

Клионский Дмитрий Михайлович

**АЛГОРИТМЫ И КОМПЛЕКС ПРОГРАММ
ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ВИБРАЦИОННОГО СИГНАЛА**

05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ) на кафедре математического обеспечения и применения ЭВМ

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Геппенер Владимир Владимирович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор, Малыхина Галина Федоровна, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», заведующая кафедрой измерительных информационных технологий

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Новиков Лев Васильевич, Институт аналитического приборостроения Российской Академии Наук, ведущий научный сотрудник лаборатории оптики заряженных частиц и математического моделирования

Ведущая организация – Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Вектор»

Защита состоится «_____» _____ 2013 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.238.01 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан «_____» _____ 2013 года.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций
Д 212.238.01, к.т.н.

Щеголева Н.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На современном этапе развития технической инфраструктуры, представляющей собой, в том числе, совокупность взаимодействующих динамических объектов (инженерных сооружений, транспортных и космических средств и пр.), значительное внимание уделяется вопросам их безотказного функционирования. Одним из путей, обеспечивающих повышение надежности функционирования динамических объектов в реальных условиях эксплуатации, является проведение технических испытаний, в ходе которых осуществляется проверка правильности их функционирования в соответствии с предназначением и условиями применения.

Испытания могут сопровождаться возникновением нештатных ситуаций, вызванных отклонениями в работе систем объекта от требуемых значений, предусмотренных специальным предварительно составленным регламентом. В этом случае речь идет о *нештатно завершенных испытаниях* (НЗИ). В наихудшем случае НЗИ могут приводить к выходу объекта из строя (аварии), что влечет за собой большие материальные потери.

По результатам НЗИ специалистами-анализаторами детально исследуются отклонения характеристик объекта, определенных на основе поступившей телеметрической информации, от заранее известных значений, задаваемых тактико-техническими требованиями. Для установления причин нештатных ситуаций и их предотвращения при последующей эксплуатации указанные характеристики и их отклонения должны быть оценены с максимально возможной точностью.

Динамический объект в процессе функционирования при испытаниях и эксплуатации характеризуется набором различных параметров, описывающих его состояние. Данные параметры рассматриваются в диссертационной работе применительно к объектам ракетно-космической техники (РКТ), при этом основное внимание уделено исследованию *вибраций*. Вибрации при определенных условиях могут быть причиной возникновения опасных резонансных явлений, приводящих к повреждению или разрушению корпуса, внутренних устройств или объекта в целом. Сигналы, получаемые в процессе виброизмерений (*вибрационные сигналы*), являются важным источником информации о состоянии объекта на всех этапах испытаний, так как они имеют высокую чувствительность к отклонению характеристик механических вибраций от допустимых значений.

Исследуемые вибрационные сигналы имеют кусочно-непрерывную структуру, представляющую собой последовательность чередующихся во времени квазистационарных и нестационарных вибрационных процессов, соответствующих различным режимам работы объекта. Сигналы являются *многокомпонентными*, то есть представляют собой конечный аддитивный набор зашумленных разномасштабных осциллирующих составляющих (компонент), локализованных по частотным полосам и соответствующих различным типам вибраций. Частотная структура детально рассматриваемых в диссертации квазистационарных вибрационных процессов характеризуется нерегулярностью и наличием распределенных локальных особенностей различной природы и неравномерным распределением энергии по стандартным третьоктавным полосам частот.

Существующие методы оценивания параметров многокомпонентных вибрационных сигналов при проведении их послесекансной обработки основаны на применении неавтоматизированной обработки данных, допускового контроля статистических характеристик сигналов и спектрального анализа сигналов с использованием преобразования Фурье. С точки зрения применения к анализу результатов НЗИ, указанные методы имеют определенные недостатки:

- оценивается и анализируется лишь незначительная часть параметров сигнала во временной области и не поддаются оценке параметры в частотной области; требуются высокая квалификация специалистов-анализаторов и значительные временные затраты (при неавтоматизированной обработке);
- не обеспечивается требуемое качество оценок параметров сигнала в частотной области при наличии распределенных локальных особенностей и нерегулярной частотной структуре (при спектральном анализе на основе преобразования Фурье);
- низкая эффективность в случае *начальной* стадии развития нештатной ситуации, когда отклонения в работе систем объекта только начинают проявляться (при допусковом контроле);
- точность полученных результатов и, как следствие, достоверность выводов по завершении оценивания параметров сигнала заметно снижаются в условиях шума, присутствующего в реальных вибрационных сигналах.

С учетом особенностей вибрационных сигналов, для устранения отмеченных недостатков, а также для повышения точности оценивания параметров многокомпонентного вибрационного сигнала в диссертации предложено применение математического аппарата, позволяющего проводить мультиразрешающий (кратномасштабный) анализ на основе дискретного вейвлет-преобразования и декомпозиции на эмпирические моды (ДЭМ) и спектральный анализ сигналов. При этом становится возможным детальное исследование разномасштабной структуры осциллирующих компонент исследуемого сигнала во временной, частотной и вейвлет-области применительно к различным типам вибраций. Использование указанного аппарата позволяет извлекать компоненты, обладающие повышенной чувствительностью к возникновению нештатных ситуаций на объекте. Кроме того, с высокой точностью обеспечивается оценивание энергии в третьоктавных полосах частот сигнала и отображение в частотной области локальных особенностей, характерных для НЗИ, - резонансных пиков. Наличие быстрых вычислительных алгоритмов позволяет применять данный аппарат к обработке реальных вибрационных сигналов длиной до нескольких миллионов отсчетов.

Таким образом, разработка и исследование новых подходов к оцениванию параметров многокомпонентного вибрационного сигнала, обеспечивающих повышение точности оценивания данных параметров во временной и в частотной области, является актуальной и практически реализуемой задачей.

Цель работы - разработка алгоритмов и комплекса программ, обеспечивающих повышение точности оценивания параметров многокомпонентного вибрационного сигнала во временной и в частотной области по сравнению с существующими аналогами.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

- 1) Разработка модели вибрационного сигнала, описывающей чередование во времени вибрационных процессов в соответствии с изменением режимов работы динамического объекта и имеющей многокомпонентную структуру, обусловленную различными типами вибраций на фоне шума.
- 2) Разработка способа обработки многокомпонентных вибрационных сигналов на основе гармонического вейвлет-преобразования, позволяющего оценивать параметры сигнала во временной области с учетом его кусочно-непрерывной многокомпонентной структуры и влияния мешающих воздействий.
- 3) Разработка вычислительного алгоритма оценивания в частотной области параметров многокомпонентного вибрационного сигнала, характеризующих потенциально опасные резонансные явления, на основе сглаживания его Фурье-периодограммы в про-

странстве вейвлет-коэффициентов.

4) Разработка вычислительного алгоритма оценивания в частотной области параметров многокомпонентного вибрационного сигнала, характеризующих спектральные свойства различных типов вибраций, на основе разделения сигнала на разномасштабные компоненты с помощью декомпозиции на эмпирические моды.

5) Создание комплекса программ для оценивания параметров многокомпонентного вибрационного сигнала во временной и в частотной области, а также для проведения экспериментального исследования разработанных способа и алгоритмов на основе компьютерного моделирования многокомпонентных вибрационных сигналов.

Объектом исследования диссертационной работы является процесс послесеансной обработки многокомпонентных вибрационных сигналов, поступающих от динамических объектов в условиях испытаний и эксплуатации.

Предметом изучения диссертационной работы являются алгоритмы оценивания параметров многокомпонентного вибрационного сигнала во временной и в частотной области при проведении послесеансной обработки.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы дискретного вейвлет-анализа сигналов, методы непараметрического спектрального анализа сигналов, метод декомпозиции сигналов на эмпирические моды, численные методы математической статистики и линейной алгебры, математическое и компьютерное моделирование. Используемые методы описаны в работах С. Малла, И. Добеши, Н.К. Смоленцева, К. Чуи, С.Л. Марпла-мл., А.Б. Сергиенко, А.И. Солониной, С.М. Арбузова, Э. Айфичера, Г. Дженкинса, Дж. Бокса, Д. Ваттса, Д. Бриллинджера, Н. Хуанга, П. Фландрина, А.В. Назарова, Г.И. Козырева, В.М. Вержбицкого, А.А. Большакова, Р.Н. Каримова, В. Дьяконова, И. Ануфриева и др.

Методология исследования включает в себя:

1) Анализ существующих методов и алгоритмов оценивания параметров вибрационного сигнала при проведении *послесеансной* обработки.

2) Применение дискретного вейвлет-преобразования, непараметрического спектрального анализа и метода ДЭМ к оцениванию параметров многокомпонентного вибрационного сигнала во временной и в частотной области.

3) Выполнение экспериментальных исследований по оцениванию параметров многокомпонентного вибрационного сигнала во временной и в частотной области с использованием разработанных способа, вычислительных алгоритмов и комплекса программ.

4) Анализ результатов применения разработанных модели, способа и вычислительных алгоритмов к оцениванию параметров многокомпонентного вибрационного сигнала.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Предложена модель вибрационного сигнала, описывающая чередование во времени вибрационных процессов с многокомпонентной структурой. Чередование процессов обусловлено изменением режимов работы динамического объекта, а их многокомпонентность - различными типами вибраций на фоне шума в ходе испытаний или эксплуатации.

2) Предложен способ обработки многокомпонентных вибрационных сигналов на основе гармонического вейвлет-преобразования, заключающийся в очистке сигнала от шума с помощью модифицированной пороговой обработки вейвлет-коэффициентов и последующей сегментации на фрагменты, соответствующие различным типам вибрационных процессов. Предложенный способ позволяет оценивать во временной области параметры многокомпонентного вибрационного сигнала, характеризующие начало и

окончание вибрационных процессов, и обеспечивает повышение точности оценивания данных параметров по сравнению с существующими аналогами.

3) Разработан вычислительный алгоритм оценивания в частотной области параметров многокомпонентного вибрационного сигнала на основе вейвлет-сглаживания Фурье-периодограммы сигнала с выбором мягкой или жесткой пороговой обработки вейвлет-коэффициентов. Оцениваемые параметры характеризуют потенциально опасные резонансные явления в частотной области и энергетические свойства механических вибраций. Алгоритм позволяет использовать в качестве исходной информации как отсчеты сигнала во временной области, так и отсчеты его дискретного преобразования Фурье (ДПФ) или отсчеты его Фурье-периодограммы.

4) Разработан вычислительный алгоритм оценивания в частотной области параметров многокомпонентного вибрационного сигнала на основе разделения сигнала на разномасштабные компоненты посредством декомпозиции на эмпирические моды. Оцениваемые параметры характеризуют спектральные свойства различных типов вибраций. Алгоритм позволяет выделять компоненты, соответствующие различным типам вибраций, и дифференцированно учитывать их вклад в анализируемый сигнал.

Достоверность научных результатов и выводов обусловлена корректностью использованного математического аппарата и подтверждается результатами экспериментальных исследований разработанных способа и алгоритмов с использованием компьютерного моделирования многокомпонентных вибрационных сигналов.

Теоретическая и практическая ценность работы заключается в следующем:

1) Предложенная модель позволяет описать структуру реальных многокомпонентных вибрационных сигналов с учетом различных типов вибраций на фоне шума. Модель позволяет проводить исследование разработанных способа и алгоритмов на многокомпонентных вибрационных сигналах.

2) Разработанные способ и алгоритмы позволяют проводить анализ результатов стендовых и натурных испытаний динамических объектов (как при штатном, так и нештатном завершении), а также результатов эксплуатации объектов применительно к обработке и анализу вибрационных сигналов. В случае НЗИ разработанные способ и алгоритмы позволяют анализировать развитие нештатных ситуаций на начальных этапах их развития. При этом обеспечивается автоматизация и более высокая точность оценивания параметров сигнала по сравнению с существующими и применяемыми методами. Это способствует повышению надежности функционирования объектов при одновременном сокращении количества испытаний и повышении информативности результатов анализа поступающих вибрационных сигналов.

3) Созданный комплекс программ позволяет выполнять оценку параметров многокомпонентного вибрационного сигнала, а также исследование разработанных способа и алгоритмов на основе компьютерного моделирования многокомпонентных вибрационных сигналов. Комплекс программ может быть расширен за счет добавления новых программных модулей.

4) Разработанные модель, способ, алгоритмы и комплекс программ могут применяться для решения более широкого круга задач, связанных с обработкой и анализом стационарных и нестационарных сигналов с многокомпонентной структурой, включающей осциллирующие разномасштабные составляющие на фоне шума.

Положения, выносимые на защиту:

1) Модель вибрационного сигнала, описывающая чередование во времени вибрационных процессов с многокомпонентной структурой.

2) Способ обработки многокомпонентных вибрационных сигналов на основе гармонических вейвлетов, обеспечивающий повышение точности оценивания параметров сигнала во временной области.

3) Вычислительный алгоритм оценивания в частотной области параметров многокомпонентного вибрационного сигнала на основе вейвлет-сглаживания его Фурье-периодограммы.

4) Вычислительный алгоритм оценивания в частотной области параметров многокомпонентного вибрационного сигнала на основе разделения сигнала на разномасштабные компоненты посредством декомпозиции на эмпирические моды.

Внедрение результатов работы. Результаты работы использованы в 2010-2013 гг. при выполнении двух НИР в рамках Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы”: “Разработка технологии комплексного анализа телеметрических данных, характеризующих состояние сложных динамических объектов” (2010-2011 гг.) и “Разработка и исследование моделей, методов и алгоритмов интеллектуального анализа состояния сложных динамических объектов” (2012 г.), а также НИР в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ высшим учебным заведениям в части проведения научно-исследовательских работ: “Разработка адаптивных подходов к комплексной обработке и выявлению аномалий в телеметрических данных, включающей предварительную обработку, структурный и интеллектуальный анализ данных” (2012-2013 гг.) и НИОКР в рамках программы “Участник молодежного научно-инновационного конкурса” под названием “Проведение анализа и обработки телеметрических данных на основе современных достижений в области спектрального, частотно-временного и интеллектуального анализа данных” (2010-2011 гг.).

Результаты работы использованы при проведении лабораторных работ и практических занятий по дисциплине “Цифровая обработка сигналов” кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ “ЛЭТИ”.

Практическое использование результатов подтверждено актами о внедрении, выданными ОАО “Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета” и ОАО “Российский институт мощного радиостроения”.

Исследования поддержаны стипендиями президента и правительства РФ (2010-2012 гг.), а также грантами Комитета по науке и высшей школе при правительстве Санкт-Петербурга (2009, 2012 гг.).

Апробация результатов работы. Результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на ряде международных, национальных и региональных научно-технических конференций, в числе которых: 11-15-я международные конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение” (г. Москва, 2009-2013 гг.); 64-я научно-техническая конференция, посвященная Дню радио (г. Санкт-Петербург, 2009 г.); 1-я международная конференция “Компьютерные науки и технологии” (г. Белгород, 2009 г.); 10-я международная конференция “Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии” (г. Санкт-Петербург, 2010 г.); международная конференция “Вейвлеты и их приложения” (г. Санкт-Петербург, 2012 г.).

Выступления на международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение” были отмечены дипломами за лучший доклад в 2010 и 2011 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, включая 6 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ, 8 докладов в материалах международных, национальных и региональных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и списка литературы, включающего 126 наименований. Основная часть работы изложена на 152 страницах машинописного текста. Работа содержит 41 рисунок, 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, определяются объект, предмет и методы исследования, указываются научная новизна и положения, выносимые на защиту. Отмечается практическая ценность полученных результатов, их внедрение и апробация. Представлена структура и объем диссертации.

Первая глава посвящена анализу существующих методов оценивания параметров вибрационного сигнала при проведении послесеансной обработки результатов технических испытаний и эксплуатации. Указываются достоинства и недостатки существующих методов, а также перспективы их усовершенствования и развития.

Параметры сигнала в диссертации оцениваются в частотной области по результатам обработки вибрационных процессов, характеризующих установившийся режим работы объекта, после оценивания их границ во временной области. Установившийся режим, согласно циклограмме, наиболее продолжителен и соответствует работе объекта в течение наибольшего времени его функционирования.

С точки зрения задач диссертационной работы, следует выделить приведенные ниже параметры многокомпонентного вибрационного сигнала:

- во временной области:
 - момент начала установившегося вибрационного процесса;
 - момент окончания установившегося вибрационного процесса.
- в частотной области:
 - спектральная плотность мощности (СПМ) установившегося вибрационного процесса в диапазоне частот от нуля до частоты Найквиста и в третьоктавных полосах частот;
 - энергия вибраций, приходящаяся на третьоктавные полосы частот.

Данные параметры являются общепринятыми применительно к исследуемым объектам. При этом в случае НЗИ точность их оценивания очень важна для последующего анализа результатов виброизмерений.

В настоящее время применяются следующие методы оценивания параметров вибрационных сигналов при проведении их послесеансной обработки:

1) *Неавтоматизированная обработка во временной области.* Состоит в анализе участков вибрационных сигналов, выделенных на основе сравнения с циклограммой испытаний или эксплуатации. При этом определяются в основном наиболее выраженные проявления нештатной ситуации такие, например, как резкие изменения амплитуды исследуемого сигнала, пропуски или появление в сигнале сбойных участков. В то же время, не поддаются оцениванию параметры сигнала в частотной области, по которым в основном делается вывод о возникновении нештатных ситуаций в ходе испытаний. Стоит также отметить недостаточную степень автоматизации (значительный объем ручной работы) и высокие требования к квалификации персонала.

2) *Допусковый контроль.* Применяется в рамках специализированных методов, заключающихся в реализации регламентированных последовательностей шагов, которым следуют специалисты-анализаторы при обработке вибрационных сигналов. Основной

недостаток допускового контроля состоит в том, что он неэффективен на начальных этапах развития нештатной ситуации в ходе испытаний, когда отклонения в значениях параметров только начинают проявляться, что может в дальнейшем привести к аварии динамического объекта.

3) *Методы и алгоритмы спектрального анализа на основе преобразования Фурье.* Традиционно используются в частотной области, но при этом не обеспечивается требуемое качество оценок параметров вибрационного сигнала с непрерывным спектром при наличии распределенных локальных особенностей и нерегулярной структуре в частотной области.

Точность оценивания параметров сигнала при использовании указанных методов в значительной степени зависит от уровня шума, присутствующего в реальных вибрационных сигналах.

При оценивании параметров вибрационного сигнала применяются модель на основе полигармонического сигнала и модель на основе авторегрессии. Обе указанные модели не могут быть применены для описания *нестационарных* вибрационных сигналов, в том числе сигналов с кусочно-непрерывной структурой. Кроме того, первая модель не учитывает случайный характер параметров вибраций и не предназначена для описания вибрационных сигналов с непрерывным спектром.

Вторая глава посвящена разработке математической модели многокомпонентного вибрационного сигнала и способа обработки многокомпонентных вибрационных сигналов на основе гармонических вейвлетов с целью оценивания параметров сигнала во временной области.

Задачи, поставленные в диссертационной работе, решаются посредством послесекансной обработки и анализа дискретных вибрационных сигналов.

Рассматриваемые вибрационные сигналы имеют кусочно-непрерывную многокомпонентную структуру, соответствующую чередованию во времени режимов работы объекта, и представляют собой конечный аддитивный набор разномасштабных осциллирующих компонент, соответствующих различным типам вибраций. С учетом сказанного, предложена следующая модель многокомпонентного вибрационного сигнала $s(n)$:

$$s(n) = \begin{cases} s_{1\text{УП}}(n) = \sum_{i \in I_1} \beta_{1i} c_{1i}(n), & n_1 \leq n < n_2, \\ \dots \\ s_{j\text{УВП}}(n) = s_{j\text{НЧ}}(n) + s_{j\text{ВЧ}}(n) + e_j(n), & n_j \leq n < n_{j+1}, \\ \dots \\ s_{M\text{ПП}}(n) = \sum_{i \in I_M} \beta_{Mi} c_{Mi}(n), & n_{M-1} \leq n \leq n_M, \end{cases} \quad (1)$$

$$0 = n_1 < n_2 \dots < n_j < n_{j+1} < \dots < n_{M-1} < n_M = N - 1,$$

где n - дискретное нормированное время (номер отсчета сигнала); N - количество отсчетов (длина) сигнала $s(n)$; M - количество чередующихся вибрационных процессов; $s_{1\text{УП}}(n)$ - ударный процесс; $s_{M\text{ПП}}(n)$ - переходный процесс; $s_{j\text{УВП}}(n)$ - j -й установившийся вибрационный процесс; $s_{j\text{НЧ}}(n)$ и $s_{j\text{ВЧ}}(n)$ - низкочастотная и высокочастотная результирующие компоненты j -го установившегося вибрационного процесса соответственно; $e_j(n)$ - нормально распределенный шум (шумовая компонента) в установившемся вибрационном процессе, учитывающий суммарное влияние бортовой и приемно-

регистрирующей аппаратуры; $c_{ji}(n)$ - i -я компонента (соответствующая шуму или одному из типов вибраций) вибрационного процесса $s_j(n)$; β_{ji} - коэффициент при компоненте $c_{ji}(n)$; I_1, \dots, I_M - индексные множества, количество элементов в которых различается из-за различного числа компонент для каждого процесса $s_j(n)$.

В диссертации детально исследуются установившиеся вибрационные процессы, соответствующие установившемуся режиму. Частота дискретизации рассматриваемых сигналов составляет 8 кГц, поэтому СПМ установившегося вибрационного процесса оценивается в диапазоне частот от 0 до 4 кГц, в котором условно выделены низкочастотная (от 0 до 125 Гц) и высокочастотная (от 125 Гц до 4 кГц) области. Низкочастотные вибрации возникают при выходе объекта на установившийся режим. Высокочастотные вибрации имеют место при работе в установившемся режиме.

Порядок чередования вибрационных процессов в модели (1) является условным и может меняться в зависимости от программы проводимых испытаний. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики вибрационных процессов, соответствующих различным режимам работы объекта.

Таблица 1. Вибрационные процессы и их характеристики

Режим работы объекта	Тип вибрационного процесса	Длительность	Стационарность вибрационного процесса	Область концентрации энергии
Установившийся	Установившийся вибрационный	До нескольких десятков секунд	Квазистационарный	От нуля до частоты Найквиста
Переходный	Переходный	Единицы секунд	Нестационарный	Вблизи нулевой частоты
Ударных воздействий	Ударный	До нескольких десятков миллисекунд	Нестационарный	Вблизи частоты Найквиста

Обобщенная структура анализируемого вибрационного сигнала $s(n)$, соответствующая модели (1), показана на рисунке 1. Границы вибрационных процессов на рисунке 1 отмечены вертикальными линиями.

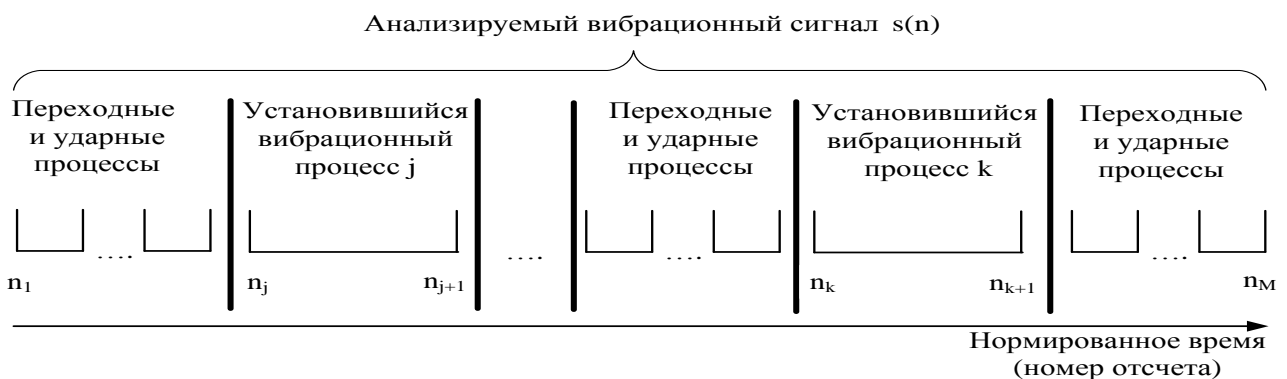


Рисунок 1 – Обобщенная структура анализируемого вибрационного сигнала

В диссертации разработан способ обработки многокомпонентных вибрационных сигналов на основе гармонического вейвлет-преобразования, согласующийся с предложенной моделью (1) и позволяющий оценивать параметры сигнала во временной области. Базисные функции, используемые при вычислении вейвлет-коэффициентов гармонического вейвлет-преобразования, соответствуют по форме отдельным участкам - как локальным, так и протяженным - исследуемых вибрационных сигналов, что позволяет применять гармонические вейвлеты для аппроксимации данных сигналов. Разработан-

ный способ учитывает особенности рассматриваемых вибрационных сигналов и реализуется в два этапа. На *первом* этапе предложено проведение очистки сигнала от шума с помощью модифицированной пороговой обработки вейвлет-эффицентов, использование которой не приводит к смещению искомым границ процессов. На *втором* этапе путем выделения участков с незначимыми вейвлет-коэффициентами осуществляется сегментация очищенного от шума сигнала для оценивания временных границ установившихся вибрационных процессов.

В силу свойства линейности гармонического вейвлет-преобразования, вейвлет-коэффициенты $a_{j\text{вibr}}(m)$ зашумленного сигнала $s(n)$ представляются в виде:

$$a_{j\text{вibr}}(m) = w_{j\text{вibr}}(m) + v_{j\text{вibr}}(m), \quad j = 0, \dots, (\log_2 N) - 1; \quad m = 0, \dots, 2^j - 1, \quad (2)$$

где j - номер уровня вейвлет-разложения, m - номер вейвлет-коэффициента, $w_{j\text{вibr}}(m)$ - вейвлет-коэффициенты полезного сигнала, $v_{j\text{вibr}}(m)$ - вейвлет-коэффициенты шума, присутствующего в анализируемом вибрационном сигнале.

Особенность данного представления состоит в том, что вейвлет-коэффициенты $a_{j\text{вibr}}(m)$, соответствующие анализируемому вибрационному сигналу, являются комплексными. В связи с этим их дальнейшая пороговая обработка, необходимая для удаления шума из сигнала, должна проводиться на основе модифицированных порогов, учитывающих распределение шума по шумовым уровням. Соответствующие модификации для шумовых уровней вейвлет-разложения получены в работе.

Как показано в диссертации, в силу осциллирующей разномасштабной структуры рассматриваемых установившихся вибрационных процессов, вейвлет-коэффициенты смеси установившегося вибрационного процесса и шума приближенно равны вейвлет-коэффициентам шума:

$$a_{j\text{УВП}}(m) \approx v_{j\text{УВП}}(m), \quad j = 0, \dots, (\log_2 N) - 1; \quad m = 0, \dots, 2^j - 1, \quad (3)$$

где $a_{j\text{УВП}}(m)$ - вейвлет-коэффициенты смеси установившегося вибрационного процесса и шума, $v_{j\text{УВП}}(m)$ - вейвлет-коэффициенты шумовой составляющей установившегося вибрационного процесса.

Величины $w_j(m)$ определяются следующим образом:

$$w_{j\text{вibr}}(m) = G[a_{j\text{вibr}}(m), \rho_j], \quad (4)$$

где $G[\dots]$ - нелинейный оператор модифицированной мягкой пороговой обработки вейвлет-коэффициентов $a_{j\text{вibr}}(m)$, ρ_j - модифицированные значения порогов.

В диссертации определено, что при обработке зашумленных вибрационных сигналов набором октавных фильтров, соответствующих гармоническому вейвлет-преобразованию, СКО шума для каждого последующего уровня разложения уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с предыдущим. При этом получено следующее выражение для расчета порогов:

$$\rho_j = \frac{\sigma_q}{\sqrt{2} \cdot 2^{j/2}} \sqrt{2 \ln N}, \quad j = (\log_2 N) - 2, (\log_2 N) - 3, \dots \quad (5)$$

где σ_q - оценка среднеквадратического отклонения (СКО) шумовой составляющей на самом тонком уровне разложения (данный уровень, в силу выраженной осциллирующей структуры, содержит наибольшую долю шума) с номером $q = (\log_2 N) - 1$; порог ρ_j применяется к вещественной и мнимой частям вейвлет-коэффициентов.

Выражения для расчета модифицированных вейвлет-коэффициентов (с учетом найденных порогов) и очищенного от шума сигнала имеют вид:

$$w_{j\text{вибр}}(m) = \begin{cases} a_{j\text{вибр}}(m) - \frac{\sigma_q}{\sqrt{2} \cdot 2^{j/2}} \sqrt{2 \ln N}, & a_{j\text{вибр}}(m) > \frac{\sigma_q}{\sqrt{2} \cdot 2^{j/2}} \sqrt{2 \ln N} \\ 0, & -\frac{\sigma_q}{\sqrt{2} \cdot 2^{j/2}} \sqrt{2 \ln N} < a_{j\text{вибр}}(m) \leq \frac{\sigma_q}{\sqrt{2} \cdot 2^{j/2}} \sqrt{2 \ln N} \\ a_{j\text{вибр}}(m) + \frac{\sigma_q}{\sqrt{2} \cdot 2^{j/2}} \sqrt{2 \ln N}, & a_{j\text{вибр}}(m) \leq -\frac{\sigma_q}{\sqrt{2} \cdot 2^{j/2}} \sqrt{2 \ln N}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\hat{s}(n) = W^{-1} [w_{j\text{вибр}}(m)], \quad (7)$$

где $w_{j\text{вибр}}(m)$ - модифицированные вейвлет-коэффициенты, $\hat{s}(n)$ - очищенный от шума сигнал, W^{-1} - оператор обратного гармонического вейвлет-преобразования. Оценка σ_q определяется в соответствии с методом наименьших квадратов или медианной оценкой (нормированная медиана абсолютных отклонений вейвлет-коэффициентов от их медианы).

После получения оценки сигнала $\hat{s}(n)$ осуществляется выделение участков с незначимыми вейвлет-коэффициентами на самом тонком уровне вейвлет-разложения. Модифицированные вейвлет-коэффициенты $w_{q\text{вибр}}(m)$ очищенного от шума сигнала полагаются незначимыми, если они удовлетворяют условию:

$$|w_{q\text{вибр}}(m)| < \eta, \quad q = (\log_2 N) - 1; \quad m = (N/4) \dots (N/2) - 1, \quad (8)$$

где η - величина с близким к нулю значением $\eta \sim 10^{-5} \dots 10^{-3}$.

В противном случае, вейвлет-коэффициенты являются значимыми и соответствуют переходному или ударному процессам.

По результатам сегментации в вейвлет-области формируется множество A_1 вейвлет-коэффициентов на самом тонком уровне разложения:

$$A_1 : \{w_{q\text{вибр}}(m)\}, \quad m \in [n_0, n_1] \cup \dots \cup [n_j, n_{j+1}] \cup \dots, \quad (9)$$

где $n_0, n_1, \dots, n_j, n_{j+1}, \dots$ - границы установившихся вибрационных процессов в пространстве вейвлет-коэффициентов, \cup - символ объединения множеств значений.

Найденные границы незначимых участков пересчитываются во временную область, и тем самым осуществляется сегментация вибрационного сигнала.

Третья глава посвящена разработке вычислительных алгоритмов оценивания в частотной области параметров многокомпонентного вибрационного сигнала.

Для оценивания параметров сигнала, характеризующих потенциально опасные резонансные явления и энергетические свойства механических вибраций, в диссертации разработан вычислительный алгоритм, основанный на вейвлет-сглаживании Фурье-периодограммы установившихся вибрационных процессов.

При разработке алгоритма учтено, что исследуемые процессы имеют непрерывный спектр, нерегулярную структуру и распределенные локальные особенности в частотной области, включая наиболее важные из них – резонансные пики. Кроме того, алгоритм позволяет в качестве исходной информации для оценивания параметров многокомпонентного вибрационного сигнала использовать не только сами отсчеты сигнала во временной области, но и отсчеты его ДПФ или отсчеты его Фурье-периодограммы, посту-

пающие от объекта по телеметрическим каналам связи. Передача отсчетов ДПФ или отсчетов Фурье-периодограммы применяется при большом объеме телеметрической информации в условиях ограниченной пропускной способности канала связи. Алгоритм представлен ниже.

Шаг 1. Вычисляется Фурье-периодограмма установившегося вибрационного процесса $s_{\text{увп}}(n)$ длины N , представляемая затем в мультипликативной форме:

$$W_N(k) = S(k)u(k), \quad k = 0, 1, \dots, N, \quad (10)$$

где k - номер спектрального отсчета, $W_N(k)$ - вычисленная Фурье-периодограмма, $S(k)$ - искомая СПМ, $u(k)$ - случайная составляющая.

Шаг 2. Вычисляется логарифмическая Фурье-периодограмма $\ln W_N(k)$

$$\ln W_N(k) = \ln S(k) + \ln u(k), \quad k = 0, 1, \dots, N, \quad (11)$$

которая преобразуется к виду:

$$\ln W_N(k) + \gamma = \ln S(k) + \varepsilon(k), \quad k = 0, 1, \dots, N. \quad (12)$$

где $\varepsilon(k) = \ln u(k) - E[\ln u(k)]$ - случайная величина с нулевым средним значением; $E[\ln u(k)]$ - математическое ожидание величины $\ln u(k)$; γ - константа Эйлера.

Шаг 3. Выполняется сглаживание логарифмической периодограммы $\ln W_N(k)$ в вейвлет-области и применяется обратное вейвлет-преобразование для расчета сглаженной логарифмической периодограммы $\ln W_N(k)$.

Для сглаживания $\ln W_N(k)$ предложено применение *жесткой пороговой обработки* вейвлет-коэффициентов, которая позволяет сохранить для последующего анализа структуру резонансных пиков в частотной области, а также масштабные соотношения между различными пиками. В случае отсутствия локальных особенностей в виде резонансных пиков (для низкочастотных компонент) предложено применение *мягкой пороговой обработки* вейвлет-коэффициентов.

Шаг 4. Вычисляется искомая оценка СПМ $\hat{S}(k)$ процесса $s_{\text{увп}}(n)$:

$$\hat{S}(k) = e^{\ln W_N(k) + \gamma}. \quad (13)$$

Шаг 5. Определяются частоты локальных максимумов найденной оценки СПМ, которые представляют собой резонансные частоты динамического объекта. Знание этих частот позволяет на практике локализовать резонансные пики.

Шаг 6. Выполняется разбиение всего частотного диапазона от нуля до частоты Найквиста на третьоктавные полосы, в каждой полосе оценивается энергия вибраций и проверяется соотношение между ее максимальным и допустимым значениями:

$$E\{\Delta f_{i(1/3)}\}_{\max} < E\{\Delta f_{i(1/3)}\}_{\text{доп}}, \quad (14)$$

где $E\{\Delta f_{i(1/3)}\}_{\max}$, $E\{\Delta f_{i(1/3)}\}_{\text{доп}}$ - максимальное и допустимое значения энергии вибраций в i -й третьоктавной полосе частот.

По результатам работы алгоритма оцениваются СПМ установившихся вибрационных процессов и энергия вибраций в третьоктавных полосах частот.

Для оценивания в частотной области параметров вибрационного сигнала, характеризующих спектральные свойства низкочастотных и высокочастотных вибраций динамического объекта, разработан вычислительный алгоритм на основе ДЭМ.

Выбор ДЭМ обусловлен тем, что исследуемые установившиеся вибрационные процессы имеют многокомпонентную разномасштабную структуру. Кроме того, в рабо-

те показано, что существует соответствие между компонентами, извлеченными на основе ДЭМ, и типами вибраций. Компоненты извлекаются непосредственно из установившегося вибрационного процесса и обладают повышенной чувствительностью к возникновению нештатной ситуации на объекте. Алгоритм представлен ниже:

Шаг 1. Выполняется разложение установившегося вибрационного процесса $s_{\text{ВВП}}(n)$ в соответствии с ДЭМ, и $s_{\text{ВВП}}(n)$ представляется в виде:

$$s_{\text{ВВП}}(n) = \sum_{i=1}^Q c_i(n), \quad n = 0, \dots, N-1, \quad (15)$$

где $c_i(n)$ – разномасштабные компоненты разложения (эмпирические моды), Q – количество компонент, извлеченных из сигнала с помощью ДЭМ.

Шаг 2. Выделяется первая компонента $c_1(n)$, которая, в силу выраженных осциллирующих свойств, применяется для аппроксимации шумовой компоненты $e(n)$:

$$s_{\text{ВВП}}(n) \approx e(n) + \sum_{i=2}^Q c_i(n). \quad (16)$$

Шаг 3. Вводятся весовые коэффициенты β_i для последующего учета неодинакового вклада различных компонент $c_i(n)$ в анализируемый установившийся вибрационный процесс $s_{\text{ВВП}}(n)$. В результате получается преобразованный процесс $s(n)$:

$$s(n) = e(n) + \sum_{i=2}^Q \beta_i c_i(n), \quad (17)$$

или в векторно-матричной форме

$$\mathbf{s} = \mathbf{C}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{e}, \quad (18)$$

где \mathbf{s} – вектор отсчетов преобразованного процесса $s(n)$, \mathbf{C} – матрица, в столбцах которой хранятся отсчеты компонент $c_i(n)$, $\boldsymbol{\beta}$ – вектор весовых коэффициентов, \mathbf{e} – вектор отсчетов шума.

Шаг 4. Оцениваются весовые коэффициенты β_i по методу наименьших квадратов:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{s}. \quad (19)$$

Шаг 5. Вычисляется *классификационная статистика* ST , определяющая неодинаковый вклад различных компонент $c_i(n)$ в анализируемый установившийся вибрационный процесс $s_{\text{ВВП}}(n)$:

$$ST_i = \frac{|\hat{\beta}_i|^2}{\{\mathbf{V}^{-1}\}_{ii} \hat{\sigma}_e^2}, \quad i = 2, \dots, Q, \quad (20)$$

где \mathbf{V} – матрица ковариаций компонент $c_i(n)$, $\hat{\sigma}_e$ – медианная оценка СКО шума, определяемая по первой компоненте.

Шаг 6. Распределяются значения классификационной статистики ST_i по 2-м группам с помощью *кластер-анализа* для объединения компонент, соответствующих низкочастотным вибрациям, и компонент, соответствующих высокочастотным вибрациям.

Шаг 7. Оценивается СПМ суммы компонент, соответствующих низкочастотным вибрациям, и СПМ суммы компонент, соответствующих высокочастотным вибрациям. Оценивание осуществляется на основе вейвлет-сглаживания Фурье-периодограммы.

Разработанный алгоритм позволяет количественно охарактеризовать факт имевших место резонансных явлений на основе анализа значений классификационной статисти-

ки. В работе установлено, что резонанс имеет место в случае, когда значения классификационной статистики для 2-й и 3-й компоненты различаются более чем в 2-3 раза. Кроме того, разработанный алгоритм позволяет с высокой степенью точности воспроизвести структуру и локализовать в частотной области резонансные пики. Наличие резонансного пика свидетельствует об имеющей место нештатной ситуации.

Четвертая глава посвящена представлению созданного комплекса программ, а также описанию экспериментальных исследований, проведенных для подтверждения повышения точности оценивания во временной и в частотной области параметров многокомпонентного вибрационного сигнала при применении разработанного способа и алгоритмов. В качестве динамических объектов рассматриваются объекты РКТ.

Комплекс программ предназначен для оценивания во временной и в частотной области параметров многокомпонентного вибрационного сигнала при проведении послесеансной обработки. Комплекс также позволяет выполнять исследование разработанного способа и алгоритмов с использованием компьютерного моделирования многокомпонентных вибрационных сигналов.

Для создания комплекса программ использовался высокоуровневый язык программирования MATLAB и графический интерфейс пользователя среды MATLAB. Основные компоненты комплекса включают в себя две подсистемы (подсистема оценивания параметров вибрационного сигнала во временной области и подсистема оценивания параметров вибрационного сигнала в частотной области) и самостоятельный программный модуль, предназначенный для компьютерного моделирования многокомпонентных вибрационных сигналов. При разработке комплекса программ была создана специальная библиотека сигналов, содержащая установившиеся вибрационные процессы, переходные процессы и ударные процессы различной длительности и с различным уровнем шума. Комплекс имеет открытую архитектуру, то есть при необходимости он может быть расширен за счет подключения новых программных модулей. Интерфейс комплекса обеспечивает выбор настроечных параметров для разработанных способа и алгоритмов, интерактивный вывод оценок параметров многокомпонентного вибрационного сигнала и сохранение результатов в текстовые файлы. Интерфейс позволяет специалистам-анализаторам применять созданный комплекс программ при послесеансной обработке результатов испытаний и эксплуатации динамических объектов, а также упрощает работу с комплексом широкого круга квалифицированных специалистов в области цифровой обработки сигналов и анализа данных.

Для проведения экспериментальных исследований выбраны сигналы, представляющие собой мгновенные значения *вибрационных ускорений*, полученные как по результатам штатно завершенных испытаний объектов РКТ, так и при НЗИ. Частота дискретизации - 8 кГц (период дискретизации – 0.125 мс). Сигналы прошли этап предварительной обработки и не содержали пропусков, выбросов и сбойных участков; длины варьируются от 20 тысяч до 1 миллиона отсчетов. При подготовке диссертации, в общей сложности, проанализированы сигналы от 15 различных вибродатчиков по результатам нескольких сеансов испытаний объектов РКТ. В работе приведены результаты для пяти вибродатчиков, отражающие тенденцию к повышению точности оценивания параметров вибрационного сигнала.

Эксперимент по оцениванию параметров вибрационного сигнала во временной области заключался в исследовании точности оценивания моментов начала и окончания установившихся вибрационных процессов. Установлено, что:

- при отношении сигнал/шум (ОСШ) 20 дБ вероятность попадания оценок времен-

ных границ данных процессов в доверительный интервал в 30 периодов (абсолютная ошибка в 30 периодов дискретизации) дискретизации (3.75 мс) равна 0.92;

- при ОСШ 2 дБ максимальная абсолютная ошибка оценивания временных границ установившихся вибрационных процессов с вероятностью 0.93 не превышает 55 периодов дискретизации (6.875 мс).

На практике при использовании аналогов абсолютная ошибка достигает от 40 до 80 мс, что сравнимо с длительностью кратковременных ударных процессов и может приводить к их пропуску при установлении границ процессов. Таким образом, разработанный способ позволяет уменьшить абсолютную ошибку в среднем в 4 раза.

Эксперименты по оцениванию в *частотной* области параметров вибрационного сигнала описаны ниже.

Первый эксперимент осуществлялся с целью подтверждения преимуществ разработанного вычислительного алгоритма оценивания параметров вибрационного сигнала, характеризующих потенциально опасные резонансные явления и энергетические характеристики механических вибраций. Для сравнения выбран алгоритм-аналог, основанный на оконном сглаживании Фурье-периодограммы в частотной области. Оба алгоритма характеризуются возможностью оценивания параметров сигнала без непосредственного использования его отсчетов во временной области.

В качестве исходного сигнала в обоих алгоритмах выбран установившийся вибрационный процесс длиной 2^{19} отсчетов (65.536 с). Эксперимент заключался в определении при заданном ОСШ *среднеквадратической ошибки* отклонения СПМ исследуемого сигнала от СПМ исходного сигнала для обоих алгоритмов. Для каждого ОСШ формировалось по 500 реализаций. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Среднеквадратическая ошибка оценивания СПМ при различных ОСШ

ОСШ, дБ	Для разработанного алгоритма								Для алгоритма-аналога
	жесткая пороговая обработка				мягкая пороговая обработка				
	db(4)	db(16)	coif(4)	sym(4)	db(4)	db(16)	coif(4)	sym(4)	
20	0.0164	0.0104	0.0024	0.0102	0.0341	0.0361	0.0330	0.0316	0.0141
12	0.0162	0.0104	0.0044	0.0100	0.0343	0.0365	0.0335	0.0320	0.0142
6	0.0174	0.0128	0.0077	0.0122	0.0346	0.0362	0.0343	0.0322	0.0159

Исследования проведены с вейвлет-базисами различных порядков p : Добеши – $db(p)$, койфлетами – $coif(p)$ и симмлетами – $sym(p)$ для мягкой и жесткой пороговой обработки. В эксперименте исследованы сигналы от одного из вибродатчиков.

Экспериментом установлено, что наилучшие результаты, с точки зрения минимизации среднеквадратической ошибки, обеспечивают койфлеты при условии модификации вейвлет-коэффициентов по правилу жесткой пороговой обработки (жирный шрифт в таблице 2). Для обеспечения компромиссного соотношения между сложностью расчетов и длиной базисного вейвлета выбран койфлет 4-го порядка.

Второй эксперимент осуществлялся с целью подтверждения обоснованности применения разработанного вычислительного алгоритма оценивания параметров вибрационного сигнала, характеризующих спектральные свойства различных типов вибраций объекта РКТ. В эксперименте исследован установившийся вибрационный процесс длиной 2^{19} отсчетов, зарегистрированный одним из вибродатчиков (другим, по сравнению с первым экспериментом). Для данного сигнала выполнено разложение с помощью ДЭМ и получено 13 компонент (эмпирических мод).

В результате применения кластер-анализа с двумя кластерами сгруппированы компоненты с 1-й по 7-ю, соответствующие высокочастотным вибрациям, и компоненты с 8-й по 13-ю, соответствующие низкочастотным вибрациям (таблица 3). Существенное – более чем в 3 раза – превышение значения ST для 2-й компоненты по сравнению с 3-й свидетельствует о наличии нештатной ситуации, вызванной потенциально опасными резонансами. Графики СПМ суммы компонент с 1-й по 7-ю и с 8-й по 13-ю показаны на рисунке 2. Критерием точности оценивания СПМ является попадание компонент с 1-й по 7-ю в априорно известный диапазон частот от 125 Гц до 4 кГц, а компонент с 8-й по 13-ю – в диапазон частот от 0 до 125 Гц. Сгруппированные по типам вибраций компоненты удовлетворяют данному критерию.

Таблица 3. Компоненты и их соответствие различным типам вибраций (низкочастотным – НЧ, высокочастотным - ВЧ) объекта РКТ

Номер компоненты (тип вибраций)	2 (ВЧ)	3 (ВЧ)	4 (ВЧ)	5 (ВЧ)	6 (ВЧ)	7 (ВЧ)
$ST \cdot 10^{-4}$	1.9242	0.5786	0.4268	0.2917	0.3142	0.1342
Номер компоненты (тип вибраций)	8 (НЧ)	9 (НЧ)	10 (НЧ)	11 (НЧ)	12 (НЧ)	13 (НЧ)
$ST \cdot 10^{-4}$	0.0739	0.0106	0.0056	0.0004	0.0021	0.0044

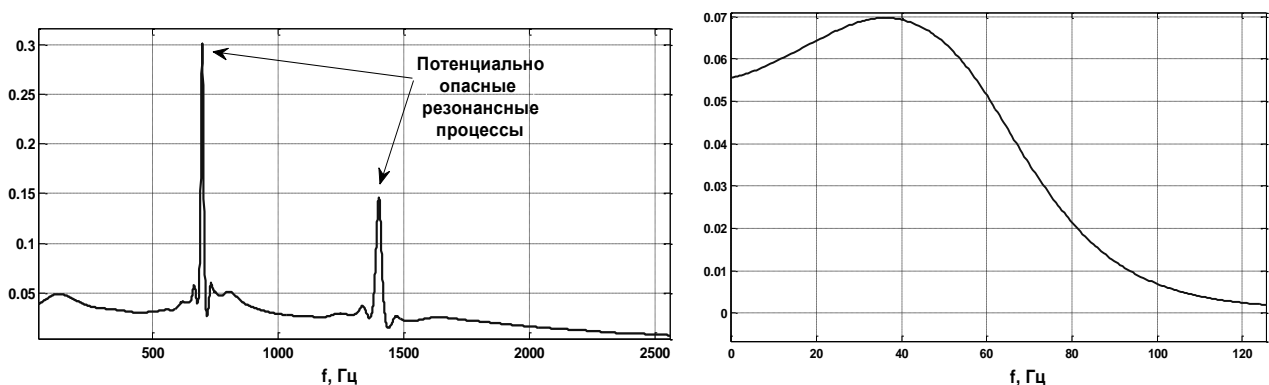


Рисунок 2 – Оценка СПМ суммы компонент, соответствующих ВЧ-вибрациям (слева), и суммы компонент, соответствующих НЧ-вибрациям (справа)

В заключении сформулированы полученные в диссертации научные и практические результаты и указаны возможные направления дальнейшего развития работы.

Основные результаты работы

1) Предложена модель вибрационного сигнала, описывающая чередование во времени вибрационных процессов в соответствии с изменением режимов работы динамического объекта и имеющая многокомпонентную структуру, обусловленную различными типами вибраций на фоне шума.

2) Предложен способ обработки многокомпонентных вибрационных сигналов на основе гармонического вейвлет-преобразования, включающий очистку вибрационного сигнала от шума на основе модифицированной мягкой пороговой обработки вейвлет-коэффициентов и его последующую сегментацию на фрагменты, соответствующие различным типам вибрационных процессов. Получено аналитическое выражение для расчета порогов, применяемых при очистке от шума, и выражение для модифицированной мягкой пороговой обработки вейвлет-коэффициентов. Способ позволяет уменьшить абсолютную ошибку оценивания моментов начала и окончания установившихся вибрационных процессов в среднем в 4 раза по сравнению с аналогами.

3) Разработан вычислительный алгоритм оценивания в частотной области параметров многокомпонентного вибрационного сигнала на основе вейвлет-сглаживания его Фурье-периодограммы с выбором мягкой или жесткой пороговой обработки вейвлет-коэффициентов. Данные параметры характеризуют потенциально опасные резонансные явления и энергетические свойства механических вибраций. Выработаны рекомендации по выбору базисного вейвлета и вида пороговой обработки при сглаживании периодограммы. Разработанный алгоритм позволяет использовать в качестве исходной информации как отсчеты сигнала во временной области, так и отсчеты его дискретного преобразования Фурье или отсчеты его Фурье-периодограммы.

4) Разработан вычислительный алгоритм оценивания в частотной области параметров многокомпонентного вибрационного сигнала на основе разделения многокомпонентного вибрационного сигнала на разномасштабные компоненты посредством декомпозиции на эмпирические моды. Данные параметры характеризуют спектральные свойства различных типов вибраций. Алгоритм позволяет выделять компоненты, соответствующие различным типам вибраций, и дифференцированно учитывать их вклад в анализируемый сигнал.

5) Создан комплекс программ в среде MATLAB для оценивания во временной и в частотной области параметров многокомпонентного вибрационного сигнала, а также для исследования разработанных способа и алгоритмов с использованием компьютерного моделирования многокомпонентных вибрационных сигналов.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1) Клионский, Д. М. Новый подход к автоматизированному выявлению шаблонов в телеметрических сигналах на основе декомпозиции на эмпирические моды / Д. М. Клионский, Н. И. Орешко, В. В. Геппенер // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. История, политология, экономика, информатика. – 2009. – № 15, Вып. 12/1. – С. 118-128.

2) Клионский, Д. М. Декомпозиция на эмпирические моды с параболической интерполяцией огибающих в задачах очистки сигналов от шума / Д. М. Клионский, Н. И. Орешко, В. В. Геппенер // Цифровая обработка сигналов. – 2011. - № 2. - С. 51-60.

3) Oreshko, N.I. New Techniques for the Processing and Analysis of Telemetry and Trajectory Information on the Basis of Achievements in the Realm of Time-Frequency Analysis and Wavelet Theory (Новые методы обработки и анализа телеметрической и траекторной информации на основе современных достижений в области частотно-временного анализа и теории вейвлетов) / N. I. Oreshko, D. M. Klionskiy // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications (Распознавание образов и анализ изображений. Успехи в области математической теории и приложений). – 2011. - Vol. 21, № 4. - P. 731-739.

4) Geppener, V. V. Classification of telemetric signals and their spectral density estimation with the help of wavelets (Классификация телеметрических сигналов и оценивание их спектральной плотности мощности с помощью вейвлетов) / V. V. Geppener, D. M. Klionsky, N. I. Oreshko // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications (Распознавание образов и анализ изображений. Успехи в области математической теории и приложений). – 2012. - Vol. 22, № 4. – P. 576-582.

5) Орешко, Н. И. Применение гармонических вейвлетов в задачах обработки осциллирующих сигналов / Н. И. Орешко, В. В. Геппенер, Д. М. Клионский // Цифровая обработка сигналов. – 2012. - № 2. - С. 6-15.

6) Клионский, Д. М. Алгоритм оценивания параметров состояния динамических объектов в частотной области на основе вейвлетов / Д. М. Клионский // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2013. - № 1. - С. 22-31.

Материалы конференций (всего 8 публикаций) приведены в библиографии диссертации.