

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 681.518.5; 621.822.6; 621.833

АСЛАМОВ
Юрий Павлович

**КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ
ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ,
управление и обработка информации

Минск 2019

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель

Давыдов Игорь Геннадьевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры информационных радиотехнологий
учреждения образования «Белорусский
государственный университет информатики и
радиоэлектроники»

Официальные оппоненты:

Гейстер Сергей Романович,
доктор технических наук, профессор,
руководитель опытных и экспериментальных
разработок закрытого акционерного общества
«Группа производственных технологий и
авиационного машиностроения «Аэромаш»

Петровский Николай Александрович,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры электронных вычислительных
средств учреждения образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация

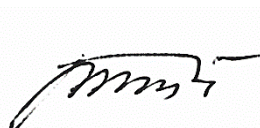
Учреждение образования «Гомельский
государственный университет имени
Ф. Скорины»

Защита состоится «16» января 2020 г. в 16:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375 17 2938989.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « » декабря 2019 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций Д 02.15.01,
кандидат технических наук, доцент



М. П. Ревотюк

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопрос контроля работоспособности роторного оборудования является актуальным для большинства промышленных предприятий. Методы и средства вибрационной диагностики позволяют обнаруживать дефекты оборудования на ранней стадии их развития, своевременно проводить ремонтные работы и тем самым значительно снижать эксплуатационные расходы предприятий.

Последние достижения в области информационных технологий, искусственного интеллекта и цифровой обработки сигналов делают возможным создание полностью автоматических систем вибрационной диагностики, исключая из процесса принятия решений эксперта. Для разработки данных систем необходимо использовать качественно новые методы анализа вибрационных сигналов.

Так, например, большой объем новой диагностической информации о техническом состоянии роторного оборудования может быть получен на основе анализа временной структуры его вибрационных сигналов. Однако на текущий момент такого рода анализ не автоматизирован и заключается в визуальном осмотре экспертом-вибродиагностом временных реализаций вибрационных сигналов, поэтому результаты анализа носят субъективный характер.

Диссертационная работа посвящена созданию и исследованию эффективности новых методик и алгоритмов автоматического анализа временной структуры вибрационных сигналов для контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования. Разработанные методики и алгоритмы апробированы на реальных объектах в составе программно-аппаратных комплексов вибрационной диагностики.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертации соответствует направлению 7 «Информационно-коммуникационные и авиакосмические технологии», пунктам 7.1 «разработка интегрированных систем автоматизации управления процессами и ресурсами организаций» и 7.6 «технологии развития информационного общества» Приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденного Указом Президента Республики Беларусь № 166 от 22.04.2015.

Диссертационная работа выполнена в рамках НИР (научно-исследовательской работы) по заданию 2.51 «Разработка средств оценки ресурса для технологии повышения ресурса высоконагруженных подшипников качения на основе применения методов вибродиагностики», ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» (ГБЦ №16-3094, срок выполнения 04.01.2016–31.12.2018).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка комплекса алгоритмов вейвлет-анализа временной структуры вибрационных сигналов для повышения эффективности контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1) провести анализ современных методов и средств контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования;

2) теоретически и экспериментально обосновать информативные сигнальные фрагменты вибрации, отражающие наличие дефектов функциональных узлов роторного оборудования, и разработать комплекс вейвлет-функций для их обнаружения во временной структуре вибрации;

3) создать словарь вейвлет-функций и разработать алгоритм разреженной декомпозиции вибрационных сигналов по вейвлетному словарю для формирования компактного описания временной структуры вибрации;

4) разработать комплекс алгоритмов автоматического анализа компактного описания временной структуры вибрационных сигналов для контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования и оценить его эффективность.

Объектом исследования является временная структура сигналов вибрации.

Предметом исследования являются модели описания временной структуры вибрации и алгоритмы ее вейвлет-анализа для контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования.

Научная новизна

В математическое выражение для базисных вейвлет-функций, используемых для выделения экспоненциальных, модуляционных и синусоидальных фрагментов временной структуры вибрации, введен дополнительный параметр, позволяющий изменять число осцилляций несущего колебания в пределах эффективного носителя вейвлетов. Введенный параметр позволяет более чем на 12 % повысить эффективность выделения информативных сигнальных фрагментов вибрации, описывающих процесс дефектообразования в основных функциональных узлах роторного оборудования. Для выделения шумовых сигнальных фрагментов вибрации, соответствующих нормальному состоянию функциональных узлов роторного оборудования для различных режимов его работы, в вейвлет-функцию *Mexican Hat* введен параметр, изменяющий ее несущую частоту.

В алгоритме разреженной декомпозиции для повышения эффективности описания временной структуры вибрации использован избыточный словарь, состоящий из семейств вейвлет-функций, члены которых изменяют свою протяженность в пределах априорной длительности анализируемых сигнальных фрагментов для заданного оборудования. Установлены зависимости величины

корреляционного отклика вейвлет-функций на модельные воздействия заданной временной структуры от длительности вейвлет-функций и показано, что при двукратном увеличении длины эффективного носителя вейвлет-функций в пределах семейств снижение величины корреляционного отклика вейвлет-семейств не превысит 5 %. В процессе разреженной декомпозиции сигнала вибрации по избыточному вейвлетному словарю для определения оптимальной базисной вейвлет-функции на каждой итерации использована весовая сумма показателей в виде значений максимумов нормированной и ненормированной взаимных корреляционных функций вейвлетов словаря и сигнала вибрации.

Контроль работоспособности роторного оборудования на основе автоматического анализа временной структуры вибрационных сигналов разбит для несколько этапов. На первом этапе на базе декомпозиции скейлограммы сигнала вибрации выделяются его значимые частотные области, в пределах каждой из которых на базе разреженной декомпозиции сигнала вибрации по избыточному вейвлетному словарю формируется компактное описание временной структуры вибрации. На втором этапе для каждой выделенной частотной области формируется набор диагностических признаков, включающий прирост энергии в пределах частотной области, обнаруженные периодичности во временной структуре вибрации, распознанный тип временной структуры вибрации и распознанный тип функционального узла оборудования. На третьем этапе на основе классификации полученных диагностических признаков делается заключение о наличии дефектов роторного оборудования.

Положения, выносимые на защиту

1. Комплекс теоретически и экспериментально обоснованных базисных вейвлет-функций, позволяющий выделить экспоненциальные, модуляционные, синусоидальные и шумовые сигнальные фрагменты вибрации, соотношение энергии которых указывает на наличие дефектов функциональных узлов роторного оборудования.

2. Алгоритм разреженной декомпозиции сигналов вибрации по избыточному вейвлетному словарю, обеспечивающий формирование компактного описания временной структуры вибрации в виде вектора коэффициентов, значения которых отражают наличие дефектов функциональных узлов роторного оборудования. Объем предлагаемого описания на 2-3 порядка меньше, чем в случае непрерывного вейвлет-преобразования.

3. Комплекс алгоритмов анализа временной структуры вибрационных сигналов, включающий алгоритм разреженной декомпозиции скейлограммы для определения значимых частотных областей сигнала вибрации, алгоритм разреженной декомпозиции вибрационных сигналов по избыточному вейвлетному словарю для формирования компактного описания их временной структуры и алгоритмы анализа компактного описания временной структуры вибрации для выделения наборов диагностических признаков технического

состояния анализируемого оборудования, что обеспечивает точность распознавания дефектов функциональных узлов роторного оборудования не менее 72 %.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты диссертации и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Автором самостоятельно разработаны базисные вейвлет-функции для выделения во временной структуре вибрации экспоненциальных, модуляционных, синусоидальных и шумовых сигнальных фрагментов, характеризующих техническое состояние роторного оборудования; алгоритм разреженной декомпозиции сигналов вибрации по избыточному вейвлетному словарю для формирования компактного описания временной структуры вибрации; алгоритм разреженной декомпозиции скейлограммы сигнала вибрации для выделения его значимых частотных областей; алгоритм распознавания типа функционального узла роторного оборудования на основе анализа компактного описания временной структуры вибрации; методика контроля работоспособности роторного оборудования на основе автоматического анализа временной структуры вибрационных сигналов.

Вклад научного руководителя, кандидата технических наук И. Г. Давыдова, связан с постановкой цели и задач исследования, а также с обсуждением полученных результатов. Полученные при выполнении диссертационной работы результаты также обсуждались с аспирантами А. П. Асламовым, А. В. Цурко, магистрантами Н. В. Космачем, Р. В. Толкачем.

В совместно опубликованных работах автору принадлежат постановка цели и задач исследования, разработка методики проведения экспериментов, анализ и интерпретация полученных результатов, формулирование выводов. На все совместно опубликованные с авторами работы приведены ссылки.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 53-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, г. Минск, Беларусь, 2–6 мая 2017 г.; First World Congress on Condition Monitoring (WCCM'2017), г. Лондон, Великобритания, 13–16 июня 2017 г.; 14-й международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникация, РТ-2018», г. Севастополь, Россия, 14–18 ноября 2018 г.; 14th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2019), г. Минск, Беларусь, 21–23 мая 2019 г.

Теоретические и практические результаты диссертационной работы использованы при реализации автоматической системы оценки технического состояния промышленного оборудования на базе предприятий ООО «СИТЕЛ» и ООО «СКФ».

Опубликование результатов диссертации

Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 20 научных работах, из которых 13 статей в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общий объем 6,74 авторского листа), 3 статьи в сборниках материалов научных конференций, 3 тезиса докладов на научных конференциях, 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем работы составляет 244 страницы, из них 142 страницы основного текста, 315 рисунков на 40 страницах, 17 таблиц на пяти страницах, библиографический список из 197 наименований на 13 страницах, список собственных публикаций из 20 наименований на двух страницах, 19 приложений на 43 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертационной работы и определены основные направления исследования.

В **первой главе** проведен обзор современных методов и средств контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования, рассмотрены их преимущества и недостатки.

Обозначено, что современная система вибрационной диагностики должна удовлетворять ряду новых требований, главными из которых являются выявление конкретных неисправностей функциональных узлов роторного оборудования и полностью автоматическая обработка данных, исключающая из процесса принятия решений эксперта. При этом отмечено, что существующие в настоящее время методы вибрационной диагностики не удовлетворяют в полном объеме обозначенным требованиям.

Установлено, что значительный объем качественно новой диагностической информации о техническом состоянии роторного оборудования заключен во временной структуре вибрационных сигналов. В ходе обзора работ, посвященных анализу временной структуры вибрации, определено, что наибольшую эффективность такого рода анализ имеет для подшипников качения и зубчатых передач, дефектное состояние которых характеризуется ударными и модуляционными вибрационными процессами.

Отмечено, что в настоящее время анализ временной структуры вибрации не автоматизирован по причине отсутствия эффективного представления временных реализаций вибрационных сигналов. С этой целью предложено использовать принцип разреженного представления сигналов, на базе которого

их временная структура может быть описана набором базисных функций с заданной собственной частотой, амплитудой и временным положением [1, 15].

Определены цели и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена разработке базисных функций для обнаружения информативных сигнальных фрагментов во временной структуре вибрации подшипников качения и зубчатых передач [1, 3, 6, 15, 17, 18].

В ходе анализа выделено четыре типа сигнальных фрагментов вибрации, описывающих техническое состояние подшипников качения и зубчатых передач: *экспоненциальные*, *модуляционные*, *синусоидальные* и *шумовые* (рисунок 1). Отмечено, что число осцилляций несущего колебания в пределах указанных сигнальных фрагментов может варьироваться от четырех до 100.

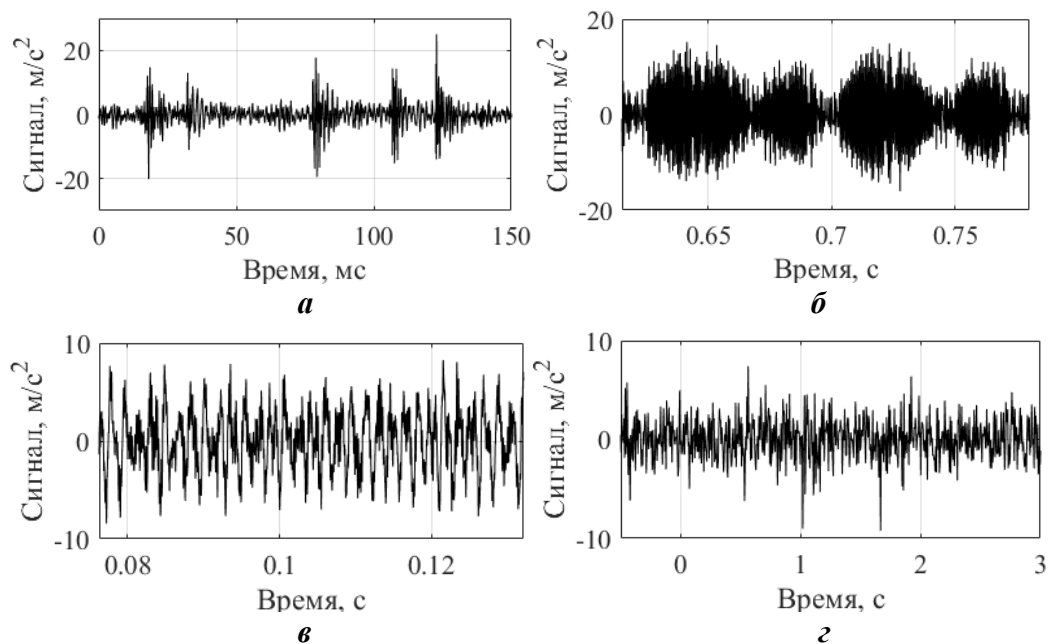


Рисунок 1. – Информативные сигнальные фрагменты вибрации, характеризующие техническое состояние подшипников качения и зубчатых передач:

***а* – экспоненциальные, *б* – модуляционные; *в* – синусоидальные; *з* – шумовые**

Сформулировано четыре требования, которым должны удовлетворять базисные функции для выделения указанных сигнальных фрагментов вибрации: 1) подобие формы; 2) частотно-временная локализация; 3) масштабируемость; 4) адаптация формы. В качестве базисных функций предложено использовать вейвлеты, которые удовлетворяют первым трем требованиям.

Однако вейвлеты не способны изменять число осцилляций несущего колебания (собственной частоты) в пределах своего эффективного носителя для заданного масштаба (требование адаптации формы). Поэтому в математическое выражение для вейвлет-функций введен дополнительный параметр, условно названный коэффициентом формы FF (от англ. *Form Factor*).

Показано, что на основе изменения коэффициента формы FF могут быть получены семейства вейвлет-функций одного типа временной структуры, члены которых имеют различное число осцилляций в своих пределах (рисунок 2).

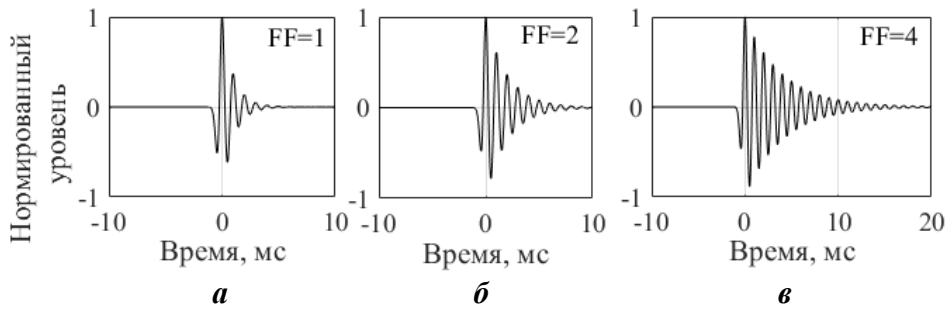


Рисунок 2. – Вейвлеты семейства *MEXP* при значениях коэффициента формы *FF*:
а – *FF*=1; *б* – *FF*=2; *в* – *FF*=4

Для описания экспоненциальных сигнальных фрагментов вибрации, характеризующих дефекты подшипников качения (раковины, сколы и трещины на телах качения, наружном или внутреннем кольце), разработано вейвлет-семейство *MEXP* [6]. Для описания модуляционных сигнальных фрагментов вибрации, соответствующих дефектам зубчатых передач (неравномерный абразивный износ или множественное выкрашивание зубьев шестерни) и подшипников качения (дефект сепаратора), разработаны вейвлет-семейства *AMP* и *BP* [3], а на основе вейвлета *Morlet* сформировано семейство *MORL* [3, 17]. Для описания синусоидальных сигнальных фрагментов вибрации, соответствующих как нормальному, так и дефектному состоянию зубчатых передач (повышенный зазор между шестернями, трещина или излом одиночного зуба шестерни), разработано вейвлет-семейство *SINP* [3, 17]. Для выделения шумовых некоррелированных сигнальных фрагментов вибрации, соответствующих нормальному состоянию функциональных узлов оборудования для различных режимов его работы, предложено использовать вейвлет-функцию *MEXH*, представляющую собой вейвлет-функцию *Mexican Hat*, в выражение для которой введен дополнительный параметр, изменяющий ее несущую частоту.

Разработанные вейвлет-функции представлены на рисунке 3.

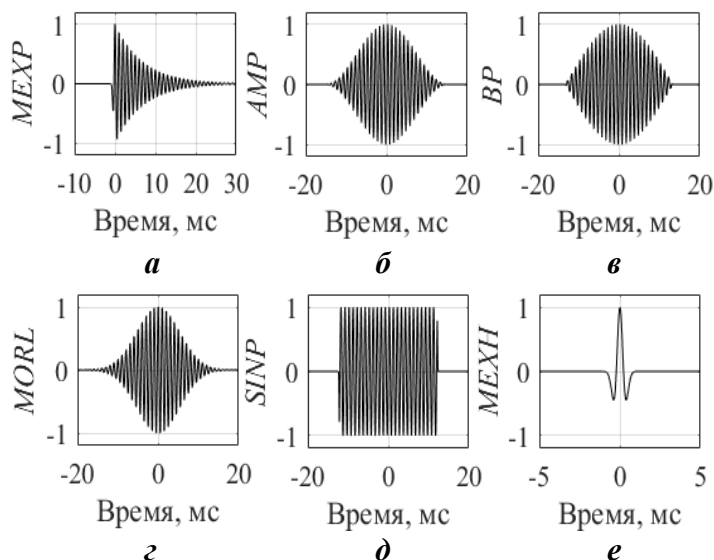


Рисунок 3. – Вейвлет-функции для выделения информативных сигнальных фрагментов во временной структуре вибрации подшипников качения и зубчатых передач:
а – *MEXP*; *б* – *AMP*; *в* – *BP*; *г* – *MORL*; *д* – *SINP*; *е* – *MEXH*

Показано, что все члены разработанных семейств *MEXP*, *AMP*, *BP*, *MORL* и *SINP* удовлетворяют требованиям, предъявляемым к вейвлет-функциям, если их коэффициент формы *FF* превышает определенное минимальное пороговое значение. Установлены [13, 16] пороговые значения коэффициента формы для каждого семейства: $FF_{min}^{MEXP} = 1,0$; $FF_{min}^{AMP} = 2,25$; $FF_{min}^{BP} = 3,36$; $FF_{min}^{MORL} = 0,75$ и $FF_{min}^{SINP} = 1,0$. При значениях коэффициента формы ниже порогового вейвлеты вырождаются в одиночные всплески и утрачивают свои свойства: возрастает среднее значение, смещается собственная частота, растекается Фурье-образ.

Для проведения сравнительного анализа разработанных вейвлет-функций введено понятие *корреляционного отклика* [3, 4, 6], под которым понимается зависимость значения коэффициента взаимной корреляции вейвлета (или вейвлет-семейства) и сигнальных воздействий заданной временной структуры от числа осцилляций несущего колебания в пределах воздействий.

В результате сравнительного анализа установлено [13, 16], что вейвлет-функция *MEXP* характеризуется на +11 % большим корреляционным откликом на *экспоненциальные* фрагменты вибрации (рисунок 1, а), чем известные вейвлет-функции. В свою очередь вейвлет-функции *MORL*, *SINP* и *MEXH* характеризуются на 8 %, 18 % и 12 % большим корреляционным откликом на соответственно *модуляционные* (рисунок 1, б), *синусоидальные* (рисунок 1, в) и *шумовые* (рисунок 1, г) фрагменты вибрационных сигналов.

Отмечено, что использование разработанных вейвлет-функций позволяет в среднем на 12 % повысить чувствительность методов вибрационной диагностики к обнаружению дефектов роторного оборудования.

Третья глава посвящена разработке алгоритма формирования компактного описания временной структуры вибрации на основе принципа *разреженного представления* [1, 4, 11, 13, 16].

Для повышения эффективности разреженного представления сигналов вибрации предложена [4, 16] *методика формирования избыточного словаря*, состоящего из рассмотренных во второй главе вейвлет-семейств *MEXP*, *MORL*, *SINP* и вейвлета *MEXH*. При этом число осцилляций в пределах эффективного носителя вейвлетов каждого семейства словаря увеличивается кратно степени двойки. *Минимальное* число осцилляций несущего колебания в пределах *членов вейвлет-семейств* словаря выбрано на уровне $N_{osc.min}^D \approx 4,35$, что обусловлено полученными ранее пороговыми значениями коэффициента формы *FF* для каждого семейства. В свою очередь наименьшим числом осцилляций среди вейвлетов словаря обладает вейвлет *MEXH* $N_{osc}^{MEXH} = 1,43$.

Максимальное число осцилляций в пределах вейвлетов словаря математически не ограничено и выбрано [4] на уровне $N_{osc.max}^D \approx 100$ исходя из протяженности встречаемых на практике сигнальных фрагментов вибрации функциональных узлов роторного оборудования.

Сформированный словарь обозначен как «*избыточный*», так как для описания с его помощью временной структуры сигнала вибрации в окрестности частоты f_0 используется 30 базисных вейвлет-функций (рисунки 4, 5).

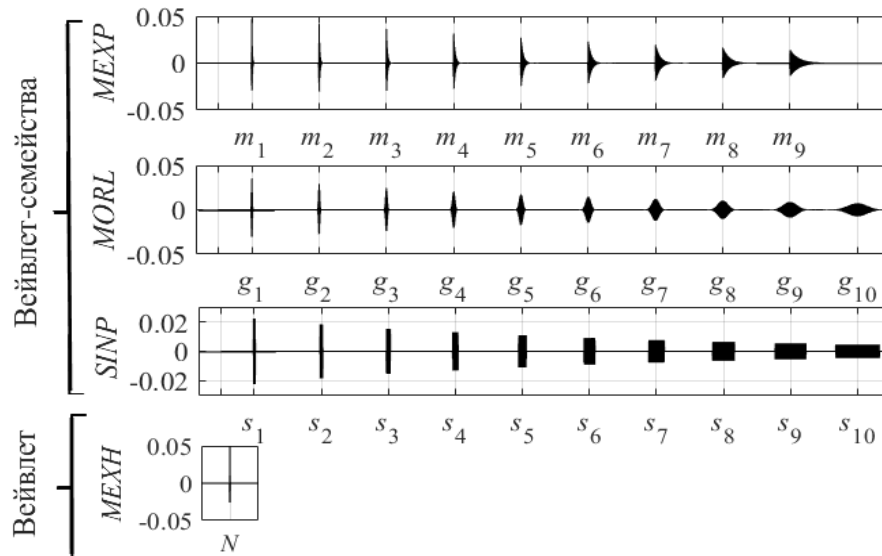


Рисунок 4. – Избыточный вейвлетный словарь для описания временной структуры вибрации в окрестности частоты f_0 в виде совокупности вейвлетов $MEXP$ (« m »), $MORL$ (« g »), $SINP$ (« s ») и $MEXH$ (« N »)

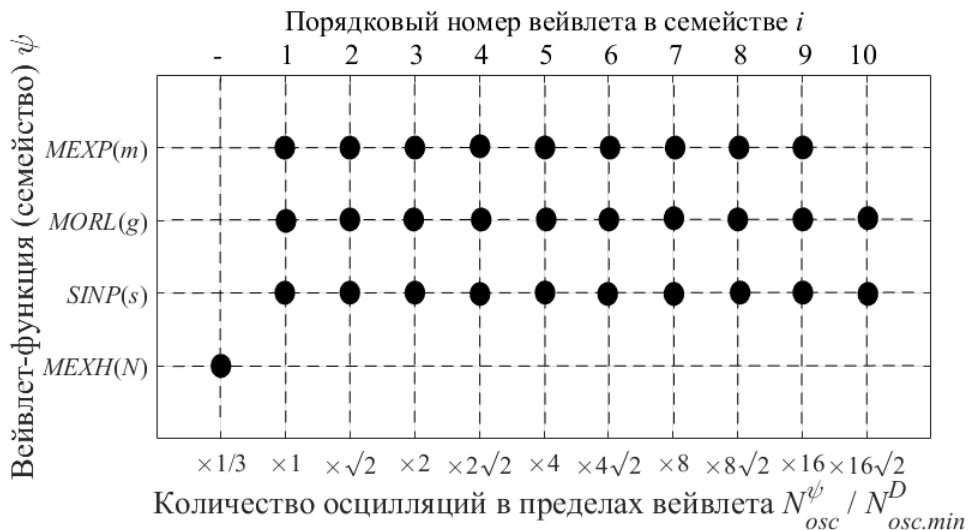


Рисунок 5. – Схематичное представление избыточного вейвлетного словаря для описания временной структуры вибрации в окрестности частоты f_0 в виде решетки «форма-длина», узлами которой являются вейвлеты

Ввиду того, что применение избыточного вейвлетного словаря ко всей информативной в вибродиагностике области частот (от нескольких герц до десятков килогерц) сопряжено с высокими вычислительными затратами, предложено проводить анализ временной структуры сигнала вибрации только в пределах его значимых энергетически выраженных частотных областей.

Для формирования компактного описания временной структуры вибрации в пределах выбранной частотной области предложен [1, 4, 16] алгоритм разреженной декомпозиции сигналов по избыточному вейвлетному словарю.

Алгоритм представляет собой итерационную процедуру, на каждом i -ом шаге которой из сигнала $x(t)$ вычитается наиболее подходящая вейвлет-функция словаря, фиксируется ее тип ψ_m , амплитуда $c_{m,i}$ и временное положение $\tau_{m,i}$

(рисунок 6, а). После каждой итерации обновляется сигнал аппроксимации $x_M(t)$, формируемый из вычитаемых базисных вейвлет-функций (рисунок 6, б).

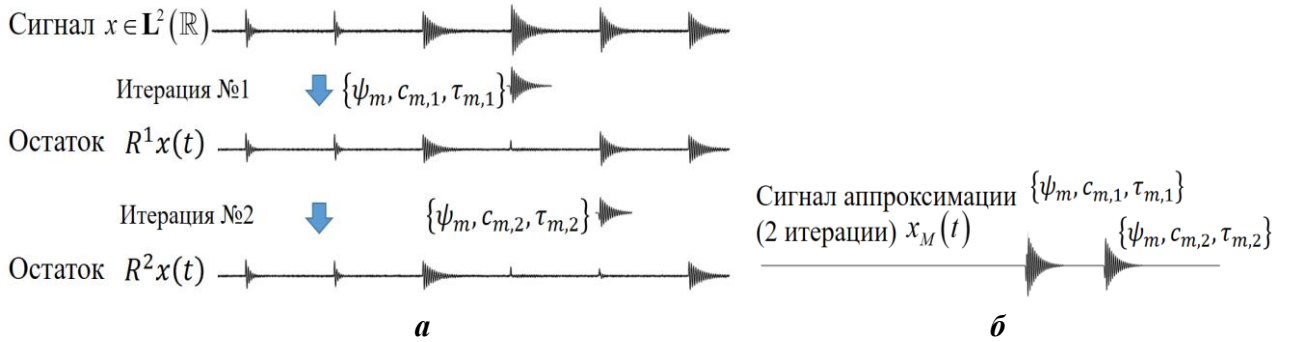


Рисунок 6. – Разреженная декомпозиция модельного сигнала (последовательность экспоненциальных импульсов) по избыточному вейвлетному словарю:
а – схематичное представление двух итераций алгоритма разреженной декомпозиции;
б – сигнал аппроксимации после двух итераций алгоритма разреженной декомпозиции

Алгоритм декомпозиции останавливается при достижении требуемой точности аппроксимации или при превышении максимально допустимого числа итераций [13]. В результате для вибрационного сигнала (рисунок 7, а) формируется *разреженное представление временной структуры X* в виде суперпозиции вейвлет-функций словаря (рисунок 7, в), а также *компактное описание временной структуры W* в виде распределения энергии сигнала между участвующими в декомпозиции вейвлет-функциями словаря (рисунок 7, б).

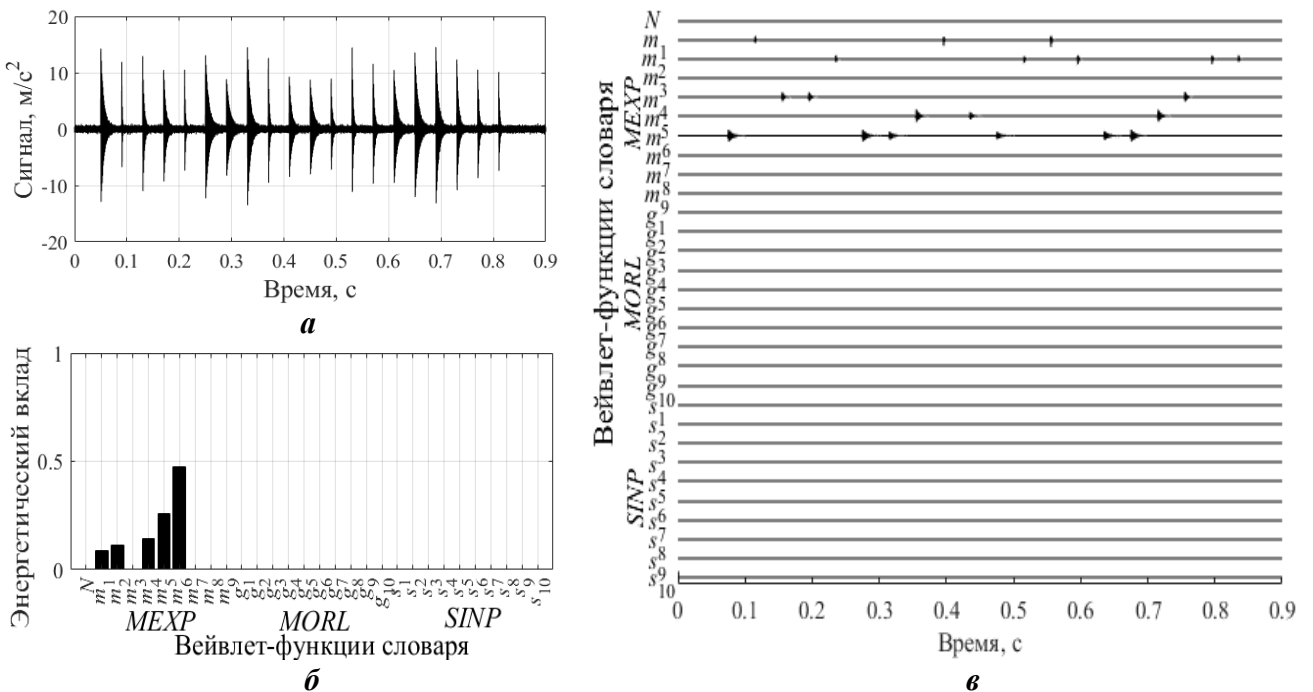


Рисунок 7. – Результат разреженной декомпозиции узкополосного модельного сигнала в окрестности частоты f_0 по избыточному вейвлетному словарю:
а – модельный узкополосный сигнал; **б** – компактное описание временной структуры модельного сигнала как распределение его энергии по вейвлетам словаря;
в – разреженное представление сигнала в виде суперпозиции вейвлетов *MEXP* («N»), *MEXP* («m»), *MORL* («g») и *SINP* («s») избыточного словаря

Показано, что разреженное представление сигнала вибрации, по сравнению с непрерывным вейвлет-преобразованием, позволяет на 2-3 порядка уменьшить необходимое для описания временной структуры вибрации количество информации (коэффициентов).

Определены [13] границы применимости алгоритма разреженной декомпозиции сигналов вибрации по избыточному вейвлетному словарю.

Разработано [11] пять модификаций алгоритма декомпозиции и проведен их сравнительный анализ для выявления лучшей с позиции максимизации скорости декомпозиции и минимизации ошибки аппроксимации. Каждая модификация реализует свой критерий выбора оптимальной базисной вейвлет-функции словаря на каждом шаге алгоритма декомпозиции. В результате выбрана модификация, которая для определения оптимальной базисной вейвлет-функции использует весовую сумму показателей в виде значений максимумов нормированной и ненормированной взаимных корреляционных функций вейвлетов словаря и сигнала вибрации.

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию эффективности методики контроля работоспособности роторного оборудования на основе анализа временной структуры вибрационных сигналов [5, 7–10, 12, 16, 19].

Предложен [12] *алгоритм разреженной декомпозиции скейлограммы* для выделения значимых частотных областей сигнала вибрации, в пределах которых формируется компактное описание временной структуры вибрации.

На первом этапе алгоритма предварительно определяются положения значимых частотных областей вибрации (рисунок 8, *а*) на базе декомпозиции ее скейлограммы (рисунок 8, *б*) с использованием *частотной функции* [12], имеющей вид скейлограммы гармонического сигнала. На втором этапе алгоритма уточняется положение и энергетический вклад выделенных значимых частотных областей сигнала на базе локальных скейлограмм с более высоким частотным разрешением. В результате формируется разреженное представление скейлограммы (рисунок 8, *в*), на базе которого она может быть восстановлена. Установлено [7, 12], что предложенный алгоритм позволяет определить положения значимых частотных областей сигнала вибрации с погрешностью не более 1 % и их энергетический вклад с погрешностью не более 5 %.

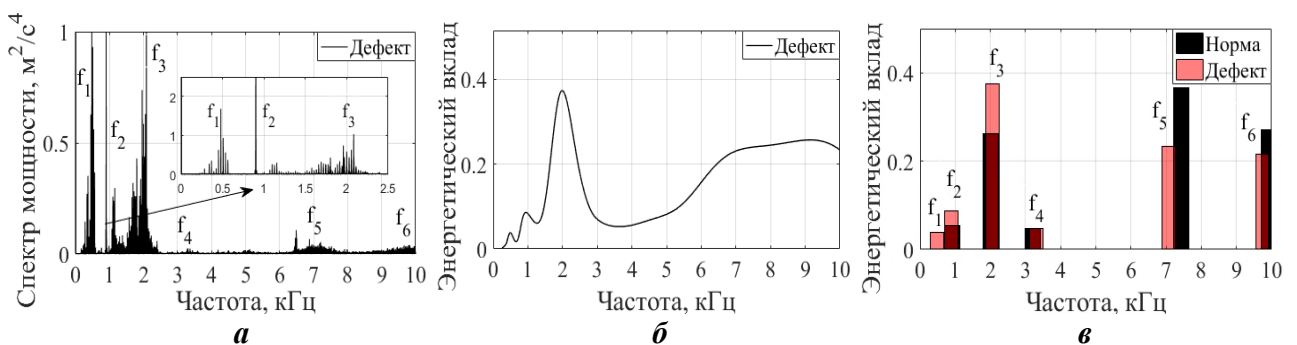


Рисунок 8. – Мониторинг технического состояния коробки передач ветрогенератора:
а – спектр мощности сигнала вибрации при наличии дефекта шестерни (излом зуба);
б – нормированная скейлограмма сигнала вибрации; *в* – разреженное представление скейлограммы сигнала вибрации до и после появления дефекта шестерни

Рассмотрены [5, 10, 13] свойства компактного описания временной структуры вибрационных сигналов как *пространства признаков* для методов машинного обучения. Установлено, что сигналы вибрации подшипников качения (рисунок 9, а) и зубчатых передач (рисунок 9, б) в нем *линейно разделимы* (рисунок 10), при этом точность классификации указанных сигналов на базе метода опорных векторов с линейным ядром составила в среднем 89,3 %. В свою очередь, максимальная точность классификации указанных сигналов вибрации 96,4 % достигнута при помощи полиномиального ядра [5].

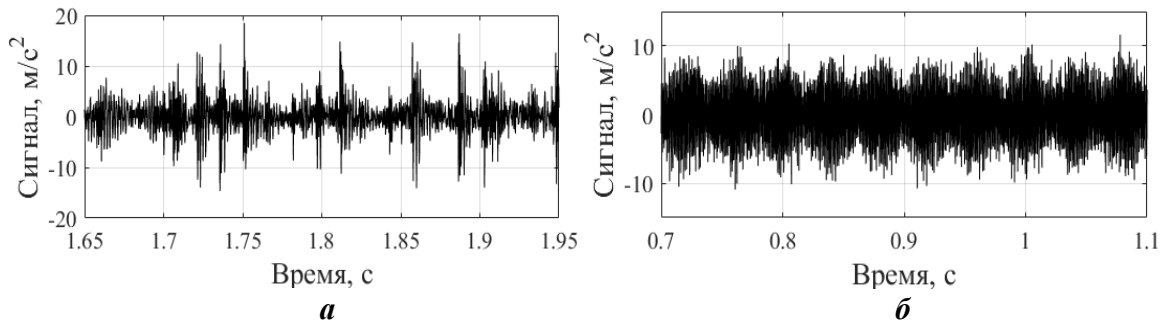


Рисунок 9. – Сигналы вибрации функциональных узлов роторного оборудования:
а – подшипник качения; б – зубчатая передача

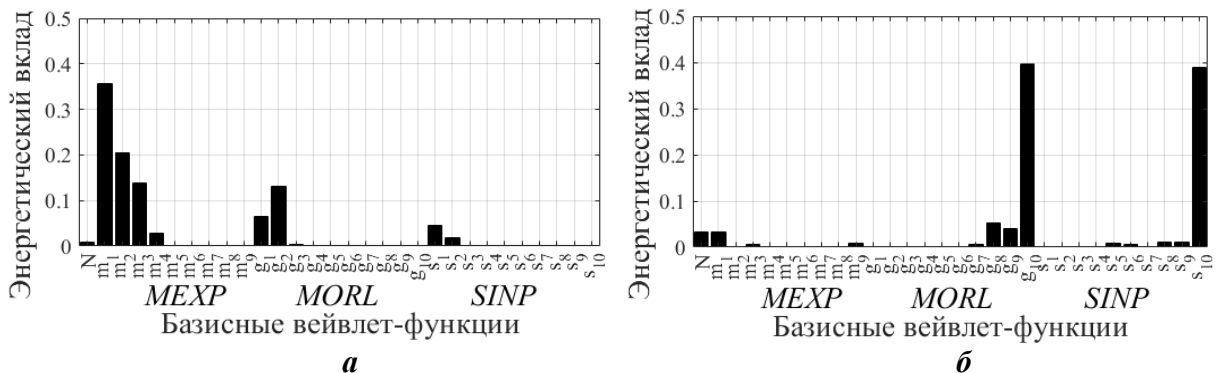


Рисунок 10. – Компактное описание временной структуры вибрации функциональных узлов роторного оборудования как распределение энергии вибрации по базисным функциям избыточного вейвлетного словаря:
а – подшипник качения; б – зубчатая передача

Для контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования предложено проводить мониторинг временной структуры вибрации в пределах ее значимых частотных областей.

При этом установлено, что временная структура вибрации подвержена значительным флуктуациям ввиду изменения скоростного режима работы оборудования [2, 8, 13]. Поэтому для мониторинга временной структуры предложено рассматривать распределение энергии сигналов не по одиночным вейвлетам избыточного словаря, а по целым вейвлет-семействам [5, 13].

С этой целью на базе экспериментальных исследований для вибрации подшипников качения и зубчатых передач выделено восемь *типов временных структур* (рисунок 11), точность распознавания которых с использованием метода опорных векторов с радиальным ядром составила не менее 98 %.

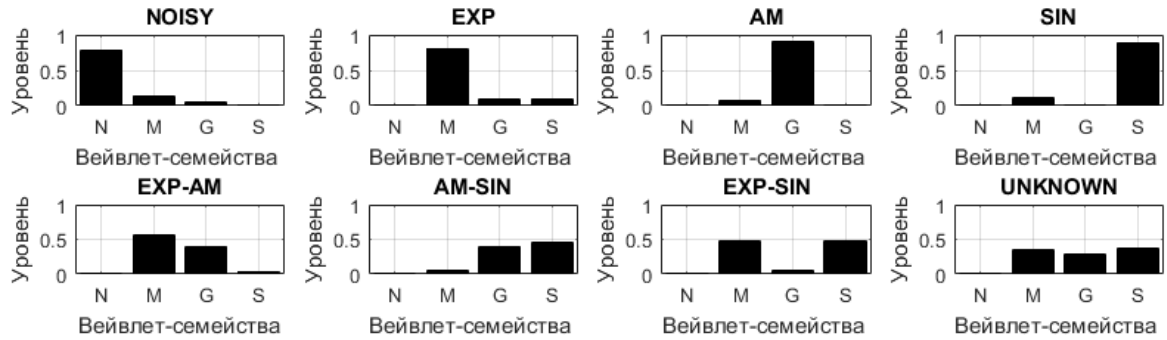


Рисунок 11. – Типы временных структур вибрации подшипников качения и зубчатых передач как распределение энергии сигналов по вейвлет-семействам *MEXH* («N»), *MEXP* («M»), *MORL* («G») и *SINP* («S») избыточного словаря

В качестве примера на рисунке 12, *а* схематично изображен подшипник качения с одиночным дефектом (раковиной) на наружном кольце, а на рисунке 12, *б* приведен фрагмент вибрации данного подшипника при частоте вращения его внутреннего кольца f_R .

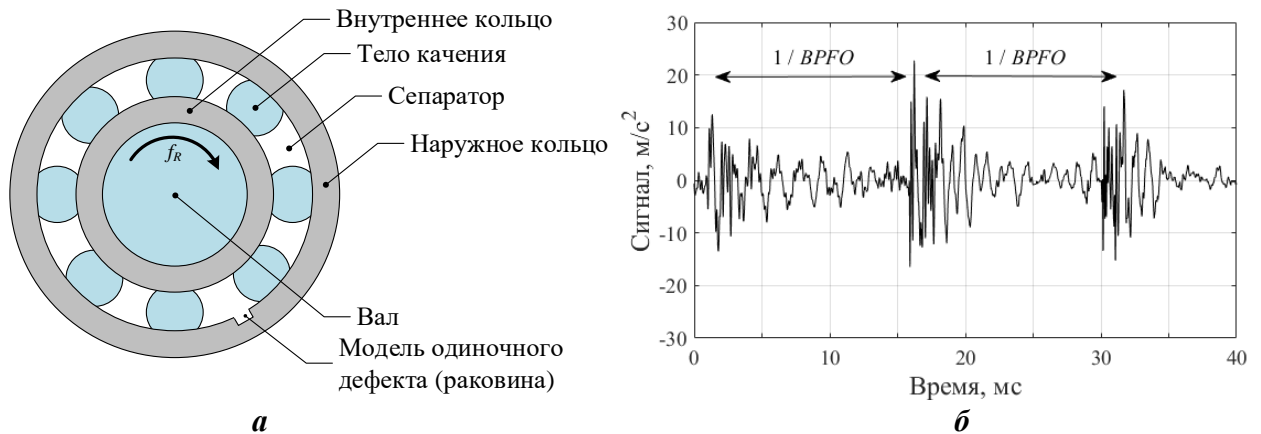


Рисунок 12. – Анализ вибрации подшипника качения с раковиной на наружном кольце: *а* – схематичное изображение конструкции дефектного подшипника качения; *б* – фрагмент сигнала вибрации дефектного подшипника (последовательность экспоненциальных ударных импульсов)

Изображенный на рисунке 12, *а* вибрационный сигнал представляет собой последовательность экспоненциальных ударных импульсов, частота следования которых равна частоте перекатывания тел качения по раковине на наружном кольце $BPFO$ [6]. Поэтому для контроля работоспособности роторного оборудования предложено [16] проводить совместный мониторинг *типа временной структуры* вибрации (рисунок 13, *а*) и частоты следования схожих сигнальных фрагментов (*периодичности*) во временной структуре вибрации (рисунок 13, *б*).

В представленном на рисунке 13 примере образование раковины на наружном кольце подшипника качения привело к концентрации энергии его вибрации в окрестности резонансной частоты $f_2 \approx 1$ кГц на экспоненциальных сигнальных фрагментах (тип временной структуры изменился с «*EXP-AM*» на «*EXP*», рисунок 13, *а*), следующих друг за другом с частотой перекатывания тел качения по наружному кольцу (тип периодичности «*BPFO*», рисунок 13, *б*).

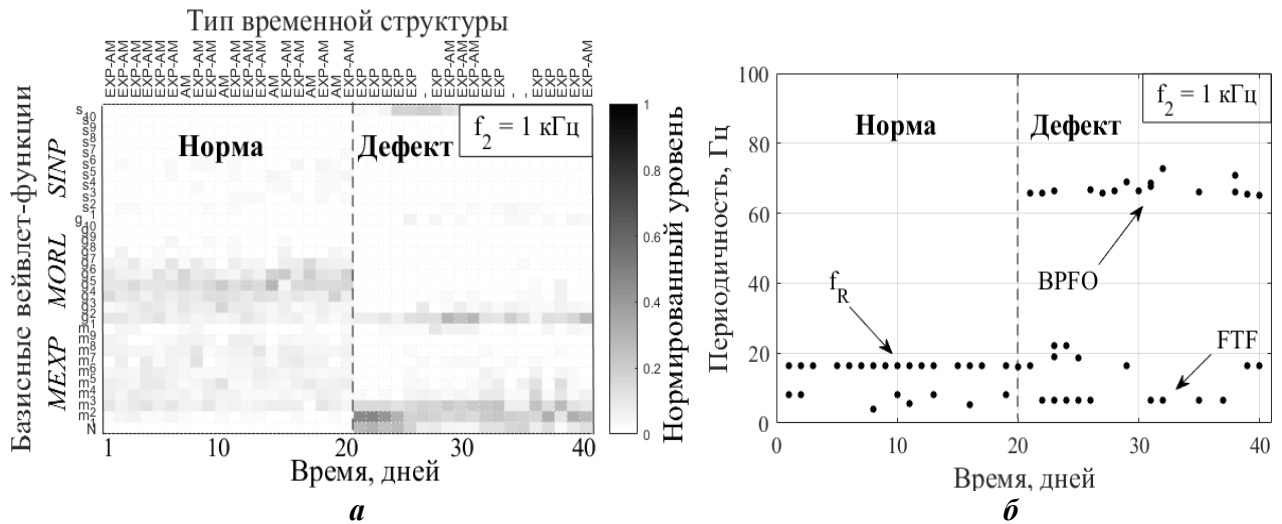


Рисунок 13. – Контроль работоспособности подшипника качения на основе мониторинга временной структуры его вибрационных сигналов:
а – мониторинг компактного описания временной структуры вибрации;
б – мониторинг частоты следования фрагментов во временной структуре вибрации

Однако в практике вибрационной диагностики зачастую отсутствует детальная информация о кинематической схеме оборудования, что не позволяет использовать классические методы анализа вибрации и связать рост ее общего уровня (или появившуюся периодичность во временной структуре вибрации) с дефектом того или иного функционального узла (подшипника, шестерни, муфты и т.д.). При этом ранее отмечено [3, 4, 6], что различные типы элементов оборудования генерируют вибрацию с качественно различной временной структурой. На этом основании предложен алгоритм [10] *распознавания типа функционального узла* оборудования при помощи классификации компактного описания временной структуры вибрации. Тестирование алгоритма проведено на наборах вибрационных сигналов, точность распознавания подшипников качения составила не менее 86 %, а зубчатых передач – не менее 75 %.

В конце диссертационной работы предложена *методика контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования* на основе автоматического анализа временной структуры вибрационных сигналов (рисунок 14). Методика подразумевает использование всех рассмотренных в диссертационной работе алгоритмов и состоит из трех этапов:

1) *На первом этапе* на базе разреженной декомпозиции скейлограммы $E_w(\omega)$ сигнала вибрации $x(t)$ выделяются его значимые частотные области $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$. В пределах каждой из них на базе разреженной декомпозиции сигнала вибрации по избыточному вейвлетному словарю (РВД) формируется компактное описание временной структуры вибрации $\mathbf{W}_i, i = 1, 2, \dots, N$.

2) *На втором этапе* для каждой выделенной частотной области ω_i формируется набор диагностических признаков \mathbf{F}_i , включающих прирост энергии в пределах частотной области, обнаруженные периодичности во временной структуре вибрации, распознанный тип временной структуры вибрации и распознанный тип функционального узла оборудования.

3) На третьем этапе на основе классификации полученных наборов диагностических признаков F_1, F_2, \dots, F_N формируется заключение C о дефектном узле оборудования, типе дефекта и степени его развития.

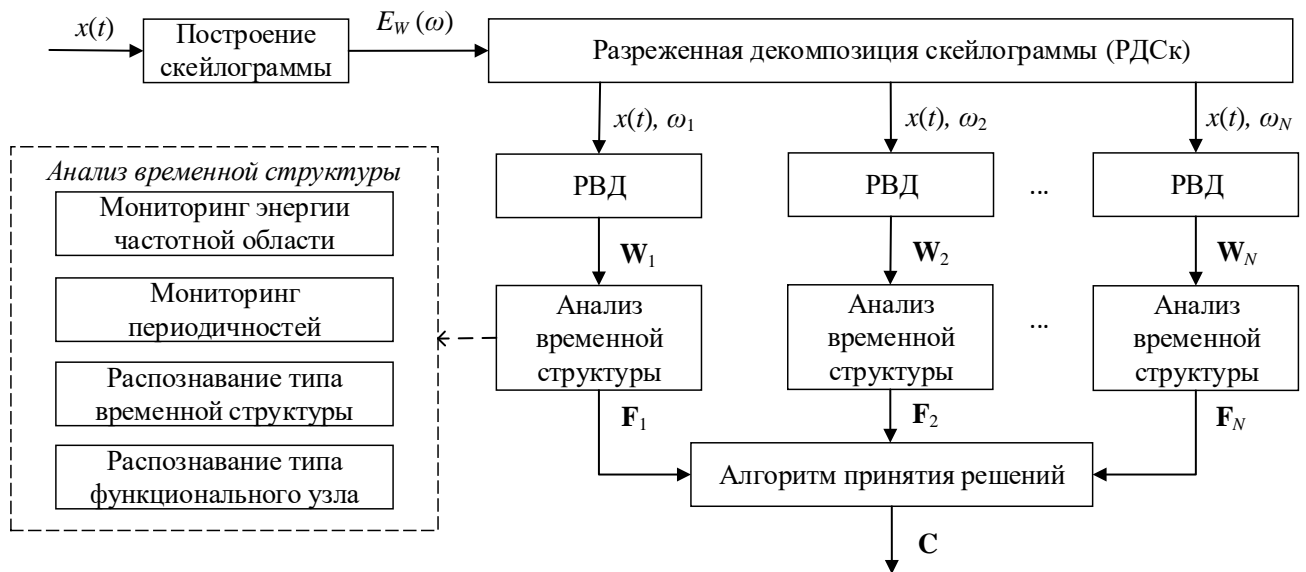


Рисунок 14. – Структурная схема методики контроля работоспособности роторного оборудования на основе анализа временной структуры сигналов вибрации

Данная методика позволяет обеспечить точность распознавания дефектов зубчатых передач не менее 72 %, а подшипников качения – не менее 87 %.

В **заключении** сформулированы основные научные результаты диссертационной работы и рекомендации по их практическому использованию.

В **приложениях** представлен графический материал по обзору методов вибрационной диагностики; вывод математических выражений и описание свойств используемых в диссертации вейвлет-функций; результаты анализа корреляционного отклика разработанных вейвлет-семейств на модельные воздействия заданной временной структуры; графический материал по оценке границ применимости алгоритма разреженной декомпозиции скейлограммы и алгоритма разреженной декомпозиции сигнала вибрации по избыточному вейвлетному словарю; результаты классификации временной структуры сигналов вибрации подшипников качения и зубчатых передач; графический материал по мониторингу временной структуры вибрации для контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования; документы об использовании результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Предложены базисные вейвлет-функции для выделения в вибрационных сигналах фрагментов, описывающих процесс дефектообразования в функциональных узлах роторного оборудования. Установлено, что разработанные вейвлет-функции характеризуются на 11 % большим

корреляционным откликом на экспоненциальные фрагменты вибрации, чем известные вейвлет-функции, а также на 8 %, 18 % и 12 % большим корреляционным откликом на модуляционные, синусоидальные и шумовые фрагменты вибрации соответственно, что позволяет в среднем на 12 % повысить чувствительность методов вибрационной диагностики к обнаружению дефектов функциональных узлов роторного оборудования [3, 4, 6, 14, 16, 18].

2. Предложен алгоритм разреженной декомпозиции сигналов вибрации по избыточному вейвлетному словарю, обеспечивающий формирование разреженного представления временной структуры вибрации в виде совокупности вейвлетов с заданной собственной частотой, амплитудой и временным положением, а также компактного описания временной структуры в виде вектора коэффициентов, значения которых отражают наличие дефектов функциональных узлов роторного оборудования. Используемый словарь состоит из вейвлет-семейств, члены которых изменяют число осцилляций в пределах эффективного носителя кратно степени двойки. Установлено, что объем формируемого разреженного представления временной структуры вибрации на 2-3 порядка меньше, чем в случае непрерывного вейвлет-преобразования [1, 2, 4, 7, 8, 11, 13, 15, 19].

3. Предложен комплекс алгоритмов автоматического анализа временной структуры вибрационных сигналов и методика контроля работоспособности роторного оборудования, обеспечивающая точность распознавания дефектов функциональных узлов не менее 72 %. На первом этапе методики на базе алгоритма разреженной декомпозиции скейлограммы выделяются значимые частотные области вибрационных сигналов, в пределах каждой из которых на базе алгоритма разреженной декомпозиции по избыточному вейвлетному словарю формируется компактное описание временной структуры вибрации. На втором этапе для каждой частотной области формируется набор диагностических признаков, включающий прирост энергии в пределах частотной области, обнаруженные периодичности во временной структуре вибрации, распознанный тип временной структуры вибрации и распознанный тип функционального узла оборудования. На третьем этапе на основе классификации полученных диагностических признаков формируется заключение о наличии дефектов оборудования [2, 5, 7–10, 12, 19, 20].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Предложенные модели, методики и алгоритмы являются основой для создания библиотек, которые могут быть использованы в составе программно-аппаратных комплексов вибрационной диагностики роторного оборудования.

Описанные в диссертационной работе алгоритмы анализа временной структуры вибрации и методика контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования успешно апробированы и внедрены на предприятиях ООО «СИТЕЛ» и ООО «СКФ» в составе автоматической системы оценки технического состояния промышленного оборудования, что отражено в соответствующих актах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Асламов, Ю. П. Разреженная вейвлетная декомпозиция в задачах вибродиагностики роторного оборудования / Ю. П. Асламов, А. П. Асламов, И. Г. Давыдов, А. В. Борсук // Докл. Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. – 2017. – № 8 (110). – С. 91–98.

2. Асламов, Ю. П. Алгоритмы уточнения частоты вращения вала в задачах вибродиагностики роторного оборудования / Ю. П. Асламов, А. П. Асламов, И. Г. Давыдов, А. В. Цурко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2017. – № 11. – С. 51–58.

3. Асламов, Ю. П. Вейвлет-функции для диагностики зубчатых передач / Ю. П. Асламов, А. П. Асламов, И. Г. Давыдов, А. В. Цурко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2018. – № 3. – С. 38–46.

4. Асламов, Ю. П. Избыточный вейвлетный словарь для разреженной декомпозиции сигналов вибрации / Ю. П. Асламов, А. П. Асламов, И. Г. Давыдов, А. В. Цурко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундамент. науки. – 2018. – № 4. – С. 86–94.

5. Асламов, Ю. П. Пространство признаков разреженной вейвлетной декомпозиции вибрационных сигналов для задач машинного обучения / Ю. П. Асламов, И. Г. Давыдов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2018. – № 3. – С. 49–56.

6. Асламов, Ю. П. Вейвлет-функция для диагностики подшипников качения / Ю. П. Асламов, И. Г. Давыдов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2018. – № 11. – С. 14–22.

7. Асламов, Ю. П. Эффективность использования скалограммы для оценки технического состояния роторного оборудования / Ю. П. Асламов, А. П. Асламов, И. Г. Давыдов, А. В. Цурко // Докл. Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. – 2018. – № 2 (112). – С. 12–17.

8. Асламов, Ю. П. Влияние изменения скорости вращения вала роторного оборудования на обработку в частотной области / Ю. П. Асламов, А. П. Асламов, И. Г. Давыдов, А. В. Цурко // Докл. Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. – 2018. – № 3 (113). – С. 13–18.

9. Цурко, А. В. Анализ вибрации роторного оборудования при помощи фазовых траекторий / А. В. Цурко, А. П. Асламов, Ю. П. Асламов, И. Г. Давыдов // Докл. Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. – 2018. – № 6 (116). – С. 32–39.

10. Асламов, Ю. П. Разреженная вейвлетная декомпозиция сигналов вибрации для задачи распознавания образов / Ю. П. Асламов, А. П. Асламов, И. Г. Давыдов, А. В. Цурко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундамент. науки. – 2018. – № 12. – С. 12–23.

11. Асламов, Ю. П. Сравнительный анализ алгоритмов разреженной вейвлетной декомпозиции / Ю. П. Асламов, И. Г. Давыдов // Докл. Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. – 2019. – № 4 (122). – С. 11–17.

12. Асламов, Ю. П. Разреженная декомпозиция скейлограммы для мониторинга технического состояния роторного оборудования / Ю. П. Асламов, И. Г. Давыдов, Н. В. Космач, Р. В. Толкач // Докл. Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. – 2019. – № 5 (123) – С. 25–31.

13. Асламов, Ю. П. Границы применимости алгоритма разреженной декомпозиции сигналов вибрации по избыточному вейвлетному словарю / Ю. П. Асламов, И. Г. Давыдов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундамент. науки. – 2019. – № 3. – С. 11–20.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

14. Aslamov, Y. Algorithms for refinement of the shaft rotational speed for solving the problems of vibration diagnostics of rotary equipment / Y. Aslamov, I. Davydov, A. Zolotarev, A. Aslamov // First World Congress on Condition Monitoring WCCM'2017, London, United Kingdom, June 13–16, 2017. / British Institute of Non-Destructive Testing. – London, 2017. – Vol. 3. – P. 1511–1521.

15. Aslamov, Y. Sparse wavelet decomposition of signals for solving vibration diagnostics problems / Y. Aslamov, I. Davydov, A. Zolotarev, A. Aslamov // First World Congress on Condition Monitoring WCCM'2017, London, United Kingdom, June 13–16, 2017. / British Institute of Non-Destructive Testing. – London, 2017. – Vol. 3. – P. 1726–1736.

16. Aslamov, Y. Sparse wavelet decomposition with redundant dictionary for vibration waveform analysis / Y. Aslamov, A. Aslamov, I. Davydov, A. Tsurko // 14th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing PRIP'2019, Minsk, Belarus, May 21–23, 2019. / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. – Minsk, 2019. – P. 354–359.

Тезисы докладов на научных конференциях

17. Асламов, Ю. П. Семейство вейвлет-функций для диагностики зубчатых передач / Ю. П. Асламов, И. Г. Давыдов // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы 14-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. РТ-2018, Севастополь, Россия, 14-18 ноября 2018 г. / Севастопольский гос. ун-т. – Севастополь, 2018. – С. 152.

18. Асламов, Ю. П. Семейство вейвлет-функций для диагностики подшипников качения / Ю. П. Асламов, И. Г. Давыдов // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы 14-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. РТ-2018, Севастополь, Россия, 14-18 ноября 2018 г. / Севастопольский гос. ун-т. – Севастополь, 2018. – С. 153.

19. Асламов, Ю. П. Метод анализа временной формы вибрационных сигналов / Ю. П. Асламов, И. Г. Давыдов // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы 14-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. РТ-2018, Севастополь, Россия, 14-18 ноября 2018 г. / Севастопольский гос. ун-т. – Севастополь, 2018. – С. 155.

Патенты

20. Приспособление для крепления датчиков на исследуемые объекты : пат. 11689 Респ. Беларусь, МПК В 25В 11/00, G 01Н 1/00, G 01М 7/00 / С. Ю. Васюкевич, Ю. П. Асламов, Р. В. Толкач : заявитель общество с ограниченной ответственностью «Сител» (ВУ). – № и 20170382 ; заявл. 17.11.2017 ; опубл. 30.06.2018 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2018. – № 3 (122). – С. 158.

РЭЗІЮМЭ

Асламаў Юрый Паўлавіч

Кантроль працаздольнасці ротарнага абсталявання на аснове аналізу часовай структуры вібрацыйных сігналаў

Ключавыя словы: лічбавая апрацоўка сігналаў, вібрацыйная дыягностыка, часовая структура, разрэджаная дэкампазіцыя, вэйвлет-аналіз.

Мэта даследавання: распрацоўка комплексу алгарытмаў вэйвлет-аналізу часовай структуры вібрацыйных сігналаў для павышэння эфектыўнасці кантролю працаздольнасці функцыянальных вузлоў ротарнага абсталявання.

Метады даследавання: лічбавая апрацоўка сігналаў, вэйвлет-аналіз, статыстычная апрацоўка дадзеных, машыннае навучанне.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: па матэрыялах дадзенай дысертацыі распрацаваны:

1) вэйвлет-функцыі для вылучэння ў часовай структуры вібрацыйных сігналаў экспанентных, мадуляцыйных, сінусоідных і шумавых фрагментаў, якія характарызуюць тэхнічны стан функцыянальных вузлоў ротарнага абсталявання;

2) методыка фарміравання слоўніка вэйвлетаў-функцый і алгарытм разрэджанай дэкампазіцыі вібрацыйных сігналаў па слоўніку вэйвлетаў для фарміравання кампактнага апісання часовай структуры вібрацыі;

3) комплекс алгарытмаў аўтаматычнага аналізу кампактнага апісання часовай структуры вібрацыйных сігналаў і методыка кантролю працаздольнасці функцыянальных вузлоў ротарнага абсталявання.

Вобласць ужывання: распрацаваныя алгарытмы і методыкі ўжываюцца на горна-абагачальных камбінатах у складзе аўтаматычных сістэм ацэнкі тэхнічнага стану прамысловага абсталявання. Распрацаваныя мадэлі і алгарытмы могуць быць выкарыстаны ў прыкладных распрацоўках, накіраваных на стварэнне новых метадаў і сродкаў вібрацыйнай дыягностыкі, якія дазваляюць знізіць невытворчыя затраты прадпрыемстваў і павялічыць эфектыўны тэрмін эксплуатацыі прамысловага абсталявання.

РЕЗЮМЕ

Асламов Юрий Павлович

Контроль работоспособности роторного оборудования на основе анализа временной структуры вибрационных сигналов

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, вибрационная диагностика, временная структура, разреженная декомпозиция, вейвлет-анализ.

Цель исследования: разработка комплекса алгоритмов вейвлет-анализа временной структуры вибрационных сигналов для повышения эффективности контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования.

Методы исследования: цифровая обработка сигналов, вейвлет-анализ, статистическая обработка данных, машинное обучение.

Полученные результаты и их новизна: по материалам данной диссертации разработаны:

1) вейвлет-функции для выделения во временной структуре вибрационных сигналов экспоненциальных, модуляционных, синусоидальных и шумовых фрагментов, характеризующих техническое состояние функциональных узлов роторного оборудования;

2) методика формирования словаря вейвлет-функций и алгоритм разреженной декомпозиции вибрационных сигналов по вейвлетному словарю для формирования компактного описания временной структуры вибрации;

3) комплекс алгоритмов автоматического анализа компактного описания временной структуры вибрационных сигналов и методика контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования.

Область применения: разработанные алгоритмы и методики применяются на горно-обогатительных комбинатах в составе автоматических систем оценки технического состояния промышленного оборудования. Разработанные модели и алгоритмы могут быть использованы в прикладных разработках, направленных на создание новых методов и средств вибрационной диагностики, позволяющих снизить непроизводительные затраты предприятий и увеличить эффективный срок эксплуатации промышленного оборудования.

SUMMARY

Aslamov Yury Pavlovich

Condition monitoring of rotary equipment based on the vibration waveform analysis

Keywords: digital signal processing, vibration-based diagnostics, signal waveform, sparse decomposition, wavelet analysis.

The purpose of this thesis: development of a complex of wavelet-based algorithms for the vibration signals waveform analysis to increase the efficiency of condition monitoring of rotary equipment.

Research methods: digital signal processing, wavelet analysis, statistical data processing, machine learning.

The obtained results and their novelty: based on the materials of this thesis, the following has been developed:

1) wavelet functions for extracting from the vibration waveform exponential, modulation, sinusoidal and noise fragments, that describe the technical condition of rotary equipment units;

2) methodology for creating wavelet dictionary and algorithm for sparse decomposition of vibration signals using wavelet dictionary to create the compact representation of vibration waveform;

3) complex of algorithms for automatic analysis of the compact vibration waveform representation and methodology for condition monitoring of rotary equipment units.

Field for application: the developed algorithms and techniques are used at mining plants as part of automatic systems for condition monitoring of industrial equipment. The developed models and algorithms can be used in applied developments aimed at creating new methods and means of vibration diagnostics, allowing to reduce non-production costs of enterprises and increase the remaining useful life of industrial equipment.



Научное издание

Асламов Юрий Павлович

**КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ
ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности: 05.13.01 – Системный анализ,
управление и обработка информации

| | | |
|------------------------------|--------------------------|------------------|
| Подписано в печать .12.2019. | Формат 60x84 1/16. | Бумага офсетная. |
| Гарнитура «Таймс». | Отпечатано на ризографе. | Усл. печ. л. |
| Уч. изд. л. | Тираж 60 экз. | Заказ |

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2019,
№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2019.
ЛП № 02330/264 от 14.04.2019.
220013, Минск, П. Бровки, 6.