

## 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.**

Диссертационная работа посвящена развитию измерительно-вычислительных комплексов и компьютерных систем цифровой обработки сигналов для вибрационного контроля и мониторинга, включая методы анализа и обработки вибрационных сигналов, алгоритмы и программные средства, реализующие разработанные методы и алгоритмы, которые используются на предприятиях энергетики для вибрационного контроля и защиты турбоагрегатов. Таким образом, работа относится к отрасли технических наук.

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей, отрасли технических наук, утвержденного приказом ВАК Республики Беларусь от 23 декабря 2022 г. № 462 по следующим пунктам:

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 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.**

Современный уровень контрольно-измерительных и управляющих систем промышленных предприятий требует повсеместного использования средств компьютерной техники, реализующей цифровые методы обработки сигналов. Следует отметить, что внедрение и эффективное использование таких систем основывается на их технических возможностях, однако, также учитывается их стоимость с учетом последующего обслуживания. Важным также является возможность развития их функциональных характеристик, так как сложность решаемых задач на производстве непрерывно увеличивается.

Для механизмов с вращательным движением, эксплуатируемых на предприятиях, перспективны контрольно-измерительные и управляющие системы, использующие параметры вибрационного состояния узлов и элементов. Это связано с тем, что анализ количественных изменений параметров вибрации во многих случаях может позволить не только характеризовать состояние контролируемого объекта, но и выявить причины возникновения неисправности.

В связи с этим диссертационная работа Бранцевича П. Ю., направленная на создание специализированного программного обеспечения для решения задач вибрационного контроля, мониторинга, автоматизации защиты на базе универсальных средств вычислительной техники и операционной системы общего назначения, безусловно является актуальной.

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

Основные результаты и научные положения, представленные в работе, являются новыми и полученными автором впервые. Новизна определяется следующим:

1. Разработана методология построения программно-управляемых многоканальных измерительно-вычислительных комплексов, предназначенных для обработки в режиме реального времени информативных сигналов при решении задач контроля, мониторинга, оценки состояния и защиты технических объектов. Методология обеспечивает возможность расширения и модификации функций измерительно-вычислительных комплексов с учетом типов контролируемого оборудования.

2. Теоретически обоснован способ определения амплитудно-фазовых параметров вибрации подшипниковых опор механизмов с вращательным движением, работающих с постоянной и переменной частотой вращения валов и роторов, базирующийся на параллельной обработке вибрационного и фазового сигналов с использованием дискретного преобразования Фурье. На основе выполненного математического анализа погрешностей вычисления параметров вибрации показано, что предложенный способ по точности соответствует предъявляемым к средствам измерения вибрации машин требованиям и правилам технической эксплуатации.

3. Разработан метод удаления в режиме реального времени низкочастотного дрейфа исходного сигнала, основанный на его полиномиальном приближении, позволяющий уменьшить погрешности вычисления параметров вибросигналов, возникающие в процессе их интегрирования при переходе от единиц виброускорения к единицам виброскорости, и повысить скорость обработки по сравнению с высокочастотной фильтрацией.

4. Разработан и математически обоснован метод вычисления частоты и амплитуды оборотных гармонических составляющих вибрационного сигнала, кратных частоте вращения валов и роторов механизмов, но не кратных частотному разрешению спектрального анализа, с использованием значений соседних,

относительно искомой, спектральных составляющих, что позволяет адаптировать алгоритм быстрого преобразования Фурье для определения параметров вибрации при произвольном значении частоты вращения.

5. Предложена декомпозиция вибрационных сигналов в виде суммы периодической (квазипериодической) и шумоподобной компонент. Временные интервалы для выделения гармоник периодической составляющей выбираются кратными их периодам, что повышает точность вычислений. Для механизмов с вращательным движением раздельная обработка периодической и шумоподобной компонент вибросигналов расширяет класс применяемых методов определения информативно-значимых признаков для оценки технического состояния объектов контроля.

6. Предложен метод формирования гауссовых вейвлетов и вейвлета Морле с задаваемой центральной частотой их амплитудно-частотных характеристик, который позволяет формировать вейвлеты определённого вида для выявления в исследуемых сигналах изменений определенной формы во временной области, а в частотной области оценивать трансформацию параметров гармонических составляющих.

7. Разработан способ сравнительного анализа вибрационных характеристик пусков-выбегов механизмов и агрегатов, фиксируемых при различных временах переходных процессов и функциях изменения скорости вращения вала, который позволяет оценить подобие характеристик пусков-выбегов с учетом различий по амплитуде и форме.

8. Предложена модель базового элемента для системы автоматического принятия решений. Разработаны 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.

9. 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, обеспечивающие повышение точности вычисления значений собственных частот по сравнению со спектральным анализом.

10. Выполнены экспериментальные исследования по определению влияния ширины частотной полосы полигармонического и случайного сигнала на величину нагружения объекта в ходе испытаний на механические воздействия. Предложенная оригинальная методика задания параметров вибрационных воздействий позволяет воспроизвести максимальное нагружение балочных элементов при проведении усталостных испытаний материалов, что сокращает время испытаний и снижает затраты на их проведение.

11. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение измерительно-вычислительных комплексов вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния, автоматизации защиты сложных многоопорных механизмов

и агрегатов; цифровой обработки длинных реализаций вибрационных сигналов. Разработаны методики метрологической аттестации и поверки измерительно-вычислительных комплексов, введенных в промышленную эксплуатацию на предприятиях энергетики Беларуси.

Выполненные соискателем исследования, апробация результатов в реальных условиях эксплуатации и широкое внедрение авторского программного обеспечения подтверждают высокую научную новизну диссертации и практическую ее значимость.

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

Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций подтверждается теоретическим анализом и методическим обеспечением проведения экспериментов, научное обоснование предложенных признаков основывается на общепризнанных теоретических положениях, применяемых в цифровой обработке сигналов. Полученные теоретические результаты не противоречат существующим научным положениям.

Правильность функционирования измерительно-вычислительных комплексов подтверждается их метрологической аттестацией, выполняемой органами стандартизации, а также испытаниями, проводимыми на предприятиях перед вводом комплексов в промышленную эксплуатацию.

Результаты работы были доложены на специализированных международных научных конференциях мирового уровня в области методов обработки вибрационных сигналов и создания программных средств.

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

*Научная значимость* рассматриваемой диссертации заключается в разработке методологии построения специализированных измерительно-вычислительных комплексов на базе компьютерных процессоров и электронных компонент универсального назначения, функциональность которых определяется математическим и программным обеспечением, предназначенных для решения задач вибрационного контроля, мониторинга, автоматизации защиты сложных механизмов и агрегатов, а также в разработке новых методов анализа вибрационных сигналов и способов определения их параметров и характеристик. Полученные теоретические результаты и выполненные технические разработки направлены на создание разнообразных прикладных систем и решении междисциплинарных задач на базе малогабаритных компьютеров, мобильных устройств, встроенных процессоров.

*Практическая значимость.*

Наиболее важным практическим результатом является широкое внедрение измерительно-вычислительных комплексов серии «Лукомль», функциональность которых определяется разработанным математическим и программным обеспечением, на предприятиях энергетики Беларуси в качестве штатных

стационарных систем вибрационного контроля и мониторинга подшипниковых опор турбоагрегатов, управления сигнализацией и автоматикой защитного отключения энергетических турбоагрегатов по стандартизованным и индивидуальным критериям. За время промышленной эксплуатации данных комплексов накоплен большой объем данных о возникавших аварийно-опасных ситуациях на контролируемых объектах, в том числе вибрационных характеристик пусков-выбегов, что используется эксплуатационным персоналом электростанций при принятии управленческих решений.

Для мобильного измерительно-вычислительных комплекса «Тембр» разработано математическое и программное обеспечение, управляющего сбором и архивированием длительных реализаций вибрационных сигналов, проведением их спектрального анализа. Разработано математическое обеспечение и его программная реализация, осуществляющее определение собственных частот и декрементов затухания конструкций зданий и сооружений путем обработки затухающих вибрационных сигналов, регистрируемых при проведении испытаний конструкций методом динамического воздействия. Измерительно-вычислительные комплексы «Тембр» внедрены в Научно-исследовательском институте пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, используются также при наблюдениях за изменением вибрационного состояния механизмов и агрегатов при изменениях нагрузок и режимов работы.

Разработано математическое обеспечение и его программная реализация для автоматизированной системы управления виброиспытаниям «АСУВ-010» на базе ПЭВМ intel архитектуры для осуществления проверок виброизмерительных преобразователей и виброизмерительных каналов. Автоматизированные системы проверок внедрены в БелГИМ, на Лукомльской ГРЭС и Минской ТЭЦ-4. Программное обеспечение максимального нагружения внедрено в МГТУ им. Н.Э Баумана, Москва, Россия.

По контракту с Шаньдунским университетом КНР автором разработано программное обеспечение для регистрации и обработки длительных вибрационных сигналов.

#### *Экономическая значимость.*

По данной тематике в НИЧ БГУИР на коммерческой основе выполнено более 80 хозяйственных договоров. Внедрение измерительно-вычислительных комплексов серии «Лукомль» на предприятиях энергетики Республики Беларусь решает задачи импортозамещения в области систем виброконтроля и способствует безаварийной работе контролируемых турбоагрегатов.

#### *Социальная значимость.*

Внедрение измерительно-вычислительных комплексов серии «Лукомль» на предприятиях энергетики, как элемента системы информирования управляющего персонала о техническом состоянии турбоагрегатов и предотвращения аварийных ситуаций, ориентировано на непрерывное обеспечения потребителей электрической энергией.

Методы анализа цифровых сигналов и программные средства, разработанные при создании измерительно-вычислительных комплексов,

использованы в учебном процессе по предмету «Цифровая обработка сигналов» для специальности «Программное обеспечение информационных технологий» БГУИР, что обеспечивает совершенствование учебного процесса в теоретическом направлении и демонстрирует примеры практического применения изучаемой теории.

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

По результатам работы опубликовано 3 авторские монографии, 54 статьи в рецензируемых научных изданиях, 54 статьи в сборниках материалов научных конференций, из них 12 работ индексируются в наукометрической базе SCOPUS. Требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь соответствуют 39 работ. Получены 2 патента на полезную модель, 3 компьютерных программы зарегистрированы в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь.

Наиболее значимыми являются 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.**

Диссертационная работа и автореферат оформлены в соответствии с Постановлением «О порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертации» Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 22 августа 2022 года № 5. Работа написана понятным, технически грамотным языком, хорошо оформлена и иллюстрирована.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, включая разделы «Общая характеристика работы» и «Заключение», которые полностью соответствуют одноименным разделам в диссертации.

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

К замечаниям по диссертации следует отнести следующие:

1 В главе 1 п.1.3. «Направления исследований» является избыточным, так как в нем повторно обосновывается актуальность и приведен перечень задач для исследований.

2 В диссертации сказано, что используется алгоритм быстрого преобразования Фурье. Однако не указан тип алгоритма, вычислительная и пространственная сложность, не обоснован его выбор.

3 При спектральном анализе сигналов оконным преобразованием Фурье,

как правило, используются специальные функции для подавления краевых эффектов разрыва входного сигнала по краям. Однако из текста работы не понятно, необходимо ли применение оконных функций в разработанных алгоритмах.

4 В алгоритме определения параметров собственных колебаний по вибрационному сигналу в соответствии с п.7 «Если пользователь инициировал выполнение действия б<sub>а</sub>), то ему предоставляется возможность, используя клавиатуру и манипулятор, задать новое значение шага изменения для выбранного параметра модели. После чего осуществляется переход к шагу б<sub>б</sub>». Однако из текста не ясно, какое действие из семи возможных будет затем выполняться в п.б.

5 В главе 6 предложено использовать вейвлет-анализ вибрационных сигналов для выделения требуемой частотной зоны и отмечено, что в зависимости от частоты вращения ротора и типа механизма объекта можно выбирать тип вейвлетных функций. Однако не представлена в явном виде методика выполнения данной задачи.

6 Структурную схему программы, реализующей вибрационный контроль (рис.9.1), следовало бы представить более детально, лучше всего другим типом схемы. В рамках диссертации разработан сложный измерительно-вычислительный комплекс, поэтому более полное описание его архитектуры предпочтительно, например, диаграммой развертывания, которая включает все необходимые аппаратные и программные компоненты для его использования.

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

На основе анализа текста диссертации, используемых методик исследования, полученных автором значимых теоретических результатов, их практической реализации и широкого использования на предприятиях в нашей стране и за рубежом, можно сделать вывод о высокой научной квалификации автора, которая, безусловно, соответствует ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

## **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, соответствующей требованиям ВАК Республики Беларусь, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, указанными в главе 3 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий. Работа содержит новые научные, экспериментальные и практические результаты, которые первоначально определили и в настоящее время развивают актуальное научное направление

по созданию измерительно-вычислительных комплексов и компьютерных систем цифровой обработки сигналов для вибрационного контроля, мониторинга, автоматизированной защиты сложных механизмов и агрегатов роторного типа.

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:

- разработку методологии построения программно-управляемых многоканальных измерительно-вычислительных комплексов, 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 низкочастотного дрейфа вибрационного сигнала в режиме реального масштаба времени, основанного на его полиномиальном приближении, позволяющего минимизировать погрешности вычисления параметров вибросигналов, возникающие в процессе их интегрирования при переходе от единиц виброускорения к единицам виброскорости;

- разработку метода вычисления частоты и амплитуды оборотных гармонических составляющих вибрационного сигнала, кратных частоте вращения валов и роторов механизмов, но не кратных частотному разрешению спектрального анализа, 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 метода представления вибрационных сигналов как декомпозиции в виде суммы периодической (квазипериодической) и шумоподобной компонент, расширяющего возможности исследования вибрационного состояния сложных механизмов и агрегатов роторного типа;

- разработку способа сравнительного анализа вибрационных характеристик пусков-выбегов механизмов и агрегатов, получаемых при различных временах переходных процессов и функциях изменения скорости вращения вала, позволяющего определять их подобие 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 разработанной

модели базового элемента принятия решений;

- разработку алгоритмов приближения затухающего вибрационного колебания, являющегося откликом объекта на динамическое воздействие, суммой затухающих гармоник, параметры которых являются собственными частотами и коэффициентами затухания колебаний исследуемых конструкций зданий и сооружений, обеспечивающих повышение точности вычисления собственных частот по сравнению со спектральным анализом;

- разработку алгоритмов и программного обеспечения измерительно-вычислительных комплексов вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния, автоматики защиты сложных многоопорных механизмов и агрегатов; цифровой обработки и исследования длинных реализаций вибрационных сигналов и временных трендов параметров вибрации.

Разработанные измерительно-вычислительных комплексы и автоматизированные системы введены в промышленную эксплуатацию на предприятиях энергетики Беларуси, следовательно, решена важная научно-техническая и производственная проблема по созданию систем вибрационного контроля и защиты для сложных механизмов и агрегатов критической инфраструктуры.

Официальный оппонент,  
заведующий кафедрой вычислительных  
систем и сетей учреждения образования  
«Полоцкий государственный университет имени  
Евфросинии Полоцкой»  
доктор технических наук, доцент

Р. П. Богуш

