

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

УДК \_\_\_\_\_

Кечик  
Даниил Александрович

Методы межкомпонентной фазовой обработки сигналов для выделения  
информативных признаков технического состояния промышленного  
оборудования

### **АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1–39 80 02 «Радиотехника, в том числе  
системы и устройства радиолокации, радионавигации и телевидения»

---

Научный руководитель  
Воробьёв Василий Иванович  
с.н.с. НИЛ 5.3 НИЧ БГУИР,  
к.т.н., доцент

---

Минск 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы виброакустической диагностики диктуется острой необходимостью организации оперативного безразборного контроля технического состояния машин и механизмов на всех стадиях их жизненного цикла как на этапах проектирования и изготовления, так и на этапах эксплуатации и ремонта.

Ориентация на методы виброакустической диагностики, базирующейся на принципах безразборности, оперативности и универсальности, позволяет успешно решать поставленные задачи благодаря огромной информационной емкости виброакустических процессов, сопровождающих функционирование машин и механизмов, использованию новых методов обработки измерительной информации, применению микроэлектронной вычислительной техники.

Техническая диагностика возникла и развивается как раздел теории измерений. Ее содержание заключается в изучении и обосновании способов косвенных измерений скрытых параметров механизма по характеру его функционального поведения. Виброакустический сигнал содержит достаточно информации для представления о процессах, протекающих в механизме во время его работы и проявляющих себя в виде упругих колебаний его материала. Эти колебания возникают непосредственно в результате столкновения деталей, соединенных в кинематические пары, поэтому содержат в себе обстоятельную информацию о состоянии пар и возникающих в них нагрузках, которые недоступны для прямого измерения.

Сложность современных машин и механизмов, как следствие – наличие множества элементов и узлов, зависимость диагностических признаков от кинематической схемы машины и режима её работы, изменение вследствие нарушения геометрии деталей с развитием дефекта, сильная нестационарность вибросигнала, наличие механических резонансов и нелинейности в механических системах делают пространство информативных признаков сильно неоднозначным.

В последнее время, как в нашей стране, так и за рубежом, возрастает интерес к методам обработки сигналов, использующих мгновенную фазу компонентов сигнала. Использование информации о полной фазе хорошо зарекомендовало себя в радиосвязи, в частности, при когерентном приёме сигналов. Долгое время применение данной группы методов было ограничено ввиду сложности получения непрерывной функции полной фазы сигнала.

Однако, с развитием вычислительной техники, данная задача стала решаемой, и интерес к методам фазовой обработки возрос.

Особую группу составляют методы межкомпонентной фазовой обработки (МФО), которые будут рассмотрены в данной работе. Данные методы помогали исследователям в области акустики, хорошо зарекомендовали себя при исследовании нелинейных сред. Методы МФО позволили повысить точность результата и снизить его зависимость от условий измерения. Появление нового поколения ЭВМ сделало возможным более широкое применение данных методов. В нашей стране в последние два десятилетия методы МФО используются в области обработки речи, исследуется их применение в виброакустической диагностике. За рубежом, при активном участии белорусских коллег, методы МФО начали применяться для улучшения качества речи.

Целью данной работы является повысить точность вибрационной диагностики спектральными методами при помощи новых способов цифровой обработки сигналов – методов межкомпонентной фазовой обработки.

Применение фазовой обработки сигналов и МФО отработаны в области анализа речевых сигналов, применение методов обработки фазовой информации изучено в данной области лучше. Речевой сигнал более простой по природе, содержит меньшее число составляющих и менее зашумлённый, чем вибрационный. Ввиду общности физической природы сигналов в данной работе опыт обработки виброакустических сигналов будет дополнен наработками в области фазового анализа речевых сигналов.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации:** В настоящее время виброакустическая диагностика, как вид неразрушающего контроля, позволяет существенно снизить расходы на техническое обслуживание. Одна из наиболее актуальных задач в диагностике машинного оборудования – диагностика зарождающихся дефектов. Спектральные методы диагностики хорошо зарекомендовали себя, однако, слабая выраженность спектральных составляющих затрудняет выявление дефекта на ранних стадиях.

**Цель данной работы:** Исследовать на применимость методов межкомпонентной фазовой обработки сигналов для диагностики машинного оборудования, проверить их эффективность.

**Задача исследования:** Провести анализ существующих алгоритмов виброакустической диагностики; проверить пригодность методов межкомпонентной фазовой обработки сигналов для спектральной вибрационной диагностики.

**Объект исследования:** Метод оценки частоты вращения вала.

**Предмет исследования:** Пригодность, достоверность метода оценки частоты вращения вала с учётом межкомпонентных фазовых соотношений.

**Теоретико-методологическую основу исследования:** составили труды отечественных и зарубежных ученых, занимающиеся теоретическими и практическими вопросами: спектральными и фазовыми методами анализа сигналов.

**Эмпирическую базу исследования:** составили открытые базы данных виброакустических сигналов, а также набор сигналов, снятые на минском подшипниковом заводе для проверки работоспособности алгоритмов.

**Объем диссертации:** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 76 страниц основного текста, 30 рисунков.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показано, в чём заключается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Актуальность исследования обусловлена трудностью диагностики зарождающихся дефектов оборудования. Применение новой для вибродиагностики группы методов межкомпонентной фазовой обработки сигналов призвано повысить чувствительность используемых спектральных методов к зарождающимся дефектам.

В первой главе рассмотрены исследования в области вибрационной диагностики машин и механизмов. Так же были рассмотрены методы диагностики по сигналам вибрации. Анализ исследований показал, что в настоящее время наиболее перспективными методами диагностики являются методы из группы спектрального анализа. Они высоко информативны, позволяют выделить из сигнала даже слабо выраженные компоненты. Полученные информативные признаки легко интерпретируемы. Однако, нестационарность и уход частот от номинальных значений затрудняют использование спектрального анализа.

Во второй главе были рассмотрены методы фазовой обработки и межкомпонентной фазовой обработки. Рассмотрены методы оценки мгновенных параметров квазигармонических сигналов, обоснована целесообразность использования преобразования Гильберта для вычисления мгновенной фазы. Обоснована непрерывность фазы реальных акустических сигналов, которая следует из их физической природы. Рассмотрена процедура сшивания фазы, которая устраняет скачки фазы через  $2\pi$ . Данное преобразование необходимо для восстановления непрерывности фазы и даёт возможность извлечь из неё информацию.

Были проверены и подтверждены главные свойства межкомпонентных фазовых отношений. На квазиполигармонических сигналах разной природы было подтверждено, что линейные комбинации полных фаз сохраняются постоянными для гармоник ЧОТ. Межкомпонентные фазовые отношения инвариантны к сдвигу сигнала во времени, нестабильности частот, АЧХ измерительного оборудования и линейным искажениям вибросигнала на пути распространения.

Обоснована необходимость и поставлена задача поиска способа повышения ОСШ и наилучших методов узкополосной фильтрации для надёжной оценки мгновенных параметров акустических сигналов.

В третьей главе был разработан и проверен новый алгоритм компенсации помех, основанный на подавлении зеркального канала при переносе частоты двухканальным преобразователем частоты. Несмотря на использование нелинейных преобразований в компенсаторе помех, нелинейные искажения в сигнал не вносятся. Разработанный компенсатор помех превосходит прочие алгоритмы узкополосной фильтрации: отсутствуют переходные процессы и нестабильность, пульсации в полосе пропускания и подавления на порядки ниже, а коэффициент подавления на порядки выше при коэффициенте прямоугольности, близком к идеальному.

Применение компенсатора помех оправдано для предварительного выделения узкополосных колебаний с последующей оценкой мгновенных параметров колебаний при помощи преобразования Гильберта. Разработанный алгоритм может успешно быть использован в области МФО и в других приложениях.

В четвёртой главе показана целесообразность применения методов МФО для обнаружения слабо выраженных компонентов вибрационного сигнала. Так же обоснованно использование компенсатора помех для выделения анализируемых компонентов из смеси близких по частоте составляющих.

Методы МФО для задачи обнаружения слабо выраженных гармоник ЧОТ были проверены на модельных и реальных сигналах. Применение методов МФО совместно со спектральными методами оценки частоты вращения вала дало практический результат. Следовательно, методы МФО могут успешно применяться в виброакустической диагностике машинного оборудования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён обзор используемых в настоящий момент методов виброакустической диагностики промышленного оборудования. Среди них выделена группа методов спектральной вибрационной диагностики. Отмечена высокая информативность, возможности относительно простого разделения компонентов и интерпретации результатов. В качестве недостатков были отмечены возможный уход частот дефектов от номинальных значений и сложность спектральной обработки нестационарных сигналов.

Рассмотрена группа методов МФО. Теоретически обоснованы главные свойства МФО – сохранение постоянных значений для ЧОТ и её гармоник, инвариантность ко сдвигам по частоте и времени, инвариантность к АЧХ измерительного оборудования. Данные свойства позволяют повысить точность измерений. Указанные свойства подтверждены на модельных и реальных акустических сигналах. Выявлена высокая чувствительность межкомпонентных фазовых отношений к ОСШ и ширине полосы выделенных компонентов.

Поставлена и решена задача выделения квазигармонических колебаний в узкой полосе, порядка 1 Гц. Рассмотрены существующие методы решения задачи – применение ЦФ, БПФ и вейвлет-преобразования. Разработан компенсатор помех, основанный на двойном переносе частоты с подавлением зеркального канала. Все рассмотренные методы проверены на смеси полезного квазигармонического сигнала, широкополосного шума и двух близко расположенных гармонических помех. В качестве критериев оценки выбраны средняя и средняя квадратичная ошибки при выделении полезного колебания. При большей концентрации энергии шума ошибка компенсатора до двух порядков меньше ошибки других методов.

Рассмотрены использующиеся на практике спектральные методы оценки частоты вращения главного вала. Отмечена приоритетность этой задачи при использовании спектральных методов диагностики. Отмечены недостатки использованных методов – неоднозначность результата диагностики сложных механизмов, ненадёжность оценки при слабой выраженности гармоник частоты вала. Применение методов МФО вместе с использованными ранее спектральными методами позволило произвести оценку частоты вала в случаях, когда спектральные методы не давали надёжного и однозначного результата. Успешное применение методов МФО на практике показало, что они заслуживают дальнейших исследований и могут быть внедрены в промышленности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### Список публикаций соискателя

[1-А] Кечик, Д.А. Анализатор фазовых характеристик колебаний механизмов и машин / Д.А. Кечик, И.В. Лощинин // Радиотехнические системы : материалы 52-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, май 2016 года). – Минск : БГУИР, 2016. – С. 24.

[2-А] Кечик, Д.А. Способ выделения информативных составляющих вибрационного сигнала методами межкомпонентной фазовой обработки / Д.А. Кечик // Радиотехнические системы : материалы 53-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, май 2017 года). – Минск : БГУИР, 2017.

[3-А] Кечик, Д.А. Способ выделения информативных составляющих вибрационного сигнала методами межкомпонентной фазовой обработки / Д.А. Кечик // Радиотехнические системы : материалы 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, май 2018 года). – Минск : БГУИР, 2018.