу развития дефекта внутреннего кольца подшипника (трещина). С помощью программы «Detect-Fault» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008610104) было проведено сравнение характеристик сигналов. Установлено, что результаты сравнения спектров по ранговой корреляции Спирмена схожи с результатами сравнения по коэффициенту корреляции спектров. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты сравнения спектров по коэффициенту корреляции.

Также было проведено сравнение скейлограмм смоделированных сигналов PSNR-метрикой по сорока типам вейвлет базиса, таких как: Meyer, Morlet, Mexican Hat, Haar, db02 - db14, sym2 - sym8, coif1 - coif5, bior1_3,

bior1_5, bior2_2, bior2_4, bior2_6, bior2_8, bior3_1, bior3_3, bior3_5, bior3_7, bior3_9.

На рис. 4 представлены данные сравнения вейвлет скейлограмм, в качестве вейвлет базиса Mexican Hat, PSNR-метрикой.

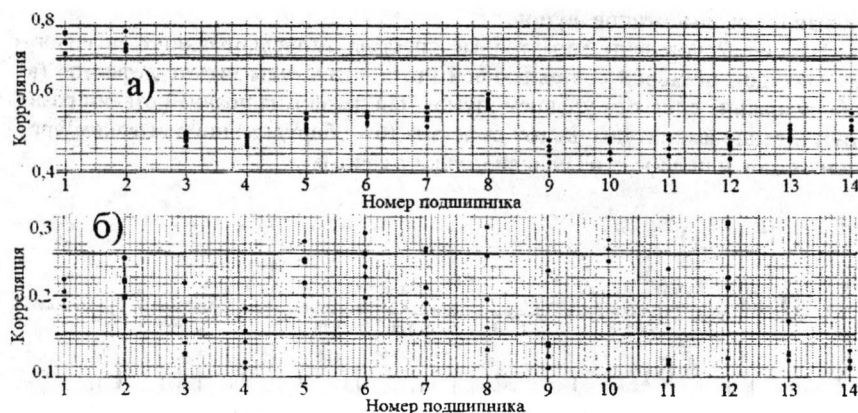


Рис. 3 Результаты сравнения спектров сигналов подшипниковых вибраций

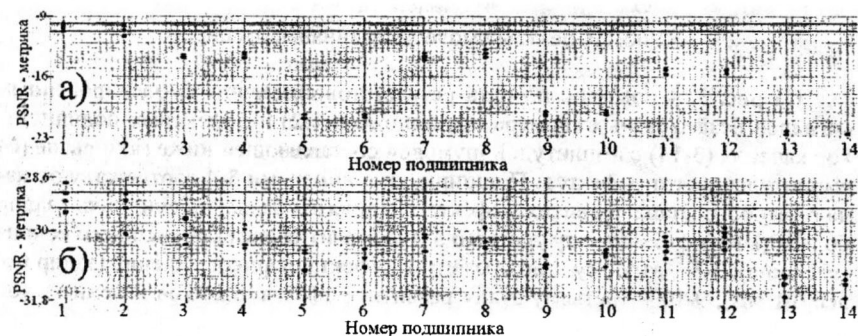


Рис. 4 Результаты сравнения скейлограмм сигналов подшипниковых вибраций

Анализ полученных данных показал следующее: критерии сравнения спектров позволяют обнаружить дефекты при уровне шумов, значительно меньшем уровня сигнала подшипника или на поздней стадии развития дефектов и не применимы для ранней диагностики подшипников качения или диагностики подшипников качения в оборудовании, где уровень шума превосходит уровень сигнала подшипника; для контроля подшипников подходят все вышеприведенные базисные вейвлет функции независимо от стадии развития дефекта и уровня зашумленности. Так как у каждого дефекта значения

частот разные, а PSNR-метрика позволяет рассматривать отличия и в отдельных частотных диапазонах, то с ее помощью можно классифицировать дефект и на ранней стадии развития.

Непрерывное вейвлет преобразование и PSNR-метрика в качестве критерия сравнения применимы для вибродиагностики подшипников качения и имеют ряд преимуществ по сравнению с классическими спектральными методами обработки сигналов: позволяют определять дефекты на ранней стадии зарождения; определение дефекта мало зависит от степени зашумленности; в случае сравнения спектров при увеличении шумовой составляющей в 10 раз определение дефекта невозможно, а при сравнении скейлограмм вероятность обнаружения дефекта уменьшается в 1,2 раза.

В третьей главе описан разработанный виброакустический измерительно-диагностический комплекс.

С целью проведения экспериментов и оценки технического состояния подшипников качения в лаборатории эксплуатации и технической диагностики Казанского Государственного Энергетического Университета разработан и изготовлен измерительно-диагностический комплекс (ИДК), предназначенный для регистрации, обработки и анализа виброакустических характеристик подшипников качения. ИДК состоит из экспериментальной установки (ЭУ) и унифицированного пакета прикладных программ «DetectFault» для ПК (ППП).

Экспериментальная установка предназначена для исследований виброакустических характеристик подшипников качения (патент на полезную модель №72546). Система регистрации ИДК (рис.7) включает в себя индуктивный датчик оборотов, датчик пьезоэлектрический KD-35, устройство сбора данных NI USB-6229, ПК, блок управления частотой вращения электродвигателя, электропривод и усилитель.

С использованием PPP «DetectFault» выполняются следующие операции:

1. Преобразование и регистрация аналоговых амплитудно-временных сигналов, поступающих по одному или нескольким каналам, в цифровой код на заданном временном интервале в соответствии с установленным интервалом дискретизации.

2. Выбор типа вейвлета.

3. Формирование скейлограммы с использованием непрерывного вейвлет преобразования на определенном временном участке амплитудно-временного сигнала.

4. Нормализация полученных скейлограмм, при которой амплитуды на всех участках нормируются среднеинтегральной амплитудой скейлограммы.

5. Формирование обобщенной скейлограммы подшипников качения по формуле:

$$a_{(i,j)s}^{(0)} = \underset{k}{med} \{a_{(i,j)k}\}, \quad j = \overline{1, M}, \quad i = \overline{1, N}, \quad k = \overline{1, L},$$

где $a_{(i,j)s}$ – i, j -ая составляющая множества амплитуд обобщенной скейлограммы, $a_{(i,j)k}$ – амплитуда на i -том масштабе j -го сдвига k -й входной скейлограммы, M – число масштабов непрерывного вейвлет преобразования, N – число сдвигов непрерывного вейвлет преобразования, K – число анализируемых скейлограмм.

6. Формирование эталонной скейлограммы с использованием всех исходных скейлограмм контролируемых изделий или скейлограмм только исправных изделий.

7. Сравнение скейлограмм с привлечением различных целевых функций и выбор наиболее информативной функции.

8. Анализ результатов сравнения, выявление дефекта и протоколирование результатов контроля.

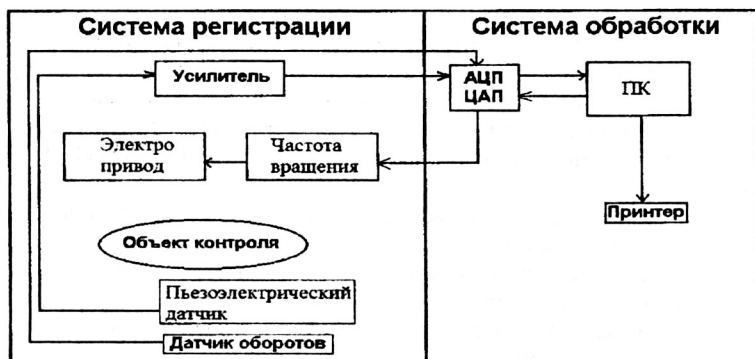


Рис. 5 Блок-схема комплекса

Конструкция ИДК позволяет получать виброакустические сигналы дефектных и бездефектных подшипников качения разных типоразмеров.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям влияния дефектов подшипников качения на их виброакустические характеристики.

Проведена оценка повторяемости результатов экспериментов и сделан вывод, что экспериментальная установка, система измерения и обработки сигналов обеспечивают воспроизводимость результатов. Относительная ошибка результатов измерений определялась вероятностно-статистическим методом по ГОСТ 8.207-76 путем получения среднего арифметического результатов наблюдений амплитуды колебания подшипника качения фирмы VDYD типоразмера 6208 и составила 2,2 % при доверительной вероятности $P=0,95$ и результатах измерений $\bar{A}=0,9286$ В.

Порядок проведения экспериментов заключался в следующем: производилась настройка ППП «DetectFault»; исследуемый подшипник устанавли-

вался на валу и зажимался металлической лентой; запускался электродвигатель и устанавливались необходимые обороты вращения двигателя; проводилось измерение амплитуды колебаний подшипника качения пьезодатчиком с записью полученных результатов в память компьютера; проводилось вейвлет-преобразование записанных сигналов для получения вейвлет скейлограмм; проводилось сравнение вейвлет скейлограмм с эталонной вейвлет скейлограммой и выдавалось заключение о состоянии исследуемого подшипника.

Экспериментальные исследования проводились на бездефектных подшипниках и подшипниках с созданными дефектами (табл. 1).

Таблица 1 Характеристики исследуемых подшипников качения

№ Подшипника	Тип дефекта	Способ создания	Этап развития
1,2	Бездефектный	--	--
3,4	Дефект сепаратора	Ослабление одной заклепки сепаратора	Начало второго этапа развития дефектов
5,6		Ослабление двух заклепок сепаратора	
7,8	Дефект шарика подшипника	Электрическим разрядом, диаметр дефекта варьировался от 0,1 до 1,5 мм, глубина отверстия 0,1 мм	Начало первого этапа развития дефектов
9,10	Дефект внешней обоймы подшипника		
11,12	Дефект внутренней обоймы подшипника		
13,14	Неудовлетворительная смазка подшипника	Внесение в смазку небольшого количества твердых частиц	

На рис. 6 показаны по пять значений результатов сравнения скейлограмм бездефектных и дефектных подшипников качения VDYD типоразмера 6208 PSNR-метрикой, для вейвлета Mexican hat, с эталонной скейлограммой. Каждый из приведенных дефектов создавался на двух подшипниках. Эталонная скейлограмма формировалась из скейлограмм бездефектных подшипников.



Рис. 6 Результаты сравнения скейлограмм

Анализ экспериментов по влиянию дефектов на параметры колебаний подшипников качения показал устойчивое определение дефекта подшипников качения на ранней стадии зарождения с помощью PSNR-метрики и на других типоразмерах подшипников и подтвердил возможность применения данного метода для контроля дефектов подшипников качения в автоматическом режиме.

Результаты работы позволили создать методику оценки технического состояния подшипников качения, включающую в себя как элементы классических спектральных методов обработки сигналов, так и метода, основанного на применении непрерывного вейвлет анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с задачами исследований в диссертационной работе получены следующие результаты:

- На основе проведенного анализа существующих методов контроля подшипников качения сделан вывод о целесообразности метода с использованием непрерывного вейвлет преобразования.
- Смоделированы сигналы бездефектных подшипников и подшипников с часто встречаемыми в процессе эксплуатации дефектами.
- Разработан алгоритм обнаружения дефектов в подшипниках качения по параметрам их вибраций, который реализован в программе «Detect-Fault».
- Разработана и создана опытная установка и проведены экспериментальные исследования параметров вибраций подшипников качения типоразмеров 207-409.
- Экспериментально получены и проанализированы скейлограммы сигналов вибраций подшипников качения.
- Определена целевая функция сравнения скейлограмм непрерывного вейвлет анализа, PSNR-метрика, позволяющая эффективно выявлять неисправность подшипника на начальном этапе развития дефекта и незначительно зависящая от уровня зашумленности оборудования.
- Разработан метод контроля технического состояния подшипников по виброакустическим параметрам на основе сравнения вейвлет скейлограмм.

Поставленная цель диссертационной работы достигнута.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

1 Акутин М.В. Виброакустический метод контроля состояния подшипников энергетического оборудования / Акутин М.В., Ваньков Ю.В. // XVIII межд. научно-практ. конф. Математические методы в технике и технологиях : Сборник трудов. Казань : КГТУ, 2005. С. 163 - 165.

2 Акутин М.В. Методика контроля технического состояния подшипников на основе ранговых критериев сравнения спектров / Акутин М.В., Ваньков Ю.В. // VII межд. научно-практ. конф. Фундаментальные и прикладные

проблемы приборостроения, информатики и экономики : Сборник трудов. М. : МГУПИ, 2005. С. 4 - 9.

3 Акутин М.В. Моделирование виброакустических сигналов подшипников с целью разработки методики их диагностирования / Акутин М.В., Ваньков Ю.В. // XVII межд. Интернет – конф. МИКМУС пробмаш 2005 : Сборник трудов. М. : Институт машиноведения им. Благонравова РАН, 2005. С. 58 - 61.

4 Акутин М.В. Вейвлет анализ и вибродиагностика подшипников / Акутин М.В., Ваньков Ю.В. // Аспирантско-магистерский семинар : Тезисы докладов. Казань : КГЭУ, 2005. С. 43 - 44.

5 Акутин М.В. Моделирование частот дефектов подшипников и их сравнение с экспериментальными данными / Акутин М.В., Ваньков Ю.В. // XII межд. научно-тех. конф. Радиоэлектроника электротехника и энергетика : Тезисы докладов. М. : МЭИ, 2006. С. 283 - 284.

6 Акутин М.В. Вибродиагностика подшипников качения с использованием технологии вейвлет анализа / Акутин М.В., Ваньков Ю.В. // I молодежная научная конф. Тинчуринские чтения : Тезисы докладов. Казань : КГЭУ, 2006. С. 48 - 50.

7 Акутин М.В. Прибор для анализа виброакустических сигналов в среде LabView / Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Костылева Е.Е. // IX межд. научно-практ. конф. Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики : Сборник трудов. М. : МГУПИ, 2006. С. 8 - 12.

8 Акутин М.В. Программа акустической диагностики клепаного соединения лопаток турбин / Акутин М.В., Ваньков Ю.В. // Межд. научно-практ. конф. Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabView и технологии National instruments : Сборник трудов. М. : РУДН, 2006. С. 320 - 325.

9 Акутин М.В. Методика диагностирования элементов энергетического оборудования и ее реализация в программной среде LabVIEW / Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Афанасьев А.С. // II молодежная межд. научная конф. Тинчуринские чтения : Тезисы докладов. Казань : КГЭУ, 2007. С. 38 - 39.

10 Акутин М.В. Диагностический комплекс для контроля состояния подшипников качения по параметрам вибрации / Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Габдуллин Л.М., Симашева Р.В. // X межд. научно-практ. конф. Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики : Сборник трудов. М. : МГУПИ, 2007. С. 13 - 18.

11 Акутин М.В. Вейвлет анализ и вибродиагностика подшипников качения / Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е. // III молодежная межд. научная конф. Тинчуринские чтения : Тезисы докладов. Казань : КГЭУ, 2008. С. 46 - 47.

12 Акутин М.В. Диагностика подшипников качения с помощью непрерывного вейвлет преобразования / Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е. // Симпозиум Надежность и качество 2008 : Сборник докладов. Пенза : ПензГУ, 2008. С. 10 - 12.

13 Акутин М.В. Диагностика подшипников качения при помощи вейвлет анализа / Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е. // Тезисы докладов. Казань : КВАКУ, 2008. С. 89 - 90.

14 Акутин М.В. Применение вейвлет - анализа для определения дефектов подшипников качения / Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е. // Казань : Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева – 2008. №3. С. 29 - 31.

15 Акутин М.В. Непрерывный вейвлет-анализ и его применение в диагностике подшипников качения / Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е. // Межд. научно-техн. конф. ЭНЕРГЕТИКА–2008 : инновации, решения, перспективы : Материалы докладов. Казань : КГЭУ, 2008. С. 132 - 136.

16 Акутин М.В. Повышение достоверности результатов диагностики подшипников качения применением вейвлет – преобразования / Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е., Акутин В.М. // XI межд. научно-практ. конф. Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики : Сборник трудов. М. : МГУПИ, 2008. С. 4 - 7.

17 Акутин М.В. Инструментальный метод контроля статорных колес ГТД НК 16-18 СТ и НК 16 СТ / Бусаров А.В., Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е., Акутин М.В. // XVIII всероссийская научно-техн. конф. НК и техническая диагностика : Материалы докладов. Н.Новгород : 2008. С. 250 - 251.

18 Акутин М.В. Испытания автоматизированного диагностического комплекса в условиях производства / Бусаров А.В., Ваньков Ю.В., Акутин М.В. // Межд. научно-техн. конф. ЭНЕРГЕТИКА–2008 : инновации, решения, перспективы : Материалы докладов. Казань : КГЭУ, 2008. С. 136 - 140.

19 Акутин М.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008610104: DetectFault / Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Бусаров А.В., Зиганшин Ш.Г. Заявка №2007614295, 2007.

20 Акутин М.В. Патент на полезную модель №72546: Устройство для измерения уровня вибрации подшипников / Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е., Зиганшин Ш.Г., Акутин В.М. Заявка №2007141875/11, 2008.

21 Акутин М.В. Метод контроля состояния подшипников качения на основе сравнения вейвлет скейлограмм / Акутин М.В. // Казань : Известия Высших учебных заведений. Проблемы энергетики – 2009. №2. С. 140 - 144.

22 Акутин М.В. Оценка технического состояния подшипников качения виброакустическим методом / Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е., Петрушенко Ю.Я. // М. : Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика – 2009. №2. С. 55 - 57.

Лиц. №00743 от 28.08.2000
Подписано к печати 26.12.08
Гарнитура "Times"
Физ. печ. л. 1.0.
Тираж 100 экз.

Вид печать РОМ
Усл. печ. л. 0.94
Заказ № 3356

Формат 60 x 84 / 16
Бумага офсетная
Уч. – изд. л. 1.0