

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию

Бранцевича Петра Юльяновича

«Математическое и программное обеспечение

измерительно-вычислительных комплексов и автоматизированных систем для решения задач цифровой обработки вибрационных сигналов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите, со ссылкой на область исследования паспорта соответствующей специальности, утвержденного ВАК.

В диссертационной работе Бранцевича П.Ю. предлагается решение теоретических, исследовательских и практических задач, возникающих при создании математического и программного обеспечения компьютерных измерительно-вычислительных систем и комплексов вибрационного контроля, мониторинга, принятия решений о состоянии контролируемых или наблюдаемых объектов и их внедрении на производственных предприятиях.

Диссертация соответствует отрасли технических наук и специальности 05.13.11 – математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей. Согласно паспорту указанной специальности «Разработка программного обеспечения вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей и его реализация в народном хозяйстве проводится в рамках этой специальности по техническим наукам». Содержание диссертации соответствует паспорту в следующих пунктах:

- разработка методов, алгоритмов и программных средств для сбора, хранения, организации и обработки больших объемов разнородных по структуре и форме представления данных;
- теоретическое обоснование и создание математического и программного обеспечения систем измерений, контроля и управления;
- математическое и программное обеспечение интеллектуальных систем, мультимедиа, принятия решений, функционального и логического программирования, баз данных, знаний и экспертных систем.

2. Актуальность темы диссертации.

В процессе эксплуатации производственных объектов критической инфраструктуры, в энергетике, газотранспортной системе, нефтехимии, промышленности и транспорте актуальной задачей является своевременное обнаружение и предупреждение возникающих дефектов и своевременная защита от аварийных ситуаций. Для механических устройств и агрегатов вибрационная диагностика во многих случаях является единственным практически доступным способом решения. В связи с этим тема диссертации Бранцевича П. Ю., направленная на разра-

ботку измерительно-вычислительных комплексов вибрационного контроля и мониторинга является актуальной. Особенную прикладную важность представляет использование в вибрационном контроле универсальных средств вычислительной техники и типовых модулей аналого-цифровых преобразователей. Рост вычислительной мощности малогабаритных, переносных компьютеров и смартфонов со временем позволяет решать все более сложные задачи цифровой обработки сигналов, что обуславливает перспективность выбранного подхода и концепции построения программно-управляемых средств для различных применений.

3. Степень новизны результатов диссертации и научных положений, выносимых на защиту.

В диссертации получены следующие основные новые научные результаты.

1. Разработана методология построения программно-управляемых многоканальных измерительно-вычислительных комплексов, предназначенных для обработки сигналов в режиме реального времени, позволяющих выполнять оценку состояния и защиты технических объектов. В отличие от применявшихся ранее специализированных систем предлагается использовать универсальные вычислительные средства, что позволяет снизить затраты на разработку и производство измерительно-вычислительных комплексов, а также обеспечить гибкость в функциональных возможностях, адаптации и модификации.

2. Выполнено теоретическое обоснование способов определения амплитудно-фазовых параметров вибрации подшипниковых опор механизмов с вращательным движением, работающих с постоянной и переменной частотой вращения валов и роторов основанного на обработке параллельно принимаемых вибрационного и фазового сигналов с использованием дискретного преобразования Фурье. Получены оценки вычисляемых параметров вибрации, которые показывают, что предложенные способы по точности соответствуют требованиям стандартов и правил технической эксплуатации.

3. Разработан метод удаления в режиме реального масштаба времени низкочастотного дрейфа исходного сигнала, основанный на его полиномиальном приближении. Метод позволяет снизить погрешности вычисления параметров вибросигналов, возникающие в процессе их интегрирования при переходе от единиц виброускорения к единицам виброскорости. По сравнению с фильтрацией верхних частот на его реализацию при обработке вибросигналов требуется меньшего времени, вследствие отсутствия переходного процесса. Математически обоснован способ вычисления частоты и амплитуды оборотных, кратных частоте вращения валов и роторов механизмов, но не кратных частотному разрешению спектрального анализа, гармонических составляющих вибрационного сигнала, с использованием значений соседних, относительно искомой, спектральных составляющих. Оригинальность заключается в том, что в этом случае не требуется обеспечение кратности интервала анализа периода оборотных составляющих вибрации.

4. Предложена декомпозиция вибрационных сигналов в виде суммы периодической (квазипериодической) и шумоподобной компонент. Отличительной осо-

бенностью является то, что временные интервалы для выделения гармоник периодической составляющей выбираются кратными их периодам, что повышает точность вычислений. Раздельная обработка периодической и шумоподобной компонент расширяет способы определения информативно-значимых признаков для оценки технического состояния объектов контроля.

5. Предложен способ формирования гаусовых вейвлетов и вейвлета Морле с задаваемой центральной частотой их амплитудно-частотных характеристик. Применение таких частотно-настроенных вейвлетов для обработки вибрационных сигналов позволяет выявлять в них возмущения и всплески определенной формы, а также оценивать изменение во времени параметров, интересующих пользователя частотных составляющих.

6. Разработан способ сравнительного анализа вибрационных характеристик пусков-выбегов механизмов и агрегатов, фиксируемых при различных временах переходных процессов и функциях изменения скорости вращения вала, позволяющий формулировать выводы об их подобии, с учетом различий по амплитуде и форме. Данный оригинальный и новый способ обработки трендов параметров вибрационных сигналов используется для оценки изменения технического состояния контролируемых объектов, их собственных частот в процессе длительной эксплуатации.

7. Предложен базовый модуль принятия решений, обеспечивающий унифицированный подход для реализации систем автоматического принятия решений. Его отличительной оригинальной особенностью является первичная функциональная обработка параметров и характеристик на основе которых оценивается состояние наблюдаемого объекта и применение обобщающих и решающих функций, что важно для ситуаций, когда отсутствуют большие объемы данных для глубокого обучения нейронных сетей. На основе данного подхода разработаны алгоритмы автоматического принятия решения о вибрационном состоянии контролируемого механизма или агрегата по стандартизованным и индивидуальным критериям и формированию управляющих воздействий для устройств сигнализации и защитного отключения, позволяющие идентифицировать аварийно-опасные ситуации и предупредить их развитие.

8. Разработаны оптимизационные алгоритмы приближения затухающего вибрационного колебания, являющегося откликом объекта на динамическое воздействие, суммой затухающих гармоник, параметры которых являются собственными частотами и коэффициентами затухания колебаний на этих частотах исследуемых конструкций зданий и сооружений.

9. Выполнены экспериментальные исследования по определению влияния ширины частотной полосы полигармонического и случайного сигнала на величину нагружения объекта в ходе испытаний на механические воздействия. Предложена оригинальная методика определения параметров вибрационных воздействий, обеспечивающих максимальное нагружение балочных элементов, при проведении усталостных испытаний материалов.

10. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение измерительно-вычислительных комплексов вибрационного контроля, мониторинга, оценки тех-

нического состояния, автоматики защиты сложных многоопорных механизмов и агрегатов; цифровой обработки длинных реализаций вибрационных сигналов. Разработаны методики метрологической аттестации и поверки, введенных в промышленную эксплуатацию на предприятиях энергетики Беларуси.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Обоснованность и достоверность выводов и основных положений диссертации не вызывает сомнений.

Разработанные новые и оригинальные методы анализа и обработки вибрационных сигналов сопровождаются математическими выкладками, имеют алгоритмическое представление и реализованы в виде прикладных программ для вибрационного контроля, программных средств обработки вибрационных сигналов и временных выборок вибрационных параметров.

Выводы и заключения согласуются с результатами, опубликованными ранее в научно-технической литературе.

Достоверность основных результатов и выводов также подтверждается их апробацией на международных научных конференциях мирового уровня с участием ведущих ученых в области методов обработки вибрационных сигналов и создания соответствующих программно-алгоритмических и технических средств. Полученные результаты представлены в авторских монографиях и научных работах, опубликованных в авторитетных отечественных и зарубежных научных рецензируемых изданиях.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию.

Разработана методология современного научного направления «Измерительно-вычислительные комплексы и компьютерные системы цифровой обработки сигналов». Предложены структуры вычислительных средств виброконтроля на базе типовых элементов компьютерной техники. Функциональность разработанных средств определяется разработанным математическим и прикладным программным обеспечением. Подход снижает затраты на разработку, производство, модификацию и эксплуатацию комплексов, обеспечивается многофункциональность и быстрая настройка.

Разработаны методы, алгоритмы, программные средства обработки вибрационных сигналов при решении в реальном масштабе времени задач вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния, автоматики защиты механизмов и агрегатов с вращательным движением. Получены оценки ожидаемых метрологических параметров и характеристик. Математически обоснован способ вычисления амплитуды и частоты выраженных, кратных частоте вращения ротора, но не кратных частотному разрешению анализа, спектральных составляющих вибрационных сигналов, что позволяет адаптировать быстрое преобразование Фурье для спектрального анализа вибрации при произвольном значении ча-

стоты вращения.

Практическая значимость подтверждается следующими внедрениями:

– более 30 измерительно-вычислительных комплексов серии «Лукомль» внедрены на предприятиях энергетики Республики Беларусь и введены в промышленную эксплуатацию;

– два измерительно-вычислительных комплекса «Тембр» внедрены в ЧС МЧС Республики Беларусь;

– программное обеспечение и измерительно-вычислительные системы внедрены в БелГИМ, на Лукомльской ГРЭС и Минской ТЭЦ-4., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

– программное обеспечение для регистрации и обработки вибрационных сигналов внедрено в Шаньдунский университет, КНР.

Экономическая значимость.

За период с 1994 по 2023 годы по данной тематике в рамках БГУИР выполнено хозяйственных договоров на общую сумму более двух миллионов долларов.

Применение измерительно-вычислительных комплексов серии «Лукомль» на предприятиях энергетики Республики Беларусь позволило предотвратить аварии контролируемых турбоагрегатов.

Социальная значимость.

Применение измерительно-вычислительных комплексов серии «Лукомль» направлено на непрерывное обеспечение электрической энергией всех возможных потребителей.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

По тематике диссертации опубликовано 130 печатных работ, в том числе 3 авторские монографии, 54 статьи в рецензируемых научных изданиях, 54 статьи в сборниках материалов научных конференций. 39 публикаций соответствуют требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий. Получены 3 свидетельства о регистрации компьютерных программ, 2 патента на полезную модель. 12 работ индексированы в наукометрической базе SCOPUS.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Диссертационная работа и автореферат оформлены в соответствии с требованиями инструкции о порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертаций, утвержденной Постановлением ВАК Республики Беларусь от 28.02.20214 № 3 (в редакции от 22.08.2022 № 5). Разделы «Общая характеристика работы» и «Заключение» автореферата дословно воспроизводят соответствующие разделы диссертации без изъятий и дополнений. Содержание автореферата полностью соответствует положениям и выводам, изложенным в диссертации.

Работа написана техническим языком и хорошо иллюстрирована. Научный уровень изложения материала высокий. Автореферат отражает содержание диссертации.

8. Замечания по диссертации (при их наличии), если они не указываются в структурных элементах отзыва о диссертации.

Необходимо отметить следующие замечания:

- целесообразно было бы выполнить более глубокий анализ полученных результатов в контексте существующих альтернативных отечественных и зарубежных решений в области вибродиагностики;

- материал диссертации объемный и несколько избыточный, его можно было бы уменьшить за счет вводных сведений в теорию цифровой обработки сигналов;

- целесообразно было бы расширить теоретический анализ общих методов цифровой обработки сигналов таких как оконное преобразование Фурье, вейвлет-анализ и преобразование Гильберта –Хуанга применительно к обработке вибрационного сигнала, опираясь на его специфические особенности.

Указанные замечания не снижают научную и практическую ценность работы.

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Полученные результаты и уровень научных публикаций свидетельствует о том, что Бранцевич П.Ю. является сформировавшимся специалистом в области технических наук, в частности, в цифровой обработке сигналов и проектировании измерительно-вычислительных комплексов.

Считаю, что научная квалификация Бранцевича П.Ю. соответствует ученой степени доктора технических наук.

10. Заключение.

Диссертационная работа Бранцевича П. Ю. «Математическое и программное обеспечение измерительно-вычислительных комплексов и автоматизированных систем для решения задач цифровой обработки вибрационных сигналов» является самостоятельно выполненной завершенной квалификационной научной работой, которая соответствует требованиям ВАК Республики Беларусь, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук.

Автор диссертации Бранцевич Петр Юльевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей за:

1. Методологию построения программно-управляемых многоканальных вычислительных комплексов, функциональность которых определяется математиче-

ским и программным обеспечением, предназначенных для обработки в реальном масштабе времени вибрационных и других информативных сигналов при решении задач контроля, мониторинга, оценки состояния и защиты технических объектов. Построение комплексов на базе вычислительных и электронных средств универсального назначения, в которых функциональность определяется программным обеспечением, приводит к снижению затрат на их разработку, модификацию, адаптацию под условия эксплуатации.

2. Теоретическое обоснование способа определения амплитудно-фазовых параметров вибрации подшипниковых опор механизмов с вращательным движением, работающих с постоянной и переменной частотой вращения валов и роторов, основанного на обработке параллельно принимаемых вибрационного и фазового сигналов. Оценки погрешностей вычисляемых параметров вибрации методом ДПФ и функциональные зависимости величин погрешностей от начальных условий вычислений. Алгоритм и программный модуль, реализующий данный способ, обеспечивают вычисление амплитуды гармоник вибрационного сигнала с относительной погрешностью, не превышающей 1 %; частоты – с относительной погрешностью не превышающей 0,1 %; фазового угла с абсолютной погрешностью не превышающей 0,2 градуса.

3. Метод удаления в режиме реального масштаба времени низкочастотного дрейфа исходного вибрационного сигнала, основанный на его полиномиальном приближении, позволяющий минимизировать погрешности вычисления параметров вибросигналов, возникающих в процессе их интегрирования при переходе от единиц виброускорения к единицам виброскорости. По сравнению с методом цифровой фильтрации верхних частот требуется меньшая временная задержка на его выполнение, вследствие отсутствия переходного процесса. Программный модуль, реализующий данный метод, входит в состав программного обеспечения комплекса «Лукомль».

4. Способ вычисления частоты и амплитуды оборотных, кратных частоте вращения валов и роторов механизмов, но не кратных частотному разрешению спектрального анализа, гармонических составляющих вибрационного сигнала, с использованием значений соседних, относительно искомой, спектральных составляющих, что позволяет адаптировать алгоритм быстрого преобразования Фурье для определения параметров вибрации при произвольном значении частоты вращения. Алгоритм и программный модуль, реализующие данный способ, обеспечивают вычисление амплитуды и частоты искомого гармонического вибрационного сигнала с относительной погрешностью, не превышающей 0,2 %.

5. Представление вибрационных сигналов как декомпозиции в виде суммы периодической (квазипериодической) и шумоподобной компонент. Временные интервалы для выделения гармоник периодической составляющей выбираются кратными их периодам, что повышает точность вычислений. Периодическая компонента отражает вибрационные процессы, обусловленные вращательным движением, в том числе с изменяющейся частотой, валов и роторов агрегатов. Обработка шумоподобной составляющей позволяет локализовать редкие всплески и воз-

мущения в вибрационном сигнале.

6. Метод формирования гауссовых вейвлетов и вейвлета Морле с задаваемой центральной частотой их амплитудно-частотных характеристик. Применение вейвлетов с настройкой на определенную частоту в задачах обработки и анализа вибрационных сигналов позволяет выявлять моменты появления возмущений определенного вида и оценивать изменение во времени параметров информативно-значимых частотных составляющих. Разработан программный модуль для исследования вибрационных сигналов с использованием частотно-настраиваемых вейвлетов.

7. Новый способ сравнительного анализа вибрационных характеристик пусков-выбегов механизмов и агрегатов, получаемых при различных временах переходных процессов и функциях изменения скорости вращения вала, позволяющий формулировать выводы об их подобии, с учетом различий по амплитуде и форме. Разработано специальное программное средство, реализующее данный способ.

8. Алгоритмы автоматического принятия решения о вибрационном состоянии контролируемого объекта по стандартизованным и индивидуальным критериям и формирования управляющих воздействий для устройств сигнализации и защитного отключения, основанные на базовом модуле принятия решений, обеспечивающем унифицированный подход для реализации систем автоматического принятия решений. Разработаны программные модули оценки состояния и формирования управляющих воздействий для турбоагрегатов мощностью 60, 100, 300 МВт, турбодетандера.

9. Алгоритмы оптимизационного приближения затухающего вибрационного колебания, являющегося откликом объекта на динамическое воздействие, суммой затухающих гармоник, параметры которых являются собственными частотами и коэффициентами затухания колебаний на этих частотах исследуемых конструкций зданий и сооружений. Получаемые данным способом значения собственных частот более точны по сравнению со спектральным анализом. Разработаны программные средства для определения параметров гармоник приближения в автоматическом и автоматизированном режимах.

10. Методика определения параметров вибрационных воздействий, обеспечивающих максимальное нагружение балочных элементов, при проведении усталостных испытаний материалов, что позволяет сократить время испытаний и затраты на их проведение. Результаты экспериментальных исследований влияния ширины частотной полосы случайных вибрационных воздействий на нагружение балочных элементов, подтверждающие действенность данной методики.

11. Алгоритмы и программное обеспечение средств вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния, автоматики защиты сложных многоопорных механизмов и агрегатов; цифровой обработки и исследования длинных реализаций вибрационных сигналов. Методики метрологической аттестации и поверки.

Полученные результаты являются решением теоретических, экспериментальных и практических задач современного научного направления «Измеритель-

но-вычислительные комплексы и компьютерные системы цифровой обработки сигналов».

Разработано математическое и программное обеспечение для компьютерных систем и комплексов вибрационного контроля, мониторинга, автоматике защиты, испытаний, принятия решений о состоянии контролируемых или наблюдаемых объектов. Произведенные комплексы данного типа введены в промышленную эксплуатацию как системы виброконтроля турбоагрегатов, что позволило решить важную научно-техническую и производственную проблемы по созданию систем вибрационного контроля и защиты сложных механизмов и агрегатов предприятий энергетики и других предприятий критической инфраструктуры.

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой электронных
вычислительных средств БГУИР,
д.т.н., профессор

И.С. Азаров

