

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

На правах рукописи

УДК 658.588

БОРСУК
Александр Валерьевич

**ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ УДАРНЫХ
ПРОЦЕССОВ ЗА СЧЁТ ВЕЙВЛЕТ- ОБРАБОТКИ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ ВИБРАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ
магистерской диссертации на соискание степени
магистра техники и технологии

по специальности 1-39 81 03 «Информационные радиотехнологии»

Научный руководитель
канд.техн.наук, доцент
Давыдов И.Г.

Минск 2018

Работа выполнена на кафедре информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

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

Рецензент: **Лагутин Андрей Евгеньевич**,
кандидат технических наук, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «18» января 2018 г. года в 13³⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 437.

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время диагностика технического состояния роторного оборудования осуществляется на основе различных методов. Наибольшее распространение получили методы анализа вибрационных сигналов в частотной области — анализ прямого спектра и спектра огибающей. За многие годы применения данного метода была сформирована обширная база шаблонов информативных признаков для каждого дефекта. Однако при использовании автоматической вибрационной диагностики спектральные методы не всегда позволяют уверенно различать типовые дефекты. Причиной выступает как вариация типов оборудования, режимов работы, внешних условий, так и схожесть спектральных шаблонов некоторых дефектов.

Наиболее очевидным решением данной проблемы является совместная обработка в спектральной и временной областях. Одним из наиболее распространённых методов частотно-временного анализа является вейвлетное преобразование (ВП). С позиции автоматической вибродиагностики данный метод обладает следующими особенностями:

1) ВП вносит амплитудные искажения во временной сигнал и его спектр, что затрудняет обработку в частотной области, где анализ также ведётся по значениям амплитуд отдельных дефектных частот.

2) Согласованная вейвлетная фильтрация увеличивает отношение сигнал-шум для целевых компонент сигнала, однако всегда присутствует фоновый шум, который затрудняет поиск периодичностей и выделение шаблонов ударных процессов в случаях слабой выраженности дефекта.

3) Зачастую ВП не способно точно локализовать слабо выраженные ударные процессы на ранних стадиях развития дефектов оборудования.

С другой стороны, высокая чувствительность, разрешающая способность и возможность применения адаптивных алгоритмов выбора оптимальных параметров вейвлет-функций позволяют более эффективно выделять информативные признаки дефектов в различных режимах эксплуатации оборудования.

Данная работа посвящена разработке модифицированной базисной вейвлет-функции для выделения ударных импульсов в подшипнике качения для более эффективного использования особенностей ВП при автоматизации вибрационной диагностики в промышленности.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Актуальность исследования напрямую связана с возможностями вейвлет-анализа по обнаружению и выделению ударных процессов в нестационарных вибрационных сигналах. Анализ ударных процессов позволяет формировать согласованные наборы информативных признаков, описывающих состояние наблюдаемых объектов, в частности, определять дефекты подшипников качения. Такой подход позволит значительно продвинуться в автоматизации оценки технического состояния роторного оборудования по вибрационным сигналам.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка модификации базисной вейвлет-функции для выделения ударных импульсных процессов в вибрационном сигнале промышленного оборудования. Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие задачи**:

1) Выявить информативные признаки дефектов промышленного оборудования в его вибрационном сигнале.

2) Проанализировать методы обработки нестационарных вибрационных сигналов и выбрать наиболее подходящий для выделения информативных признаков дефектов промышленного оборудования.

3) Разработать модифицированную базисную вейвлет-функцию для выделения информативных признаков дефектов.

4) Исследовать свойства и границы применимости разработанной вейвлет-функции.

5) Провести сравнительный анализ разработанной вейвлет-функции с другими вейвлет-функциями.

Объектом являются сигналы вибрации промышленного оборудования.

Предметом работы выступают методы вейвлет-обработки сигналов для оценки технического состояния промышленного оборудования.

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли результаты исследований российских и зарубежных учёных в области обработки нестационарных сигналов.

Моделирование, изучение свойств и сравнение базисных вейвлет-функций осуществлены в пакете MatLab.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке модифицированной версии базисной вейвлет-функции для выделения признаков ударных процессов из нестационарных сигналов вибрации.

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и библиографического списка. Общий объем диссертации – 79 страниц. Работа содержит 6 таблиц, 32 рисунка. Библиографический список включает 33 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы диагностики состояния роторного оборудования и наиболее очевидные подходы к её решению, а также даётся обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы её цель и задачи, даны сведения об объекте и предмете исследования.

В **первой главе** описаны современные методы и средства оценки технического состояния и диагностики дефектов подшипников качения по вибрационному сигналу. Рассмотрены такие методы, как:

- акустическая диагностика подшипников качения;
- диагностика по общему уровню вибрации;
- диагностика методом сравнения мощности сигнала в двух частотных диапазонах;
- диагностика с использованием метода пик-фактора;
- диагностика по методу «ударных импульсов»;
- диагностика по спектрам вибросигнала;
- диагностика по спектру огибающей вибросигнала.

Показано, что эти методы имеют разную трудоёмкость, достоверность, помехозащищённость и информативность. При этом диагностика по спектру огибающей вибросигнала отличается наибольшей эффективностью и позволяет выявлять дефекты подшипников на сравнительно ранних стадиях. Достоинства метода — чувствительность к зарождающимся дефектам, информативность и помехозащищённость. Основной недостаток — относительная сложность реализации.

Во **второй главе** рассмотрены методы обработки нестационарных вибрационных сигналов. Анализ современной литературы по теме диссертации свидетельствует о наличии большого количества методов, позволяющих производить анализ вибрации промышленного оборудования с учётом нестационарности процессов, оказывающих влияние на реализацию вибрационных сигналов. Методы частотно-временного анализа позволяют отслеживать характер изменения энергии сигнала во временной и частотной областях одновременно, однако обладают ограниченным разрешением по

времени и частоте. Благодаря вейвлет-анализу вибрационных сигналов появляется возможность варьировать разрешающую способность за счёт изменения параметров вейвлет-функции во время анализа, однако задача выбора наиболее подходящей вейвлет-функции в ряде случаев становится достаточно трудоёмкой и требует применения специальных методов оптимизации параметров базисных вейвлет-функций. Проблема выбора базиса преобразования решается с применением метода эмпирической декомпозиции мод, однако оценка частотно-временных параметров полученных модовых функций сильно зависит от методики вычисления их спектральных характеристик. Методы анализа полиспектральных характеристик сигналов позволяют выявлять дефекты оборудования на ранних стадиях их зарождения, однако обладают высокой вычислительной сложностью.

Из всех рассмотренных методов, вейвлет-анализ является наиболее гибким, предоставляя обширные возможности по адаптации базовой вейвлет-функции. Поэтому представляется перспективным рассмотреть именно этот подход для выделения из вибрационного сигнала различных дефектов подшипников качения.

Третья глава посвящена оценке технического состояния оборудования с применением вейвлет-анализа и базисных вейвлет-функций. Так же в ней представлены результаты проведённых исследований. Описана разработанная модификация вейвлет-функции для выделения ударных импульсов в подшипнике качения. Проверено соответствие полученной функции основным требованиям, предъявляемым к вейвлетам. Получены зависимости длины эффективного носителя и ухода центральной частоты вейвлета от коэффициента формы вейвлета. При помощи моделирования проведён сравнительный анализ отклика вейвлета *MEXP* с откликами *MEXH* и *MORL* на экспоненциальные импульсные воздействия различной длительности. Показано преимущество *MEXP* в отклике на экспоненциальные ударные процессы в большем диапазоне длительностей, чем *MORL* и *MEXH*. Проведён сравнительный анализ фильтрующих свойств вейвлета *MEXP*, *MEXH* и *MORL* для анализа сигналов с экспоненциальными ударными процессами. Проведён сравнительный анализ отклика вейвлета *MEXP* и *MORL* на импульсные воздействия различной формы и длительности. Показано преимущество *MEXP* в отклике на экспоненциальные ударные процессы в большем диапазоне длительностей, чем *MORL*. Однако отмечено, что *MORL* в силу своих свойств, имеет одинаково высокий отклик на импульсные воздействия различной формы.

В результате предложено использовать *MORL* для построения скалограммы, а *МЕХР* для выделения ударных импульсов по найденной на скалограмме частоте (масштабе).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён сравнительный обзор современных методов решения задачи оценки технического состояния промышленного оборудования и диагностики дефектов подшипников качения по вибрационному сигналу и выявлены основные информативные признаки дефектов.

Так же проведён сравнительный обзор методов анализа вибрации промышленного оборудования с учётом нестационарности процессов, оказывающих влияние на реализацию вибрационных сигналов. Были рассмотрены частотно-временной, вейвлетный, полиспектральный подходы, а также метод эмпирической декомпозиции мод. Выявлены достоинства и недостатки каждого из методов. Наиболее актуальным методом для решения задач оценки технического состояния промышленного оборудования является вейвлет-анализ, т.к. он позволяет адаптировать базисные функции для выделения из вибрационного сигнала ударных импульсов в подшипнике качения.

Предложена модификация базисной вейвлет-функции *МЕХР* для выделения информативных признаков дефектов. Проверено соответствие полученной функции основным требованиям, предъявляемым к вейвлетам.

Проведён сравнительный анализ откликов различных вейвлетов на экспоненциальные импульсные воздействия различной длительности и анализ фильтрующих свойств вейвлетов.

Установлено, что использование вейвлета *МЕХР* является более эффективным для выделения ударных импульсов из нестационарных сигналов вибрации по сравнению с вейвлетами *MERL* и *MHAT*.

В итоге проведённого исследования предложена модификация базисной вейвлет-функции для выделения ударных импульсов в подшипнике качения и решения задач вибрационной диагностики неисправностей подшипников качения на ранних стадиях развития дефектов. Результаты работы могут быть использованы для дальнейших исследований и внедрения подходов автоматизированной диагностики в промышленность.

Список опубликованных работ

- [1] Асламов, Ю. П. Разреженная вейвлетная декомпозиция в задачах вибродиагностики роторного оборудования / Ю. П. Асламов, А. П. Асламов, И. Г. Давыдов, А. В. Борсук // Доклады БГУИР. - 2017. - No 8 (110). - С. 91 - 98.
- [2] 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. Borsuk, A. Aslamov // First World Congress on Condition Monitoring, London, 13-16 June 2017, Session 6E: Vibration condition monitoring methods and technologies / The British Institute of Non-Destructive Testing.
- [3] Aslamov, Y. Sparse wavelet decomposition of signals for solving vibration diagnostics problems / Y. Aslamov, I. Davydov, A. Borsuk, A. Aslamov // First World Congress on Condition Monitoring, London, 13-16 June 2017, Session 7E: Vibration condition monitoring methods and technologies / The British Institute of Non-Destructive Testing.