

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Объект авторского права  
УДК 004.02, 004.4

**БРАНЦЕВИЧ**  
**Петр Юльевич**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ И  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

по специальности 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Минск 2024

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный консультант

**Ярмолик Вячеслав Николаевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения информационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты:

**Азаров Илья Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных вычислительных средств учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Ишин Николай Николаевич**, доктор технических наук, доцент, начальник НТЦ «Карьерная техника» государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

**Богущ Рихард Петрович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей учреждения образования «Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой»

Оппонирующая организация **Белорусский национальный технический университет**

Защита состоится «13» июня 2024 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.04 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovets@bsuir.by, тел. +375-17-293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 02 » мая 2024 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент



Н. А. Петровский

## ВВЕДЕНИЕ

В энергетике, газотранспортной системе, на предприятиях критической инфраструктуры важнейшим требованием является предотвращение аварийных ситуаций. Поэтому в процессе эксплуатации производственного оборудования необходимы оценка и прогнозирование изменения его технического состояния, своевременное предупреждение и обнаружение возникающих дефектов. Для сложных механизмов и агрегатов с вращательным движением вибрационный контроль, мониторинг, диагностика являются основополагающими в решении этих задач.

Обеспечение качества выпускаемой продукции, ее соответствия эксплуатационным требованиям во многом достигается проведением испытаний производимых изделий на всех этапах жизненного цикла, от разработки до промышленной эксплуатации. Среди разнообразных типов испытаний одно из важнейших мест занимают испытания на вибрационные воздействия.

Сложные задачи, возникающие при оценке состояния механизмов и агрегатов, решении задач технической диагностики, проведении испытаний, требуют соответствующего аппаратного, алгоритмического, программного, метрологического и методического обеспечения. Вычислительная мощность современных малогабаритных компьютеров, возможность подключения к ним по стандартизованным интерфейсам аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и специализированных устройств позволяют создавать на их основе измерительно-вычислительные комплексы (ИВК), способные решать перечисленные задачи и обладающие при этом гибкостью, модифицируемостью, возможностью функциональной расширяемости и адаптации под новые задачи и условия применения.

Эффективность и круг решаемых задач таких систем в основном определяется возможностями математического и программного обеспечения (ПО). Их роль еще больше возрастает в связи с необходимостью автоматизации ряда сопутствующих задач, связанных с планированием хода испытаний, проведением метрологической аттестации и периодической поверки испытательного и виброизмерительного оборудования, обработкой результатов испытаний и измерений, принятием решений. Компьютерные системы собирают большой объем информации о состоянии контролируемых объектов и по сути являются системами больших данных.

Известны работы многих зарубежных фирм, например, Shinken, SKF, Schlumberger, Brüel & Kjær, Ling Dynamic, Bently Nevada, Schenck, ЛМЗ, Диамех, Вибробит в области создания систем испытаний, вибрационного контроля и диагностики. В Беларуси этими вопросами в разное время занимались А. Е. Леусенко, П. М. Чеголин, Э. А. Баканович, А. Н. Морозевич, В. Н. Ярмолик, А.А. Петровский, Р. Х. Садыхов, Н. Н. Ишин, Н. В. Грунтович, А. Г. Якубенко, А. М. Крот, В. И. Микулович и другие. Однако появление малогабаритных и высокопроизводительных средств вычислительной техники позволило разработать новые подходы к решению указанных задач, перейдя от специализированных изделий к универсальным компьютерным средствам.

29 июня 1992 года Белорусское территориальное энергетическое управление «БЕЛОРУСЭНЕРГО» издало указание «О мерах по улучшению вибрационного об-

служивания и вибросостояния оборудования электростанций». В нем в том числе было сказано, что «виброконтроль работающих агрегатов недостаточно организован и не обеспечен необходимым количеством и качеством штатной и переносной виброизмерительной аппаратуры. Есть случаи несвоевременного выявления диагностических признаков дефектов на ранней стадии развития, не в полном объеме ведется накопление и систематизация данных».

На предприятиях энергетики Беларуси возникла острая потребность в современной системе вибрационного контроля и мониторинга, обеспечивающей импортозамещение в этой сфере. В перспективе эта система должна была интегрироваться в стационарные АСУ ТП, а также решать задачи оценки технического состояния турбоагрегатов и автоматически принимать решение о защитном отключении.

При этом следовало учитывать ряд существенных требований: непрерывная работа с обработкой исходных вибрационных сигналов в режиме реального времени; обеспечение требуемых метрологических характеристик в производственных условиях с учетом изменений окружающей среды и режимов работы оборудования; высокая цена принимаемых решений. Такая система было создана и внедрена на предприятиях энергетики Беларуси.

В диссертации представлены основные научные результаты, полученные в ходе выполнения научно-исследовательских, опытных, экспериментальных и внедренческих работ по созданию математического и программного обеспечения компьютерных систем и комплексов для решения перечисленных задач.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Диссертационная работа выполнена в соответствии с научно-техническими заданиями и планами работ кафедры «Программное обеспечение информационных технологий», научно-исследовательской лаборатории «Вибродиагностические системы» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», государственными научно-техническими программами и государственными программами научных исследований Республики Беларусь, хозяйственными договорами с предприятиями Беларуси, контрактами с организациями России и Китая, основными из которых являются следующие:

1. Разработать методы, алгоритмы и программные средства автоматизированных систем контроля вибросостояния и диагностики промышленного оборудования предприятий энергетики / Министерство топлива и энергетики Республики Беларусь; рук. д-р техн. наук А. Е. Леусенко. – Минск, 1995. – № ГР 199411509. – 01.02.1995–31.12.1995 гг.

2. Разработка методов и программных средств построения фазовых портретов вибросостояния турбоагрегатов / Министерство топлива и энергетики Республики Беларусь; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 1996. – Х/д № 95–1035. – 01.02.1995–31.12.1996 гг.

3. Разработка на базе контрольно-диагностического комплекса «Лукомль-

2001» базовых алгоритмов и основ компьютерной поддержки и сопровождения пуска и нагружения турбоустановок / Министерство топлива и энергетики Республики Беларусь; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 1997. – № ГР 19972677. – 1.02.1996–11.04.1997 гг.

4. Исследование методов испытаний при экстремальных режимах вибронагружения на АСУВ–010, создание программного обеспечения для системы управления вибрацией / НИИ конструкционных материалов и технологических процессов МГТУ им. Баумана; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 1996. – № ГР 19972680. – 1.04.1996–30.12.1996 гг.

5. Разработать и внедрить комплекс программно-алгоритмических средств непрерывного вибрационного мониторинга опор роторных агрегатов электростанций на базовом образце. Провести эксплуатационные испытания и внедрить программный продукт на базовом образце Лукомльской ГРЭС / ГНТП «Энергетика», задание № 12. Министерство топлива и энергетики Республики Беларусь; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 1998. – № ГР 19973184. – 01.02.1997–31.12.1998 гг.

6. Разработать и внедрить комплекс программно-алгоритмических средств поддержки режимов пуска-останова турбоагрегатов и штатного стационарного вибромониторинга, интегрированных в общестанционную АСУ ТП в системе вибробезопасности эксплуатации многороторных механизмов / ГНТП «Энергетика», задание № 14. Концерн БелЭнерго; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 2000. – № ГР 19992911. – 01.02.1999–31.12.2000 гг.

7. Установка, монтаж, наладка и внедрение системы интегрирования КДК «Лукомль-2001» в систему технологической сигнализации и защит т/а ст. № 2 Минской ТЭЦ-4, проведение эксплуатационных испытаний / Минская ТЭЦ-4; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 2002. – Х/д № 01–1023. – № ГР 20014114. – 01.02.2002–31.05.2002 гг.

8. Создание автоматизированного рабочего места по поверке средств измерения параметров вибрации / РУП «Белорусский государственный институт метрологии»; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 2003. – Х/д № 03–1109. – № ГР 20033534. – 01.02.2003–20.12.2003 гг.

9. Разработка и внедрение программного обеспечения оперативного отображения вибрационного состояния детандер-генераторной установки с функциями технологической сигнализации и сопряжения с системой управления ДГУ / Лукомльская ГРЭС; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 2004. – Х/д № 02–1138. – № ГР 2003287. 16.12.2002–30.07.2004 гг.

10. Проведение исследований по созданию вибродиагностической системы определения качества изготовления и сборки узлов автомобилей БелАЗ / РУПП «Белорусский автомобильный завод»; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 2005. – Х/д № 04–1079. – № ГР 2005395. – 15.11.2004–15.12.2005 гг.

11. Разработать методы, алгоритмы и программные модули для исследования характеристик, оценки технического состояния и диагностирования сложных систем / БГУИР; рук. д-р техн. наук В. Н. Ярмолик. – ГБ № 01–2004. – № ГР 2004305. – 3.01.2001–30.12.2005 гг.

12. Разработать опытный образец измерительно-вычислительного комплекса для системы поддержки принятия решений по оценке остаточной устойчивости и жесткости зданий и сооружений / ГНТП «Защита от чрезвычайных ситуаций». Министерство чрезвычайных ситуаций Республики Беларусь, учреждение «НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций»; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 2007. – № ГР 2006339. – 01.12.2005–30.05.2007 гг.

13. Разработать программное обеспечение для обработки результатов, полученных с помощью измерительно-вычислительного комплекса «Тембр» / ГНТП «Защита от чрезвычайных ситуаций». Министерство чрезвычайных ситуаций Республики Беларусь, учреждение «НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций»; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 2009. – № ГР 20090025. – 01.11.2008–31.12.2009 гг.

14. Создание методики и автоматизированной системы управления виброиспытаниями на широкополосную случайную вибрацию и полигармоническую вибрацию / Белорусский республиканский ФФИ, Министерство образования Республики Беларусь, МГТУ им. Н. Э. Баумана; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 2010. – № ГР 20082235. – 01.04.2008–31.03.2010 гг.

15. Разработать алгоритмы и программное обеспечение для непрерывного анализа амплитудно-фазовых параметров вибрационных сигналов, отражающих колебания подшипниковых опор сложных агрегатов при пусках и остановах / Министерство образования Республики Беларусь; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 2010. – № ГР 20102651. – 01.04.2010–31.12.2010 гг.

16. Разработать методы, алгоритмы, аппаратно-программные средства оценки технического состояния сложных механизмов с вращательным движением на основе применения компьютерных средств анализа их вибрационного состояния / БГУИР; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 2013. ГБЦ № 11–3017. – № ГР 20112439. – 01.02.2011–31.12.2013 гг.

17. Разработка методики, алгоритмов, программных средств оценки технического состояния сложных механизмов с вращательным движением на основе анализа вибрационных характеристик пусков и выбегов / ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия». Задание 4.42. «Исследования предельных состояний ответственных элементов приводных механизмов со сложным нестационарным, вращательным движением и разработка методов их диагностики на основе анализа вибрационных параметров»; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич. – Минск, 2015. ГБЦ № 14–3015. – № ГР 20142479. – 01.02.2014–31.12.2015 гг.

18. Разработка методики, алгоритмов, аппаратно-программных средств многокритериального анализа вибрационных сигналов для системы поддержки принятия решений по оценке технического состояния механизмов и агрегатов / ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма 3 «Техническая диагностика»; рук. канд. техн. наук П. Ю. Бранцевич, канд. техн. наук Н. В. Лапицкая. – Минск, 2018. ГБЦ № 16–3019. – № ГР 20162691. – 01.02.2016–31.12.2018 гг.

19. Разработка компонент распределенного сбора и централизованной обработки длинных реализаций вибрационных сигналов для применения в системах

оценки технического состояния механизмов и агрегатов / ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма 3 «Техническая диагностика»; рук. канд. техн. наук Н. В. Лапицкая. – Минск, 2020. ГБЦ № 19–3019. – № ГР 20162691. – 01.02.2019– 31.12.2020 гг.

20. Разработка алгоритмов комплексной обработки длинных реализаций вибрационных сигналов с целью мониторинга и повышения точности оценки технического состояния механизмов и агрегатов и создание на их основе прототипа программно-аппаратного модуля вибродиагностики / ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении»; рук. канд. техн. наук Н. В. Лапицкая. – Минск, 2021. ГБЦ № 21–3006. – № ГР 20211399. – 01.02.2021–31.12.2025 гг.

Выполнено более ста хозяйственных договоров по тематике, связанной с разработкой, внедрением, метрологическим обеспечением и сопровождением компьютерных ИВК, систем, приборов, программных средств вибрационного контроля, мониторинга, автоматики защиты механизмов и агрегатов.

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

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертации является решение теоретических, исследовательских, экспериментальных и практических задач современного научного направления «Измерительно-вычислительные комплексы и компьютерные системы цифровой обработки сигналов» применительно к созданию систем и комплексов вибрационного контроля, мониторинга, автоматики защиты, испытаний, принятия решений о состоянии контролируемых или наблюдаемых объектов и ввод разработанных и произведенных ИВК в промышленную эксплуатацию.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

1. Разработать методологию построения программно-управляемых ИВК, предназначенных для анализа и обработки в режиме реального масштаба времени вибрационных и других информативных сигналов, отражающих состояние исследуемых объектов.

2. Разработать методы и программные средства обработки цифровых вибрационных сигналов для определения в режиме реального масштаба времени их параметров и характеристик при решении ИВК задач вибрационного контроля, мониторинга, автоматики защиты механизмов и агрегатов с вращательным движением в соответствии с требованиями стандартов и правил технической эксплуатации (ПТЭ) в условиях промышленной эксплуатации.

3. Разработать способ обработки и сравнительного анализа временных трендов параметров вибрации механизмов и агрегатов роторного типа, фиксируемых на переходных режимах, пусках и выбегах, их работы. Осуществить его программную реализацию.

4. Разработать способ и программный модуль автоматического принятия решения о вибрационном состоянии контролируемого объекта по стандартизованным или индивидуальным критериям и формирования управляющих воздействий для устройств сигнализации и защитного отключения.

5. Разработать алгоритмы, программное обеспечение обработки вибрационных сигналов, представляющих отклик исследуемого объекта на динамическое воздействие, с целью определения значений его собственных частот и параметров затухания колебаний на этих частотах.

6. Провести исследования по формированию вибрационных воздействий, обеспечивающих максимальное нагружение испытываемых балочных элементов, при проведении усталостных испытаний материалов.

7. Разработать алгоритмы и программные средства для решения указанных задач.

8. Разработать методики метрологической аттестации и поверки измерительно-вычислительных комплексов.

9. Внедрить разработанные ПС в комплекте с ИВК в производственные процессы на предприятиях Беларуси.

*Объектом исследования* являются программные средства компьютерных систем и комплексов цифровой обработки сигналов.

*Предмет исследования* – математическое и программное обеспечение ИВК и компьютерных автоматизированных систем (АС) для решения функциональных задач цифровой обработки сигналов в системах вибрационного контроля, мониторинга, защиты, испытаний, метрологии, оценки состояния объектов наблюдения.

### **Научная новизна**

1. Разработана методология построения программно-управляемых многоканальных ИВК, предназначенных для обработки в реальном масштабе времени вибрационных и других информативных сигналов при решении задач контроля, мониторинга, оценки состояния и защиты технических объектов. ИВК в процессе мониторинга формируют временные тренды параметров вибрации, являющиеся большими данными. По сравнению со специализированными системами ИВК на базе универсальных компьютеров требуют значительно меньше времени и затрат на разработку, изготовление и модификацию.

2. Выполнено 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. Получены точностные оценки вычисляемых параметров вибрации с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и функциональные зависимости величин погрешностей от начальных условий вы-

числений. Проверка предложенного алгоритма, реализующего данный способ, на модельных сигналах и метрологическая аттестация ИВК подтвердили теоретические выводы.

3. Проведен анализ вибрационных сигналов, отражающих колебания подшипниковых опор механизмов и агрегатов с вращательным движением, и предложены новые методы их обработки. Разработан метод удаления в режиме реального масштаба времени низкочастотного дрейфа исходного сигнала, основанный на его полиномиальном приближении, позволяющий минимизировать погрешности вычисления параметров вибросигналов, возникающие в процессе их интегрирования при переходе от единиц виброускорения к единицам виброскорости. На его реализацию, по сравнению с методом цифровой фильтрации верхних частот, требуется меньше 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, что позволяет адаптировать алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) для определения параметров вибрации при произвольном значении частоты вращения. Моделирование вычислений и экспериментальные исследования подтвердили правильность теоретических решений.

4. 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. 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 возмущения в вибрационном сигнале, которые на начальных этапах развития дефектов подшипников носят случайный характер.

5. Предложен метод формирования гаусовых вейвлетов и вейвлета Морле с задаваемой центральной частотой их амплитудно-частотных характеристик. Применение таких вейвлетов в задачах обработки и анализа вибрационных сигналов позволяет выявлять моменты появления возмущений определенного вида и оценивать изменение во времени параметров информативно-значимых 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. Полученные результаты используются для оценки изменения технического состояния контролируемых объектов в процессе длительной эксплуатации.

7. Предложен базовый модуль принятия решений, обеспечивающий унифицированный подход для реализации систем автоматического принятия решений. Разработаны алгоритмы автоматического принятия решения о вибрационном со-

стоянии 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 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. Уменьшение с течением времени значений собственных частот и увеличение декрементов затухания являются индикаторами снижения 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 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.

10. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение ИВК вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния, автоматики защиты сложных многоопорных механизмов и агрегатов; цифровой обработки длинных реализаций вибрационных сигналов. Разработаны методики метрологической аттестации (МА) и поверки (МП) ИВК, введенных в промышленную эксплуатацию на предприятиях энергетики Беларуси.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методология 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. Построение ИВК на базе вычислительных и электронных компонент 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 ИВК «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 БПФ 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 возмущения в вибрационном сигнале. Разработан программный модуль, реализующий данное преобразование.

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 критери-

ям 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 ИВК вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния, автоматизации защиты сложных многопорных механизмов и агрегатов; цифровой обработки и исследования длинных реализаций вибрационных сигналов. Методики метрологической аттестации и поверки ИВК.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Результаты и положения, вносимые на защиту, получены соискателем лично. Вклад научного консультанта д-ра техн. наук, профессора В. Н. Ярмолика заключается в обсуждении проблематики исследований, оценке получаемых результатов. Разработка ИВК проводилась совместно с и. о. зав. НИЛ «Систем вибродиагностики» БГУИР С. Ф. Костюком, который разработал электронные схемы и конструкцию согласующих усилителей, блока низкочастотной фильтрации, схему соединений. Разработка ПО ИВК «Тембр» проводилась совместно с аспирантом Д. В. Носко, который разработал программные модули интерфейса, ввода, отображения и сохранения в файлы вибрационных сигналов. Разработка зарегистрированных компьютерных программ проводилась совместно с аспирантом Е. Н. Базылевым, который разработал программные модули пользовательского интерфейса, отображения вибросигналов, результатов их обработки и сохранения в файлы экранных форм. В представленных публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации результатов. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

## **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты, полученные в ходе выполнения исследований, докладывались и обсуждались на 7-й, 8-й, 12-й Всероссийских научно-технических конференциях с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Москва, МГИ электроники и математики, 1995, 1996, 2000); Международной конференции «Компьютерный анализ данных и моделирование» (Минск, БГУ, 1995); 7-й Белорусской математической конференции (Минск, БГУ-ИМ АНБ, 1996); 1-й, 3-й международных конференциях «Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях» (Минск, ИТК НАН Беларуси, 1998, 2002); 6-й Международной научной конференции «Актуальные проблемы информатики» (Минск, БГУ, 1998); Всероссийском научно-техническом совещании «Проблемы вибрации и вибродиагностики энергетического оборудования» (Москва, ВТИ, 1999); 2-й международной научно-технической конференции «Современные методы цифровой обработки сигналов в системах измерения, контроля, диагностики и управления» (Минск, БГУ, 1999); Четвертом международном симпозиуме «Интеллектуальные системы» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000); Всероссийском научно-техническом совещании «Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций» (Москва, ВТИ, 2001); Международном научно-техническом совещании «Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций» (Москва, ВТИ, 2003, 2005, 2007); Международных конференциях «Информационные системы и технологии» (Минск, БГУ, 2002, 2009); 4-й, 5-й, 6-й Международных научно-практических конференциях «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация» (Минск, НИИ ПБ и ЧС МЧС РБ, 2007, 2009, 2011); 4-м, 5-м, 6-м Белорусском космическом конгрессе (Минск, ОИПИ НАН Беларуси, 2009, 2011, 2014); 3-й, 7-й Международных научно-технических конференциях «Приборостроение» (Минск, БНТУ, 2010, 2014); 5-м Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике (Минск, Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси, 2011); Международных научно-технических конференциях «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (Могилев, Белорус.-Рос. ун-т, 2012, 2014, 2017, 2022); 7-й Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в промышленности» (Минск, ОИПИ НАН Беларуси, 2012); 3-й Международной научно-технической конференции «Открытые информационные технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technology for Intelligent Systems (OSTIS–2013)» (Минск, БГУИР, 2013); 2-й, 3-й, 4-й, 6-й, 7-й Международных научно-практических конференциях «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та, 2013, 2015, 2017, 2021, 2023); Международных конгрессах по информатике «Информационные технологии и системы» (Минск, БГУ, 2013, 2016); Международных научно-технических конференциях «Инновации в машиностроении» (Минск, Объедин. ин-т машино-

строения НАН Беларуси, 2012, 2013, 2014, 2015); Международных научно-технических конференциях «Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС» (Минск, БГУИР, 2015, 2021); Международных научных конференциях «Информационные технологии и системы» (Минск, БГУИР, 2017, 2020, 2021, 2022); Десятой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (Санкт-Петербург, АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2021); 13-й Международной научно-технической конференции «Медэлектроника-2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии» (Минск, БГУИР, 2022); International Congress of Sound and Vibration (Krakow, Poland, 2009; Rio de Janeiro, Brazil, 2011; Vilnius, Lithuania, 2012; Bangkok, Thailand, 2013; Beijing, China, 2014; Florence, Italy, 2015; Athens, Greece, 2016; Hiroshima, Japan, 2018; Prague, Czech Republic, 2021; Singapore, 2022; Prague, Czech Republic, 2023); Международных научно-технических конференциях «Мониторинг техногенных и природных объектов» (Минск, БГУИР, 2015, 2017, 2021); Международных научно-практических конференциях «Big Data and Advanced Analytics (Минск, БГУИР, 2016, 2017, 2018, 2021, 2022, 2023). Использование результатов диссертации подтверждено актами внедрения в производство и учебный процесс.

### **Опубликованность результатов диссертации**

По тематике диссертации опубликовано 130 печатных работ, в том числе 3 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 в Республике Беларусь. Получены 3 свидетельства о регистрации компьютерных программ, 2 патента на полезную модель. Суммарный объем публикаций составляет более 60 авторских листов. 12 работ индексируются в наукометрической базе SCOPUS. Результаты работы включены в 16 депонированных отчетов по НИР.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация 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.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

В **первой главе** проведен анализ решаемых задач и функций систем вибрационного контроля, мониторинга, автоматизации защиты и автоматизированных систем управления испытаниями на вибрационные воздействия (АСУВ). Рассмотрено

ны примеры программно-управляемых ИВК вибрационного контроля и мониторинга на базе современных малогабаритных компьютеров.

Для механизмов и агрегатов, в основу механического функционирования которых положено вращательное движение, одними из важнейших параметров являются интенсивность и спектральный состав вибрации его валов, роторов, подшипниковых опор. При длительном безостановочном функционировании подобного технического объекта, например, турбоагрегата, насоса трубопровода, требуется непрерывное наблюдение или слежение за его вибрационным состоянием. Особую роль контрольно-диагностические системы играют в сфере энергетики, как отрасли, обеспечивающей жизнедеятельность современного общества.

Для решения задач по совершенствованию вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния турбоагрегатов Белорусской энергосистемы обоснована концепция построения ИВК, в которых компьютер является основным блоком обработки данных, а его функциональность определяется ПО, разрабатываемым под конкретные производственные задачи и достаточно просто модифицируемым при изменении или расширении функциональных требований. Для преобразования аналоговых сигналов в цифровые используется универсальный модуль АЦП, подключаемый на стандартную шину компьютера. На входы АЦП могут подключаться выходы любых первичных преобразователей информации, которые преобразуют изменения физических величин в электрический сигнал тока или напряжения.

Предложена структура ИВК для работы в режиме реального времени с групповым переключением каналов для многоточечного контроля многоопорного механизма или агрегата. Разработано несколько модификаций ИВК (серия «Лукомль», «Палессе», «Полоцк-2003»). При работе ИВК «Лукомль» для определения параметров вибрации в большинстве случаев используется временная реализация вибрационного сигнала длительностью 200 мс, что соответствует десяти оборотам вала турбоагрегата при частоте вращения  $3000 \text{ мин}^{-1}$  (50 Гц). Подшипниковая опора контролируется в трех направлениях: вертикальном, горизонтально-поперечном и горизонтально-осевом. Для каждой точки контроля вычисляется 14 параметров вибрации. Для турбоагрегата с восемью подшипниковыми опорами каждые 2 секунды вычисляются 336 параметров. Следовательно, за сутки получаем 14 515 200 значений параметров вибрации, которые сохраняются в файлах на жестком диске компьютера. Таким образом, уже к концу 90-х годов внедрение ИВК серии «Лукомль» обеспечило получение больших данных производственного назначения.

Решение задачи проактивного технического обслуживания оборудования требует тщательного изучения изменений вибрационного состояния технических объектов на разных режимах работы в процессе их эксплуатации, обнаружения редких изменений структуры вибрационного сигнала и выявления причинно-следственных связей между их появлением и развитием дефектов. Для этого осуществляется регистрация и анализ непрерывных вибрационных сигналов, отражающих состояние объекта, на протяжении длительных временных интервалов.

Для практической реализации данного метода исследований разработан 16-канальный ИВК «Тембр» («Тембр-М» для амплитудно-фазовых измерений) на

базе ноутбука, модуля АЦП, виброизмерительных каналов с первичными виброизмерительными преобразователями и проблемно-ориентированного ПО.

Управление проведением испытаний на вибрационные воздействия, выполнением поверочных работ виброизмерительных приборов и устройств осуществляют АСУВ, представляющие собой аппаратно-программный комплекс средств испытательной, измерительной и вычислительной техники, предназначенный для автоматизации выполнения функций формирования воздействий и управления технологическим процессом виброиспытаний или поверки. Одной из важнейших задач усталостных испытаний материалов является воспроизведение тяжелейшего режима нагружения испытываемых балочных элементов, который необходимо определить перед началом испытаний.

Функциональность компьютерных ИВК и систем определяется специализированным математическим и программным обеспечением, процессы разработки и внедрения которого изложены в диссертации.

Во **второй главе** рассмотрены методологические аспекты определения амплитудных и фазовых параметров вибрации механизмов роторного типа.

При работе механизмов с вращательным движением вследствие периодического вращения вала (ротора) на подшипниковые опоры и на другие узлы механизма действуют силы, изменяющие свое основное направление воздействия, что приводит к вибрации (механическим колебаниям) опор. Наиболее часто в качестве первичного виброизмерительного преобразователя (ВИП) используется пьезоэлектрический акселерометр, который в комплекте с согласующим усилителем образует виброизмерительный канал, на выходе которого напряжение или ток, пропорциональные виброускорению. Однако стандартами и ПТЭ допустимые уровни вибрации подшипниковых опор заданы в единицах виброскорости, а валов – в единицах виброперемещения, переход к которым осуществляется путем одинарного (двойного) интегрирования сигнала виброускорения. Для определения частоты вращения вала и амплитудно-фазовых параметров вибрации дополнительно используется сигнал от датчика фазовой метки, которая устанавливается на валу.

Количество дискретных отсчетов  $N$  для обработки вибросигнала выбирается кратным степени двойки, чтобы обеспечить более производительную реализацию алгоритмов ЦОС, а частота дискретизации выбирается такой, чтобы на  $N$  отсчетах укладывалось несколько (5 – 10) периодов гармонической составляющей, равной частоте вращения вала контролируемого объекта.

После того как вибросигнал и сигнал от датчика фазовой метки оцифрованы и введены в вычислительную машину для определения амплитудных параметров и фазовых сдвигов частотных составляющих, кратных частоте вращения, решаются следующие алгоритмические задачи: 1) определение номеров дискретных отсчетов, которые соответствуют моментам срабатывания датчика фазовой метки, при прохождении под ним метки, закрепленной на цилиндрической поверхности вала; 2) определение периода вращения вала; 3) выбор диапазона номеров дискретных отсчетов вибросигнала, на котором будут вычисляться амплитудные и фазовые параметры вибрации; 4) определение амплитудных и фазовых параметров оборотных составляющих вибрации методом ДПФ. Погрешность вычисления периода (частоты)

ты) вращения вала зависит от количества дискретных отсчетов сигнала, которые используются для определения значений этих параметров.

Под нестационарным режимом понимается работа агрегата при пусках и выбегах, когда изменяется частота вращения вала. Модель вибрационного процесса, представляющего вибрацию подшипниковой опоры как совокупность  $L$  оборотных составляющих при нестационарном режиме работы, можно описать следующим выражением:

$$x(t) = \sum_{i=1}^L A_i(t) \cos[2\pi \cdot f_i(t) \cdot t - \varphi_i(t)], \quad (1)$$

где  $A_i(t)$ ,  $f_i(t)$ ,  $\varphi_i(t)$  – функции, описывающие изменение во времени, соответственно, амплитуды, частоты и фазы  $i$ -й оборотной составляющей.

Экспериментальные исследования вибрационных характеристик при выбегах турбоагрегатов показывают, что максимальное изменение частоты вращения вала не превышает 10–20 оборотов в секунду. Момент начала приема сигнала является произвольным и по отношению к фазовому датчику метка на валу оказывается повернутой на угол  $\varphi_1$  первой оборотной составляющей, отсчитываемый относительно фазового датчика против часовой стрелки (вал вращается по часовой стрелке). Полученное значение частоты является некоторой усредненной оценкой на интервале анализа и применяется при последующем вычислении амплитуды и фазы.

Высокая стоимость принятия неправильного решения при оценке вибробезопасности турбоагрегата обуславливает необходимость обеспечения достаточной точности определения значений параметров вибрации. Существуют причины возникновения погрешностей при определении этих параметров, связанные как с аппаратными особенностями систем виброконтроля, так и со свойствами применяемых алгоритмов обработки, а именно: некрatность временного интервала анализа периоду анализируемого гармонического сигнала (погрешность синхронизации); низкочастотные дрейфы, которые могут присутствовать в анализируемом сигнале; переходные процессы; нелинейные искажения в виброизмерительных каналах и устройствах ввода, например, ограничения по уровню; ограниченная разрядность аналого-цифрового преобразования; особенности трансформации погрешностей исходных данных в выходные результаты применяемыми вычислительными способами. Выполнен анализ погрешностей при вычислении фазовых параметров вибраций, получены выражения для оценки влияния погрешности синхронизации при определении синусных и косинусных составляющих гармоник.

Выполнено имитационное моделирование по формированию вибросигнала, соответствующего первой оборотной частоте, с изменяющимися амплитудой, частотой и фазой, и определению значений параметров модельного сигнала.

Результаты моделирования показали: 1) при наличии погрешности синхронизации погрешность определения фазового угла анализируемой гармоники зависит от ее начальной фазы, причем на интервале ее изменения от 0 до 360 градусов значение погрешности определения фазового угла изменяется по закону, близкому к гармоническому (два периода повторения), имея два максимума и два минимума, минимумы соответствуют значениям начальной фазы сигнала примерно 135 и 315

градусов, а максимумы – 45 и 215 градусов; 2) при наличии погрешности синхронизации относительная погрешность определения амплитуды анализируемой гармоники зависит от начальной фазы сигнала, причем на интервале ее изменения от 0 до 360 градусов значение относительной погрешности изменяется по закону, близкому к гармоническому (два периода повторения), имея четыре минимума, соответствующие значениям начальной фазы сигнала примерно 45, 135, 225 и 315 градусов.

Так как реальный вибрационный сигнал содержит широкий спектр гармонических составляющих, в том числе и не кратных оборотной, то при определении параметров  $n$ -й оборотной составляющей эти гармоники также вносят свой вклад в погрешность вычислений.

Предложенный способ определения амплитудных и фазовых параметров вибрационных сигналов, отражающих колебания подшипниковых опор турбоагрегатов, обеспечивает получение их значений с погрешностями, удовлетворяющими требованиям стандартов и ПТЭ для энергетических установок. Это подтверждается результатами моделирования и метрологических аттестаций ИВК.

В **третьей главе** рассмотрены методы обработки цифровых вибрационных сигналов, применяемые в ИВК.

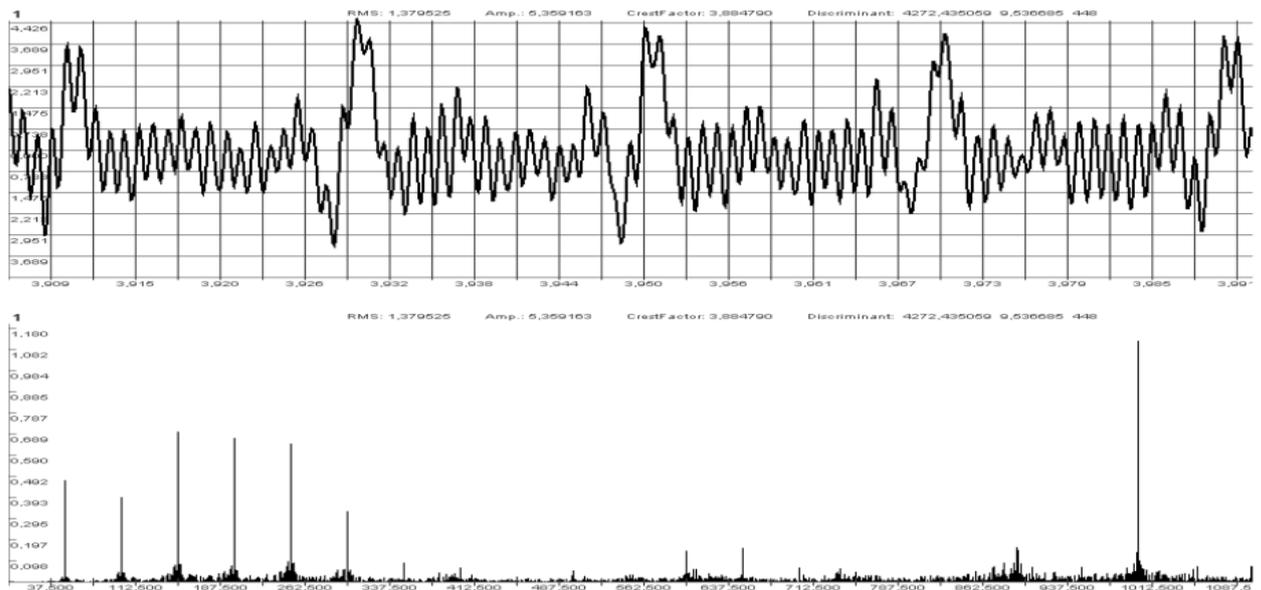
Определение амплитуд спектральных составляющих цифрового вибрационного сигнала производится методом дискретного преобразования Фурье. Трудоемкость вычисления амплитуд комплексных составляющих  $X(j)$  весьма значительна:  $N^2$  операций комплексного сложения и умножения (для определения тригонометрических функций применяют табличный способ). Поэтому для вычисления  $X(j)$  применен алгоритм быстрого преобразования Фурье, реализованный на математическом сопроцессоре Intel-архитектуры.

Если частота вращения ротора имеет целочисленную кратность по отношению к частотному разрешению спектрального анализа, то дискретное преобразование Фурье позволяет получить амплитудный спектр, соответствующий реальному. Иллюстрация такого амплитудного спектра представлена на рисунке 1. Частотное разрешение спектрального анализа в данном случае  $\Delta f = 1,25$  Гц, а частота вращения ротора 50 Гц.

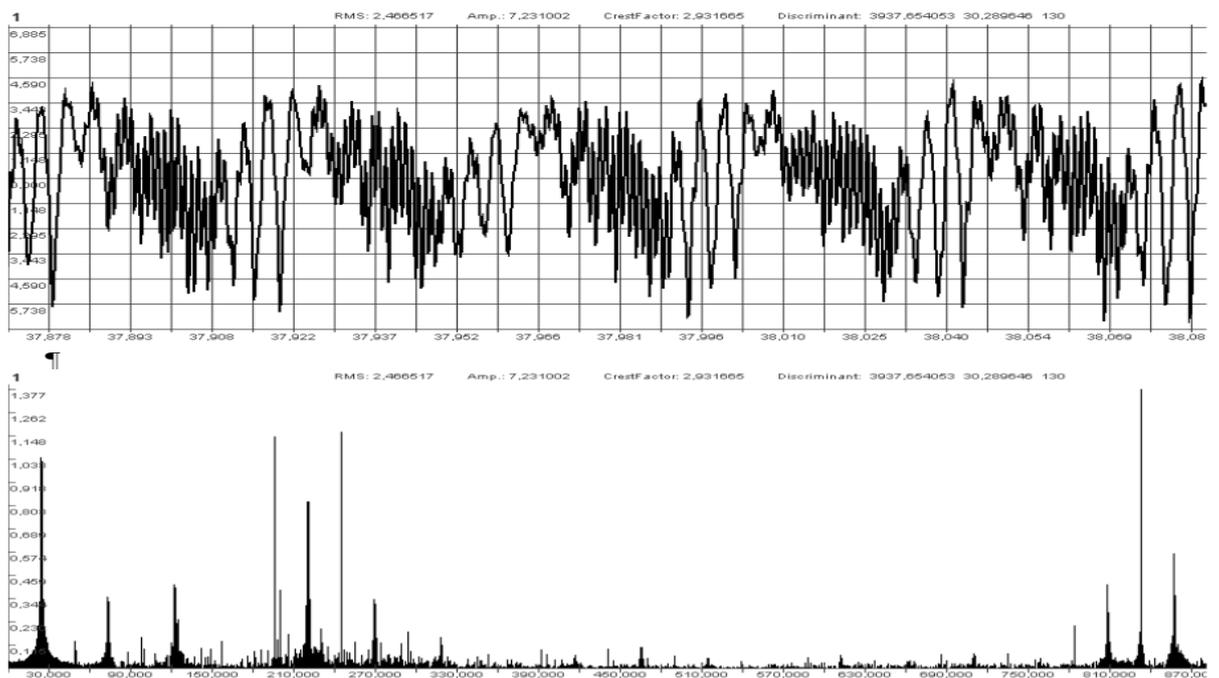
Проблемная, с точки зрения исследования амплитудного спектра вибросигнала, ситуация показана на рисунке 2. Частотное разрешение спектрального анализа в данном случае  $\Delta f = 1$  Гц, а частота вращения ротора находится между 24 и 25 Гц. Здесь наблюдается размывание амплитуды реальной спектральной составляющей по соседним спектральным линиям.

Предложен способ вычисления амплитуды и частоты такой спектральной составляющей. Допустим, что в анализируемом сигнале присутствует гармоническая составляющая с частотой  $f_x$ , причем  $i \cdot \Delta f < f_x < (i + 1) \cdot \Delta f$ , и отсутствуют гармонические составляющие с частотами  $i \cdot \Delta f$  и  $(i + 1) \cdot \Delta f$ .

После вычисления спектра на интервале анализа, выделенном прямоугольным временным окном, будут получены некоторые значения амплитуд спектральных составляющих  $A_i$  и  $A_{i+1}$ , соответствующих частотам  $i \cdot \Delta f$  и  $(i + 1) \cdot \Delta f$ .



**Рисунок 1 – Временная реализация и амплитудный спектр вибрационного сигнала, полученного при исследовании подшипниковой опоры генератора (для временной реализации: ось абсцисс – время, с; ось ординат – виброускорение, м/с<sup>2</sup>; для спектра: ось абсцисс – частота, с<sup>-1</sup>; ось ординат – виброускорение, м/с<sup>2</sup>)**



**Рисунок 2 – Временная реализация и амплитудный спектр вибрационного сигнала, полученного при исследовании электродвигателя (для временной реализации: ось абсцисс – время, с; ось ординат – виброускорение, м/с<sup>2</sup>; для спектра: ось абсцисс – частота, с<sup>-1</sup>; ось ординат – виброускорение, м/с<sup>2</sup>)**

Если обозначить  $\zeta = (i + 1) \cdot \Delta f - f_x$ , то тогда после преобразований получим:

$$\zeta = A_i \Delta f / (A_i + A_{i+1}); \quad (2)$$

$$f_x = (i + 1) \cdot \Delta f - \zeta = \left[ i + A_{i+1} / (A_i + A_{i+1}) \right] \cdot \Delta f; \quad (3)$$

$$A_{f_x} = A_{i+1} \pi \zeta / \left[ \Delta f \sin(\pi \zeta / \Delta f) \right], \quad (4)$$

где  $A_{f_x}$  – истинное значение амплитуды гармоники с частотой  $f_x$ .

Отличительной особенностью вибрационных сигналов, отражающих вибрационное состояние механизмов и агрегатов с вращательным движением, является наличие периодической (или близкой к периодической) и шумоподобных составляющих. С целью более детального исследования предлагается представлять исходный вибросигнал в виде суммы периодической (квазипериодической) и шумоподобной составляющих:

$$x(nt_d) = p(nt_d) + s(nt_d) = \sum_{m=1}^L A_m \cos(2\pi k_m f_0 n t_d - \varphi_m) + s(nt_d), \quad (5)$$

где  $p(nt_d)$  – периодическая (квазипериодическая) составляющая вибрационного сигнала;  $s(nt_d)$  – шумоподобная составляющая вибрационного сигнала;  $n$  – номер дискретного отсчета,  $n = 0, 1, 2, \dots$ ;  $t_d$  – интервал дискретизации;  $f_0$  – частота вращения приводного вала (оборотная частота);  $k_m$  – кратность  $m$ -й гармоники, включенной в периодическую составляющую, относительно  $f_0$ ,  $f_m = k_m f_0$ ,  $A_m, f_m, \varphi_m$  – амплитуда, частота, начальная фаза  $m$ -й гармоники периодической компоненты;  $L$  – число гармоник периодической составляющей вибросигнала.

Анализ шумоподобной компоненты позволяет обнаружить вибрационные всплески и возмущения как превышение шумоподобной составляющей вибрационного сигнала по абсолютной величине некоторого порогового уровня, которые носят случайный характер и являются признаками зарождающихся дефектов.

Предложен способ выделения квазипериодической составляющей вибрации, которая является следствием изменения частоты вращения валов или роторов на интервале анализа.

Разработаны алгоритмы: вычисления огибающей сигнала на основе преобразования Гильберта; построения полосового спектра; кепстрального анализ вибрационных сигналов; удаления низкочастотного дрейфа вибрационного сигнала.

Под полосовым спектром понимается представление вибрационного сигнала в частотной области в виде последовательности СКЗ сигналов в частотных полосах, примыкающих друг к другу, в порядке возрастания частоты. Такой подход позволяет осуществлять сравнительный анализ вибросигналов при качающихся значениях частотных составляющих. Кепстральный анализ применяется для выявления функционально связанных спектральных составляющих вибрационных сигналов.

При обработке реальных вибрационных сигналов следует учитывать, что данные, поступающие от первичных преобразователей, подвержены воздействию помех и искажающих факторов различного типа. Одним из них является низкочастотный дрейф, лежащий вне информативной частотной полосы вибрации, который может оказать существенное искажающее воздействие на вычисляемые параметры, особенно в случаях, когда выполняется интегрирование сигнала, представ-

ленного в единицах виброускорения, для его перевода в единицы виброскорости.

Для удаления низкочастотного дрейфа из исходного массива данных на первом этапе ищется описание дрейфа в виде алгебраического полинома первой или второй степени, как полученное в общем виде решение системы уравнений, а затем принимается решение о вычитании этой функции из исходного сигнала.

В четвертой главе рассмотрен ряд методов, применяемых для исследования вибрационных сигналов и определения информативно-значимых признаков для систем вибрационной диагностики и автоматике принятия решений.

Предложен метод исследования цифровых вибросигналов с применением вейвлетов. Этот метод может быть использован для локализации на длинной временной реализации вибросигнала аномальных явлений определенной формы или фиксации моментов возбуждения сигналов в некоторых частотных полосах.

В дискретном виде вейвлет-преобразование длительного вибрационного сигнала  $s(m)$  представляется выражением

$$C(N, m) = \sum_{n=0}^N s(n + m) \cdot \psi \left[ (8n - 4N) / N \right], m = 0 \dots L-1, \quad (6)$$

где  $L$  – число дискретных отсчетов в анализируемой временной реализации исследуемого сигнала;  $\psi(\cdot)$  – функция вейвлета.

Дискретное вейвлет-преобразование представляет собой вариант цифровой полосовой фильтрации, поэтому для вейвлета важно определить, какое количество дискретных точек  $N$  будет соответствовать полосовому фильтру с центральной частотой  $f_w$  (частота, на которой его АЧХ имеет максимальный коэффициент передачи). Экспериментально получены выражения, используя которые вычисляются  $N$  для гауссовых вейвлетов и вейвлета Морле. Например, для гауссова вейвлета 3-го порядка:

$$N_{\text{гаус}3\text{п}} = \text{round} \left( 2,22 f_d / f_w \right), \quad (7)$$

где  $f_d$  – частота дискретизации аналогового сигнала;  $f_w$  – частота, на которой цифровой полосовой фильтр, реализуемый вейвлетом, имеет максимальный коэффициент передачи;  $\text{round}(\cdot)$  – операция округления.

Для обеспечения единичного коэффициента передачи на центральной частоте вейвлетного цифрового фильтра следует нормализовать вейвлет по амплитуде, применяя на примере гауссова вейвлета 3-го порядка формулы вида:

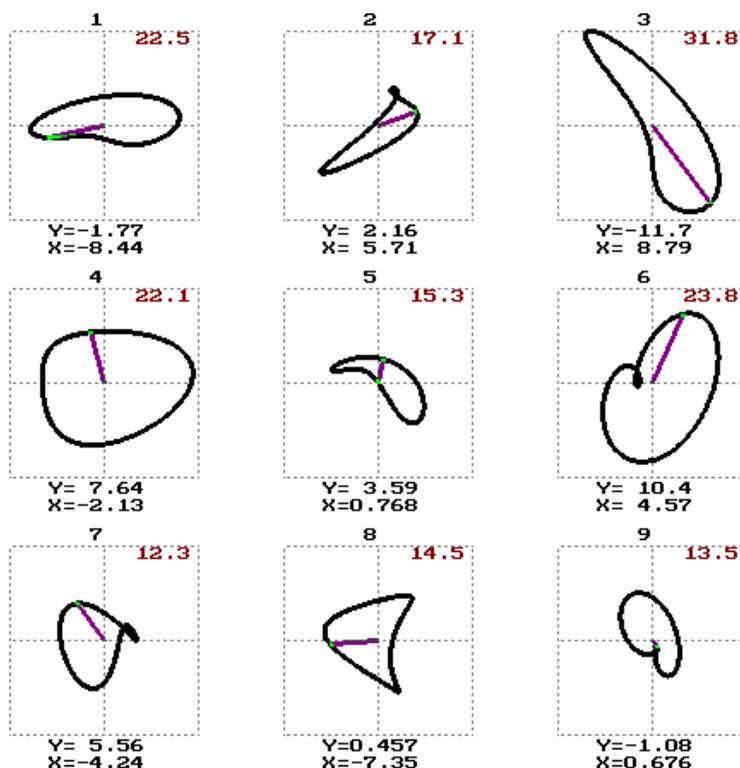
$$\text{гаус}3\text{п}_{\text{норм.}}(n) = \text{гаус}3\text{п}(n) / \left[ 1,3 \sum_{i=0}^N |\text{гаус}3\text{п}(i)| \right]; n=0 \dots N. \quad (8)$$

Полученные вейвлетные функции не содержат постоянной составляющей и удобны для работы с вибросигналами.

Вибрационные сигналы имеют разнообразные наборы спектральных составляющих со сложными взаимосвязями. Одним из методов нахождения групп взаимосвязанных спектральных составляющих является усреднение сигнала во времен-

ной области при одинаковой начальной фазе одной из выбранных частотных составляющих. Это действие осуществляется путем сдвига полученных временных реализаций сигнала таким образом, чтобы начальная фаза выбранной частотной составляющей в каждом из сигналов принимала одинаковое значение. Затем сдвинутые сигналы суммируются и находится их среднее арифметическое.

Для понимания сущности вибрационных колебаний полезны разнообразные модели. Одной из таких моделей является графическое представление траектории движения центра подшипниковой опоры при вращении вала, которая при наличии коэффициентов чувствительности пересчитывается в траекторию движения центра вала, вращающегося в обойме подшипника скольжения (рисунок 3).



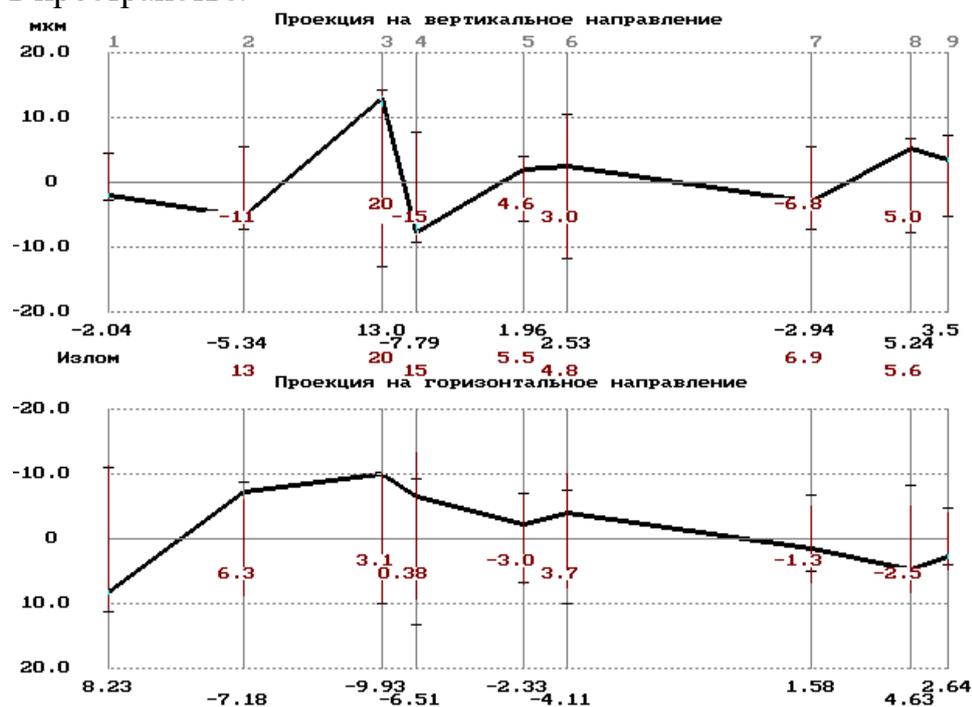
**Рисунок 3 – Траектории движения подшипниковых опор турбоагрегата (единицы измерения – мкм)**

Расчет траектории движения подшипниковой опоры производится по одновременно принимаемым сигналам от двух виброизмерительных преобразователей, установленных в вертикальном и горизонтальном направлении подшипниковой опоры, и сигналу от датчика фазовой метки. Исходные вибросигналы дважды интегрируются.

Валопровод турбоагрегата представляется динамической моделью, которая отражает изменение проекций центра опоры на вертикальное и горизонтальное направление при вращении вала (рисунок 4). По оси абсцисс валопровод представлен в масштабе расстояний между подшипниковыми опорами.

Для количественной характеристики вибросостояния валопровода применяются как диапазоны изменения проекций, так и величина излома валопровода для отдельных опор, которая определяется для  $i$ -й опоры как высота треугольника (в

микронах), вершинами которого являются точки, представляющие собой значения координат положения центра  $(i-1)$ -й,  $i$ -й и  $(i+1)$ -й подшипниковых опор на плоскости или в пространстве.



**Рисунок 4 – Модель вибрационного состояния валопровода турбоагрегата (единицы измерения по оси ординат – мкм)**

В пятой главе рассмотрены вопросы анализа вибрационных сигналов, получаемых при испытаниях зданий и сооружений методом динамического воздействия.

При проведении вибрационных испытаний конструкции в режиме свободных колебаний ее возбуждение проводится посредством удара. Зарегистрированная временная реализация затухающего вибрационного сигнала, состоящего из нескольких частотных составляющих, обрабатывается и определяются собственные частоты и логарифмические декременты затухания колебаний для этих частот.

Для решения задач по исследованию вибрационного состояния конструкций при динамических воздействиях разработано программное обеспечение ИВК «Тембр». ИВК осуществляет ввод, первичный спектральный анализ и запись в файл временной реализации вибросигнала, отражающего колебательный процесс.

Применение ДПФ для определения амплитудного спектра такого сигнала на конечном временном интервале позволяет получить только приблизительные значения собственных частот (частоты выраженных по амплитуде спектральных линий). Для более точного определения указанных параметров предлагается представить экспериментальный сигнал в виде математической модели:

$$x_m(nt_d) = \sum_{m=1}^M A_m \exp(-nt_d/\tau_m) \cdot \cos(2\pi f_m nt_d - \varphi_m), \quad (9)$$

где  $M$  – количество собственных частот, составляющие которых включаются

в аппроксимирующее выражение;  $A_m, f_m, \tau_m, \varphi_m$  – амплитуда, частота, параметр затухания и начальная фаза  $m$ -й частотной составляющей;  $t_d$  – интервал дискретизации;  $n = n_{нач} \dots n_{нач} + N - 1$ ;  $n_{нач}$  – номер дискретного отсчета, начиная с которого проводится аппроксимация;  $N$  – количество точек функции, для которых выполняется построение аппроксимирующей функции.

Решаемой задачей является нахождение таких значений  $A_m, f_m, \tau_m, \varphi_m$ , являющихся параметрами математической модели, при которых на рассматриваемом интервале аппроксимирующая функция наиболее близка к экспериментальному сигналу. В качестве критерия близости предлагается использовать среднее квадратическое отклонение модельного сигнала от исходного.

При поиске параметров модели целью является минимизация данного критерия. Оптимизационная задача решается методом последовательного приближения. Однако параметры модели связаны между собой неформализованными зависимостями, что существенно усложняет процесс поиска решения.

Разработаны алгоритмы автоматизированного и автоматического определения параметров собственных колебаний по вибрационному сигналу.

Исходно для каждого параметра модели задаются: начальное значение; возможный диапазон изменения параметра (максимальное и минимальное значение); шаг изменения параметра; начальная точка временной реализации, начиная с которой исходные данные сравниваются с модельным сигналом; длина (количество дискретных точек) аппроксимирующей функции, по которым рассчитывается критерий близости; количество собственных частот (затухающих гармонических составляющих), по которым строится модель; набор параметров модели, для которых требуется произвести автоматическую подстройку.

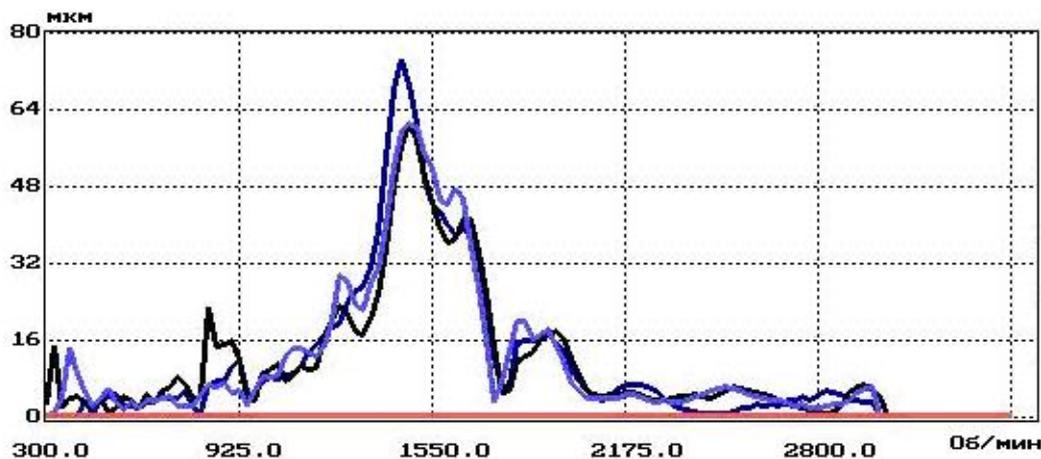
Проведен эксперимент по определению собственных частот плит перекрытия до и после их нагрузочных испытаний. Анализ полученных данных показал, что изменение состояния конструкции (в данном случае плиты перекрытия) отражается на параметрах вибрационного импульса, возбуждаемого при динамическом воздействии на конструкцию. В проведенных исследованиях наиболее существенное изменение в сторону увеличения, почти в три раза, наблюдалось для логарифмического декремента затухания. Увеличение скорости затухания колебаний, возбужденных в конструкции, происходит из-за ускорения рассеяния (диссипации) энергии, основными факторами которого являются неоднородность структуры материала и появление микротрещин в плитах после статического нагружения. Таким образом, предложенный способ обработки возбуждаемых колебаний конструкций может применяться для оценки изменения их состояния.

В **шестой главе** рассмотрены способы обработки вибрационных характеристик пусков-выбегов, которые отражают изменение амплитуды колебаний подшипниковой опоры при изменении частоты вращения вала.

Вибрационные характеристики выбега (рисунок 5) получают при свободном торможении вращающегося вала во время остановки механизма, а пуска – при его включении и наборе оборотов.

Чаще всего их используют при оценке технического состояния механизмов и агрегатов с подшипниками скольжения (турбоагрегаты, мощные насосы и двигате-

ли). Эти характеристики интересны тем, что во время переходного процесса, связанного с изменением частоты вращения вала, происходит вибрационное возбуждение элементов вращения и опор на собственных частотах, и параметры оборотных составляющих вибрации, вычисляемые в этих состояниях, позволяют оценить величину дисбалансов валопровода.



**Рисунок 5 – Вибрационные характеристики выбегов для подшипниковой опоры турбоагрегата, полученные в разное время. Ось абсцисс – частота вращения вала, мин<sup>-1</sup>; ось ординат – размах виброперемещения, мкм**

Осуществляя сравнение самих вибрационных характеристик пусков-выбегов, полученных на протяжении некоторого, достаточно протяженного, интервала времени, можно делать выводы об изменении технического состояния механизма или агрегата. Применение методов формализации принятия решений позволяет автоматизировать реализацию сравнительных процедур. Форма вибрационных характеристик выбега весьма разнообразна, причем существенные отличия наблюдаются даже для одноименных подшипников разных однотипных турбоагрегатов.

В результате вычисления и регистрации параметров вибрации ИВК «Лукомль», когда изменяется частота вращения ротора, получается последовательность значений параметров вибрации с неравномерным шагом по частоте вращения.

Разработан алгоритм формирования на основе исходных данных мониторинга, характеристик пуска или выбега с осью абсцисс, линейной по частоте. Для расчета промежуточных значений функции между  $i$ -м и  $(i+1)$ -м значениями экспериментальных данных используется интерполяционный многочлен Лагранжа третьей степени, применение которого дало в сравнении со сплайнами лучшие результаты. Вычисления проводятся по четырем экспериментально полученным значениям функции, следующим друг за другом, а искомые значения вычисляются для среднего отрезка. Обработка всего набора исходных данных осуществляется путем продвижения четверки узлов, участвующих в вычислениях, по всем исходным данным с проведением вычислений для средних участков. Это позволяет получить гладкую итоговую функцию.

При проведении оценки изменения технического состояния механизмов на основе сравнительного анализа вибрационных характеристик пуска-выбега одна из функций принимается за базовую, вторая – за сравниваемую.

Для любой характеристики выбега, рассматривая ее либо как обычную функциональную зависимость, либо как функцию плотности вероятностей, определяется ряд параметров, каждый из которых отражает ее определенные свойства. Для снижения влияния случайных искажающих факторов, которые имеют место при экспериментальном определении характеристики выбега, она представляется суммой некоторого количества (12–15) гармонических составляющих (ряд Фурье), а затем по аппроксимирующей функции вычисляются информативные параметры.

Амплитудные свойства характеристики выбега оцениваются следующими параметрами: амплитуды трех первых (по величине) локальных максимумов аппроксимирующей функции; амплитуды четырех первых гармонических составляющих аппроксимирующего разложения; основной максимум. Форма функции характеризуется такими параметрами: частота максимума функции; частоты трех первых максимумов аппроксимирующей функции; четырех первых гармонических составляющих аппроксимирующего разложения; коэффициент амплитуды; коэффициент асимметрии; коэффициент островершинности.

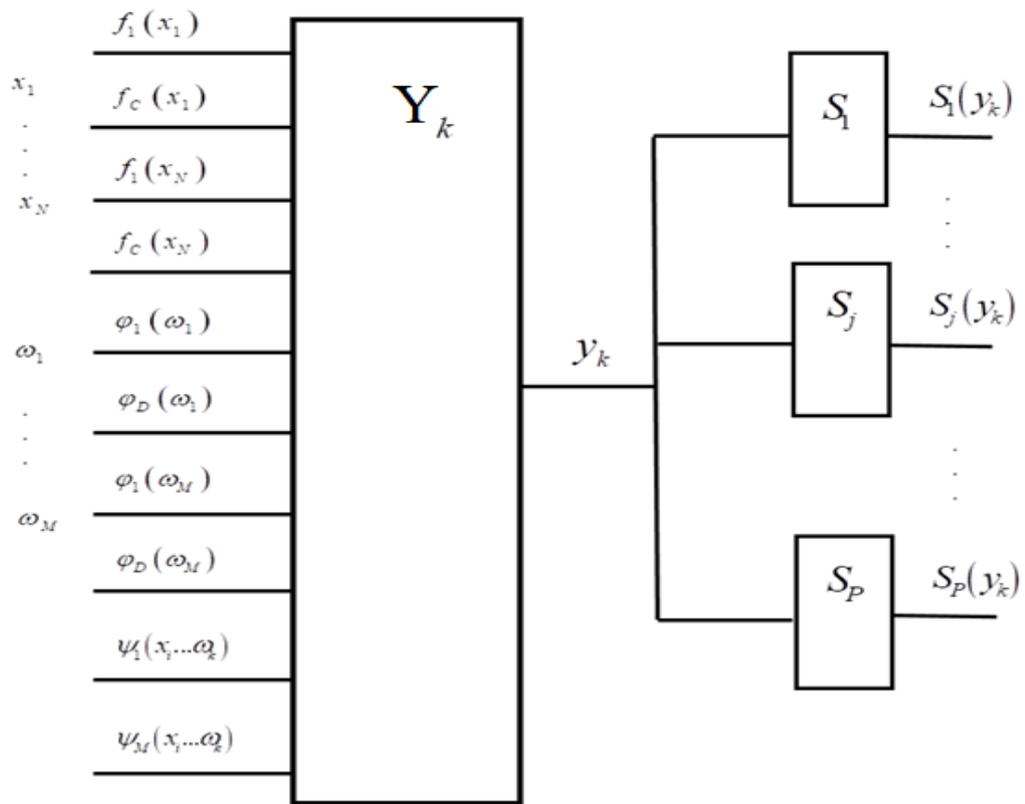
В качестве обобщающего параметра при сравнении характеристик выбега использовано нормированное расстояние по Манхеттену между ними. Значения обобщенных решающих функций по амплитудным параметрам и по параметрам формы определяются как взвешенные суммы решающих функций по отдельным параметрам. Результатом сравнения характеристик пуска-выбега является один из следующих выводов: «очень похожи»; «похожи, но есть и отличия»; «существенно отличаются»; «сильно отличаются»; «совершенно не похожи» и значения решающих функций. Для проведения сравнительного анализа вибрационных характеристик пуска-выбега разработано специальное программное средство.

В **седьмой главе** рассмотрены вопросы автоматизации принятия решений о состоянии контролируемого или наблюдаемого объекта на основе результатов обработки вибрационных сигналов.

Чтобы выполнять оценку состояния наблюдаемого объекта, требуется некая система принятия решений или поддержки принятия решений. Предложена модель базового решающего элемента (БРЭ) системы принятия решений по оценке состояния контролируемого (наблюдаемого) объекта и выработке управляющих воздействий на данный объект или рекомендаций техническому персоналу (рисунок 6).

Входными данными БРЭ являются: значения параметров  $x_i$ ,  $i = 1 \dots N$ ; характеристики  $\omega_j(y_{j,1}, \dots, y_{j,k})$  при дискретных значениях аргумента  $y_j$  ( $k$  – количество дискретных значений),  $j = 1 \dots M$ ; характеристики  $\omega_j(y_j(t))$  при непрерывном значении аргумента  $y_j$ ,  $j = 1 \dots M$ . По отношению ко входным исходным параметрам и характеристикам применяются функции первичной обработки:  $f_l(x_i)$ , где  $l = 1 \dots B$ ; и  $\varphi_m(\omega_j)$ , где  $m = 1 \dots C$ . Причем разные функции  $f_l(\cdot)$  могут применяться по отношению к одному и тому же параметру  $x_i$ , а разные функции  $\varphi_m(\cdot)$  – к одной и той же характеристике  $\omega_j$ . Также применяются функции с многими аргументами, среди которых могут быть и параметры, и характеристики:

$\psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_p, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_q)$ , где  $n = 1 \dots D$ ;  $i, j, p \in 1 \dots N$ ;  $l, m, q \in 1 \dots M$ .



**Рисунок 6 – Модель базового элемента принятия решений по оценке состояния наблюдаемого объекта**

Результаты функций  $f_l(x_i)$ ,  $\varphi_m(\omega_j)$ ,  $\psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_p, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_q)$  являются аргументами обобщающих функций обработки:

$$y_k = Y_k \left[ f_l(x_i), l = 1 \dots B; \varphi_m(\omega_j), m = 1 \dots C; \psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_p, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_q), n = 1 \dots D \right]; k = 1 \dots L.$$

По отношению к  $y_k$  применяются разнообразные решающие функции:  $S_\eta(y_k)$ ,  $\eta = 1 \dots P$ , определяемые типом задач и принимаемых решений.

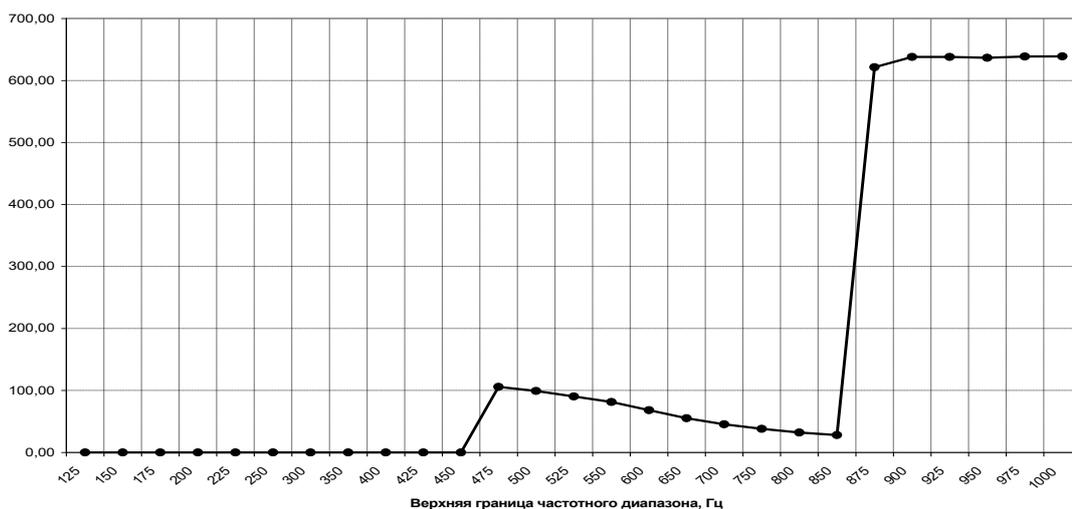
Результат функции  $S_\eta(y_k)$  определяет или одно из возможных состояний анализируемого объекта, или тип самого объекта, или принимаемое решение.

Приведены примеры применения БРЭ для системы принятия решений в автоматике защитного отключения турбоагрегата по параметрам вибрации для ИВК «Лукомль», введенных в промышленную эксплуатацию. На основе БРЭ формализован сравнительный анализ вибрационных характеристик пуска-выбега.

В **восьмой главе** приведены результаты экспериментальных исследований по выбору режимов максимального нагружения при усталостных испытаниях балок на вибрационные воздействия. Их целью являлась проверка гипотезы о возможности воспроизведения режима максимального нагружения объекта испытаний путем выбора определенной ширины частотного диапазона, в котором формируется полигармоническое или случайное воздействие с равномерным спектром.

Системы испытаний на вибрационные воздействия «АСУВ-010» обеспечивают контроль и поддержание вибрации в единицах виброускорения, поэтому для обеспечения формирования воздействий со спектром, равномерным по виброперемещению или виброскорости, получены соответствующие формулы перехода.

Известным и достоверным критерием степени опасности вибронагружения, кроме времени до разрушения, является формула Райса. В соответствии с этой формулой тяжелейшему режиму вибронагружения соответствует максимум средней виброскорости и минимум среднего напряжения, которое для консольной балки пропорционально перемещению.



**Рисунок 7 – Изменение количества положительных выбросов вибрационного сигнала, превышающих уровень 7 мкм, в точке контроля при испытаниях балки из стали (спектр вибровозбуждения равномерный по виброперемещению, в расширяющейся частотной полосе от 100 Гц и выше, ось абсцисс в Гц)**

Экспериментальные исследования показывают, что при испытаниях образцов материалов, изготовленных в виде балок, можно с учетом значений их собственных частот выбрать такую ширину спектра задающего воздействия, при которой будет обеспечено максимальное вибрационное нагружение объекта испытаний. Вибрационное воздействие со спектром, равномерным для единиц виброперемещения, обеспечивает максимальное нагружение (рисунок 7), определяемое количеством пересечений вибрационного сигнала, отражающего колебания испытываемого объекта, определенного уровня.

Скачки количества положительных выбросов вибросигнала наблюдаются при захвате частотной полосой вибрационного воздействия очередной собственной частоты балки. Разработана методика выбора параметров для режима максимального нагружения при вибрационных испытаниях консольно закрепленных балок.

В **девятой главе** рассмотрены вопросы разработки программного обеспечения компьютерных ИВК вибрационного контроля, мониторинга, диагностики; анализа и обработки вибрационных сигналов, а также метрологическое обеспечение ИВК и вопросы введения их в промышленную эксплуатацию.

При проектировании и разработке программного обеспечения ИВК приме-

нялись смешанные методы проектирования с преобладанием нисходящего проектирования и расширения ядра. Определены группы функций, используемых при программировании: обеспечение пользовательского интерфейса; управление аппаратными средствами; работа с файловой системой; обработка, вычисления и преобразования исходных вибрационных сигналов; логический анализ результатов и принятие решений; вывод результатов. Для обеспечения взаимодействия функций в ходе выполнения применяется сцепление по данным, по образцу, по общей области, по управлению или путем их комбинаций.

Основным объектом разработки является функциональная программа ИВК серии «Лукомль». Она обеспечивает проведение вибрационного контроля с измерением амплитудных и фазовых параметров и выполняет следующие основные действия: получение конкретных численных значений параметров вибрационного состояния турбоагрегата; выявление факта возникновения определенных информативно-значимых и аварийно-идентифицируемых ситуаций и выдачу информативных сообщений; непрерывное отображение (рисунк 8) и сохранение получае-



Рисунк 8 – Отображение результатов вибрационного контроля

мых результатов (получение трендов во времени), сбор и сохранение дополнительной информации о вибросигнале; построение динамической модели вибрационного состояния валопровода; формирование сигналов, выдаваемых на внешнее устройство управления устройствами сигнализации и защиты. Разработаны структура программы, алгоритмы, детализированы функции, написанные на языках программирования Си и Ассемблер, что обеспечивает минимальную зависимость от операционной системы.

Разработана программа, предназначенная для вторичной обработки результатов вибрационного контроля, которые получены ИВК «Лукомль». Программа позволяет проводить анализ таких данных как параллельно с работой комплекса, при его работе в сетевом варианте реализации, так и обрабатывать уже существующие данные, а также формировать данные для передачи в другие подсистемы АСУ ТП. Ее отличительной особенностью является обработка данных для режимов пуска и выбега турбоагрегата.

Разработана программа для анализа и обработки длинных реализаций вибрационных сигналов, полученных в ходе обследования вибрационного со-

стояния механизмов и агрегатов с помощью ИВК «Тембр» и «Тембр-М». Задача, решаемая данной программой, относится к классу цифровой обработки сигналов (ЦОС), в ходе которой выполняются такие функции, как удаление постоянной составляющей и низкочастотного дрейфа из исходного сигнала; интегрирование и двойное интегрирование сигнала; вычисление амплитудного и полового амплитудного спектра вибросигнала; цифровая низкочастотная и высокочастотная фильтрация; вейвлет – анализ вибросигнала; разложение сигнала на периодическую и шумоподобную составляющие; выделение огибающей сигнала; обработка сигнала с изменяющейся основной частотой; разложение сигнала на моды (преобразование Гильберта – Хуанга); построение временных трендов вычисленных параметров; вычисление гистограммы распределения параметров временных трендов и параметров тренда (минимальное, максимальное, среднее значения и СКЗ разброса параметра тренда).

Разработка ИВК заканчивается его метрологической аттестацией, целью которой является определение достигнутых погрешностей измерения параметров вибрации. Основным точностным параметром ИВК является предел основной относительной погрешность измерения амплитуды (СКЗ) вибросигналов в рабочем диапазоне амплитуд и частот. Для его определения на входы ИВК подаются образцовые сигналы, соответствующие определенным значениям частоты и амплитуды, а затем находится разность между этими значениями и результатами, вычисленными ИВК. Приведены выражения для пересчета значений параметров вибрации в единицах виброускорения и виброскорости в соответствующие параметры входных электрических сигналов.

Для подтверждения работоспособности ИВК проводятся их ежегодные поверки, основной целью которых является подтверждение метрологических характеристик. Разработаны и зарегистрированы в органах стандартизации методики метрологической аттестации и поверки для разработанных ИВК и виброизмерительных приборов.

Перед вводом ИВК в промышленную эксплуатацию на протяжении 2–12 месяцев проводится его опытная эксплуатация с целью определения функциональной надежности и достоверности работы комплекса. После ее завершения выполняется анализ результатов, полученных в ходе работы комплекса, и замечаний эксплуатационного персонала. Затем проводятся мероприятия по устранению выявленных недостатков и замечаний и принимается решения о вводе комплекса в промышленную эксплуатацию.

В **десятой главе** рассмотрено применение методов ЦОС, апробированных при анализе вибросигналов, для исследования электроэнцефалограмм (ЭЭГ), как одного из новых и перспективных направлений междисциплинарных исследований и разработок.

Исследованы особенности изменения амплитудных спектров сигналов ЭЭГ при изменении частотного разрешения спектрального анализа. Предложен способ обработки и определения параметров и характеристик ЭЭГ, основанный на их частотно-временной декомпозиции и анализе временных трендов их параметров в отдельных частотных полосах. Проведенные исследования сигналов ЭЭГ показали,

что изменение частотного разрешения спектрального анализа приводит к изменению структуры их амплитудных спектров, что свидетельствует о случайном характере сигналов ЭЭГ, однако можно выбрать временной интервал для определения параметров ЭЭГ, при котором (или более длительном) временной тренд параметров приобретает плавный характер изменения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методология современного научного направления «Измерительно-вычислительные комплексы и компьютерные системы цифровой обработки сигналов». Предложены структуры ИВК виброконтроля на базе типовых элементов компьютерной техники. Функциональность ИВК определяется разработанным математическим и прикладным программным обеспечением. Такой подход снижает затраты на разработку, производство, модификацию и эксплуатацию комплексов. Обеспечивается многофункциональность и быстрая настройка ИВК под тип контролируемого оборудования. В процессе эксплуатации ИВК сохраняются временные тренды вычисленных параметров вибрационных сигналов и информативно-значимые исходные вибрационные сигналы, образуя большие данные [3–А; 4–А; 20–А; 23–А; 25–А; 28–А; 30–А; 40–А; 56–А; 59–А; 67–А; 73–А; 80–А; 85–А; 91–А; 92–А; 101–А; 114–А; 115–А; 122–А; 123–А].

2. Разработаны методы, алгоритмы, программные средства обработки вибрационных сигналов при решении в реальном масштабе времени задач вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния, автоматизации защиты механизмов и агрегатов с вращательным движением, обеспечивающие требуемые стандартами и ПТЭ значения погрешностей вычисляемых параметров вибросигналов в условиях промышленной эксплуатации. 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 алгоритм БПФ для спектрального анализа вибрации при произвольном значении частоты вращения [2–А; 3–А; 5–А; 6–А; 7–А; 14–А; 20–А; 42–А; 49–А; 53–А; 57–А; 58–А; 61–А; 64–А; 86–А; 93–А; 100–А; 103–А].

3. Разработан метод удаления в реальном масштабе времени низкочастотного дрейфа исходного сигнала, представленного в единицах виброускорения, позволяющий минимизировать погрешности при его интегрировании и вычислении амплитудного спектра в единицах виброскорости, что важно при решении задач предупредительной сигнализации и защитного отключения. Разработаны алгоритмы определения параметров и характеристик вибрационных сигналов с изменяющейся частотой вращения валов и роторов, вычисления огибающей вибросигнала и ее параметров, построения полосового спектра, кепстрального анализа вибрационных сигналов. Данные, получаемые в результате выполнения программных средств, реализующих эти алгоритмы, используются в дальнейшем при оценке состояния контролируемых и наблюдаемых производственных объектов [2–А;

13–А; 47–А; 50–А; 63–А; 66–А; 69–А; 90–А; 97–А; 104–А; 105–А; 113–А].

4. Предложен программно реализованный способ представления вибрационных сигналов в виде декомпозиции периодической (квазипериодической) и шумоподобной компонент с последующим исследованием параметров каждой из составляющих. Периодическая вибрационная компонента обусловлена вращением валов и роторов. Обработывая шумоподобную составляющую вибрации, можно выявлять даже небольшие по амплитуде всплески и возмущения как проявление зарождающихся дефектов. Данный подход расширяет возможности оценки технического состояния объектов с вращательным движением по вибрационным параметрам [2–А; 21–А; 32–А; 34–А; 83–А; 87–А; 89–А; 100–А; 105–А].

5. Предложен способ формирования гауссовых вейвлетов и вейвлета Морле с заданной центральной частотой их АЧХ путем расчета длины вейвлетной функции для задач обработки и анализа вибрационных сигналов. Набор вейвлетных функций, которые своими частотными полосами перекрывают некоторый частотный диапазон, позволяет вычислять оценки ряда параметров (например, СКЗ) для этого частотного диапазона на основе значений этих же параметров, полученных после обработки составляющих вибросигналов, выделенных отдельными вейвлетами из набора [2–А; 26–А; 48–А; 51–А; 55–А; 76–А; 116–А].

6. Разработаны алгоритмы обработки затухающих сигналов, представляющих вибрационный отклик объекта на динамическое воздействие с целью определения значений собственных частот конструкций и декрементов затухания колебаний на этих частотах. На основе анализа изменения значений собственных частот и декрементов затухания колебаний можно делать выводы об изменении несущих свойств исследуемых конструкций с течением времени [3–А; 43–А; 44–А; 45–А; 46–А; 52–А; 77–А; 78–А; 81–А; 117–А; 118–А; 121–А].

7. Разработан способ аппроксимации временных трендов вибрационных параметров, получаемых стационарными компьютерными системами вибрационного контроля на переходных (пуски-выбеги) режимах работы механизмов и агрегатов с вращательным движением, который позволяет вычислить дополнительные промежуточные значения между экспериментальными значениями и обеспечить требуемый объем данных для построения вибрационных характеристик пуска или выбега с осью абсцисс, линейной по частоте. Предложен способ сравнительного анализа вибрационных характеристик пусков-выбегов с учетом параметров формы и амплитуды, позволяющий формулировать выводы об их подобии и, соответственно, об изменении состояния технического объекта. На протяжении промышленной эксплуатации ИВК «Лукомль» накоплен значительный объем характеристик пуска-выбега различных турбоагрегатов, в том числе и при возникновении аварийных ситуаций, что позволяет специалистам облегчить процедуры оценки их технического состояния [1–А; 11–А; 24–А; 27–А; 29–А; 41–А; 54–А; 71–А; 74–А; 94–А].

8. Предложена модель системы оценки технического состояния объектов по вибрационным параметрам на основе базового решающего элемента. Разработаны алгоритмы и программный модуль автоматического принятия решения о вибрационном состоянии контролируемого объекта и при необходимости формирова-

ния сигналов защитного отключения на базе стандартизованных или индивидуальных критериев. Разработаны методики проверки правильности функционирования данных алгоритмов в производственных условиях. Преимущество БРЭ заключается в возможности предварительной обработки и наблюдения в течение некоторого времени, определяемого требованиями технологических процессов и потребителями, за изменением параметров исследуемого объекта и только после этого принятия соответствующего решения, варианты которого формулируются на основе экспертных оценок и прецедентных данных [3-А; 8-А; 9-А; 10-А; 12-А; 16-А; 33-А; 35-А; 36-А; 38-А; 39-А; 68-А; 70-А; 72-А; 75-А; 88-А; 90-А; 99-А; 106-А; 107-А; 108-А].

9. Проведены экспериментальные исследования и разработана методика определения параметров вибрационных воздействий, обеспечивающих максимальное нагружение балочных элементов, при проведении усталостных испытаний материалов. Полигармоническое или случайное вибрационное воздействие с равномерным спектром для единиц виброперемещения и шириной частотной полосы, захватывающей интересующие собственные частоты испытываемой балки, обеспечивает максимальное нагружение. Проведение усталостных испытаний материалов на максимальном нагружении позволяет сократить время испытаний и затраты на их проведение [3-А; 17-А; 18-А; 19-А; 22-А; 31-А; 79-А; 82-А; 84-А; 120-А].

10. Разработано программное обеспечение, обеспечивающее функциональность ИВК и выполнение исследовательских работ, реализующее перечисленные методы, способы, алгоритмы обработки цифровых сигналов. Разработаны методики определения метрологических характеристик ИВК (метрологическая аттестация), предназначенных для измерения параметров вибрации. Для последующих проверок в течение длительной эксплуатации ИВК их метрологических характеристик на соответствие требованиям, определяемым стандартами и ПТЭ, разработаны методики поверки. [3-А; 15-А; 37-А; 60-А; 65-А; 102-А; 112-А; 124-А; 125-А; 126-А; 127-А; 128-А; 129-А; 130-А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработано математическое и программное обеспечение стационарных ИВК серии «Лукомль» различных модификаций для решения задач вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния, сигнализации и автоматической защиты энергетических турбоагрегатов. Более 30 ИВК данной серии введены в промышленную эксплуатацию на предприятиях энергетики Беларуси. Реализованы алгоритмы защиты турбоагрегатов по стандартизованным и индивидуальным вибрационным критериям. Данные ИВК обеспечивают выполнение функций вибрационного контроля в соответствии с требованиями соответствующих ГОСТ и ПТЭ. Комплексы могут интегрироваться в АСУ ТП предприятий (Акты внедрения).

2. Разработано математическое и программное обеспечение мобильного ИВК «Тембр», обеспечивающего регистрацию длинных реализаций вибрационных сигналов; вычисление их параметров; определение значений собственных ча-

стот и декрементов затухания колебаний на этих частотах конструкций зданий и сооружений по вибрационному отклику объекта исследования на динамическое воздействие. Два ИВК «Тембр» произведены по заказу НИИ ПБ и ЧС МЧС Республики Беларусь и переданы ему для эксплуатации. Разработана методика применения ИВК «Тембр» (Акт внедрения).

3. Разработано математическое и программное обеспечение для автоматизированных систем поверки виброизмерительных преобразователей и 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 «АСУВ-010», обеспечивающее управление при воспроизведении 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, Москва, Россия (Акт внедрения).

4. Предложен способ определения граничных значений параметров вибрации на основе экспериментальных данных для классификации производимых механизмов по качеству сборки. Данный способ апробирован при оценке качества сборки задних мостов автомобилей БелАЗ–7555 (Акт внедрения).

5. Разработано программное обеспечение для обработки временных трендов параметров вибрации, являющихся результатом работы ИВК «Лукомль», аппроксимации вибрационных характеристик пусков-выбегов, их сравнительного анализа, с учетом параметров формы и амплитуды, и формулировки выводов об их подобии, которые используются техническим персоналом предприятий при оценке состояния производственного оборудования (Акт внедрения).

6. Разработаны компьютерные программы многофункционального анализа и обработки длинных реализаций вибрационных и фазовых сигналов; построения трендов вычисленных параметров. Данные программы зарегистрированы в «Национальном центре интеллектуальной собственности» и используются при проведении научно-исследовательских и экспериментальных работ [124–А; 125–А; 126–А].

7. По контракту для Шаньдуньского университета (Китай) разработано специальное программное обеспечение для регистрации и обработки вибрационных сигналов [20–А; 26–А; 34–А].

8. Апробированные при исследованиях вибрационных сигналов способы ЦОС применены для анализа электроэнцефалограмм, что является перспективным развитием разработанного научного направления. Проведенные экспериментальные исследования позволяют определить группу информативно-значимых признаков для сравнительного анализ электроэнцефалограмм [37–А; 109–А; 110–А; 111–А].

9. Разработанные методы обработки цифровых сигналов и программные средства использованы в учебном процессе специальности «Программное обеспечение информационных технологий» при изучении предмета «Цифровая обработка сигналов» (Акты внедрения).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Монографии

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

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

### Статьи в научных изданиях, соответствующие требованиям п. 19

#### Положения о присвоении ученых степеней и присвоении ученых званий

4–А. Концептуальные основы системы вибробезопасности / В. Г. Кордуба, П. Ю. Бранцевич, Э. И. Кульков, С. Ф. Костюк, А. А. Писарев, Н.П. Шишков // Наука – энергетике. Сборник научных трудов. – Минск: АНК «ИТМО им. А. В. Лыкова» НАН Беларуси, 1999. – С. 61–65.

5–А. Бранцевич, П. Ю. Анализ погрешностей при вычислении фазовых параметров вибраций / П. Ю. Бранцевич // Наука – энергетике. Сборник научных трудов. – Минск: АНК «ИТМО им. А. В. Лыкова» НАН Беларуси, 1999. – С. 66–73.

6–А. Программные средства для оценки вибрационного состояния сложных технических объектов / П. Ю. Бранцевич, Э. И. Кульков, С. Ф. Костюк, А. А. Писарев, Н. П. Шишков // Наука – энергетике 1999–2000. Сборник научных трудов. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2001. – С. 72–81.

7–А. Бранцевич, П. Ю. Модели при определении параметров вибрационного процесса для нестационарного режима работы турбоагрегата / П. Ю. Бранцевич // Наука энергетике 1999–2000. Сборник научных трудов. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2001. – С. 82–88.

8–А. Бранцевич, П. Ю. Алгоритмы и программные средства системы оценки технического состояния механизмов по вибрационным параметрам / П. Ю. Бранцевич, С. В. Коростель, Д. В. Носко // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – № 1(13)/2. – С. 36–39.

9–А. Бранцевич, П. Ю. Модель системы диагностики технических объектов / П. Ю. Бранцевич, С. А. Гончарова // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – № 1(13)/2. – С. 33–36.

10–А. Бранцевич, П. Ю. Система оценки технического состояния механизмов по вибрационным параметрам / П. Ю. Бранцевич, И. А. Лукьянчук // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 1(15)/1'. – С. 18–21.

11–А. Бранцевич, П. Ю. Программная система обработки и анализа вибрационных характеристик выбега / П. Ю. Бранцевич, С. А. Гончарова // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – №1(15)/2. – С. 26–28.

12–А. Бранцевич, П. Ю. Способы задания решающих функций в системах поддержки принятия решений / П. Ю. Бранцевич, С. А. Гончарова // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 1(17)/1'. – С. 29–31.

13–А. Бранцевич, П. Ю. Функции, алгоритмы и программы измерительно-вычислительного комплекса для решения задач вибрационного контроля / П. Ю. Бранцевич, А. В. Карпиков // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 1(17)/2'. – С. 25–28.

14–А. Бранцевич, П. Ю. Способ определения амплитудно-фазовых параметров вибрации / П. Ю. Бранцевич, П. С. Мирончик // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 2(20)/1. – С. 66–69.

15–А. Бранцевич, П. Ю. Методические подходы и организация программных средств для обработки данных о вибрационном состоянии узлов большегрузных автомобилей / П. Ю. Бранцевич, Д. В. Носко // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 2(20)/1. – С. 69–71.

16–А. Бранцевич, П. Ю. Определение информативных признаков для системы поддержки принятия решений / П. Ю. Бранцевич, Д. В. Носко // Инженерный вестник. – 2006. – № 1(21)/3. – С. 166–168.

17–А. Ovchinnikov, I. Definition of the hardest condition of broadband random vibration / I. Ovchinnikov, V. Stepnev, P. Brancevich // 16-th International Congress on Sound and Vibration 2009 (ICSV16). – NY, USA, Curran Associates, Inc., 2010. – P. 4963–4969.

18–А. Ovchinnikov, I. N. Experimental determination of the hardest condition of the broadband random vibration / I. N. Ovchinnikov, V. A. Stepnev, P. J. Brancevich // 18-th International Congress on Sound and Vibration 2011 (ICSV 18). – NY, USA, Curran Associates, Inc., 2012. – P. 2310–2316.

19–А. Ovchinnikov, I. N. Authenticity of the equivalent vibration tests / I. N. Ovchinnikov, V.A. Stepnev, P. J. Brancevich // 19-th International Congress on Sound and Vibration 2012 (ICSV 19). – NY, USA, Curran Associates, Inc., 2013. – P. 727–733.

20–А. Brancevich, P. Organization of the vibration-based monitoring and diagnostics system for complex mechanical system / P. Brancevich, X. Miao, Y. Li // 20-th International Congress on Sound and Vibration 2013 (ICSV 20). – NY, USA, Curran Associates, Inc., 2014. – Vol. 1. – P. 612–619.

21–А. Brancevich, P. Emergency vibration situation analysis for rotor unit: a case study / P. Brancevich, Y. Li // 21-st International Congress on Sound and Vibration 2014 (ICSV 21). – NY, USA, Curran Associates, Inc., 2014. – Vol. 5. – P. 4122–4129.

22–А. Ovchinnikov, I. Experimental determination of the hardest condition of broadband random vibration / I. Ovchinnikov, P. Brancevich // 21-st International Congress on Sound and Vibration 2014 (ICSV 21). – NY, USA, Curran Associates, Inc., 2014. – Vol. 5. – P. 4382–4389.

23–А. Бранцевич, П. Ю. Решение задач вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния механизмов и турбоагрегатов с помощью компьютерных комплексов / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Е. Н. Базылев // Доклады БГУИР. – 2015. – № 2 (88). – С. 148–152.

24–А. Бранцевич, П. Ю. Оценка технического состояния механизмов и турбоагрегатов с использованием вибрационных характеристик пуска-выбега / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев // Доклады БГУИР. – 2015. – № 2 (88). – С. 153–157.

25–А. Бранцевич, П. Ю. Компьютерный вибрационный мониторинг механизмов и турбоагрегатов / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Е. Н. Базылев // Доклады БГУИР. – 2015. – № 7 (93). – С. 5–10.

26–А. Brancevich, P. Assessment of mechanism vibration condition based on the intensity of vibration in the wavelet allocated frequency bands / P. Brancevich, Y. Li // 22-nd International Congress on Sound and Vibration 2015 (ICSV 22). – NY, USA, Curran Associates, Inc. 2015. – Vol. 5. – P. 3609–3616.

27–А. Бранцевич, П. Ю. Анализ вибрационных характеристик пусков и выбегов при оценке изменения вибрационного состояния турбоагрегатов / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 1. – С. 32–43.

28–А. Бранцевич, П. Ю. Большие данные в системах вибрационного контроля, мониторинга, диагностики / П. Ю. Бранцевич, Е.Н. Базылев // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 3. – С. 28–41.

29–А. Brancevich, P. Estimation of changing vibration conditions of complicated mechanisms using vibration characteristics of start-ups and run-downs / P. Brancevich, Y. Li // 23-rd International Congress on Sound and Vibration 2016 (ICSV 23). – NY, USA, Curran Associates, Inc., 2016. – P. 528–535.

30–А. Бранцевич, П. Ю. Организация и функционирование системы вибрационного контроля, мониторинга, диагностики / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев, С. Ф. Костюк // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2017. – № 2. – С. 18–32.

31–А. Ovchinnikov, I. Equivalent vibration tests / I. Ovchinnikov, P. Brancevich // Procedia Engineering. – Elsevier. – 2017. – Vol. 176. – P. 610–617.

32–А. Brancevich, P. Detection of vibration disturbances during the analysis of long realisations of vibration signals / P. Brancevich, Y. Li // 25-th International Congress on Sound and Vibration 2018 (ICSV 25). – NY, USA, Curran Associates, Inc., 2018. – P. 2736–2743.

33–А. Бранцевич, П. Ю. Организация системы поддержки принятия решений по оценке технического состояния и диагностированию роторных агрегатов по вибрационным параметрам / П. Ю. Бранцевич, В. А. Леванцевич, Д. В. Деменковец // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2021. – № 1. – С. 43–49.

34–А. Brancevich, P. Multifunctional analysis of long realizations of vibration signals / P. Brancevich, Y. Li // 27-th International Congress on Sound and Vibration 2021 (ICSV 27). – NY, USA: Curran Associates, Inc., 2021. – P. 3199–3206.

35–А. Бранцевич, П. Ю. Оценка состояния технических объектов по параметрам вибрационного сигнала / П. Ю. Бранцевич, Н. В. Лапицкая, В. А. Леванцевич, Д. В. Деменковец // Цифровая трансформация. – 2021. – № 2 (15). – С. 56–63.

36–А. Brancevich, P. Model of the decision-making system for assessment of the state of technical objects / P. Brancevich, Y. Li // 28th International Congress on Sound

and Vibration 2022 (ICSV28). – NY, USA: Curran Associates, Inc., 2023. – P. 1986–1992.

37–А. Бранцевич, П. Ю. Цифровая обработка электроэнцефалограмм / П. Ю. Бранцевич // Science and innovation. – Ташкент: LLC «Science and innovation», 2023. – Special Issue 3. – С. 930–934.

38–А. Brancevich, P. Assessment of the state of technical objects by the parameters of vibration signals and their trends / P. Brancevich, Y. Li // 29th International Congress on Sound and Vibration (ICSV29). – NY, USA: Curran Associates, Inc., 2023. – P. 3356–3363.

39–А. Brancevich, P. Y. Implementation of Decision-Making Systems Based on a Typical Decisive Element / P. Y. Brancevich // Doklady BGUIR. – 2023. – Vol. 21, – № 5. – С. 96–103.

#### **Статьи в научных изданиях**

40–А. Бранцевич, П. Ю. ИВК «Лукомль-2001» для вибрационного контроля / П. Ю. Бранцевич // Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 12 (69). – С. 19–21.

41–А. Бранцевич, П. Ю. Применение вибрационных характеристик выбега для оценки технического состояния турбоагрегатов / П. Ю. Бранцевич // Энергетика и ТЭК. – 2009. – № 12 (81). – С. 20–23.

42–А. Бранцевич, П. Ю. Применение цифровой обработки сигналов в системах вибрационного контроля / П. Ю. Бранцевич // Электроника инфо. – 2010. – № 1. – С. 36–38.

43–А. Бранцевич, П. Ю. Оценка технического состояния строительных конструкций по результатам анализа отклика на динамическое воздействие / П. Ю. Бранцевич, Е. В. Бобрук, Н. С. Щетько // Строительная наука и техника. – 2010. – № 3. – С. 52–58.

44–А. Бранцевич, П. Ю. Оценка технического состояния строительных конструкций по результатам анализа отклика на динамическое воздействие / П. Ю. Бранцевич, Е. В. Бобрук, Н. С. Щетько // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2010. – № 1(27). – С. 11–23.

45–А. Косицын, А. В. Экспериментальное определение дефектов в материале упругого тела / А. В. Косицын, И. И. Кислый, П. Ю. Бранцевич // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 2 (19). – С. 50–52.

46–А. Бранцевич, П. Ю. Анализ вибрационных сигналов, полученных при исследовании влияния механизмов с вращательным движением на колебания конструкций / П. Ю. Бранцевич, Е. В. Бобрук // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 1 (31). – С. 5–8.

47–А. Бранцевич, П. Ю. Способ анализа вибрационных сигналов при исследовании технического состояния механизмов / П. Ю. Бранцевич // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2012. – № 2-1. – С. 244–250.

48–А. Бранцевич, П. Ю. Анализ причин изменения вибрационного состояния агрегата роторного типа / П. Ю. Бранцевич // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. Ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А. А. Дюжев [и др.]. – 2013. – Вып.2. – С. 277–283.

49–А. Бранцевич, П. Ю. Применение примеров решений задач вибродиагностики при изучении алгоритмов цифровой обработки сигналов / П. Ю. Бранцевич, В. Э. Базаревский // Исследования наукограда. – 2013. – № 1 (3). – С. 49–55.

50–А. Бранцевич, П. Ю. Модели вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2013. – № 3. – С. 30–36.

51–А. Бранцевич, П. Ю. Применение вейвлетов при анализе вибрационного состояния механизмов и агрегатов / П. Ю. Бранцевич // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. Ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С. Н. Поддубко [и др.]. – 2014. – Вып.3. – С. 220–228.

52–А. Бранцевич, П. Ю. Методика применения измерительно-вычислительного комплекса «Тембр-М» при оценке вибрационного состояния механизмов и агрегатов / П. Ю. Бранцевич // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2014. – № 4. – С. 55–67.

53–А. Бранцевич, П. Ю. Модели вибрационных сигналов для механизмов с вращательным движением при изменении частоты вращения ротора / П. Ю. Бранцевич // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2015. – № 5-1. – С. 136–142.

54–А. Бранцевич, П. Ю. Анализ вибрационного состояния механизмов и агрегатов с использованием вибрационных характеристик пусков и выбегов / П. Ю. Бранцевич // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С. Н. Поддубко [и др.]. – 2015. – Вып. 4. – С. 270–275.

55–А. Бранцевич, П. Ю. Анализ вибрационных сигналов с использованием вейвлетов / П. Ю. Бранцевич // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2016. – № 6-1. – С. 80–86.

56–А. Бранцевич, П. Ю. Обработка больших массивов данных систем вибрационного мониторинга / П. Ю. Бранцевич // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2017. – № 7. – С. 121–126.

57–А. Бранцевич, П. Ю. Программная обработка вибрационных сигналов в системах поддержки принятия решений / П. Ю. Бранцевич // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2020. – № 8. – С. 52–58.

### **Материалы конференций**

58–А. Бранцевич, П. Ю. Алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной системы анализа вибрационного состояния роторных механизмов / П. Ю. Бранцевич // Компьютерный анализ данных и моделирование. Сборник научных статей международной конференции. – Минск: БГУ, 1995. – Т. 2, – С. 63–67.

59–А. Бранцевич, П. Ю. Контрольно-диагностическая система вибрационного состояния промышленного оборудования / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Н. П. Шишков // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления, 8-я НТК с участием зарубежных специалистов. – Москва: МГИЭМ, 1996. – Т. 2. – С. 312–313.

60–А. Бранцевич, П. Ю. Методологические аспекты организации и проведения периодических поверок виброизмерительных преобразователей ВДТ–131(231) системы ВВК–331 / П. Ю. Бранцевич // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. 8-я НТК с участием зарубежных специалистов. – М.: МГИЭМ, 1996. – Т. 2. – С. 408–409.

61–А. Бранцевич, П. Ю. Программно-алгоритмические средства вибрационного контроля сложных технических объектов / П. Ю. Бранцевич // Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях. Материалы 1-й международной конференции. – Минск: ИТК НАН Беларуси, 1998. – Т. 2. – С. 11–18.

62–А. Бранцевич, П. Ю. Распределенная обработка в измерительно-вычислительном комплексе / П. Ю. Бранцевич // Актуальные проблемы информатики: сб. трудов 6-й Международной научной конференции; под ред. А. Ф. Чернявского и В. В. Бобкова. – Минск: БГУ, 1998. – Ч. 1. – С. 5–11.

63–А. Бранцевич, П. Ю. Способ удаления низкочастотного дрейфа при обработке экспериментальных данных / П. Ю. Бранцевич // Актуальные проблемы информатики: сб. трудов 6-й Международной научной конференции; под ред. А. Ф. Чернявского и В. В. Бобкова. – Минск: БГУ, 1998. – Ч. 2. – С. 336–343.

64–А. Бранцевич, П. Ю. Алгоритмы определения амплитудных и фазовых параметров вибрации / П. Ю. Бранцевич // Международная научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в науке и производстве». Материалы конференции. – Минск: БГУИР-Медиум, 1998. – С. 219–222.

65–А. Бранцевич, П. Ю. Способы определения метрологических характеристик виброизмерительных каналов / П. Ю. Бранцевич // Международная научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в науке и производстве». Материалы конференции. – Минск: БГУИР-Медиум, 1998. – С. 215–216.

66–А. Бранцевич, П. Ю. Программно-алгоритмические средства в системах виброконтроля и вибродиагностики / П. Ю. Бранцевич // Современные методы цифровой обработки сигналов в системах измерения, контроля, диагностики и управления. Материалы 2-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БГУ, 1999. – С. 320–323.

67–А. Бранцевич, П. Ю. Измерительно-вычислительная система распределенного сбора и централизованной обработки виброметрических данных / П. Ю. Бранцевич // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Сборник материалов 12-й научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов; под ред. В. Н. Азарова. – М.: МГИЭМ, 2000. – С. 170–171.

68–А. Бранцевич, П. Ю. Система контроля и анализа технического состояния механизмов по вибрационным параметрам / П. Ю. Бранцевич // Интеллектуальные системы: труды четвертого международного симпозиума / МГТУ им. Н. Э. Баумана; под ред. К. А. Пупкова. – М.: РУСАКИ, 2000. – С. 244–247.

69–А. Бранцевич, П. Ю. Обработка виброметрических данных в сетевом контрольно-диагностическом комплексе / П. Ю. Бранцевич // Сетевые компью-

терные технологии: сб. трудов междунар. науч. конф.; под ред. М. К. Бузы, С. Д. Пашкеева. – Минск: БГУ, 2000. – С. 85–88.

70–А. Бранцевич, П. Ю. Критерии и алгоритмы оценки технического состояния сложных объектов в системе вибрационного контроля / П. Ю. Бранцевич // Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях. Материалы второй международной конференции. – Минск: ИТК НАН Беларуси, 2000. – Т.2. – С. 112–117.

71–А. Бранцевич, П. Ю. Алгоритмы сопоставительного анализа вибрационных характеристик выбега в системе поддержки принятия решений / П. Ю. Бранцевич // Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях. Доклады третьей международной конференции. – Минск: ИТК НАН Беларуси, 2002. – Т.1. – С. 191–196.

72–А. Бранцевич, П. Ю. Организация системы поддержки принятия решений по оценке технического состояния механизмов с вращательным движением / П. Ю. Бранцевич // Информационные системы и технологии (IST' 2002): материалы I Междунар. конф.; редкол.: А. Н. Курбацкий, А. Н. Дудин, И. В. Совпель [и др.]. – Минск: БГУ, 2002. – Ч. 1. – С.117–121.

73–А. Бранцевич, П. Ю., Организация и алгоритмы системы вибрационного контроля и оценки технического состояния турбоагрегатов по вибрационным параметрам / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Г. Г. Соболев // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций: сб. докл.; под общ. ред. А. В. Салимона. – М.: ОАО "ВТИ", 2003. – С. 25–30.

74–А. Бранцевич, П. Ю. Система поддержки принятия решений по оценке технического состояния турбоагрегатов на основе вибрационных характеристик выбега / П. Ю. Бранцевич // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций: сб. докл.; под общ. ред. А. В. Салимона. – М.: ОАО «ВТИ», 2005. – С. 115–121.

75–А. Бранцевич, П. Ю., Алгоритмы защиты по вибрации для детандергенераторного агрегата / П. Ю. Бранцевич, В. А. Гузов, И. Е. Ероховец, С. Ф. Костюк // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций: сб. докл.; под общ. ред. А. В. Салимона. – М.: ОАО «ВТИ», 2005. – С. 122–124.

76–А. Бранцевич, П. Ю., Применение усреднения во временной области и вейвлет-анализа для исследования вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич, В. А. Гузов // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций: сб. докл. – М.: ОАО «ВТИ». – 2007. – С. 58–66.

77–А. Бранцевич, П. Ю. Способ определения собственных частот строительных конструкций / П. Ю. Бранцевич, Е. В. Бобрук // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации: сб. материалов науч.-практ. конференции. – Гомель: ГИИ, 2008. – Ч. 1. – С. 211–217.

78–А. Бранцевич, П. Ю. Программно-алгоритмический способ построения математической модели вибрационного отклика конструкции на динамическое

воздействие / П. Ю. Бранцевич, О. С. Колчина // Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров: сб. материалов по итогам работы МНПК, Минск, 23–24 апреля 2008 г.: под общ. ред. проф. Н. А. Цырельчука. – Минск: МГВРК, 2008. – Ч. 2. – С. 13–14.

79–А. Овчинников, И. Н. Выбор режимов максимального нагружения при усталостных испытаниях материалов / И. Н. Овчинников, П. Ю. Бранцевич // Четвертый Белорусский космический конгресс: материалы конгресса. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2009. – Т. 1. – С. 42–46.

80–А. Бранцевич, П. Ю. Решение задач вибрационного контроля и диагностики механизмов и конструкций с использованием ИВК «Лукомль» и «Тембр» / П. Ю. Бранцевич, Е. В. Бобрук, С. Ф. Костюк, Н. В. Степанчук // Приборостроение–2010. Материалы 3-й Международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2010. – С. 36–38.

81–А. Бранцевич, П. Ю. Компьютерный анализ собственных частот и вибраций строительных конструкций / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Е. В. Бобрук // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сборник докладов VI Международной научно-практической конференции. Ред. кол.: Ю. С. Иванов [и др.]. – Минск, 2011. – С. 166–172.

82–А. Овчинников, И. Н. Вибрационные и усталостные испытания материалов на тяжелейшем режиме широкополосной случайной и полигармонической вибрации / И. Н. Овчинников, П. Ю. Бранцевич, В. А. Степнев // Пятый Белорусский космический конгресс: материалы конгресса. Минск, 25-27 октября 2011 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2011. – Т. 1. – С. 26–30.

83–А. Бранцевич, П. Ю. Применение разложения вибрационных сигналов на периодическую и шумоподобную составляющие при исследовании технического состояния механизмов с вращательным движением / П. Ю. Бранцевич, В. Э. Базаревский, С. Ф. Костюк // Механика 2011: сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике. Минск, 26–28 окт. 2011 г.: Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М. С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 2. – С. 27–31.

84–А. Бранцевич, П. Ю. Определение тяжелейшего режима нагружения при вибрационных испытаниях материалов / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, И. Н. Овчинников, В. А. Степнев // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. Ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А. А. Дюжев [и др.]. – 2012. – Вып. 1. – С. 304–305.

85–А. Бранцевич, П. Ю. Мониторинг вибрационного состояния сложных технических объектов / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 4-й международн. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 236 – 238.

86–А. Бранцевич, П. Ю. Применение разработок лаборатории вибродиагностических систем при изучении вопросов цифровой обработки сигналов / П. Ю. Бранцевич, В. Э. Базаревский // Информатизация образования – 2012: педа-

гогические основы разработки и использования электронных образовательных ресурсов: материалы междунар. науч. конф. – Минск: БГУ, 2012. – С. 44–48.

87–А. Бранцевич, П. Ю. Оценка технического состояния оборудования по вибрационным параметрам / П. Ю. Бранцевич // Academic science-problems and achievements. – North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2013. – P. 201–205.

88–А. Бранцевич, П. Ю. Организация интеллектуальной системы оценки технического состояния сложных механизмов / П. Ю. Бранцевич, И. Ли // Открытые информационные технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technology for Intelligent Systems (OSTIS–2013): материалы III междунар. науч.-техн. конф. Минск, 21–23 февраля 2013 года. – Минск: БГУИР, 2013. – С. 569–572.

89–А. Бранцевич, П. Ю. Методика применения программных средств обработки вибросигналов при оценке технического состояния механизмов и агрегатов / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Е. Н. Базылев, В. Э. Базаревский // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы второй междунар. науч.-практ. конф. 27–28 февраля 2013 г. Минск, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко» Беларус. гос. ун-та. – Минск: ОДО «Рейплац», 2013. – С. 102–103.

90–А. Бранцевич, П. Ю. Методика исследования вибросигналов при анализе причин изменения вибрационного состояния энергоагрегата. / П. Ю. Бранцевич // Topical areas of fundamental and applied research. – North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2013. – Vol. 1. – P. 111–116.

91–А. Бранцевич, П. Ю. Организация и опыт применения систем вибрационного мониторинга и защиты / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. науч. тр.; под ред. Н. П. Мигуна. – Минск: Институт прикладной физики НАН Беларуси, 2013. – С. 67–74.

92–А. Бранцевич, П. Ю. Компьютерные и интернет-технологии в системах вибрационного контроля, мониторинга, диагностики / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Е. Н. Базылев, В. Э. Базаревский // Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии=International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies: материалы междунар. научн. конгресса, Республика Беларусь. Минск, 4–7 нояб. 2013 г.; редкол.: С. В. Абламейко, В. В. Казаченок [и др.]. – Минск: БГУ, 2013. – С. 286–290.

93–А. Бранцевич, П. Ю. Исследование и анализ вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР. Минск, 18–19 марта 2014 года: материалы конф.; редкол. А. А. Кураев [и др.]. – Минск: БГУИР, 2014. – Ч. 2. – С. 268–269.

94–А. Бранцевич, П. Ю. Методика применения программных средств построения и обработки вибрационных характеристик выбега при оценке технического состояния механизмов роторного типа / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Е. Н. Базылев // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы третьей Междунар. науч.-практ. конф. 28–29 апр. 2015 г., Минск, НИУ «Ин-т приклад. физ. Проблем

им. А. Н. Севченко» Беларус. гос. ун-та); редкол.: В. И. Попечиц (гл. ред.), Ю. И. Дудчик, Н. И. Шугалей. – Минск: ОДО «Рейплац», 2015. – С. 145–147.

95–А. Бранцевич, П. Ю. Обработка длинных реализаций вибрационных сигналов и данных в системах оценки технического состояния сложных объектов / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев, С. Ф. Костюк // BIG DATA and Advanced Analytics. Использование BIG DATA для оптимизации бизнеса и информационных технологий: сборник материалов II междунар. науч.-практ. конф. Минск, 15–17 июня 2016 года; редкол.: М. П. Батура [и др.]. – Минск: БГУИР, 2016. – С. 119–126.

96–А. Бранцевич, П. Ю. Анализ длинных реализаций вибрационных сигналов в системах поддержки принятия решений по оценке технического состояния сложных механизмов / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев // Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии = International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies [Электронный ресурс]: материалы междунар. науч. конгресса. Минск, 24–27 окт. 2016 г.; редкол.: С. В. Абламейко (гл. ред.), В. В. Казаченок (зам. гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2016. – С. 925–929.

97–А. Бранцевич, П. Ю. Получение и анализ больших объемов виброметрических данных и сигналов / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев, С. Ф. Костюк // BIG DATA and Advanced Analytics: collection of materials of the third international scientific and practical conference. Minsk, Belarus, May 3–4, 2017; editorial board: M. Batura [etc.]. – Minsk: BSUIR, 2017. – С. 144–149.

98–А. Бранцевич, П. Ю. Обнаружение всплесков-возмущений на длинных реализациях вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев, С. Ф. Костюк // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы четвертой Междунар. науч.-практ. конф. 11–12 мая 2017 г. Минск, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко» Беларус. гос. ун-та; редкол.: В. И. Попечиц (гл. ред.), Ю. И. Дудчик, Г. А. Сенкевич. – Минск: ОДО «Рейплац», 2017. – С. 164–167.

99–А. Бранцевич, П. Ю. Оценка технического состояния механизмов на основе анализа длительных вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев, С. Ф. Костюк // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 418–423.

100–А. Бранцевич, П. Ю. Особенности применения алгоритмов цифровой обработки сигналов в системах вибрационного мониторинга и диагностики / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев, Е. С. Кулаковская, С. Ф. Костюк // Мониторинг техногенных и природных объектов: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф.; редкол.: Батура М. П. [и др.]. – Минск: БГУИР, 2017. – С. 12–32.

101–А. Бранцевич, П. Ю. Программное средство обработки длинных реализаций вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев, Е. С. Кулаковская // BIG DATA Advanced Analytics: collection of materials of the fourth

international scientific and practical conference. Minsk, Belarus, May 3–4, 2018; editorial board: M. Batura [etc.]. – Minsk: BSUIR, 2018. – С. 160–166.

102–А. Бранцевич, П. Ю. Использование преобразования Гильберта – Хуанга для локализации кратковременных возмущений вибросигналов / П. Ю. Бранцевич, Н. В. Лапицкая, В. А. Леванцевич // Информационные технологии и системы 2020 (ИТС 2020) = Information Technologies and Systems 2020 (ITS 2020): материалы международной научной конференции. Минск, 18 ноября 2020 г. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2020. – С. 157–158.

103–А. Бранцевич, П. Ю. Исследование характеристик вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы шестой Международной научно-практической конференции 20–21 мая 2021 г. Минск, НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета; редкол.: В. И. Попечиц (главный редактор)[и др.] – Минск: ОДО «Рейплац», 2021. – С. 119–121.

104–А. Бранцевич, П. Ю. Компьютерная обработка длинных реализаций вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. научных статей VII Междунар. науч.-практ. конф. Республика Беларусь, Минск 19–20 мая 2021 года; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2021, – С. 423–437.

105–А. Бранцевич, П. Ю. Анализ вибрационных сигналов при аварийно-опасной ситуации на детандере // Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС = Instrumentation and control systems for NPP and TPP: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Республика Беларусь, Минск 27–28 апреля 2021 года; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2021, – С. 164–170.

106–А. Бранцевич, П. Ю. Цифровая обработка вибрационных сигналов при оценке технического состояния турбинных агрегатов / П. Ю. Бранцевич, Н. В. Лапицкая // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД–2021): труды конференции (электронное издание), 20–22 октября 2021 г. – Санкт-Петербург: АО «ЦТСС», 2021. – С. 113–119.

107–А. Бранцевич, П. Ю. Принятие решений в задачах, связанных с обработкой вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. научных статей VIII Междунар. науч.-практ. конф. Республика Беларусь, Минск, 11–12 мая 2022 г.; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2022. – С. 440–449.

108–А. Бранцевич, П. Ю. Проектирование сети принятия решений для систем вибрационной диагностики и автоматики защиты / П. Ю. Бранцевич // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. 8-й Междунар. науч.-техн. конф.; редкол.: М.Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 49–56.

109–А. Бранцевич, П. Ю. Примеры цифровой обработки электроэнцефалограмм / П. Ю. Бранцевич // Медэлектроника–2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф. Республика Беларусь, Минск, 8–9 декабря 2022 года. – Минск: БГУИР, 2022. – С. 314–318.

110–А. Бранцевич, П. Ю. Сравнительный анализ электроэнцефалограмм / П. Ю. Бранцевич // BIG DATA и анализ высокого уровня = BIG DATA and Advanced Analytics: сб. науч. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1 (Республика Беларусь, Минск, 17–18 мая 2023 года) / редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2023. – С. 132–144.

111–А. Бранцевич, П. Ю. Информативные параметры электроэнцефалограмм / П. Ю. Бранцевич // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы седьмой Междунар. науч.-практ. конф. 18–19 мая 2031 г., Минск, М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко» Беларус. Гос. ун-та; редкол.: Ю. И. Дудчик (гл. ред.), И. М. Цикман, И. Н. Кольчевская. – Минск: ОДО «Рейплац», 2023. – С. 137–139.

#### Тезисы докладов

112–А. Бранцевич, П. Ю. Алгоритмическая и программная поддержка автоматизированной системы поверки виброизмерительных преобразователей / П. Ю. Бранцевич // Современные проблемы радиотехники, электроники и связи: тезисы докладов. – Минск: БГУИР, 1995. – Т. 2. – С. 349–350.

113–А. Бранцевич, П. Ю. Средства многофункциональной обработки для системы вибродиагностики механизмов с вращательным движением / П. Ю. Бранцевич // 7-я Белорусская математическая конференция. Тезисы докладов. – Минск: БГУ-ИМ АН Беларуси, 1996. – Ч. 3. – С. 172–173.

114–А. Бранцевич, П. Ю. Измерительно - вычислительный комплекс анализа вибрационного состояния турбоагрегатов. / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Н. П. Шишков, Н. Н. Скоробогатый // Проблемы вибрации и вибродиагностики энергетического оборудования: Тезисы докладов. – М.: ВТИ, 1999. – С. 59–60.

115–А. Brantsevitch, P. Multilayer monitoring system of vibration condition of rotor machinery / P. Brantsevitch, S. Kostjuk // Days of science and technologies of the Republic of Belarus in Vietnam. Theses of reports. – State committee for science and technologies of the Republic of Belarus, 2000. – P. 8–9.

116–А. Бранцевич, П. Ю. Применение вейвлет-анализа для исследования виброударных сигналов / П. Ю. Бранцевич, М. М. Жук, Д. В. Носко // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сборник тезисов докладов 4-й Международной науч.-практической конференции; ред. кол. Э. Р. Бариев [и др.]. – Минск, 2007. – Т. 1 – С. 186–188.

117–А. Бранцевич, П. Ю. Программно-алгоритмическое обеспечение ИВК «Тембр» / П. Ю. Бранцевич, М. М. Жук, Д. В. Носко // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сборник тезисов докладов 4-й Международной

научно-практической конференции; ред. кол. Э. Р. Бариев [и др.]. – Минск, 2007. – Т. 1 – С. 188–191.

118–А. Бранцевич, П. Ю. Обработка результатов динамических испытаний конструкций / П. Ю. Бранцевич, Е. В. Бобрук, Н. С. Щетько // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сборник тезисов докладов V Международной научно-практической конференции: ред. кол.: Э.Р. Бариев и др. – Минск, 2009, Т. 1. – С. 167–169.

119–А. Бранцевич, П. Ю. Методы и алгоритмы вибродиагностики, мониторинга, защиты по вибрационным параметрам и оценки технического состояния сложных механизмов с вращательным движением / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк // Россия-Беларусь-Сколково: единое инновационное пространство: тезисы междунар. науч. конф. (Минск, 19 сент. 2012 г.). – Минск: Беларус. навука, 2012. – С. 324–325.

120–А. Бранцевич, П. Ю. Разработка методологии и автоматизированной системы управления для вибрационных и усталостных испытаний на тяжелейшем режиме широкополосной случайной и полигармонической вибрации / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, И. Н. Овчинников, В. А. Степнев // Россия-Беларусь-Сколково: единое инновационное пространство: тезисы Междунар. науч. конф. (Минск, 19 сент. 2012 г.). – Минск: Беларус. навука, 2012. – С. 326–327.

121–А. Бранцевич, П. Ю. Методика применения компьютерного комплекса для исследования собственных частот и вибраций строительных конструкций / П. Ю. Бранцевич, Е. В. Бобрук // Седьмая Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в промышленности» (ИТ\*2012): тезисы докладов (30–31 октября 2012 года, Минск). – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2012. – С. 215–216.

### **Патенты на полезную модель**

122–А. Устройство для обработки вибрационных сигналов при динамических испытаниях конструкций и диагностике механизмов с вращательным движением: патент на полезную модель. 4050 Республика Беларусь / П. Ю. Бранцевич, И. Е. Ероховец, С. Ф. Костюк, Д. В. Носко, А. Н. Кудряшов, С. Г. Котов, А. И. Дедюля, М. М. Жук. – Опубл. 30.12.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 6. – С. 214.

123–А. Устройство для измерения параметров вибрации и защиты механизмов с вращательным движением: патент на полезную модель. 8654 Республика Беларусь. / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк. – Опубл. 30.10.2012. // Официальный бюллетень. Изобретения, полезные модели, промышленные образцы. – 2012. – № 5. – С. 230–231.

### **Зарегистрированные компьютерные программы**

124–А. Программа анализа и обработки вибрационных и фазовых сигналов: компьютерная программа. № 851 Республика Беларусь / П. Ю. Бранцевич,

Е. Н. Базылев. Национальный центр интеллектуальной собственности. Реестр зарегистрированных компьютерных программ: 15.01.2016.

125–А. Программа преобразования и многофункционального анализа длинных реализаций вибрационных сигналов: компьютерная программа. № 1051 Республика Беларусь / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев. Национальный центр интеллектуальной собственности. Реестр зарегистрированных компьютерных программ: 21.05.2018.

126–А. Программа обработки, многофункционального анализа длинных реализаций вибрационных сигналов и построения трендов вычисленных параметров Vibric-2020: компьютерная программа. № 1376 Республика Беларусь / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев. Национальный центр интеллектуальной собственности. Реестр зарегистрированных компьютерных программ: 31.12.2020.

### **Методики**

127–А. Контрольно-измерительный комплекс «Лукомль-2001». Программа и методика метрологической аттестации: ПМА 128-96 / П. Ю. Бранцевич. – Минск: Минский центр стандартизации и метрологии, 1996. – 47 с.

128–А. Измерительно-вычислительный комплекс «Лукомль-2004Д». Программа и методика метрологической аттестации: ПМА.МН 932-2004 / П. Ю. Бранцевич. – Минск: РУП БелГИМ, 2004. – 46 с.

129–А. Измерительно-вычислительный комплекс «Тембр». Программа и методика метрологической аттестации: МПА.МН 1322-2007 / П. Ю. Бранцевич. – Минск: РУП «БелГИМ», 2007. – 25 с.

130–А. Измерительно-вычислительный комплекс «Лукомль-2001(4)». Методика поверки: МРБ МП.МН 2238-2012 / П. Ю. Бранцевич. – Минск: РУП «БелГИМ», 2012. – 19 с.



## РЭЗІЮМЭ

Бранцэвіч Петр Юльянавіч

### **Матэматычнае і праграмнае забеспячэнне вымяральна-вылічальных комплексаў і аўтаматызаваных сістэм для вырашэння задач лічбавай апрацоўкі вібрацыйных сігналаў**

**Ключавыя словы:** праграма, сігнал, вібрацыя, лічбавая апрацоўка, вылічэнне, комплекс, сістэма

**Мэта працы:** распрацоўка матэматычнага і праграмнага забеспячэння для вымяральна-вылічальных комплексаў і аўтаматызаваных сістэм вібрацыйнага кантролю, маніторынгу, аўтаматыкі абароны, выпрабаванняў, прыняцця рашэнняў аб стане кантралюемых аб'ектаў, лічбавай апрацоўкі сігналаў.

**Метады даследавання:** матэматычны аналіз, лічбавая апрацоўка сігналаў, матэматычнае і праграмнае мадэляванне, тэорыя імавернасці, матэматычная статыстыка, тэорыя прыняцця рашэнняў.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацавана метадалогія пабудовы праграмна-кіруемых шматканальных вымяральна-вылічальных комплексаў, прызначаных для рашэння задач кантролю, маніторынгу, адзнакі стану і абароны тэхнічных аб'ектаў; распрацаваны метады і алгарытмы апрацоўкі вібрацыйных сігналаў, вызначэнні іх параметраў і характарыстык, якія забяспечваюць патрабаваныя дакладнасці ва ўмовах прамысловай эксплуатацыі; распрацаваны алгарытмы аўтаматычнага прыняцця рашэння аб вібрацыйным стане кантралюемага агрэгата па стандартызаваных і індывідуальных крытэрыях, якія дазваляюць ідэнтыфікаваць аварыйна-небяспечныя сітуацыі і папярэдзваць іх развіцце. Распрацавана матэматычнае забеспячэнне і праграмныя сродкі для аналізу і лічбавай апрацоўкі часовых трэндаў параметраў і доўгіх рэалізацый вібрацыйных сігналаў.

**Ступень выкарыстання:** распрацаваныя праграмна-кіруемыя комплексы і сістэмы ўведзены ў прамысловую эксплуатацыю на прадпрыемствах энергетыкі Рэспублікі Беларусь, выкарыстоўваюцца ў Навукова-даследчым інстытуце пажарнай бяспекі і праблем надзвычайных сітуацый. Выкананы кантракты па стварэнні навукова-тэхнічнай прадукцыі з Маскоўскім дзяржаўным тэхнічным універсітэтам ім. Н. Э. Баўмана, Расія, Шаньдуньскім універсітэтам, Кітай.

**Галіна прымянення:** энергетыка, прадпрыемствы нафтахіміі, машынабудавання, сістэмы аўтаматыкі прыняцця рашэнняў і кіравання, сістэмы выпрабаванняў, лічбавая апрацоўка сігналаў, навучальны працэс.

## РЕЗЮМЕ

Бранцевич Петр Юльянович

### **Математическое и программное обеспечение измерительно-вычислительных комплексов и автоматизированных систем для решения задач цифровой обработки вибрационных сигналов**

**Ключевые слова:** программа, сигнал, вибрация, цифровая обработка, вычисление, комплекс, система

**Цель работы:** разработка математического и программного обеспечения для измерительно-вычислительных комплексов и автоматизированных систем вибрационного контроля, мониторинга, автоматики защиты, испытаний, принятия решений о состоянии контролируемых объектов, цифровой обработки сигналов.

**Методы исследования:** математический анализ, цифровая обработка сигналов, математическое и программное моделирование, теория вероятностей, математическая статистика, теория принятия решений.

**Полученные результаты и их новизна:** разработана методология построения программно-управляемых многоканальных измерительно-вычислительных комплексов, предназначенных для решения задач контроля, мониторинга, оценки состояния и защиты технических объектов; разработаны методы и алгоритмы обработки вибрационных сигналов, определения их параметров и характеристик, обеспечивающие требуемые точности в условиях промышленной эксплуатации; разработаны алгоритмы автоматического принятия решения о вибрационном состоянии контролируемого агрегата по стандартизованным и индивидуальным критериям, позволяющие идентифицировать аварийно-опасные ситуации и предупредить их развитие. Разработано математическое обеспечение и программные средства для анализа и цифровой обработки временных трендов параметров и длинных реализаций вибрационных сигналов.

**Степень использования:** разработанные комплексы и системы введены в промышленную эксплуатацию на предприятиях энергетики Республики Беларусь, используются в Научно-исследовательском институте пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций. Выполнены контракты по созданию научно-технической продукции с Московским государственным техническим университетом им. Н. Э. Баумана, Россия, Шаньдунским университетом, Китай.

**Области применения:** энергетика, предприятия нефтехимии, машиностроения, системы автоматики принятия решений и управления, системы испытаний, цифровая обработка сигналов, учебный процесс.

## SUMMARY

Brancevich Peter

### **Mathematical and software for measuring and computing complexes and automated systems for solving problems digital vibration signal processing**

**Key words:** program, signal, vibration, digital processing, computing system

**Objective:** development of mathematical and software for measuring and computing systems and automated systems for vibration control, monitoring, automatic protection, testing, decision-making on the state of controlled objects, digital signal processing.

**Research methods:** mathematical analysis, digital signal processing, mathematical and software modeling, spectral analysis, probability theory, mathematical statistics, decision theory.

**Results and their novelty:** a methodology has been developed for constructing software-controlled multi-channel measuring and computing systems designed to solve problems of control, monitoring, condition assessment and protection of technical objects; methods and algorithms have been developed for processing vibration signals, determining their parameters and characteristics, verifying the required accuracy meet industrial conditions; algorithms have been developed for automatically making decisions about the vibration state of a controlled unit according to standardized and individual criteria, allowing one to identify emergency situations and prevent their development. Mathematical support and software have been developed for the analysis and digital processing of time trends of parameters and long-term observation of vibration signals.

**Efficiency:** the developed software-controlled complexes and systems have been put into commercial operation at energy enterprises of the Republic of Belarus, and are used at the Research Institute of Fire Safety and Emergency Problems. Contracts for the creation of scientific and technical products were completed with the Moscow State Technical University. N. E. Bauman, Russia, Shandong University, China.

**Field of application:** energy, petrochemical enterprises, mechanical engineering, automatic decision-making and control systems, testing systems, digital signal processing, educational process.

*Научное издание*

**Бранцевич Петр Юльянович**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ И  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

по специальности 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Подписано в печать 10.04.2024. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Опечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3.3. Уч. изд. л. 3.1. Тираж 60 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
«2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск.