

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу 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.

Содержание диссертации соответствует технической отрасли науки и п.2., п.6. и п.7. области исследований паспорта специальности 05.13.11 – математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей:

п.2 – разработка методов, алгоритмов и программных средств для сбора, хранения, организации и обработки больших объемов разнородных по структуре и форме представления данных;

п.6 – *теоретическое обоснование и создание компиляторов и интерпретаторов с языков программирования, языков описания параллельных систем и аппаратуры, проблемно ориентированных и естественных языков; моделей, методов и средств высокоуровневого синтеза вычислительных машин, систем и сетей; математического и программного обеспечения систем измерений, контроля и управления;*

п.7 – математическое и программное обеспечение интеллектуальных систем, мультимедиа, принятия решений, функционального и логического программирования, баз данных, знаний и экспертных систем.

### **2. Актуальность темы диссертации.**

Анализ современных тенденций развития машиностроения показывает, что наиболее прогрессивным направлением обеспечения и повышения надежности, качества функционирования и, прежде всего, ресурсов работоспособности машин является организация их эксплуатации, обслуживания и ремонтов по фактическому состоянию. Однако практическая реализация этих рекомендаций возможна только при наличии эффективных методов и средств оценки и мониторинга изменений, основных критериальных параметров, лимитирующих работоспособность машин и механизмов. Одним из таких методов является безразборная оценка технического состояния машин по их виброакустическим характеристикам – вибродиагностика.

Современное развитие вычислительной техники позволяет создавать диагностические комплексы, обеспечивающие эффективный контроль текущего технического состояния сложных систем и достаточно обоснованное прогнозирование «эксплуатационного ресурса» их наиболее ответственных элементов. Решению указанных проблем посвящены исследования крупнейших научных центров и ведущих зарубежных фирм, к которым относятся: Институт ма-

пиноведения им. А.А. Благоднарова Российской Академии наук, Московский государственньй технический университет им. Н.Э. Баумана, Центр промышленных роботов Франции, Rockwell Standart и National Instruments (США), SKF (Швеция), Brul & Kier (Дания) и др. Однако широкое практическое применение результатов подобных исследований требует дополнительного развития ряда научных и практических приложений, таких, в частности, как разработка программньх средств для цифровой обработки вибрационных сигналов и принятия решений, определяющих функциональность измерительно-вычислительньх комплексов (ИВК), построенньх на базе универсальных средств вычислительной техники и типовьх модулей АЦП. Поэтому диссертационная работа Бранцевича П. Ю., посвященная разработке ИВК вибрационного контроля, мониторинга, защиты сложных технических объектов, созданию новых методов анализа и обработки вибрационных сигналов, является актуальной и своевременной.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетньм направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, определенньх Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 7 мая 2020 г. «О приоритетньх направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы», а именно пунктам: п.1. «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства: технологии больших данных»; п.4. «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: производственные автоматизированные комплексы; радиоэлектронные системы и технологии, приборостроение».

### ***3. Степень новизнь результатов диссертации и научных положений, выносимьх на защиту.***

Исследования, выполненнье в диссертационной работе Бранцевича П.Ю., направлены на развитие современного научного направления – измерительно-вычислительнье комплексы цифровой обработки сигналов в части создания математического и программногo обеспечения анализа и обработки вибрационных сигналов для решения задач вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния сложных механизмов и агрегатов роторного типа.

В работе соискателем получены следующие основные новые научные результаты.

1. Разработана новая методология построения программно-управляемьх многоканальньх ИВК, предназначенньх для обработки в режиме реального времени вибрационных и других информативньх сигналов при решении задач контроля, мониторинга, оценки состояния и защиты технических объектов. В отличие от применяемьх ранее специализированньх систем и устройств предложено построение ИВК на базе универсальных вычислительньх средств и модулей АЦП, подключаемьх на универсальные компьютерные шины, в которых функциональность определяется программньми средствами, что позволяет снизить затраты на разработку и производство ИВК, а также обеспечить

быстрое расширение функциональных возможностей, модификацию функций и адаптацию под конкретные типы объектов контроля.

2. *Впервые 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, основанное на обработке параллельно принимаемых вибрационного и фазового сигналов с использованием дискретного преобразования Фурье. Получены точностные оценки вычисляемых параметров вибрации, которые показывают, что предложенные способы по точности соответствуют требованиям действующих стандартов и правил технической эксплуатации.*

3. Проанализирована структура вибрационных сигналов, отражающих колебания подшипниковых опор механизмов и агрегатов с вращательным движением, и предложены новые методы их обработки:

– *разработан новый метод удаления в режиме реального масштаба времени низкочастотного дрейфа исходного сигнала, основанный на его полиномиальном приближении. Этот 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 меньше времени, вследствие отсутствия переходного процесса;*

– *математически обоснован новый 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. Новизна заключается в отсутствии необходимости обеспечения кратности интервала анализа периоду оборотных составляющих вибрации.*

4. Предложен *новый метод декомпозиции вибрационных сигналов в виде суммы периодической (квазипериодической) и шумоподобной компонент. Отличительной особенностью является то, что временные интервалы для выделения гармоник периодической составляющей выбираются кратными их периодам, что повышает точность вычислений. Последующая раздельная обработка периодической и шумоподобной компонент расширяет способы определения информативно-значимых признаков для оценки технического состояния объектов контроля.*

5. Предложен *новый 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 *новый способ сравнительного анализа вибрационных ха-*

*рактических 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 способ обработки трендов параметров вибрационных сигналов используется для оценки изменения технического состояния контролируемых объектов, их собственных частот в процессе длительной эксплуатации.*

7. Предложен *оригинальный базовый модуль принятия решений*, обеспечивающий унифицированный подход для реализации систем автоматического принятия решений. Его отличительной 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 новые алгоритмы автоматического принятия решения о вибрационном состоянии контролируемого механизма или агрегата* по стандартизованным и индивидуальным критериям и формирования управляющих воздействий для устройств сигнализации и защитного отключения, позволяющие идентифицировать аварийно-опасные ситуации и предупреждать их развитие.

8. Разработаны *новый способ и 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. Данный способ позволяет повысить точность определения значений собственных частот конструкций и декрементов затухания колебаний, по которым можно делать выводы об изменении несущей способности конструкций.

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 *новая оригинальная методика определения параметров вибрационных воздействий, обеспечивающих максимальное нагружение балочных элементов, при проведении усталостных испытаний материалов*. Испытания на максимальном нагружении позволяют до 20% сократить время испытаний и затраты на их проведение.

10. Разработаны *новые алгоритмы и программное обеспечение ИВК вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния, автоматической защиты сложных многоопорных механизмов и агрегатов; цифровой обработки длинных реализаций вибрационных сигналов*. Разработаны *новые методики метрологической аттестации и поверки ИВК*, введенные в промышленную эксплуатацию на предприятиях энергетики Беларуси. Данные алгоритмы и программное обеспечение оригинальны и являются объектами авторского права.

Таким образом, все перечисленные выше научные положения, выносимые автором диссертационного исследования на защиту, обладают научной новизной.

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

Обоснованность и достоверность научных результатов подтверждается корректностью формулировки цели, постановки задач исследования. Заключение, выводы и рекомендации, приведенные в диссертации, основываются на достаточном объеме теоретических и экспериментальных исследований. Автор использовал современные методы математического моделирования и обработки информации, теорию многофакторного анализа, а также методы распознавания и классификации динамических состояний элементов в вибрационных сигналах для решения поставленной задачи. Полученные результаты не противоречат существующим научным положениям и подтверждены экспериментальными исследованиями и практическим внедрением. Основные положения и выводы диссертации прошли апробацию на научно-технических конференциях, опубликованы в научно-технических журналах и монографиях

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

*Научная значимость* результатов рассматриваемой диссертации заключается в разработке методологии построения программно-управляемых ИВК на базе вычислительных и электронных компонент универсального назначения, функциональность которых определяется математическим и программным обеспечением, предназначенных для решения задач вибрационного контроля, мониторинга, оценки состояния и защиты технических объектов. Данный подход ориентирован на создание разнообразных прикладных систем с использованием малогабаритных компьютеров, смартфонов, встроенных процессоров, решающих междисциплинарные задачи и реализующих системы автоматического принятия решений.

Разработанные новые методы анализа вибрационных сигналов и способы определения их параметров и характеристик, обработки временных трендов параметров вибрации обеспечивают и повышают точность их вычислений и используются при решении различных прикладных задач, связанных с оценкой изменений состояния контролируемых и наблюдаемых объектов.

Полученные научные и практические результаты создают предпосылки для создания систем распределенного сбора и централизованной обработки вибрационных сигналов, автоматизации принятия решений по оценке технического состояния контролируемых объектов.

*Практическая значимость* результатов исследований заключается в следующем:

– разработано математическое и программное обеспечение стационарных измерительно-вычислительных комплексов серии «Лукомль» различных модификаций для решения задач вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния, сигнализации и автоматики защиты энергетических

турбоагрегатов. Более 30 ИВК данной серии внедрены на предприятиях энергетики Беларуси и введены в промышленную эксплуатацию. Реализованы алгоритмы защиты турбоагрегатов по стандартизованным и индивидуальным вибрационным критериям. Данные ИВК обеспечивают выполнение функций вибрационного контроля в соответствии с требованиями ГОСТ ИСО 10816-1-97 «Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях» и ГОСТ ИСО 2954-97 «Вибрация машин с возвратно-поступательным движением. Требования к средствам измерений»;

– разработано математическое и программное обеспечение мобильного измерительно-вычислительного комплекса «Тембр», обеспечивающего регистрацию длинных реализаций вибрационного сигнала и определение его параметров. Разработано математическое и программное обеспечение для обработки вибрационных сигналов, являющихся откликом на динамическое воздействие на объект исследования, определения собственных частот и декрементов затухания для конструкций, зданий и сооружений. Два ИВК «Тембр» произведены по заказу НИИ ПБ и ЧС МЧС Республики Беларусь и переданы ему для эксплуатации;

– разработано математическое и программное обеспечение для автоматизированных систем поверки виброизмерительных преобразователей и виброизмерительных каналов на базе блока формирования воздействий «АСУВ-010» и ПЭВМ. Данное программное обеспечение и системы внедрены в БелГИМ, на Лукомльской ГРЭС и Минской ТЭЦ-4. Разработано математическое и программное обеспечение для автоматизированной системы управления виброиспытаниями, обеспечивающее воспроизведение гармонических, полигармонических и случайных воздействий с заданными спектральными характеристиками, а также режим максимального нагружения при усталостных испытаниях материалов. Данное программное обеспечение внедрено в МГТУ им. Н.Э Баумана (г. Москва, Россия);

– разработано специальное программное обеспечение для регистрации и обработки вибрационных сигналов. В соответствии с контрактом данное программное обеспечение передано в Шаньдунский университет (КНР).

*Экономическая значимость результатов исследований:* в период с 1994 по 2023 годы в рамках тематики диссертации соискателем совместно с другими сотрудниками БГУИР выполнено хозяйственных договоров на общую сумму более двух миллионов долларов. Применение ИВК серии «Лукомль» на предприятиях энергетики Республики Беларусь позволило предотвратить аварии контролируемых турбоагрегатов и тем самым снизить затраты на проведение ремонтно-восстановительных работ.

*Социальная значимость результатов исследований.*

Применение ИВК серии «Лукомль», как системы автоматического принятия решений о техническом состоянии по параметрам вибрации контролируемых турбоагрегатов, направлено на своевременное информирование управляющего персонала и предотвращение аварийных ситуаций, создавая условия для непрерывного обеспечения потребителей электрической энергией.

Разработанные методы анализа цифровых сигналов и программные средства использованы в учебном процессе по предмету «Цифровая обработка сигналов» для специальности «Программное обеспечение информационных технологий» БГУИР, что обеспечивает совершенствование учебного процесса и показывает примеры практического применения изучаемой теории.

#### **6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.**

Автореферат и 130 печатных работ, в том числе 3 авторские монографии, 54 статьи в рецензируемых научных изданиях, 54 статьи в сборниках материалов научных конференций, полностью раскрывают сущность выполненных соискателем исследований и отражают содержание диссертации. Наиболее существенными являются 39 статей, опубликованных в научно-технических журналах и сборниках, входящих в перечень ВАК РБ. Получены 3 свидетельства о регистрации компьютерных программ, 2 патента на полезную модель. 12 работ индексированы в наукометрической базе SCOPUS. 46 работ опубликованы без соавторов, в том числе 3 монографии:

1. Бранцевич, П.Ю. Оценка технического состояния механизмов с вращательным движением на основе анализа вибрационных характеристик пусков и выбегов / П.Ю. Бранцевич. – Минск: Четыре четверти, 2021. – 236 с.

2. Бранцевич, П.Ю. Цифровая обработка вибрационных сигналов / П.Ю. Бранцевич. – Минск: Бестпринт, 2022. – 297 с.

3. Бранцевич, П.Ю. Компьютерные системы и комплексы обработки вибрационных сигналов / П.Ю. Бранцевич. – Минск: Бестпринт, 2023. – 282 с.

#### **7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.**

Диссертация Бранцевича П.Ю. содержит термины и определения, перечень сокращений и обозначений, введение, общую характеристику работы, десять глав, заключение, список использованных источников и приложения. Полный объем диссертации составляет 408 страниц, в том числе 199 страниц текста, 142 рисунка на 84 страницах, 8 таблиц на 4 страницах, 4 приложения на 72 страницах. Список использованных источников содержит 390 наименований на 38 страницах, включая 130 публикаций соискателя ученой степени. Имеются акты внедрения, приведенные в качестве приложения к диссертационной работе. Соискателем сформулированы выводы после каждой из десяти глав, в заключении перечислены результаты всей работы. Работа написана понятным языком, хорошо оформлена и иллюстрирована. Научный уровень изложения материала показывает, что автор хорошо ориентируется в рассматриваемом научном материале.

В целом автореферат и диссертация оформлены в соответствии с требованиями ВАК РБ и дают достаточно полное представление о проделанной соискателем работе. Вместе с тем, необходимо отметить *некоторые упущения и неточности, допущенные автором при оформлении диссертации и автореферата:*

– на рисунках 1, 2 автореферата числовые значения по осям абсцисс и ординат невозможно прочесть ввиду очень мелкого шрифта;

– не понятно, с какой целью соискатель привел «траектории движения подшипниковых опор», изображенные на рисунке 3 автореферата. Анализ орбиты прецессии вала является обычной практикой при оценке технического состояния подшипниковых опор крупногабаритных машин (см. п. 4.2.6. ГОСТ Р ИСО 13373-2–2009 «Вибрационный контроль состояния машин» Часть 2.);

– формулировка термина «дефект» (стр.7 диссертации), который соискатель трактует как «...изменение состояния объекта в процессе его изготовления, эксплуатации и ремонта...», не соответствует общепринятому. Согласно действующему ГОСТ 15467-79, «дефект – это любое отклонение изготовленной продукции от требований, установленных нормативно-технической документацией» и он может возникнуть только при изготовлении объекта. Все то, что может произойти с объектом в процессе эксплуатации, хранения, транспортировки, называется *неисправность*. Термин «дефект» связан с термином «неисправность», но не является его синонимом;

– не понятен используемый соискателем термин «виброремонтные работы» (стр. 40 диссертации, третий абзац сверху);

– не оправданно большое место в диссертации уделено разъяснению общеизвестных терминов и понятий, таких, как «вибрация»; «вибрационный контроль» (стр. 40 диссертации); «спектральный анализ» (стр.102 диссертации); «кепстр» (стр.125 диссертации); «огигающая сигнала» (стр.120 диссертации) и т. д.;

– в главе 1 диссертации соискателем не в полной мере проведен анализ работ, выполненных ранее отечественными и иностранными исследователями по рассматриваемой тематике, не оценен уровень и результаты исследований по теме диссертации в республике и за рубежом. В частности, ничего не сказано о разработках фирмы National Instruments (США) и ее программном продукте LabVIEW, который уже более 30 лет широко применяется в мире при создании виртуальных приборов и анализе различных, в том числе и виброакустических, сигналов;

– в работе целесообразно было бы отразить, в каких случаях при диагностике технического состояния узлов машин и механизмов наиболее эффективно применение того или иного метода анализа вибрационных сигналов: спектрального анализа, вейвлет-анализа, преобразования Гильберта-Хуанга и других рассмотренных в работе методов, и как они разграничиваются;

– в диссертации не отражены вопросы прогнозирования остаточного ресурса подшипниковых узлов турбоагрегатов по результатам вибромониторинга; не рассмотрены вопросы применения разработанных методов, алгоритмов, программных средств в машиностроении и транспорте.

#### **8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.**

Анализ представленных в диссертационной работе результатов и положений, выносимых на защиту, выводов и рекомендаций, их новизна и актуальность, логичность и последовательность изложения, уровень научных публикаций указывает на то, что Бранцевич П.Ю., несомненно, является специалистом



высокой квалификации, способным самостоятельно формулировать и решать фундаментальные и прикладные научные задачи. Диссертант в полной мере владеет современной теорией цифровой обработки сигналов, методами проектирования программных средств, практическими навыками разработки и внедрения программного обеспечения, измерительно-вычислительных комплексов и автоматизированных систем. Очевидно, что научная квалификация Бранцевича П.Ю. соответствует ученой степени доктора технических наук.

### **9. Заключение.**

Диссертационная работа Бранцевича П.Ю. «Математическое и программное обеспечение измерительно-вычислительных комплексов и автоматизированных систем для решения задач цифровой обработки вибрационных сигналов» представляет законченную научно-квалификационную работу. По актуальности, новизне, научной и практической ценности результатов, по уровню обоснованности выводов работа отвечает требованиям ВАК РБ (требованиям Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей», а ее автор Бранцевич Петр Юльянович достоин присуждения ученой степени доктора технических наук **за новые научно обоснованные теоретические и экспериментальные результаты** по созданию и внедрению измерительно-вычислительных комплексов и компьютерных систем цифровой обработки сигналов, **включающие:**

- разработку методологии построения программно-управляемых многоканальных ИВК, функциональность которых определяется математическим 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;

- теоретическое обоснование способа определения амплитудно-фазовых параметров вибрации подшипниковых опор механизмов с вращательным движением, работающих с постоянной и переменной частотой вращения валов и роторов, обеспечивающего 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;

- разработку метода удаления в режиме реального масштаба времени низкочастотного дрейфа исходного вибрационного сигнала, основанного на его полиномиальном приближении, позволяющего минимизировать погрешности вычисления параметров вибросигналов, возникающих в процессе их интегрирования при переходе от единиц виброускорения к единицам виброскорости;

- разработку способа вычисления частоты и амплитуды оборотных, кратных частоте вращения валов и роторов механизмов, но не кратных частот-

ному разрешению спектрального анализа, гармонических составляющих вибрационного сигнала, с использованием значений соседних (относительно искомой) спектральных составляющих, обеспечивающего вычисление амплитуды и частоты искомого гармонического вибрационного сигнала с относительной погрешностью, не превышающей 0,2 %;

– разработку нового способа сравнительного анализа вибрационных характеристик пусков-выбегов механизмов и агрегатов, получаемых при различных временах переходных процессов и функциях изменения скорости вращения вала, позволяющего формулировать выводы об их подобии, с учетом различий по амплитуде и форме;

– разработку алгоритмов автоматического принятия решения о вибрационном состоянии контролируемого объекта по стандартизованным и индивидуальным критериям и формирования управляющих воздействий для устройств сигнализации и защитного отключения, основанных на базовом модуле принятия решений, обеспечивающем унифицированный подход для реализации систем автоматического принятия решений;

– разработку алгоритмов и программного обеспечения ИВК вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния, автоматике защиты сложных многоопорных механизмов и агрегатов; цифровой обработки и исследования длинных реализаций вибрационных сигналов и временных трендов параметров вибрации,

**что в совокупности позволило** создать измерительно-вычислительные комплексы и компьютерные системы цифровой обработки сигналов, внедрение которых на предприятиях энергетики Беларуси явилось решением важной научно-технической и производственной проблемы по созданию противоаварийных систем вибрационного контроля и защиты сложных механизмов и агрегатов критической инфраструктуры.

Официальный оппонент,  
начальник научно-технического центра  
«Карьерная техника» Объединенного  
института машиностроения НАН Беларуси,  
д.т.н., доцент

Н.Н. Ишин

Республика Беларусь, 220072, г. Минск,  
ул. Академическая, д. 12,  
Тел.: +375 (17) 378 29 12  
bats@ncpmm.bas-net.by; [nik\\_ishin@mail.ru](mailto:nik_ishin@mail.ru)  
27.05.2024 г.

