

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

УДК 658.588

СМОЛЕВ  
Андрей Михайлович

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВА ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ  
ДЕФЕКТОВ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ  
ЗА СЧЕТ ОБРАБОТКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ ВИБРАЦИИ

АВТОРЕФЕРАТ  
магистерской диссертации на соискание степени  
магистра техники и технологии

по специальности 1-39 80 01 «Радиосистемы и радиотехнологии»

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

Минск 2022

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопрос повышения надежности и качества работы промышленного оборудования является актуальным практически для любой отрасли. Использование методов и средств вибрационной диагностики позволяет на раннем этапе обнаруживать неисправности оборудования, своевременно проводить ремонтные работы и тем самым значительно снижать эксплуатационные расходы промышленных предприятий.

Современная система вибрационной диагностики должна удовлетворять ряду новых требований, главными из которых является выявление конкретных неисправностей функциональных узлов оборудования, прогнозирование ресурса функциональных узлов и полностью автоматическая обработка вибрационных сигналов и данных телеметрии.

Существующие в настоящее время методы вибрационной диагностики не удовлетворяют в полном объеме обозначенным требованиям. Так одни методы обеспечивают лишь интегральную оценку технического состояния оборудования без распознавания конкретных неисправностей его функциональных узлов; другие методы формируют пространства диагностических признаков, ориентированные на эксперта-вибродиагноста и малоприспособленные для автоматического анализа; а третьи методы базируются на алгоритмах машинного обучения, но требуют значительный временной интервал для обучения и не инвариантны ни к типу оборудования, ни к изменениям в режиме его работы.

Анализ временной структуры сигналов вибрации позволяет выделить большой объем качественно новой диагностической информации о техническом состоянии роторного оборудования, так как дефекты его функциональных узлов имеют в ней специфические проявления. Так, например, дефектное состояние подшипников качения и зубчатых передач характеризуется ударными и модуляционными процессами в генерируемых ими вибрационных сигналах.

Однако на текущий момент в практике вибрационной диагностики комплексный автоматический анализ временной структуры вибрационных сигналов для контроля работоспособности роторного оборудования не применяется. Как правило, такого рода анализ носит субъективный характер, основан на визуальном осмотре экспертом-вибродиагностом временных реализаций вибрационных сигналов, поэтому результаты анализа напрямую зависят от квалификации эксперта.

Основными препятствиями на пути реализации методов автоматического анализа временной структуры вибрационных сигналов для контроля работоспособности роторного оборудования является сложность временной структуры вибрации и отсутствие инструментария ее эффективного описания. Реализация методов автоматического анализа временной структуры вибрационных сигналов позволит повысить достоверность результатов работы существующих систем вибрационной диагностики роторного оборудования.

Таким образом, разработка методов компактного и эффективного описания временной структуры вибрационных сигналов, а также методов ее автоматической обработки для контроля работоспособности функциональных узлов роторного оборудования является актуальной задачей.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования** 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 промышленного оборудования по вибрационным сигналам.

### **Цель и задачи исследования**

**Целью** диссертации является разработка подходов к формированию пространств информативных признаков дефектов машин и механизмов за счет обработки нестационарных сигналов вибрации. Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие задачи**:

- 1) Проанализировать связь нестационарных сигналов вибрации вращающихся механизмов с дефектами их компонентов.
- 2) Выявить информативные признаки дефектов промышленного оборудования в его вибрационном сигнале.
- 3) Проанализировать методы обработки нестационарных вибрационных сигналов и выбрать наиболее подходящий для выделения информативных признаков дефектов промышленного оборудования.
- 4) Разработать модифицированную базисную вейвлет-функцию для выделения информативных признаков дефектов.
- 5) Исследовать свойства и границы применимости разработанной вейвлет-функции.
- 6) Провести сравнительный анализ разработанной вейвлет-функции с другими вейвлет-функциями.

**Объектом** являются сигналы вибрации промышленного оборудования.

**Предметом** работы выступают методы формирования пространства информативных признаков дефектов машин и механизмов за счет обработки нестационарных сигналов вибрации 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 – 98 страниц. Работа содержит 7 таблиц, 35 рисунков. Библиографический список включает 45 наименований.

## 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

учётom 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 *MEXP* для выделения ударных импульсов по найденной на скалограмме частоте (масштабе).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен сравнительный обзор современных методов вибрационной диагностики промышленного оборудования. Выявлены основные информативные признаки его дефектов и их проявления в сигналах вибрации. Так же проведён сравнительный обзор методов анализа вибрации промышленного оборудования (частотно-временной, вейвлетный, полиспектральный подходы, а также метод эмпирической декомпозиции мод). Наиболее перспективным методом определен вейвлет-анализ, позволяющий адаптировать базисные функции для эффективного выделения из вибрационного сигнала ударных импульсов.

Проведено моделирование тестовых вибрационных сигналов, содержащих импульсные сигналы с различными параметрами затухания, соответствующие различным дефектам подшипников качения. Проведен анализ тестовых сигналов с выявлением информативных признаков смоделированных дефектов.

Предложена модификация базисной вейвлет-функции *MEXP* для выделения информативных признаков дефектов. Сравнительный анализ откликов различных вейвлетов на экспоненциальные импульсные воздействия различной длительности и анализ фильтрующих свойств вейвлетов показал, что использование вейвлета *MEXP* является более эффективным для выделения ударных импульсов из нестационарных сигналов вибрации по сравнению с вейвлетами *MERL* и *MHAT*. Также показано, что вейвлет *MORL* имеет преимущества перед *MEXP* при построении скалограммы и анализе спектра огибающей вибрационных сигналов.

Предложен новый подход к формированию пространств информативных признаков, реализующий использование модифицированной базисной вейвлет-функции совместно с другими методами (интегральные методы (анализ общего уровня вибрации, анализ соотношения «пик-фон», пик-фактора), анализа спектра и спектра огибающей, полиспектрального анализа и анализа с применением метода эмпирической декомпозиции мод). В этом подходе модифицированная базисная вейвлет-функция будет использоваться для выделения ударных импульсных процессов, расширяя и усиливая остальные методы для решения задачи вибрационной диагностики

дефектов на ранних стадиях их развития, позволяя автоматизировать формирование пространств информативных признаков благодаря использованию методов машинного обучения.

Результаты работы могут быть использованы для дальнейших исследований и внедрения подходов автоматизированной диагностики в промышленность.



### Список опубликованных работ

[1] Интеграция системы диагностики промышленного оборудования с экосистемами тренда Industry 4.0, построенными на основе фреймворка FIWARE / Кечик Д.А., Давыдов И.Г., Герасимук Я.В., Цурко А.В., Смолев М.А. // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020 : материалы Республиканской научно-практической конференции, Минск, 28-29 октября 2020 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богущ [и др.]. – Минск : БГУИР, 2020. – С. 206-210.

[2] Integration of the system of diagnostics of industrial equipment and enterprise asset management systems using FIWARE framework / D. Kechik, I. Davydov, Ya. Hierasimuk, A. Tsurko, M. Smolev // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. - 2021. - № 4. - С. 20-28.