

На правах рукописи



ЯБЛОКОВ АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ
ЗЕРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА БАЗЕ
НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДАННЫХ**

Специальность 2.3.3 — Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

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

Москва 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Московский государственный университет пищевых производств» (МГУПП)

Научный консультант:	Благовещенский Иван Германович доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника пищевых производств» ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств» (МГУПП)
Официальные оппоненты:	Красников Степан Альбертович доктор технических наук, доцент, профессор кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА — Российский технологический университет» Красуля Ольга Николаевна доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология хранения и переработки продуктов животноводства» ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева» Шкапов Павел Михайлович доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика», ФГБОУ ВО «Московский государственный Технический университет имени Н.Э. Баумана»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное научное учреждение « Федеральный научный Центр пищевых систем имени В.М. Горбатова » Российской Академии Наук

Защита состоится 07 октября 2022 г. в 10 час. 00 мин. на заседании Диссертационного совета 24.2.334.01 (Д 212.148.02) на базе ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств» по адресу: 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д.33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «МГУПП» и на сайте: <http://www.mgupp.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11.

Автореферат разослан ____ . _____ 2022 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета 24.2.334.01 (Д 212.148.02),

кандидат технических наук

Мокрушин С. А.

Актуальность темы

Зерноперерабатывающая отрасль России является системообразующей в задаче обеспечения населения страны продуктами питания. Элеваторное хозяйство обеспечивает предварительную очистку и долгосрочное хранение жизненно важного зернового сырья. Мукомольные и крупяные предприятия производят товарную продукцию для пищевых (в т.ч. хлебопекарных) предприятий и конечных потребителей. Комбикормовое производство является важнейшим звеном в цепочке обеспечения населения сырьём и продуктами питания животного происхождения.

Здания и помещения предприятий по хранению и переработке зерна имеют высокую категорию взрывопожарной и пожарной опасности (категория «Б» согласно СНиП 2.10.05-85). Источником возгорания горючей зерновой пыли может стать неисправное оборудование. Решение задачи повышения эксплуатационной надёжности, безопасности производства, снижения затрат на эксплуатацию технологических машин предприятий отрасли лежит в области разработки и внедрения автоматизированных систем мониторинга и технического диагностирования оборудования.

Четвёртая промышленная революция (Индустрия 4.0), как прогнозируемое событие, определяется как средство повышения эффективности и конкурентоспособности промышленных предприятий путём массового внедрения киберфизических систем в производственные процессы. Повышение вычислительной мощности и снижение стоимости микропроцессорной техники позволяет создавать доступные и информационно ёмкие стационарные системы сбора диагностической информации. Однако рост объёмов собранной информации требует использования новых математических методов её обработки и интерпретации. В этой связи перед разработчиками диагностических систем стоят задачи: повышение эффективности предобработки сигналов с целью увеличения соотношения «полезный сигнал/помеха», выделение из сигнала диагностических признаков и разработка методов классификации технических состояний объекта контроля по совокупности диагностических параметров.

Решение этих задач на новом технологическом уровне возможно на базе достижений науки в области ЦОС (цифровая образовательная среды) и методов машинного обучения. В последние годы во всех областях науки и техники наблюдается повышенный интерес к технологиям искусственного интеллекта, которые базируются на методах машинного обучения, в т.ч. на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС) различных архитектур. Теория и практика методов машинного обучения раскрыты в работах П. Домингоса, М. Харрисона, Х. Бринка, Д. Ричардса, М. Феверолфа, Н. Гифта, П. Флаха, С. Шумского, Р. Шамина и др. авторов.

Методы интеллектуального анализа данных с использованием мелких и глубоких искусственных нейронных сетей (ИНС) представлены в работах Т. М. Mitchell, L. A. Deng, А. Б. Барского, Е. В. Бодянского, О. Г. Руденко, С. Николенко, А. Кадурина, Е. Архангельской и др. Исследования эффективности применения методов искусственного интеллекта (ИИ) в задачах технического диагностирования промышленного оборудования представлены в работах М. Brundage, Т. Ademujimi, V. Prabhu, S. Zhang, S. Zhang, В. Wang, Д. М. Шпрехера, В. В. Грачёва, А. Д. Барта, Ю. Е. Кувайскова и др. Вопросам прогнозирования изменения технического объекта контроля посвящены работы L. A. Alrabady, М. Krupa, К. Javed, М. Koujok, В. Н. Клячкина, К. П. Голоскокова, В. И. Дубровина, Н. Х. Корецкого, А. В. Кожевникова, И. С. Илатовского, О. И. Соло-

вьёвой. Однако разработка интеллектуальных компонентов систем диагностики связана с рядом трудностей: необходимо совершенствовать методы обработки и анализа диагностической информации, проектирования диагностических признаков, не решены вопросы формирования обучающих выборок, проектирования эффективных архитектур ИНС, процедур обучения и тестирования нейросетей.

Исходя из вышеизложенного, тема диссертационного исследования — «Научно-практические основы создания автоматизированных систем технического мониторинга и диагностики оборудования зерноперерабатывающих предприятий на базе нейросетевых методов анализа данных» — является актуальной, отвечает вызову четвёртой промышленной революции, нацелена на повышение надёжности и эффективность технологического оборудования, имеет важное практическое значение и соответствует научно-техническим задачам специальности 2.3.3 — «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.3, а именно пунктам: 2. Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технологической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.; 4. Теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания АСУТП, АСУП, АСТПП и др.; 5. Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления; 8. Методы эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая базы и банки данных и методы их оптимизации; 13. Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др.; 14. Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.); 17. Разработка автоматизированных систем научных исследований; 19. Цифровизация управления в промышленности.

Объектами исследования являются технологические процессы и оборудование зерноперерабатывающих предприятий, автоматизированная система мониторинга и интеллектуальной диагностики технического состояния и эффективности работы оборудования.

Предметом исследования являются методы, процедуры, алгоритмы, техническое и программное обеспечение автоматизированной системы интеллектуальной диагностики технологических процессов и оборудования зерноперерабатывающих предприятий.

Целью исследования является повышение безопасности производства, надёжности и эффективности технологического оборудования зерноперерабатывающих предприятий путем научного обоснования и разработки автоматизированной системы мониторинга и диагностики оборудования на базе нейросетевых методов анализа данных.

Задачи исследований:

1. Провести системный анализ вопроса повышения надёжности, безопасной эксплуатации и совершенствования технического обслуживания оборудования зерноперерабатывающих предприятий. Проанализировать современные методы, средства и автоматизированные системы технического мониторинга и диагностики технологических машин.
2. Провести анализ современного уровня развития информационных технологий, методов сбора, передачи и хранения информации с точки зрения их применения для

разработки и создания автоматизированных систем технического мониторинга и диагностики нового поколения. Рассмотреть возможность применения методов машинного обучения, в т.ч. методов нейросетевого анализа данных для автоматизации процедур классификации, кластеризации и прогнозирования технических состояний.

3. Изучить современные методы цифровой обработки сигналов (ЦОС), измеренных с помощью датчиков физических величин, и рассмотреть возможность их применения для повышения соотношения «полезная информация / помеха» при формировании векторов диагностических признаков рассматриваемых неисправностей оборудования. Разработать методику формирования векторов, матриц и изображений диагностических признаков для их дальнейшего использования в нейросетевых классификаторах.
4. Изучить влияние неисправностей технологических машин на количественные и качественные показатели технологического процесса переработки зернового сырья.
5. На основе изучения и обобщения конструктивных особенностей зерноперерабатывающих машин, разработать несколько типов диагностических моделей в которых будет заложена возможность моделирования различных неисправностей машины и отклонений технологического процесса.
6. Методом математического моделирования с использованием разработанных диагностических моделей провести численные эксперименты и определить зависимости между техническим состоянием исследуемой машины, отклонениями технологического процесса и диагностическими параметрами, сопровождающими ее функционирование. На основании полученных зависимостей определить диагностические признаки неисправностей.
7. Создать автоматизированную экспериментальную установку для научных исследований зависимостей между техническим состоянием различных механизмов машин (зубчатых, ременных передач, муфт, подшипников и пр.) и их диагностическими признаками.
8. Разработать методы, алгоритмы и программное обеспечение для автоматизации процедур сбора, обработки (с использованием методов ЦОС) и статистического анализа измеренных с помощью датчиков сигналов. Создать программы для исследования диапазона возможностей применения методов нейросетевого анализа данных в задаче классификации технического состояния объекта контроля.
9. Исследовать эффективность работы полносвязных ИНС различных архитектур и алгоритмов обучения для классификации состояний по значениям амплитуд спектров виброускорения и виброскорости, спектра огибающей вибросигнала, спектров тока и звука. Исследовать эффективность работы глубоких СНС различных архитектур для классификации состояний по изображениям спектрограмм и вейвлет-скалограммам диагностических сигналов, выработать рекомендации по дальнейшему применению ИНС в задачах технического диагностирования.
10. Изучить возможности нейросетевых методов регрессионного анализа тренда диагностических признаков для их использования в задаче прогнозирования изменения технического состояния объекта контроля.
11. По результатам исследований разработать алгоритмы, программные и технические средства системы мониторинга и технического диагностирования оборудования.

12. Разработать концепцию построения распределенной системы технического мониторинга, диагностирования и прогнозирования технического состояния оборудования отрасли.
13. Провести апробацию разработанной системы технического мониторинга на промышленном оборудовании и оценить ее эффективность.

Научная новизна заключается в разработке научно-практических основ в области создания автоматизированных систем технического мониторинга, диагностики и прогнозирования технического состояния оборудования зерноперерабатывающих предприятий на базе систем автоматического сбора и интеллектуального анализа диагностической информации. Наиболее значимые результаты исследований представлены следующими положениями:

- определены зависимости между техническим состоянием технологических машин, диагностическими признаками неисправностей и качественными показателями технологических процессов измельчения и шелушения зернового сырья;
- выявлены структурные особенности технологических машин зерноперерабатывающих предприятий, согласно которым на базе законов классической механики и методов динамического моделирования механических систем разработано четыре типа диагностических моделей оборудования;
- в результате математического моделирования функционирования технологических машин (энтелейтора, молотковой дробилки, вентилятора, шелушителя, обочной машины, вальцового станка) установлены зависимости между кинематическими (зазоры в сопряжениях), динамическими (жесткость элементов, силы сопротивления, инерционные характеристики, внешние силы) и технологическими (расход и равномерность подачи продукта, характеристики рабочих органов, рабочие зазоры и пр.) отклонениями в работе оборудования и их диагностическими признаками – параметрами колебаний;
- разработаны новые методы классификации технических состояний зерноперерабатывающего оборудования по параметрам вибрации, потребляемого тока и излучаемого звука на базе методов нейросетевого анализа диагностических признаков с использованием мелких и глубоких ИНС;
- разработаны новые методы прогнозирования технического состояния оборудования по трендовым характеристикам диагностических признаков с использованием нейросетевых методов анализа временных рядов;
- созданы методологические основы и разработан новый класс автоматизированных распределенных систем сбора, обработки (на базе методов ЦОС), интеллектуального анализа (на базе методов ИНС) и удаленного доступа к диагностической информации для решения задач технического мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния оборудования зерноперерабатывающих предприятий.

Практическая значимость результатов исследования заключается в следующем:

- результаты теоретических и экспериментальных исследований получили практическую реализацию при разработке стационарной системы мониторинга технического состояния молотковой дробилки. Разработка защищена патентом RU 195763 на полезную модель;
- по результатам исследований технологической эффективности работы вальцового станка разработаны и защищены патентами РФ: устройство подачи продукта в

вальцовый станок (Патент RU 2135287); привод вальцового станка с пониженным уровнем вибрации (Патент RU 2176549); мукомольный валец повышенной жёсткости (Патент RU 2366506); размольный узел вальцового станка с устройством стабилизации рабочего зазора (Патент RU 148345);

- по результатам исследований виброактивности молотковой дробилки разработана система виброизоляции ротора дробилки (Патент RU 150 282);
- разработана автоматизированная система научных исследований методов технической диагностики технологических машин по параметрам вибрации, потребляемого тока и излучаемого звука на базе АЦП Е-440 и комплекса специально разработанных на языке Matlab программ для автоматизации процедур сбора, цифровой обработки и анализа диагностических сигналов, формирования обучающих и тестовых выборок для обучения ИНС и решения задач классификации (Свидетельства ПрЭВМ № 2020660665 и № 2020614100), в т.ч. для акустической диагностики оборудования по вейвлет-скалограмме излучаемого звука с использованием свёрточной нейронной сети (Свидетельство ПрЭВМ № 2021661786);
- разработан и создан опытный образец комбинированного датчика вибрации и температуры ДВТ-8g для системы мониторинга; разработаны и получены свидетельства о государственной регистрации (Свидетельство ПрЭВМ № 2020619541) микропрограммы для МК dsPIC30F6012 цифрового датчика ДВТ-8g;
- разработана конструкторская документация и создан опытный образец прибора сбора и первичной обработки диагностической информации СТМ-12Т, который является базовым прибором распределённой системы мониторинга и диагностики;
- разработана, создана и прошла апробацию распределённая система мониторинга и технической диагностики оборудования, которая обеспечивает удалённый сбор, хранение, анализ и отображение диагностической информации с использованием облачных технологий и технологий удалённого доступа посредством сети Internet;
- разработаны архитектуры и обучены на распознавание механических дефектов оборудования ИНС прямого распространения и свёрточного типов;
- результаты исследований используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям 15.03.02 и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств при проведении практических занятий и лабораторных работ», а также при выполнении выпускных работ, курсовых проектов и магистерских диссертаций.

Значение для теории. Научным результатом является развитие теории и практики создания диагностических математических моделей оборудования на базе законов классической механики, позволяющих устанавливать зависимости между отклонениями в работе машин и их диагностическими признаками — параметрами колебаний. Предложена методология разработки автоматизированных систем диагностики технического состояния оборудования зерноперерабатывающих предприятий на основе автоматизации процедур сбора, передачи, хранения и анализа диагностических показателей работы машин с использованием нейросетевых технологий классификации и прогнозирования технического состояния оборудования.

Предложен методологический подход к решению задачи прогнозирования изменения технического состояния объекта контроля на базе методов нейросетевого прогнозирования временных рядов значений диагностического признака.

На защиту выносятся теоретические и методологические положения создания интеллектуальных систем мониторинга и диагностики оборудования зерноперерабатывающих предприятий, в т.ч.:

- зависимости между техническим состоянием оборудования, их диагностическими признаками и показателями эффективности технологических процессов;
- четыре типа обобщённых диагностических моделей, соответствующих типовым компоновкам технологических машин зерноперерабатывающих предприятий с учётом особенностей возбуждения колебаний при наличии типовых неисправностей оборудования: дисбаланс ротора; дефекты подшипников, муфт, механических передач, монтажа; отклонений показателей технологического процесса;
- методы и программное обеспечение диагностического моделирования технологических машин, позволяющие определять диагностические признаки оборудования и формировать обучающие выборки для машинного обучения;
- методы и программное обеспечение математической обработки сигналов с целью выделения информативных признаков с низким уровнем помех;
- методика определения технического состояния оборудования методом спектрального анализа сигналов с датчиков вибрации, тока, звука с использованием нейронных сетей прямого распространения;
- методика определения технического состояния оборудования методом анализа изображений временных преобразований (оконное ПФ, вейвлет-преобразование) сигналов с различных датчиков с использованием свёрточных нейронных сетей;
- методика прогнозирования изменения технического состояния оборудования по трендам значений диагностических признаков с применением ИНС;
- методические основы создания распределённой системы технического мониторинга и диагностики оборудования зерноперерабатывающего производства;
- аппаратное и программное решение средства системы мониторинга — прибор сбора и предварительного анализа данных СТМ-12Т;
- архитектура специализированной БД для хранения разнородной по структуре собранной диагностической информации с интерфейсом удалённого доступа к БД системы мониторинга.

Методологические и теоретические основы исследования.

И. А. Биргер, М. Д. Генкин, А. В. Мозгалевский, Б. В. Павлов, К. Н. Явленский и А. К. Явленский и другие учёные создали научно-методологическую базу для разработки и применения методов и средств с целью решения прикладных задач диагностирования, определения дефектов на различных этапах жизненного цикла изделия.

Существенный вклад в развитие теоретических и практических методов вибрационного диагностирования внесли отечественные учёные: И. И. Артоболевский, Ф. Я. Балицкий, М. Д. Генкин, А. Г. Соколова, Б. Л. Герике, Н. А. Баркова и др.

Различные физические методы технической диагностики технологического оборудования мукомольных заводов рассмотрены в работах В. В. Старостина, А. Т. Птушкина, В. И. Денисова, М. У. Кацнельсона, М. Д. Руба, А. Е. Яблокова, Л. А. Глебова, С. В. Зверева.

Научно-методологические основы создания и совершенствования технологических линий пищевых производств внёс академик В. А. Панфилов.

Вопросами диагностического моделирования механических систем занимались И. И. Артоболевский, Ф. Я. Балицкий, Ю. Г. Баринов, М. Д. Генкин, М. М. Гернет.

Большой вклад в работу по тематике комплексной автоматизации пищевой промышленности внесли М. М. Благовещенская, И.Г. Благовещенский, Е. Б. Карпин, А. Я. Красинский, А. Е. Краснов, К. С. Мышенков, С.В. Николаева, О. А. Новицкий, В. О. Новицкий, Н. В. Остапчук, А. Т. Птушкин, С. А. Красников и многие другие.

Методы и средства исследования. В работе использовались теоретические и эмпирические методы исследования. Теоретические методы основаны на принципах системного анализа и математического моделирования, методах машинного обучения и искусственных нейронных сетей, методах математической статистики. Диагностические модели оборудования построены на законах классической механики и представлены в виде дифференциальных систем уравнений динамики, которые получены с помощью уравнений Лагранжа 2-го рода. Компьютерное 3D-моделирование оборудования проводилось в системе SolidWorks, обработка сигналов, статистический анализ данных и математическое моделирование проводилось с использованием пакета Matlab.

Эмпирические методы реализованы путём проведения натуральных экспериментов на экспериментальных установках и промышленном оборудовании. Измерение физических величин, сопровождающих работу объекта контроля, осуществлялось с помощью датчиков вибрации, оборотов, тока, измерительного микрофона. В качестве системы сбора и предварительной обработки измеренной информации использовался 24-битный АЦП с прикладным программным обеспечением «LGraph2». Математическая обработка и анализ измеренных диагностических сигналов проводилась с применением системы Matlab.

При создании электронных схем и программного обеспечения разработанного микропроцессорного измерительного прибора диагностики СТМ-12Т использовались программы Proteus, MikroC, Microchip, Microsoft Visual Studio.

Апробация работы. На различных этапах выполнения научной работы результаты исследований и диссертация в целом были доложены и получили одобрение на расширенных заседаниях кафедр «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами», «Прикладная механика и инжиниринг технических систем», «Информатика и вычислительная техника пищевых производств» ФГБОУ ВО «МГУПП». Основные положения диссертационной работы были доложены и одобрены на всероссийских и международных научно-практических конференциях, в т.ч. на VI Международной НП конференции «Вопросы науки: современные технологии и технический прогресс» (г. Воронеж, 2015 г.), II Международной НП конференции «Фабрика будущего» (г. Москва, 2020 г.), Международной НП конференции «Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса» (г. Пенза, 2021), Международном НТК «Лучший исследовательский проект — 2021» (г. Петрозаводск, 2021), IV Международной НП конференции «Фабрика будущего» (г. Москва, 2022 г.г.). Результаты научных исследований внедрены на предприятиях: ООО «Эрман», ООО «Русское поле», ООО «Эркан», ООО «Северный лес», ООО «Пачелмское хозяйство» ОП «Пачелмское».

Часть диссертационной работы выполнялась в рамках НИР «Разработка интеллектуальной системы технического мониторинга и диагностики оборудования отрасли», выполняемой в рамках конкурса научных грантов ФГБОУ ВО «МГУПП».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 109 печатных работ, в т.ч. один учебник, 3 учебно-методических пособия, 2 монографии, 26 статей в журналах, входящих в список ВАК, 22 — в прочих изданиях, опубликовано 48 докладов на

научных конференциях, получено 6 патентов на изобретения и полезные модели, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения и списка используемой литературы (212 источников). Работа изложена на 378 страницах машинописного текста, в т.ч. 331 страниц основного текста, содержит 177 рисунков, 31 таблицу и 7 актов внедрения научно-исследовательских работ.

Личный вклад соискателя. Диссертационная работа является обобщением научных исследований, проведенных автором в 2002-2022 гг. Личный вклад заключается в формулировке задач исследования, разработке проблемы в целом, в выполнении теоретических и экспериментальных исследований и анализе их результатов. Автору принадлежит формулировка выводов, положений и закономерностей, описанных в диссертации. В совместных работах личный вклад автора состоит в полной или частичной разработке основных положений работ, анализе результатов, формулировании выводов.

Краткое содержание работы. Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость результатов исследований, а также основные научные положения, выносимые на защиту; дана оценка достоверности полученных результатов.

В первой главе приведён анализ состояния вопроса мониторинга и диагностики оборудования зерноперерабатывающих предприятий. Проанализированы машинно-аппаратурные схемы мукомольных, комбикормовых и крупяных заводов, отмечено, что большинство единиц технологического оборудования относится к машинам роторного типа с вращающимися рабочими органами. Выявлены типовые дефекты оборудования. Рассмотрены современные стратегии технического обслуживания и ремонта (ТОиР) с точки зрения их эффективности. Отдельно рассмотрены информационные системы и программные продукты, направленные на автоматизацию процедур, связанных с ТОиР.

Проанализированы современные методы, средства и информационные системы неразрушающего контроля, рассмотрены методы выделения диагностических признаков и повышения их информативности при использовании виброакустических методов диагностики и диагностики по потребляемому току. В конце главы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приводится обзор современных компьютерных и информационных технологий с точки зрения их применения в создании диагностических систем нового поколения. Определение класса технического состояния объекта контроля сводится к задаче распознавания образов. Приводятся обзор и классификация методов распознавания классов образов состояния. Искусственные нейронные сети (ИНС) являются сбалансированным компромиссом между параметрическим и метрическим методами при решении задач классификации. Одним из преимуществ использования нейронных сетей является возможность анализа больших объёмов данных. В настоящее время разработаны и успешно применяются ИНС различных архитектур с применением разных функций активации и алгоритмов обучения.

Рассмотрены современные алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС), в т.ч. цифровых фильтров, математических преобразований с точки зрения их применения в задаче повышения соотношения полезный сигнал/помеха и выделения из сигнала информативных составляющих диагностических признаков. В этой связи традиционный метод обработки диагностических сигналов — спектральный анализ сигнала и его

огибающей — дополнен двумя современными методами: дискретное кратковременное преобразование Фурье (STFT) и вейвлет-преобразование (ВП), которое переводит сигнал из временного представления в частотно-временное. ВП сигнала — это его представление в виде обобщённого ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1)$$

сконструированных из материнского (исходного) вейвлета $\psi(t)$, обладающего определёнными свойствами за счёт операций сдвига во времени (b) и изменения временного масштаба (a).

Для расчёта STFT в случае входного дискретного сигнала $s[n]$ и временного окна $w[n-m]$ со сдвигом m , функция имеет вид:

$$S_{STFT}(e^{j\omega}, m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s[n]w[n-m]e^{-j2\pi fn}, \quad (2)$$

где f — текущее значение частоты. В результате получается представление с непрерывной осью частот и осью дискретного времени.

Для визуализации данных преобразований используются соответственно спектрограммы и вейвлет-скалограммы, которые являются поверхностями в трёхмерном пространстве, но для удобства представления значение спектральной амплитуды (магнитуды для скалограмм) может быть представлено цветовой шкалой. Изображения трудно формализовать традиционными статистическими методами обработки данных, но для автоматического выявления значимых особенностей в изображениях (паттернов), которые коррелированы с теми или иными дефектами, хорошо подходят свёрточные нейронные сети (СНС).

Рассмотрены различные технологии передачи данных от средств измерения на сервер БД. В качестве последнего целесообразно использовать облачные сервисы, что позволит предприятиям передать на аутсорсинг вопросы, связанные с созданием и поддержанием серверной инфраструктуры распределённой online-системы диагностики.

В третьей главе проработаны вопросы взаимозависимости между показателями эффективности технологических процессов измельчения и шелушения зернового сырья, техническим состоянием оборудования и их диагностическими признаками.

Исследованием влияния на технологический процесс помола зерна на вальцовых станках различных факторов, приводящих к нестабильности рабочего зазора (неуравновешенность вальцов, нарушение межосевого расстояния межвальцовой передачи), занимались М. М. Гернет и А. И. Иванов. Учёными установлено, что наличие статического дисбаланса вальцов, равного 4 кг·см, приводит к увеличению зольности продукта на 0,02–0,04 %, степень повреждения крахмальных зёрен увеличивается на 2,4–3,3 ед. F . Извлечение муки уменьшается на 2–11 %.

Значительное влияние на стабильность межвальцового зазора оказывает техническое состояние зубчатой межвальцовой передачи. Изменение межосевого расстояния вследствие износа вальцов приводит к ударам в зацеплении. Это приводит к колебаниям вальцов и, как следствие, — к изменению зазора. По данным А. И. Иванова, средняя величина бокового зазора для станков А1-БЗН 1-й дранной системы составляет 220 мкм, 4-й дранной — 147 мкм, 5-й размольной — 167 мкм.

В. И. Штернис в своей научной работе приводит данные о том, что отклонение межосевого расстояния в зубчатой межвальцовой передаче на 2,5 мм от расчётного на 1-й р.с. приводит к уменьшению извлечения на 3,8 % (с 46,9 % до 50,7 %) и увеличению зольности на 0,03 % (от 0,5 % до 0,53 %).

Перечисленные факторы нестабильности и отклонения показателей процесса измельчения можно контролировать через диагностические параметры — шум, вибрацию, температуру подшипниковых узлов, значения тока, потребляемого электродвигателем.

Исследование влияния износа молотков и размера отверстий сит на количественные показатели процесса измельчения, а также на гранулометрический состав смеси проведено на комбикормовом заводе ОАО «Болшево — Хлебопродукт» на молотковой дробилке типа А1-ДДП. Измельчаемый продукт — ячмень. Влажность продукта — 15%. Размол зерна проводился на дробилке с ситами, имеющими отверстия диаметром 2; 4; 6,3 и 8 мм.

Во время измельчения поддерживалась номинальная мощность электродвигателя (50 кВт). Исследования проведены при работе дробилки на комплекте новых и изношенных пластинчатых молотков. Графики зависимости производительности дробилки и удельного расхода электроэнергии от диаметра отверстия сита d на разных комплектах молотков изображены на рис. 1.

Износ молотков приводит к снижению производительности на 3-10%. При размере отверстий сит 2 мм производительность упала с 1,82 до 1,65 т/ч, а удельные энергозатраты возросли на 6% с 27,8 до 29,4 т/ч. Результаты исследований аппроксимированы полиномиальными моделями регрессии 2-го порядка:

- новые молотки: $N_n = 0,64 \cdot d^2 - 9,8 \cdot d + 44,7$, ($R^2 = 0,998$, $RMSE = 0,775$); (3)

- изношенные молотки: $N_u = 0,65 \cdot d^2 - 10,2 \cdot d + 47,5$, ($R^2 = 0,999$, $RMSE = 0,488$). (4)

Данные уравнения регрессии используются в задаче диагностики степени износа молотков по СКЗ потребляемого тока (при заданном размере отверстий сита).

Ситовой анализ продуктов измельчения проводился по методике, разработанной учеными МГУППа. На рис. 2 приводятся кумулятивные кривые гранулометрического состава продуктов измельчения при использовании новых и изношенных молотков, исследован его гранулометрический состав при установке в дробилке сит с диаметром отверстий: а) 2 мм, б) 4 мм, в) 6,3 мм, г) 8 мм. Графики дают наглядное представление о количественном распределении частиц различной крупности в смеси. В результате ситового анализа продуктов измельчения установлено, что при использовании изношенных молотков образуется больше мелкой фракции, средний размер частиц уменьшился на 5–8% (большие значения наблюдаются при использовании ситового полотна с более мелкими отверстиями). Степень измельчения продукта α выше при использовании изношенных молотков. Максимальное различие наблюдается при использовании изношенных молотков с ситом, у которого диаметр отверстий равен 2 мм. Коэффициент тонкости измельчения мелкой фракции увеличивается до 11% (при использовании сит с отверстиями 6,3 мм). Наиболее выравненным по гранулометрическому составу получается продукт при измельчении на ситах с диаметром отверстий 2 мм, менее выравненный

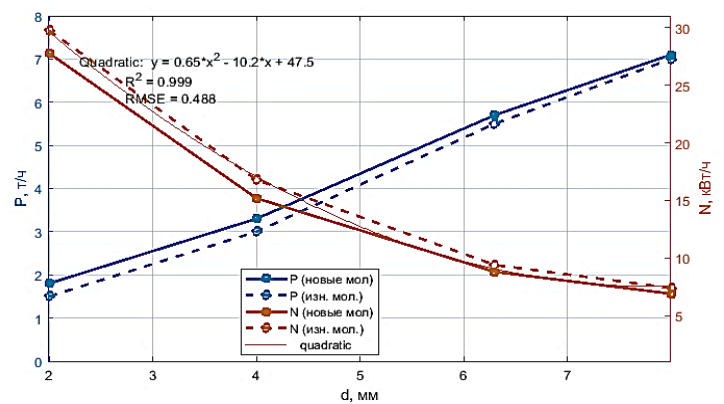


Рисунок 1 — Зависимость производительности P и удельного расхода электроэнергии N от диа-

на ситах с отверстиями диаметром 8 мм. При работе дробилки с изношенными молотками коэффициент выравнивания снижается на 3-6%.

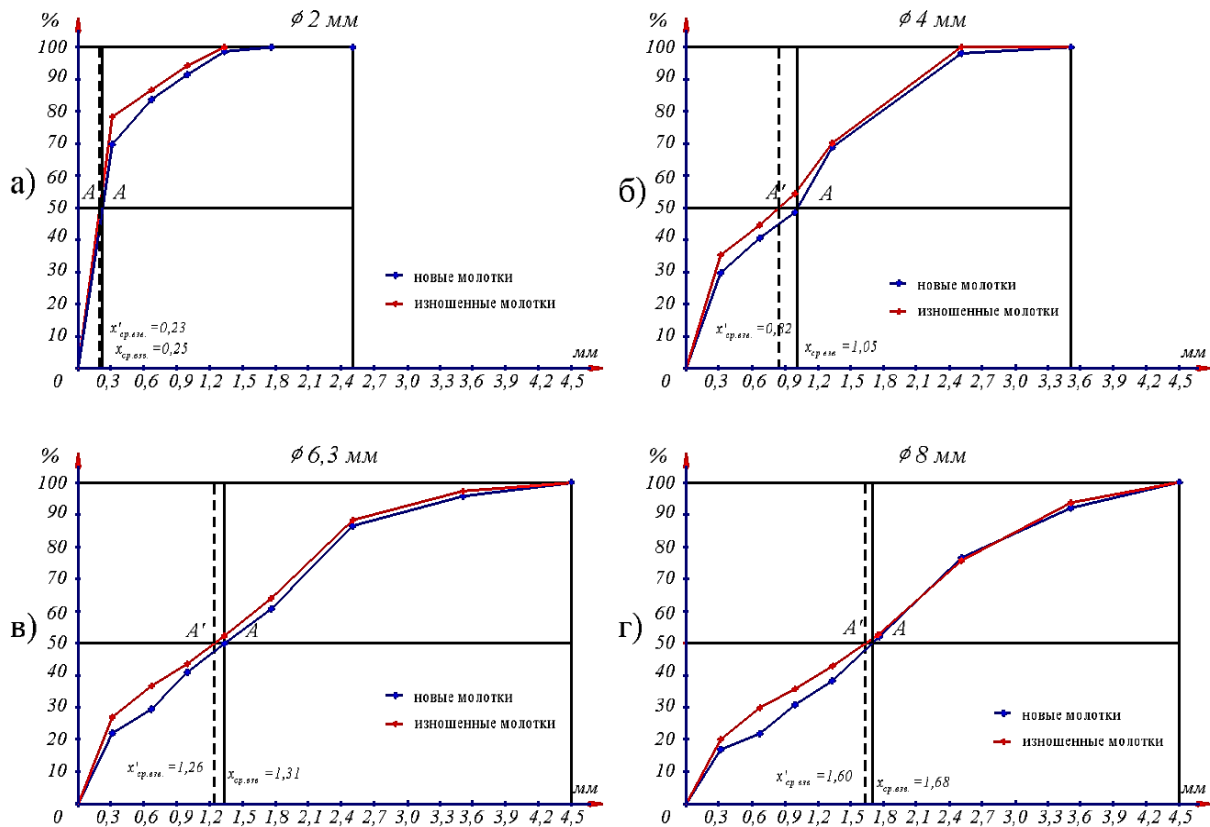


Рисунок 2 — Кумулятивные кривые гранулометрического состава продуктов измельчения при использовании новых и изношенных молотков при использовании сит с диаметром отверстий: а) 2 мм, б) 4 мм, в) 6,3 мм, г) 8 мм

В лаборатории кафедры «ПМиИТС» МГУПП с использованием горизонтального малогабаритного шелушителя (рис. 3) с абразивными дисками проведены исследования влияния износа абразивных дисков на параметры эффективности процесса шелушения. Производительность шелушителя — 350 кг/ч. Рабочая частота вращения ротора — 1500, 2000 об/мин. В исследованиях использовался ячмень влажностью 12 %.

Первая серия исследований проведена с целью нахождения эмпирических зависимостей между удельным расходом электроэнергии на процесс шелушения при скоростях вращения ротора 1500 и 2000 об/мин при оптимальном рабочем зазоре — 13 мм (соответствующему использованию новых абразивных дисков) и при зазорах, увеличенных на 2, 4 и 6 мм, имитирующих износ дисков и обечайки. Для каждого опыта было проведено по шесть измерений значений потребляемого тока в электрической цепи приводного трёхфазного электродвигателя. На рис. 4 в виде диаграмм размаха представлены зависимости удельного расхода электроэнергии на процесс шелушения ячменя от величины рабочего зазора (13, 15, 17 и 19 мм) (при частоте вращения ротора 2000 об/мин). Результаты измерений имеют хорошую воспроизводимость. Увеличение рабочего зазора с 13 до 19 мм приводит к снижению энергозатрат на 1,9 кВт·т/ч, но при этом коэффициент шелушения снизился на 6%.

На рис. 5 представлены графики зависимостей удельных энергозатрат на процесс шелушения от величины рабочего зазора при частоте вращения ротора 1500 об/мин (а) и 2000 об/мин (б).



Рисунок 3 — Общий вид экспериментальной установки на базе шелушителя с абразивными дисками

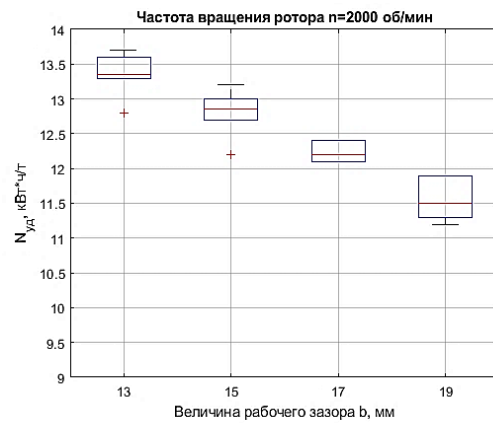
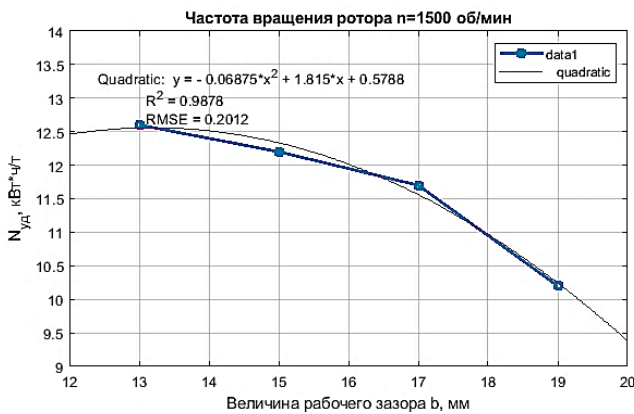
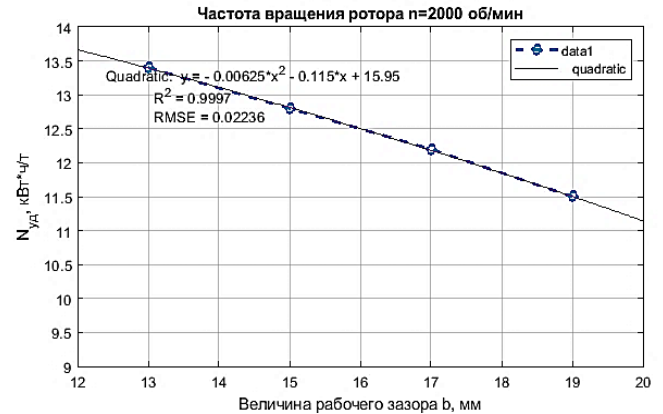


Рисунок 4 — Диаграмма размаха значений удельных энергозатрат на процесс шелушения при разных величинах рабочего зазора (частота вращения ротора 2000 об/мин)



а)



б)

Рисунок 5 — Зависимость удельных энергозатрат на процесс шелушения от величины рабочего зазора при частоте вращения ротора: а) 1500 об/мин, б) 2000 об/мин

Экспериментальные данные статистически обработаны в системе Matlab. В результате аппроксимации получены математические модели удельных энергозатрат на процесс шелушения в виде уравнений квадратичной регрессии:

- частота вращения 1500 об/мин: $N_{уд} = -0,0688b^2 + 1,815b + 0,579$ ($R^2 = 0,988$); (5)
- частота вращения 2000 об/мин: $N_{уд} = -0,00625b^2 - 0,115b + 15,95$ ($R^2 = 0,999$). (6)

В результате проведенных исследований установлено, что износ абразивных дисков (увеличение рабочего зазора) негативно влияет на качественный показатель процесса — коэффициент шелушения. При значительном износе дисков (6 мм) этот показатель снизился на 12,5 % (с 50 % до 37,5 %) при частоте вращения ротора 1500 об/мин и на 12 % при частоте вращения 2000 об/мин. При этом удельные энергозатраты снизились соответственно на 2,2 и 1,4 кВт. Таким образом, значение потребляемого шелушителем тока (при фиксированной производительности) является диагностическим признаком износа абразивных дисков или нарушения положения сетчатой обечайки.

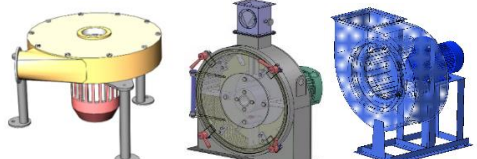
В четвёртой главе рассмотрены вопросы диагностического моделирования технологических машин. Исследование колебательных процессов машин при наличии возмущающих воздействий от неисправностей или отклонений в технологических

свойствах сырья целесообразно проводить с использованием их динамических моделей. Динамическим моделированием зерноперерабатывающих машин занимались М. М. Гернет, В. И. Денисов, В. В. Старостин, А. И. Иванов, С. Ю. Терёхин и др.

В рамках исследований разработаны диагностические модели четырёх типов, соответствующие типовым компоновкам зерноперерабатывающих машин: 1) роторная одноопорная механическая система со сосредоточенными параметрами, 2) роторная двухопорная механическая система с консольным креплением ротора, 3) двухопорная роторная механическая система, 4) двухроторная механическая система с механической связью. Предложенные расчётные схемы позволяют решить задачу диагностического моделирования для большинства машин зерноперерабатывающих предприятий. При этом для моделирования конкретных машин необходимо идентифицировать их жёсткостные и инерционные характеристики, размеры и кинематические параметры, определить вынужденные и диссипативные силы. В работе параметры моделей определены расчетным путем методом 3D-моделирования в САД-системе Solidworks.

Математическое моделирование функционирования машин в различные технические состояния реализовано в системе Matlab путем численного решения систем дифференциальных уравнений методом Рунге–Кутты. В табл. 1 представлена классификация диагностических моделей и электронные двойники рассматриваемых машин, сгруппированные по типам диагностических моделей.

Таблица 1 — Типы разработанных диагностических моделей и примеры соответствующих им технологических машин в виде электронных 3D-моделей

Тип диагностической модели	Примеры технологических машин
Механическая система с консольным креплением ротора на валу электродвигателя (вентиляторы, дробилки, энтолейторы)	
Механическая роторная система с консольным креплением ротора (центробежные вентиляторы, дробилки, дезинтеграторы и пр.)	
Механическая двухопорная роторная система (молотковые дробилки, шелушители, обочные машины, смесители и пр.)	
Механическая двухроторная система с механической связью (вальцовые измельчители, плющильные станки)	

Модель механической системы с консольным креплением ротора рассмотрена как система с сосредоточенной массой и одной степенью свободы — перемещение центра тяжести ротора в радиальном направлении. Такая модель используется для моделирования работы центробежных и осевых вентиляторов, дробилок, энтолейторов и др.

машин с консольным креплением рабочего колеса на валу электродвигателя. В зоне низких частот, когда машина колеблется как единое целое с одной степенью свободы, уравнение динамики записывается в виде:

$$m\ddot{q} + h\dot{q} + c(t)(q - \Delta(t)) = P^u(t), \quad (7)$$

где m — масса системы, кг; h — коэффициент сопротивления системы; $P^u(t)$ — обобщённая вынуждающая сила, Н; $c(t)$ — коэффициент жёсткости системы как функция времени, Н/м; $\Delta(t)$ — кинематическая погрешность в опоре как функция времени, м.

Для моделирования локальных дефектов подшипников в зоне сопряжения его деталей функция кинематической погрешности может быть задана кусочно-линейной функцией вида:

$$\Delta(t) = \begin{cases} \Delta & \text{при } k \cdot T_\delta \leq t \leq k \cdot T_\delta + \Delta\tau \\ 0 & \text{при } k \cdot T_\delta + \Delta\tau < t < (k+1) \cdot T_\delta \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

где Δ — значение кинематической погрешности, м; $T_\delta = 1/f_\delta$ — период, с которым проявляется погрешность, с; f_δ — частота проявления дефекта, Гц; $\Delta\tau$ — время проявления дефекта, с.

Механическая двухопорная роторная система с консольным креплением ротора в опорах A и B с учётом их демпфирующих свойств и жёсткости разработана совместно с Терёхиным С. Ю. В расчётную схему (рис. 6) добавлены сила воздействия на рабочий орган машины продукта $S_Q(t)$ (для моделирования дефектов взаимодействия с продуктом) и сила взаимодействия элементов привода (муфты, ременной передачи) с ротором $S_P(t)$.

Рассматриваемая система имеет шесть обобщённых координат: углы поворота α_y и α_z центральных осей ротора в плоскостях соответственно XOY и XOZ , угол поворота ротора φ относительно оси OX , линейные перемещения (x_O, y_O, z_O) центра масс (ЦМ) ротора (т. O) вдоль соответствующих осей координат. С учётом упрощающих допущений рассмотрена система с четырьмя степенями свободы: линейные перемещения ЦМ вдоль осей OY и OZ поворота ротора в плоскостях XOY и XOZ .

В разрабатываемую диагностическую модель заложены возможности моделирования ряда типовых дефектов машин: изменение жёсткости $c_i(t)$ опор, кинематические погрешности в подшипниках опор, дефекты шкива, ремня или муфты, дефекты взаимодействия рабочего органа с продуктом, неуравновешенность рабочего органа, шкива, полумуфты.

Динамика рассматриваемой системы по четырём координатам описывается системой из дифференциальных уравнений (СДУ) вида:

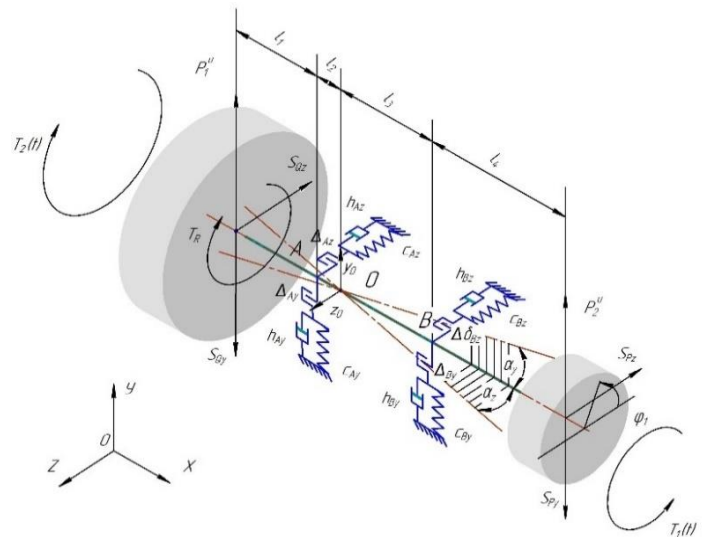


Рисунок 6 — Расчётная схема роторной системы с консольным креплением ротора

$$\left. \begin{aligned}
 & m\ddot{y}_C + h_{Ay} \cdot (\dot{y}_C - l_2 \cdot \dot{\alpha}_Y) + h_{By}(\dot{y}_C + l_3 \dot{\alpha}_Y) + c_{Ay} \cdot [y_C - l_2 \cdot \alpha_Y - \Delta_{Ay}(t)] + \\
 & + c_{By} [y_C + l_3 \alpha_Y - \Delta_{By}(t)] + m \cdot g = P_1^u \cdot \sin(\omega t + \psi_1) + P_2^u \cdot \sin(\omega t + \psi_2) - S_{Py}(t) - S_{Qy}(t); \\
 & m\ddot{z}_C + h_{Az} \cdot (\dot{z}_C + l_2 \dot{\alpha}_Z) + h_{Bz} \cdot (\dot{z}_C - l_3 \dot{\alpha}_Z) + c_{Az} \cdot [z_C + l_2 \alpha_Z - \Delta_{Az}(t)] + \\
 & + c_{Bz} \cdot [z_C - l_3 \alpha_Z - \Delta_{Bz}(t)] = -P_1^u \cdot \cos(\omega t + \psi_1) - P_2^u \cdot \cos(\omega t + \psi_2) - S_{Pz}(t) - S_{Qz}(t); \\
 & I_{Y0} \ddot{\alpha}_C - h_{Ay} \cdot (\dot{y}_C - l_2 \dot{\alpha}_Y) \cdot l_2 + h_{By} \cdot (\dot{y}_C + l_3 \dot{\alpha}_Y) \cdot l_3 - c_{Ay} \cdot [y_C - l_2 \alpha_Y - \Delta_{Ay}(t)] \cdot l_2 + \\
 & + c_{By} \cdot [y_C + l_3 \alpha_Y - \Delta_{By}(t)] \cdot l_3 = -P_1^u \cdot \sin(\omega t + \psi_1) \cdot (l_1 + l_2) + \\
 & \quad + P_2^u \cdot \sin(\omega t + \psi_2) \cdot (l_3 + l_4) - S_{Py}(t)(l_3 + l_4) + S_{Qy}(t)(l_1 + l_2); \\
 & I_{Z0} \ddot{\alpha}_Z + h_{Az} \cdot (\dot{z}_C + l_2 \dot{\alpha}_Z) \cdot l_2 - h_{Bz}(\dot{z}_C - l_3 \dot{\alpha}_Z) \cdot l_3 + c_{Az} [z_C + l_2 \cdot \alpha_Z - \Delta_{Az}(t)] \cdot l_2 - \\
 & - c_{Bz} \cdot [z_C - l_3 \alpha_Z - \Delta_{Bz}(t)] \cdot l_3 = -P_1^u \cdot \cos(\omega t + \psi_1) \cdot (l_1 + l_2) + \\
 & \quad + P_2^u \cdot \cos(\omega t + \psi_2) \cdot (l_3 + l_4) + S_{Pz} \cdot (l_3 + l_4) - S_{Qz}(t)(l_1 + l_2);
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где I_{Y0} , I_{Z0} — главные осевые моменты инерции ротора, кг·м²; l_2 , l_3 — расстояния от ЦМ ротора до подшипниковых опор, м; $\Delta_{Ay}(t)$, $\Delta_{Az}(t)$, $\Delta_{By}(t)$, $\Delta_{Bz}(t)$ — кинематические погрешности в подшипниках, м; c_{Ay} , c_{By} и c_{Az} , c_{Bz} — жёсткости подшипниковых опор вдоль соответствующих осей, Н/м; h_{Ay} , h_{Az} , h_{By} , h_{Bz} — коэффициенты сопротивления в опорах; P_1^u и P_2^u — силы инерции от дисбаланса рабочих органов и шкива, Н; $S_{pz}(t)$ и $S_{py}(t)$ — проекции силы взаимодействия ротора с приводом (от муфты, ременной передачи) на оси OZ и OY , Н; $S_{Qz}(t)$ и $S_{Qy}(t)$ — проекции силы взаимодействия рабочего органа с продуктом на оси OZ и OY , Н; ω — средняя угловая скорость вращения ротора, с⁻¹; ψ_1 и ψ_2 — фазовые углы сил инерции, рад.

В качестве примера рассмотрим результаты диагностического моделирования вентилятора типа ВЦП. Инерционные и жесткостные характеристики модели определены расчётным путём в САД-системе SolidWorks. Рабочее колесо имеет шесть лопастей, которые при вращении создают переменную нагрузку на вал с так называемой «лопаточной» частотой, равной произведению частоты вращения колеса на количество лопаток.

В системе Matlab написан скрипт численного решения системы уравнений (9), проведена серия математических экспериментов по моделированию различных неисправностей вентилятора. Смоделировано четыре класса состояний (табл. 2). При моделировании использовались следующие параметры модели: масса ротора — 105 кг, $l_1 = 240$ мм, $l_2 = 25$ мм, $l_3 = 230$ мм, $l_4 = 130$ мм, жёсткости в опорах — $6 \cdot 10^7$ Н/м, осевые моменты инерции $I_{Y0} = I_{Z0} = 10$ кг·м², частота вращения ротора — 1140 об/мин (18,5 Гц).

Результатом численного решения является временная реализация значений перемещений, скорости и ускорений по обобщённым координатам. Для удобства последующего анализа результаты представлены в виде спектров колебаний цапф ротора в опорах.

Таблица 2 — Описание моделируемых состояний вентилятора ВЦП

№ состояния	Описание
1	Исправный вентилятор, допускаемая статическая остаточная неуравновешенность рабочего колеса — 500 г·см, дисбаланс шкива — 100 г·см
2	Статическая неуравновешенность рабочего колеса — 1000 г·см, погрешность на наружном кольце подшипника на частоте $f_{\text{тк/н}} = 3,1f_1$ в опоре А — 0,1 мм, дисбаланс шкива — 100 г·см
3	Неуравновешенность ротора — 1000 г·см, погрешность на внутреннем кольце подшипника на частоте $f_{\text{тк/в}} = 4,92f_1$ в опоре А — 0,1 мм, дисбаланс шкива — 100 г·см
4	Статическая остаточная неуравновешенность рабочего колеса — 3000 г·см, дисбаланс шкива — 1000 г·см, погрешность на внутреннем кольце подшипника на частоте $f_{\text{тк/в}} = 4,92f_1$ в опоре А — 0,1 мм на внутреннем кольце, на наружном кольце на частоте $f_{\text{тк/н}} = 3,1f_1$ в опоре В — 0,1 мм

На рис. 7 представлены результаты решения системы дифференциальных уравнений в виде графиков спектров виброскорости колебаний ротора в опорах A и B . Спектр колебаний при нормальном техническом состоянии характеризуется амплитудой на частоте вращения рабочего колеса — 18,5 Гц и на лопаточной частоте — 111 Гц. Дефекты внутреннего и внешнего колец подшипника проявляются на частотах 91 Гц и 56 Гц и их гармониках.

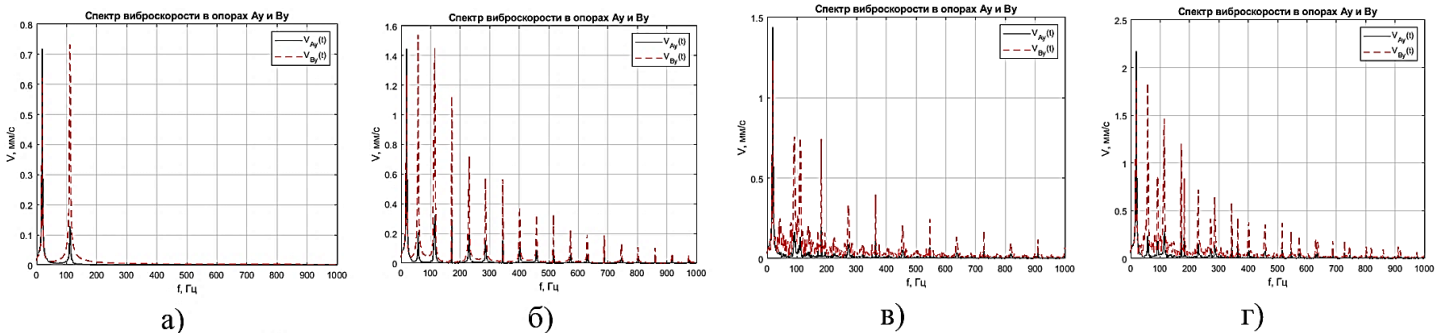


Рисунок 7 — Графики спектров виброскорости цапф ротора в опорах A и B при различных состояниях вентилятора: а) состояние № 1, б) состояние № 2, в) состояние № 3, г) состояние № 4

Вейвлет-скалограммы виброускорения цапфы в опоре A показаны на рис. 8. Хорошо заметны периодические всплески магнитуды с периодами, равными периоду попадания тел качения в зону локального дефекта (соответственно 11 мс и 17,9 мс). Визуальные отличия скалограмм, при различных состояниях, дают предпосылки для их дальнейшего использования при решении задачи классификации с использованием СНС.

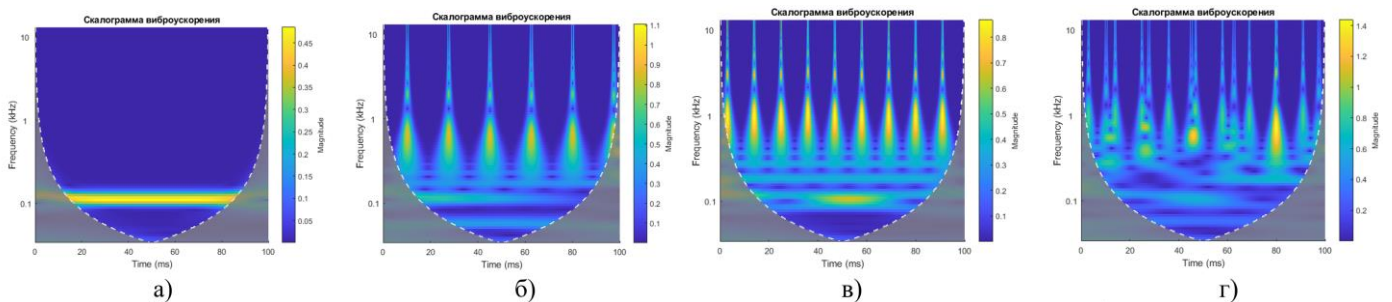


Рисунок 8 — Графики вейвлет-скалограмм вибрации цапфы ротора в опоре A при различных состояниях: а) состояние № 1, б) состояние № 2, в) состояние № 3, г) состояние № 4

Механическая двухопорная роторная система состоит из ротора, вращающегося в опорах A и B . Ротор представляет собой вал в сборе с рабочими органами, шкивом или полумуфтой. Расчётная схема представлена на рис. 9.

В диагностическую модель заложена возможность моделирования ряда типовых дефектов: изменение жёсткости и кинематических зазоров в опорах, дисбаланс ротора, дефекты шкива, ремня, муфты, дефекты взаимодействия рабочего органа с продуктом $S_Q(t)$ и силы взаимодействия ротора с приводом $S_P(t)$.

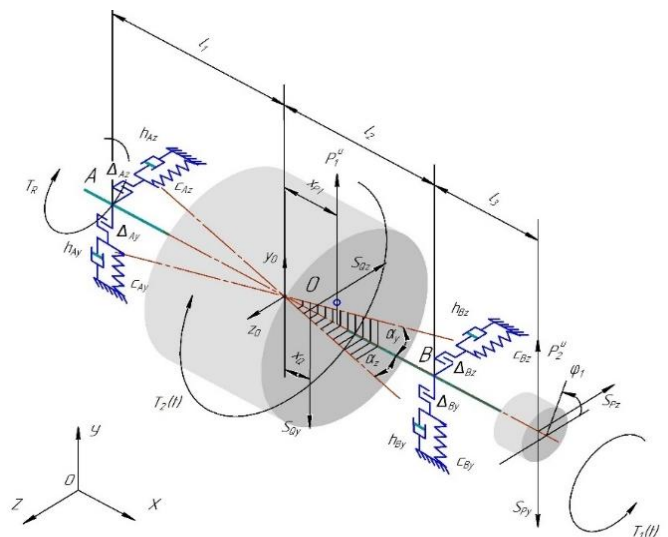


Рисунок 9 — Расчётная схема двухопорной роторной системы

Диагностическая динамическая модель двухопорной роторной системы рассмотрена как система дифференциальных уравнений (СДУ) динамики:

$$\left. \begin{aligned} m\dot{y}_C + h_{Ay} \cdot (\dot{y}_C - l_1 \cdot \dot{\alpha}_Y) + h_{By}(\dot{y}_C + l_2 \dot{\alpha}_Y) + c_{Ay} \cdot [y_C - l_1 \cdot \alpha_Y - \Delta_{Ay}(t)] + \\ + c_{By}[y_C + l_2 \alpha_Y - \Delta_{By}(t)] + m \cdot g = P_1^u \cdot \sin(\omega t + \psi_1) + P_2^u \cdot \sin(\omega t + \psi_2) - S_{Py}(t) - S_{Qy}(t); \\ m\ddot{z}_C + h_{Az} \cdot (\dot{z}_C + l_1 \dot{\alpha}_Z) + h_{Bz} \cdot (\dot{z}_C - l_2 \dot{\alpha}_Z) + c_{Az} \cdot [z_C + l_1 \alpha_Z - \Delta_{Az}(t)] + \\ + c_{Bz} \cdot [z_C - l_2 \alpha_Z - \Delta_{Bz}(t)] = -P_1^u \cdot \cos(\omega t + \psi_1) - P_2^u \cdot \cos(\omega t + \psi_2) - S_{Py}(t) - S_{Qy}(t); \\ I_{YO} \ddot{\alpha}_Y - h_{Ay} \cdot (\dot{y}_C - l_1 \dot{\alpha}_Y) \cdot l_1 + h_{By} \cdot (\dot{y}_C + l_2 \dot{\alpha}_Y) \cdot l_2 - c_{Ay} \cdot [y_C - l_1 \alpha_Y - \Delta_{Ay}(t)] \cdot l_1 + \\ + c_{By} \cdot [y_C + l_2 \alpha_Y - \Delta_{By}(t)] \cdot l_2 = P_1^u \cdot \sin(\omega t + \psi_1) \cdot x_{P1} + P_2^u \cdot \sin(\omega t + \psi_2) \cdot (l_2 + l_3) - \\ - S_{Py}(t)(l_2 + l_3) - S_{Qy}(t) \cdot x_Q; \\ I_{ZO} \ddot{\alpha}_Z + h_{Az} \cdot (\dot{z}_C + l_1 \cdot \dot{\alpha}_Z) \cdot l_1 - h_{Bz}(\dot{z}_C - l_2 \dot{\alpha}_Z) \cdot l_2 + c_{Az}[z_C + l_1 \cdot \alpha_Z - \Delta_{Az}(t)] \cdot l_1 - \\ - c_{Bz} \cdot [z_C - l_2 \alpha_Z - \Delta_{Bz}(t)] \cdot l_2 = P_1^u \cdot \cos(\omega t + \psi_1) \cdot x_{P1} + P_2^u \cdot \cos(\omega t + \psi_2) \cdot (l_2 + l_3) + \\ + S_{Pz} \cdot (l_2 + l_3) + S_{Qz}(t) \cdot x_Q; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где m — масса ротора в сборе с рабочим органом и шкивом (муфтой), кг; I_{YO} , I_{ZO} — главные моменты инерции ротора по соответствующим осям, кг·м²; l_1 , l_2 — расстояния от подшипниковых опор A и B до ЦМ ротора, м; x_{P1} — координата приложения силы инерции ротора, м; P_1^u и P_2^u — силы инерции от дисбаланса рабочих органов и шкива (полумуфты), Н; $S_{pz}(t)$ и $S_{py}(t)$ — проекции силы взаимодействия ротора с приводом (от муфты, ременной передачи) на оси OZ и OY , Н; $S_{Qz}(t)$ и $S_{Qy}(t)$ — проекции силы взаимодействия рабочего органа с на оси OZ и OY , Н; x_Q — координата приложения результирующей силы от продукта, м.

Для изучения параметров динамической системы использован метод системного анализа и были рассчитаны передаточные функции $W_i(s)$ данной системы. При воздействии единичной импульсной функции Дирака на систему колебания достаточно быстро затухают, что говорит о том, что система обладает демпфирующими свойствами.

На базе разработанной диагностической модели проведена серия математических экспериментов по моделированию различных технических состояний молотковой дробилки А1-ДМР, шелушителя А1-ЗШН, обочной машины РЗ-БГО-8.

Механическая двухроторная система с механической связью разработана для моделирования динамики вальцовых измельчителей и плющильных станков. В качестве примера рассмотрим размольную пару вальцового станка типа А1-БЗН 1-й р.с.

Размольная пара, включающая быстровращающийся и медленно вращающийся вальцы в сборе со шкивом и зубчатыми колёсами представлена как динамическая система, обладающая определёнными инерционными и жёсткостными характеристиками, а также обладающая демпфирующими свойствами (рис. 10). Такая система имеет 12 степеней свободы — линейные перемещения центров тяжести двух мукомольных вальцов вдоль осей системы координат XYZ и угловые перемещения двух вальцов относительно своих центральных осей инерции OX , OY и OZ . Так как главной задачей диагностического моделирования является нахождение зависимостей между техническим состоянием объекта контроля и параметрами его колебаний, которые можно измерить с помощью датчиков вибрации, рассмотрим пару мукомольных вальцов как механическую систему с шестью степенями свободы: перемещение центров масс вальцов в сборе со шкивом и зубчатыми колёсами y_1 и y_2 вдоль оси OY , угловые колебания вальцов α_1 и α_2 в плоскости XOY и их углы поворота φ_1 и φ_2 относительно осей O_1X и O_2X . Такое представление позволит определить законы движения цапф мукомольных вальцов при наличии силовых и кинематических возбуждений, связанных с различными механическими дефектами.

Вальцы вращаются в опорах A, B, C и D , взаимодействуют между собой посредством зубчатой передачи и фрикционных сил от измельчаемого продукта.

Диагностическая модель позволяет моделировать следующие неисправности вальцового станка: дисбаланс шкива, мукомольных вальцов, зубчатых колес; дефекты сопряжения зубчатых колёс (износ, выкрашивание поверхности зубьев); дефекты дорожек и тел качения в подшипниках; дефекты формы вальцов; неравномерность подачи продукта; дефекты шкива ременной передачи.

Диагностическая динамическая модель вальцового станка описывается системой из 6 дифференциальных уравнений по соответствующим координатам:

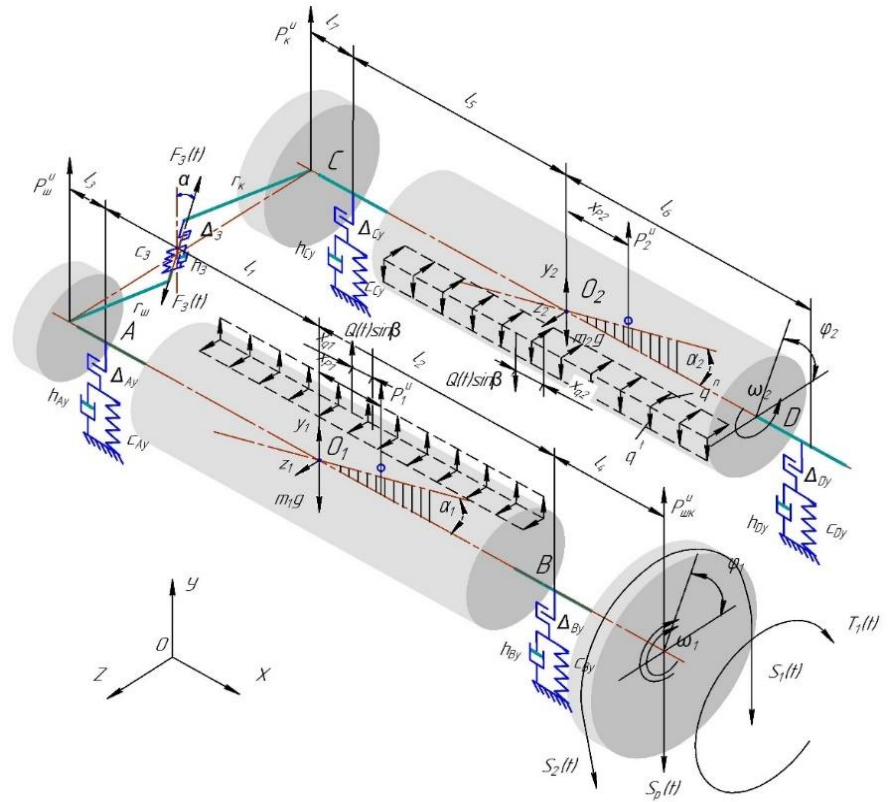


Рисунок 10 — Расчётная схема пары мукомольных вальцов вальцового станка

$$\begin{aligned}
 & m_1 \cdot \dot{y}_{01} + h_{Ay} \cdot (\dot{y}_{01} - \dot{\alpha}_1 \cdot l_1) + h_{By} \cdot (\dot{y}_{01} + \dot{\alpha}_1 \cdot l_2) + h_3 \cdot [\cos \alpha (\dot{y}_{01} - \dot{y}_{02} - \dot{\alpha}_1(l_1 + l_3) + \dot{\alpha}_2(l_5 + l_7)) + \dot{\phi}_1 \cdot r_w + \dot{\phi}_2 \cdot r_k] \cdot \cos \alpha + \\
 & + c_{Ay}(y_{01} - \alpha_1 \cdot l_1 + \Delta_A(t)) + c_{By}(y_{01} + \alpha_1 \cdot l_2 + \Delta_B(t)) + c_3(t) \cdot [\cos \alpha (y_{01} - y_{02} - \alpha_1(l_1 + l_3) + \alpha_2(l_5 + l_7)) + \phi_1 \cdot r_w + \phi_2 \cdot r_k - \Delta_3(t)] \cdot \cos \alpha = \\
 & = -m_1 g - F^T(t) - S_p(t) + Q(t) \cdot \sin \beta + P_1^u(t) + P_w^u(t); \\
 & m_2 \ddot{y}_{02} + h_{Cy}(\dot{y}_{02} - \dot{\alpha}_2 \cdot l_5) + h_{Dy} \cdot (\dot{y}_{02} + \dot{\alpha}_2 \cdot l_6) - h_3 \cdot [\cos \alpha (\dot{y}_{01} - \dot{y}_{02} - \dot{\alpha}_1(l_1 + l_3) + \dot{\alpha}_2(l_5 + l_7)) + \dot{\phi}_1 \cdot r_w + \dot{\phi}_2 \cdot r_k] \cdot \cos \alpha + \\
 & + c_{Cy}(y_{02} - \alpha_2 \cdot l_5 - \Delta_C(t)) + c_{Dy}(y_{02} + \alpha_2 \cdot l_6 - \Delta_D(t)) - c_3(t) \cdot [\cos \alpha (y_{01} - y_{02} - \alpha_1(l_1 + l_3) + \alpha_2(l_5 + l_7)) + \phi_1 \cdot r_w + \phi_2 \cdot r_k - \Delta_3(t)] \cdot \cos \alpha = \\
 & = -m_2 g + F^T(t) - Q(t) \cdot \sin \beta + P_2^u(t) + P_k^u(t); \\
 & I_{Z1} \cdot \ddot{\alpha}_1 - h_{Ay} \cdot (\dot{y}_{01} - \dot{\alpha}_1 \cdot l_1) \cdot l_1 + h_{By} \cdot (\dot{y}_{01} + \dot{\alpha}_1 \cdot l_2) \cdot l_2 - h_3 \cdot \cos \alpha \cdot (l_1 + l_3) \cdot [\cos \alpha \cdot (\dot{y}_{01} - \dot{y}_{02} - \dot{\alpha}_1(l_1 + l_3) + \dot{\alpha}_2(l_5 + l_7)) + \dot{\phi}_1 \cdot r_w + \dot{\phi}_2 \cdot r_k] - \\
 & - c_{Ay}(y_{01} - \alpha_1 \cdot l_1 + \delta_A(t)) \cdot l_1 + c_{By}(y_{01} + \alpha_1 \cdot l_2 + \delta_B(t)) \cdot l_2 - c_3(t) \cdot \cos \alpha \cdot (l_1 + l_3) \cdot [\cos \alpha \cdot (y_{01} - y_{02} - \alpha_1(l_1 + l_3) + \alpha_2(l_5 + l_7)) + \phi_1 \cdot r_w + \phi_2 \cdot r_k - \Delta_3(t)] = \\
 & = F^T(t) \cdot (l_1 + l_3) - S_p(t)(l_2 + l_4) + P_1^u(t) \cdot x_{p1} - P_w^u(t)(l_1 + l_3) - Q(t) \sin \beta \cdot x_{q1}; \\
 & I_{Z2} \cdot \ddot{\alpha}_2 - h_{Cy} \cdot (\dot{y}_{02} - \dot{\alpha}_2 \cdot l_5) \cdot l_5 + h_{Dy}(\dot{y}_{02} + \dot{\alpha}_2 \cdot l_6) \cdot l_6 + h_3 \cdot \cos \alpha \cdot (l_5 + l_7) \cdot [\cos \alpha \cdot (\dot{y}_{01} - \dot{y}_{02} - \dot{\alpha}_1(l_1 + l_3) + \dot{\alpha}_2(l_5 + l_7)) + \dot{\phi}_1 \cdot r_w + \dot{\phi}_2 \cdot r_k] - \\
 & - c_{Cy}(y_{02} - \alpha_2 \cdot l_5 + \delta_C(t)) \cdot l_5 + c_{Dy}(y_{02} + \alpha_2 \cdot l_6 + \delta_D(t)) \cdot l_6 + c_3(t) \cdot \cos \alpha \cdot (l_5 + l_7) \cdot [\cos \alpha \cdot (y_{01} - y_{02} - \alpha_1(l_1 + l_3) + \alpha_2(l_5 + l_7)) + \phi_1 \cdot r_w + \phi_2 \cdot r_k - \Delta_3(t)] = \\
 & = F^T(t)(l_5 + l_7) + Q(t) \cdot \sin \beta \cdot x_{q2} + P_2^u(t) \cdot x_{p2} - P_k^u(t)(l_5 + l_7); \\
 & I_{X1} \cdot \ddot{\phi}_1 + h_{K1} \cdot \dot{\phi}_1 + h_3 r_w [\cos \alpha (\dot{y}_{01} - \dot{y}_{02} - \dot{\alpha}_1(l_1 + l_3) + \dot{\alpha}_2(l_5 + l_7)) + \dot{\phi}_1 \cdot r_w + \dot{\phi}_2 \cdot r_k] + \\
 & + c_3(t) r_w [\cos \alpha (y_{01} - y_{02} - \alpha_1(l_1 + l_3) + \alpha_2(l_5 + l_7)) + \phi_1 \cdot r_w + \phi_2 \cdot r_k - \Delta_3(t)] = -T_1(t) + Q(t) \cdot \sin \beta \cdot R - F^T(t) \cdot r_w; \\
 & I_{X2} \cdot \ddot{\phi}_2 + h_{K2} \cdot \dot{\phi}_2 + h_3 r_k [\cos \alpha (\dot{y}_{01} - \dot{y}_{02} - \dot{\alpha}_1(l_1 + l_3) + \dot{\alpha}_2(l_5 + l_7)) + \dot{\phi}_1 \cdot r_w + \dot{\phi}_2 \cdot r_k] + \\
 & + c_3(t) r_k [\cos \alpha (y_{01} - y_{02} - \alpha_1(l_1 + l_3) + \alpha_2(l_5 + l_7)) + \phi_1 \cdot r_w + \phi_2 \cdot r_k - \Delta_3(t)] = -Q(t) \cdot \sin \beta \cdot R + F^T(t) \cdot r_k.
 \end{aligned} \quad (11)$$

где $T_1(t)$ — крутящий момент от ременной передачи, Н·м; $F_3(t)$ — окружная сила в зацеплении, зависит от величины циркулирующей мощности: $F_3(t) = 0,5 N_{\text{дс}} / r_{\text{ш}} \cdot \omega_1$, Н; $Q(t)$ — распорные усилия от продукта, Н; x_{q1} и x_{q2} — расстояние от ЦМ вальцов в сборе

до линии действия Q , м; R — радиус вальца, м; r_u, r_k — радиус шестерни и колеса, м; $P_1^u(t), P_2^u(t), P_k^u(t), P_{uu}^u(t)$, — силы инерции соответственно б/в и м/в вальцов, зубчатого колеса и шестерни, Н, S_p — радиальная составляющая силы натяжения ремня, Н; ω_1 и ω_2 — угловые скорости вращения вальцов, c^{-1} ;

Крутящий момент $T_1(t)$ на приводном шкиве представлен в виде суммы среднего постоянного момента $T=N_{об}/\omega_1$, который зависит от мощности электродвигателя $N_{об}$ и переменной составляющей $\Delta T(t)$, моделирующей дефекты ременной передачи и шкивов:

$$T_1(t) = T + \Delta T(t), \Delta T(t) = k \cdot T \cdot \cos(\omega_d \cdot t),$$

где k — коэффициент, учитывающий степень развития дефекта; ω_d — частота проявления дефекта.

Жёсткость в зубчатом зацеплении не постоянна во времени, а зависит от фазы зацепления (двух или трехпарное зацепление), т.е. от коэффициента полного перекрытия, и моделируется кусочно-линейной функцией жёсткости зацепления $c_3(t)$:

$$c_3(t) = \begin{cases} 3 \cdot c_3 & \text{если } t \in (k \cdot T_{2p} \dots k \cdot (T_{2p} + T_{3p})), k = 0, 1, 2, \dots, n \\ 2 \cdot c_3 & \text{иначе} \end{cases}, \quad (12)$$

где T_{2p} — период зацепления двух пар зубьев, с; T_{3p} — период зацепления трёх пар зубьев, с.

Математическое моделирование проведено для станка 1-й размольной системы с параметрами: частота вращения б/в вальца $f_1 = 6,9$ Гц, число зубьев шестерни — $z_1 = 36$, колёса — $z_2 = 44$, частота пересопряжения зубьев — $f_3 = z_2 f_2 = z_1 f_1 = 248$ Гц. Численное решение системы дифференциальных уравнений (11) выполнено в системе Matlab 2020, с использованием специально написанного скрипта «main_BZN.mlx».

В ходе численных экспериментов смоделировано 6 различных состояний станка. Их описание представлено в табл. 3.

Таблица 3 – Описание моделируемых состояний вальцового станка

№ состояния	Описание
1	Исправный станок, статическая остаточная неуравновешенность (дисбаланс) вальцов $D_I = D_2 = 500$ г·см, погрешность в зацеплении $\Delta_3 = 0,1$ мм
2	Дисбаланс б/в вальца $D_I = 2000$ г·см, погрешность в зацеплении $\Delta_3 = 0,5$ мм, погрешность в опоре A : $\Delta_{AY} = 0,2$ мм на частоте перекачивания тел качения по внутреннему кольцу $f_{TK/B} = 7,839 f_1$,
3	Дисбаланс б/в вальца $D_I = 3000$ г·см, дисбаланс шестерни $D_u = 1000$ г·см, погрешность в зацеплении $0,5$ мм, погрешность в опоре A : $\Delta_{AY} = 0,2$ мм на частоте перекачивания тел качения по внутреннему кольцу $f_{TK/B} = 7,839 f_1$, в опоре B — $0,2$ мм на частоте вращения наружного кольца $f_{TK/H} = 5,161 f_1$
4	Дисбаланс б/в вальца $D_I = 500$ г·см, дисбаланс шестерни $D_u = 500$ г·см, погрешность в зацеплении $\Delta_3 = 1$ мм, погрешность в опоре A — $0,3$ мм на частоте перекачивания тел качения по внутреннему кольцу $f_{TK/B} = 7,839 f_1$, в опоре B — $0,3$ мм на частоте вращения наружного кольца $f_{TK/H} = 5,161 f_1$
5	Дисбаланс б/в вальца $D_I = 500$ г·см, дисбаланс шестерни $D_u = 500$ г·см, дефект зуба шестерни — 2 мм, дефекты формы быстровращающегося вальца (огранка с трёхвершинным профилем)
6	Дисбаланс б/в вальца $D_I = 500$ г·см, дисбаланс шестерни 500 г·см, погрешность в зацеплении $\Delta_3 = 1$ мм, погрешность в опоре A — $0,5$ мм на частоте перекачивания тел качения по наружному кольцу $f_{TK/H} = 5,161 f_1$

Спектры виброскорости цапф мукомольных вальцов при различных состояниях представлены на рис. 11. На графиках доминируют амплитуды на частоте 160 Гц, свя-

занной с параметрическими колебаниями от двупарного / трёхпарного зацепления зубчатых колёс. На спектрах, соответствующих дефекту внутреннего кольца (рис. 11б, в, г), наблюдается доминирующая амплитуда на частоте, детерминированной с данным дефектом, — 61,1 Гц. На спектрах рис. 11в, г, е наблюдаются составляющие колебаний на частоте перекачивания тел качения по наружному кольцу $f_{\text{ТК/Н}} = 35,6$ Гц.

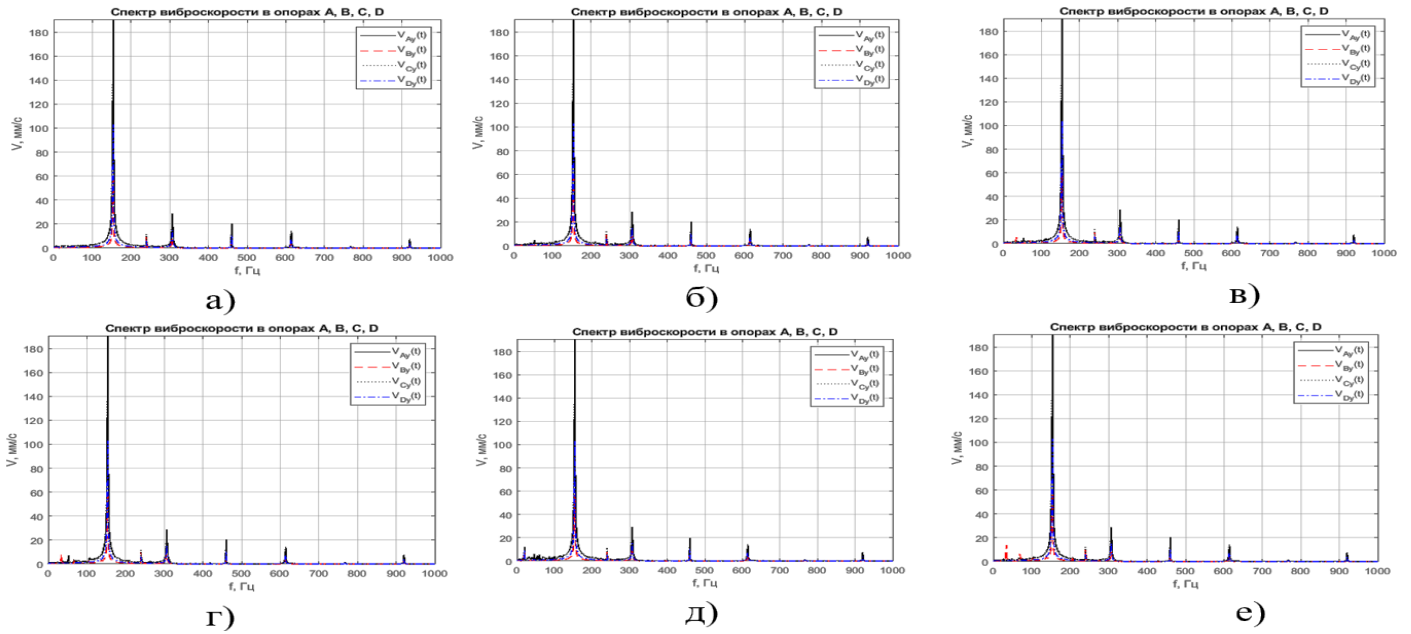


Рисунок 11 — Графики спектров виброскорости цапф валцов в опорах *A*, *B*, *C* и *D* при различных состояниях станка: а) состояние № 1, б) состояние № 2, в) состояние № 3, г) состояние № 4, г) состояние № 5, г) состояние № 6

Всплески магнитуд на вейвлет-скалограмме (рис. 12), происходящие с периодом, равным периоду попадания тел качения в зону локального дефекта колец подшипника, хорошо выражены. Это связано с логарифмическим представлением оси частот. Визуальный анализ результатов позволил качественно оценить динамические процессы, проходящие в размольной паре в зависимости от дефектов, и сделать предварительные выводы о высокой информативности скалограмм исследуемого вибросигнала.

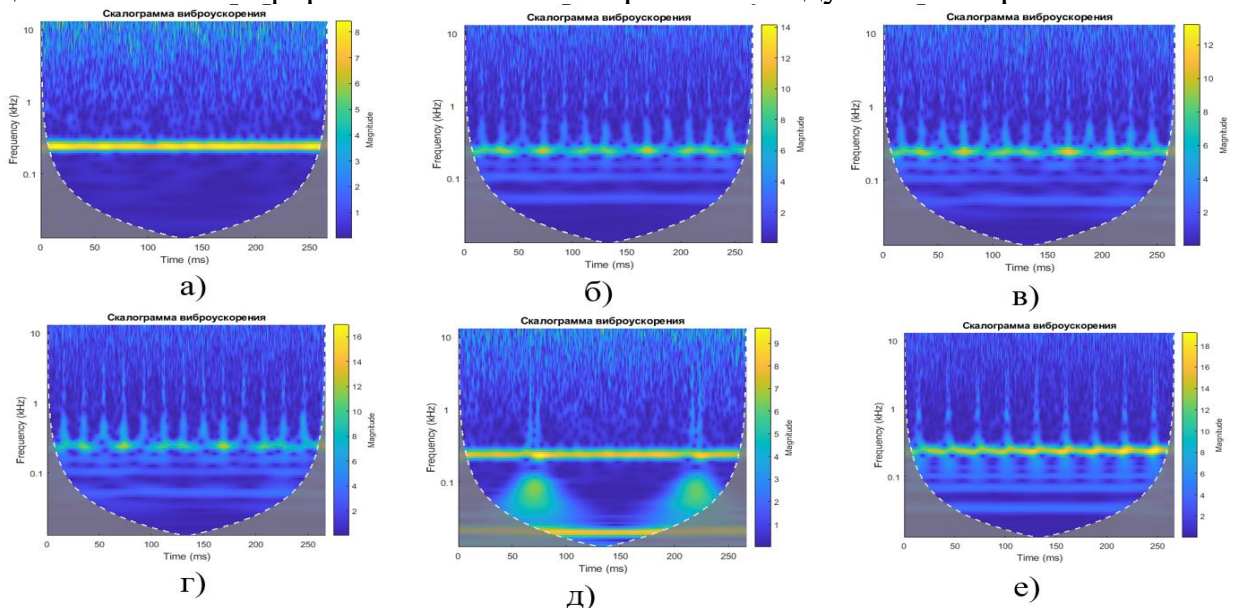


Рисунок 12 — Графики спектрограмм виброускорения цапфы вальца в опоре *A* при различных состояниях станка: а) состояние № 1, б) состояние № 2, в) состояние № 3, г) состояние № 4

Пятая глава посвящена экспериментальным исследованиям связанных с разработкой методов классификации технических состояний узлов и механизмов с использованием ИНС. Для проведения научных исследований на кафедре «ПМиИТС» МГУПП разработана и создана экспериментальная установка (рис. 13). В ее состав входят преобразователь частоты переменного тока (1), электродвигатель (2) мощностью 370 Вт. Вал электродвигателя соединён с ведущим валом передачи муфтой (3). На валу могут устанавливаться шестерни (4) или шкивы (5) ременной передачи. На ведомый вал устанавливается зубчатое колесо (6) или ведомый шкив (7). Валы вращаются в подшипниках типа 6002-2RS (102). Электромагнитный тормоз FZ-6-K (8) позволяет создавать нагрузку на передачу. Для измерения вибрации подшипниковых опор использовался пьезоэлектрический акселерометр типа KD39 (10) с эффективным частотным диапазоном от 1 Гц до 15 кГц. Сигнал с акселерометра усиливается с помощью усилителя заряда LE-1 (11). Оцифровка аналогового сигнала с датчиков и запись осуществляются с помощью внешнего аналого-цифрового преобразователя (АЦП) типа E-440 (12) производства ООО «Л КАРД» с USB подключением к ПК. Частота дискретизации сигналов с датчиков вибрации и тока SCT-013 (14) составляет 30 кГц, измерительного микрофона EM258N (13) – 80 кГц.

В состав установки входят наборы эксцентриковых (15) и закрепительных (16) втулок, дефектные подшипники, зубчатое колесо с дефектным зубом (17), ремень с локальным дефектом рабочей поверхности (рис. 13б) и измерительный инструмент.

Для предобработки измеренного диагностического сигнала методами ЦОС (масштабирование, цифровая фильтрация, интегрирование сигнала, выделение огибающей, БПФ, вейвлет-преобразование, расчёт СКЗ и пр.) и формирования входных признаков для ИНС в пакете Matlab 2020a была написана программа, на которую получено свидетельство о государственной регистрации № 2020660665 [106].

Спектры вибрации, в качестве входных данных для ИНС, представлены в виде векторов значений амплитуд колебаний в соответствующем диапазоне частот. При расчёте спектрограмм и скалограмм сигналов генерируются цветные изображения размером 781×781 pix, которые затем передаются на вход СНС.

Для предварительного обучения нейронной сети требуется датасет существенного объёма (для обучающей и тестовой выборок). В ходе практических экспериментов для каждого технического состояния было выполнено по 150 измерений вибросигнала.

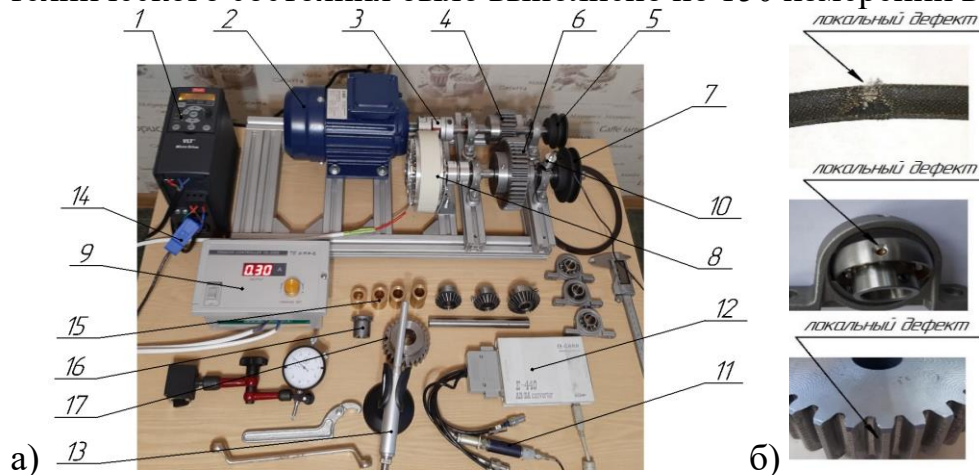


Рисунок 13 — Экспериментальная установка: а) диагностический стенд с измерительной аппаратурой, б) шестерня, подшипник и ремень с локальными дефектами

Исследования эффективности методов нейросетевой классификации состояний зубчатой передачи проведены на экспериментальной установке. Описание моделируемых дефектов представлены в табл. 4. Параметры передачи: модуль зубчатых колёс — 2,5 мм, число зубьев шестерни — 26, колёса — 44. Частота вращения шестерни — 750 об/мин (12,5 Гц). Нагрузочное устройство создавало момент сопротивления на ведомом валу — 4 Н·м. Проведено по 1200 измерений вибрации (по 150 измерений для 8 состояний), акустического сигнала и сигнала датчика тока.

Таблица 4 – Описание моделируемых технических состояний зубчатой передачи

№ состояния	Описание
1	Исправная и выверенная передача
2	Перекос колёс на угол $\varphi = 1$ градус
3	Увеличение межосевого расстояния на 1,2 мм
4	Эксцентриситет шестерни $\delta=0,3$ мм
5	Эксцентриситет колеса $\delta = 0,6$ мм
6	Локальный дефект зуба шестерни (уменьшение толщины зуба по делительной окружности на 0,5 мм)
7	Эксцентриситет шестерни $\delta = 0,3$ мм и дефектный подшипник
8	Локальный дефект зуба шестерни и дефектный подшипник

На рис. 14 представлены типичные для рассматриваемых состояний (см. табл. 4) спектры виброускорения корпуса подшипника ведущего вала шестерни в диапазоне частот от 0 до 15 000 Гц. Спектры отличаются по частотному составу. Колебания преобладают в частотном диапазоне до 8 кГц. Визуально трудно выделить составляющие, детерминированные с тем или иным дефектом передачи. Амплитуды спектров были представлены в виде вектора из 512 значений для дальнейшего использования в качестве входных признаков ИНС.

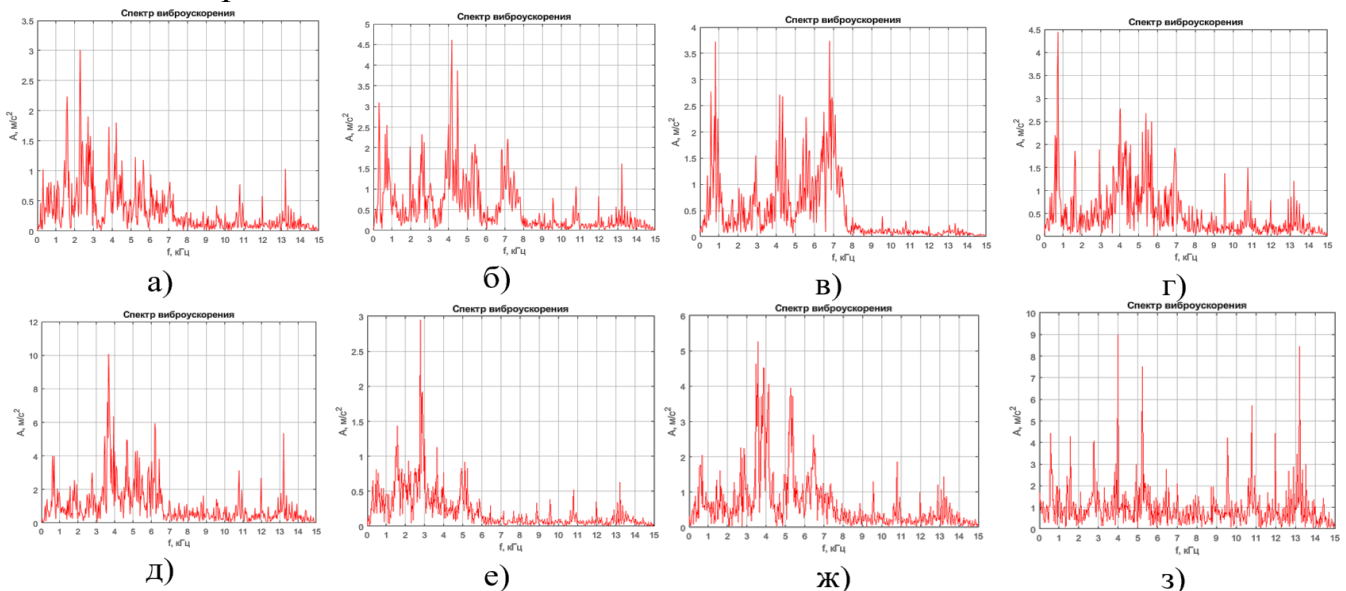


Рисунок 14 — Графики спектров виброускорения корпуса подшипника при различных состояниях зубчатой передачи: а) состояние № 1, б) состояние № 2, в) состояние № 3, г) состояние № 4, д) состояние № 5, е) состояние № 6, ж) состояние № 7, з) состояние № 8

На рис. 15 представлены спектры интегрированного вибросигнала. Энергия виброскорости сосредоточена в нижнем частотном диапазоне, поэтому спектры представлены в диапазоне частот до 1000 Гц. Во всех спектрах доминируют колебания на

частоте пересопряжения зубьев — 325 Гц, а также на частоте вращения зубчатых колёс (12,5 Гц и 7,4 Гц).

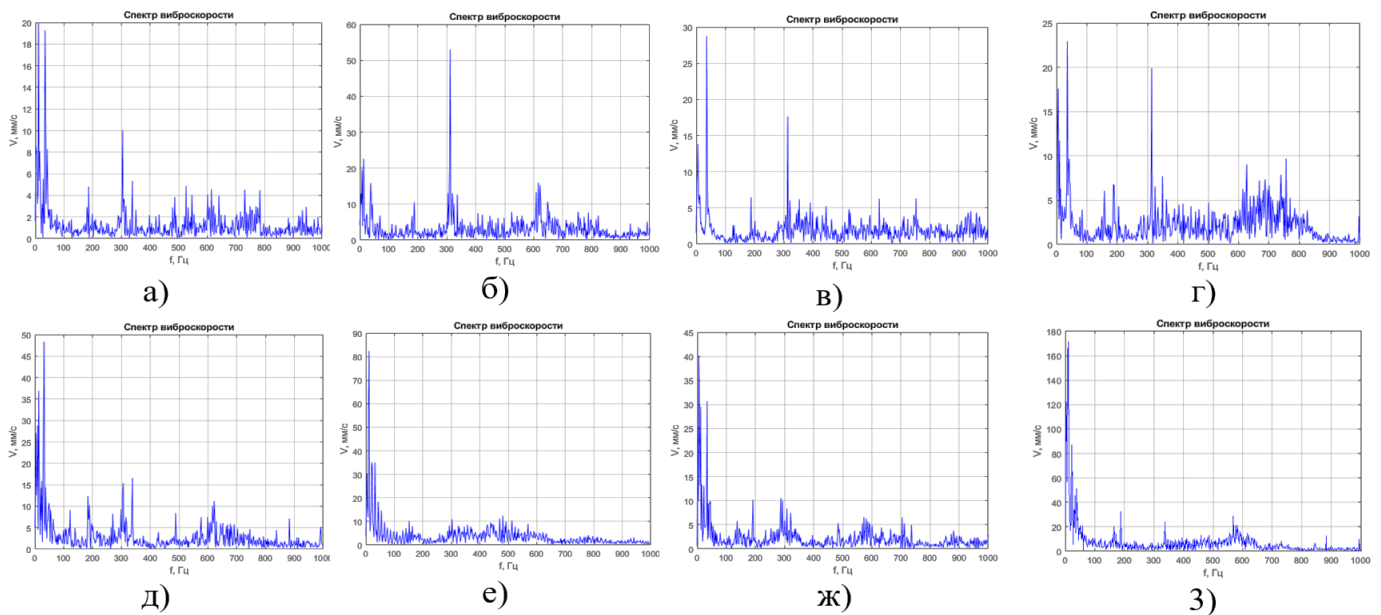


Рисунок 15 — Графики спектров виброскорости корпуса подшипника при различных состояниях зубчатой передачи: а) состояние № 1, б) состояние № 2, в) состояние № 3, г) состояние № 4, д) состояние № 5, е) состояние № 6, ж) состояние № 7, з) состояние № 8

Задача классификации состояний по амплитудам спектров виброускорения в частотном диапазоне до 15 кГц и виброскорости в диапазоне до 1 кГц с применением ИНС решена в пакете Matlab 2020a. Длина входных векторов — 512 значений амплитуд, количество целевых классов состояний — 8 (см. табл. 6). Для каждого класса использовалось по 150 векторов, при этом для обучения — 70% векторов, для валидации — 15% и оставшиеся 15% для тестов. Проведены исследования по определению эффективности классификации состояний при использовании амплитуд спектров с использованием ИНС различных архитектур:

- 1) алгоритм обучения — масштабированный метод сопряжённых градиентов (ММСГ), 10 нейронов (кросс-энтропия (CE) достигла $1,75 \cdot 10^{-5}$ за 134 эпохи обучения) (рис. 16);
- 2) алгоритм — Левенберга–Марквардта, 10 нейронов ($MSE = 0,0023$);
- 3) алгоритм — Байесова регуляризация, 10 нейронов ($MSE = 0,033$).

Анализ матриц ошибок работы сетей с различными алгоритмами оптимизации показал, что наилучшую обобщающую способность показала ИНС обученной методом обратного распространения ошибки с алгоритмом оптимизации ММСГ. Такая архитектура использована в дальнейших исследованиях.

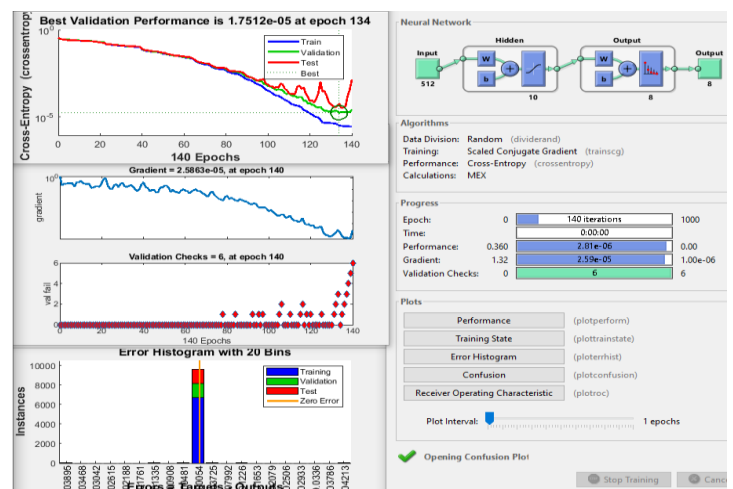


Рисунок 16 — Результаты работы ИНС со значениями амплитуд спектров виброускорения (алгоритм обучения — ММСГ)

Аналогичные исследования проведены по нейросетевой классификации состояний по спектрам виброскорости. Использовалась ИНС с одним скрытым слоем с 10 нейронами и алгоритмом обучения — ММСГ. Кросс-энтропия (СЕ) достигла $5,4 \cdot 10^{-7}$ за 102 эпохи обучения. Матрицы ошибок показали 100% правильных результатов классификации. Применение ИНС аналогичной архитектуры с 30 нейронами в скрытом слое позволило уменьшить СЕ до $2,5 \cdot 10^{-7}$.

Изучена эффективность применения спектра огибающей сигнала акселерометра в качестве диагностического признака. Процедура расчета спектра огибающей: выделение из сигнала виброускорения информативной полосы частот, которая включает резонансные частоты элементов подшипника, с помощью полосно-пропускающего фильтра (ППФ); расчет огибающей с использованием преобразования Гильберта; фильтрация сигнала ФНЧ с полосой пропускания 1 кГц, построение спектра огибающей. Для реализации процедуры расчета огибающей, в системе Matlab написан скрипт. В исследованиях использовались цифровые ППФ с полосами пропускания 3,5–5,0 кГц и 6,0–8,0 кГц. Результаты нейросетевой классификации состояний передачи по амплитудам спектра (512 значений): СЕ при использовании спектров огибающей вибросигнала (при использовании ППФ с полосой 3,5–5,0 кГц), составила $1,1 \cdot 10^{-4}$, при использовании ППФ с полосой 6,0–8,0 кГц — $4,6 \cdot 10^{-6}$. Эти показатели немного хуже, чем при использовании спектров виброскорости ($СЕ=2,5 \cdot 10^{-7}$). Матрица ошибок на тестовых выборках показала 100% правильных результатов классификации.

Проведены исследования для оценки возможности использования в задачах диагностики значений амплитуд спектров сигнала измерительного трансформатора тока. Типовые спектры сигналов датчика тока, потребляемого электродвигателем под нагрузкой зубчатой передачи для восьми технических состояний представлены на рис. 17. Визуальный анализ спектров показал отличия в их амплитудно-частотном составе.

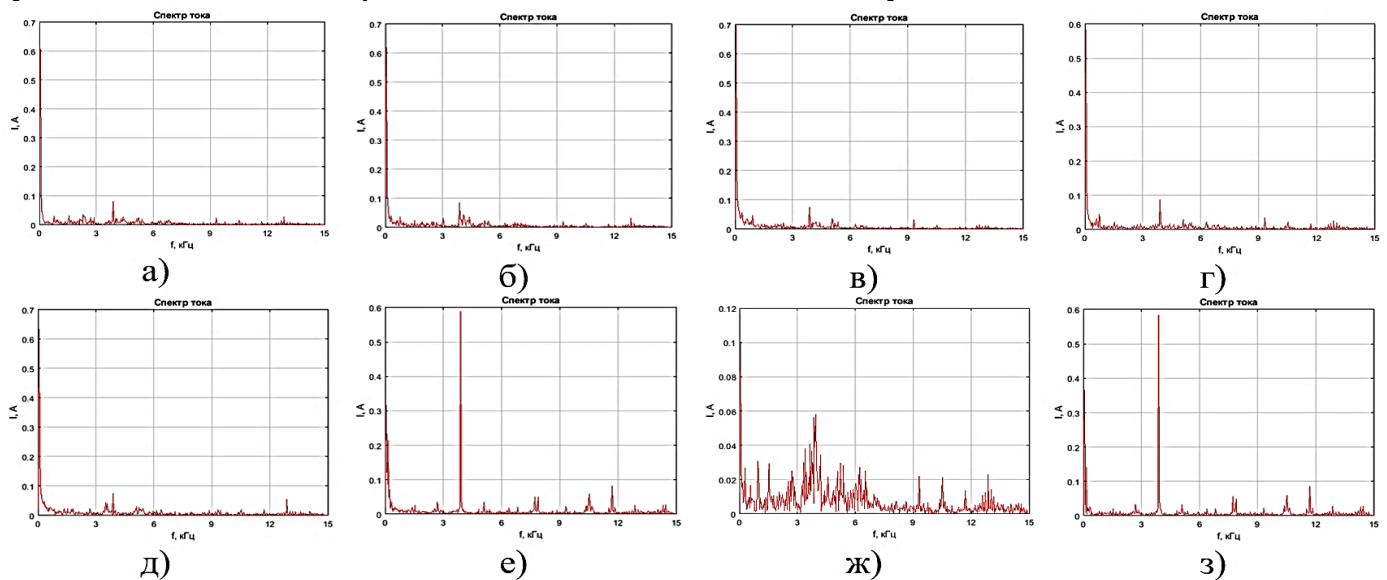


Рисунок 17 — Графики спектров сигнала датчика тока при различных состояниях зубчатой передачи: а) состояние № 1, б) состояние № 2, в) состояние № 3, г) состояние № 4, д) состояние № 5, е) состояние № 6, ж) состояние № 7, з) состояние № 8

ИНС в задаче классификации технических состояний передачи по току показала следующие результаты: кросс-энтропия достигла минимума на 37-й эпохе обучения и составила $5,16 \cdot 10^{-7}$. Матрица ошибок показала 100 % правильных результатов классификации для всех технических состояний передачи.

Для использования изображений спектрограмм и вейвлет-скалограмм сигналов с различных датчиков в качестве входных признаков СНС в программе Matlab 2020 выполнены оконное преобразование Фурье (функция `spectrogram`¹) и вейвлет-преобразование (функция `cwt`²). На рис. 18 показаны (в виде 3D-графиков) спектрограммы виброускорения корпуса подшипника ведущего вала длительностью 1 сек в частотном диапазоне от 10 Гц до 15 кГц для восьми состояний согласно табл. 4.

Визуально спектрограммы первых трёх состояний (см. рис. 18а, б, в) отличаются не сильно, наблюдаются колебания мощности сигнала во времени. На спектрограммах рис. 18г, д, е наблюдается рост амплитуд колебаний в высокочастотном диапазоне. На спектрограмме, соответствующей локальному дефекту зуба (рис. 18е), наблюдаются периодические увеличения мощности колебаний, связанные с ударами в зацеплении.

На скалограммах (рис. 19) отражается конус влияния, показывающий, где крайние эффекты становятся существенными. В работе использовался вейвлет Морзе. Длительность выборки сигнала подбиралась опытным путём, оптимальное значение составило 260 мс. Визуальный анализ скалограмм показал отличия на изображениях, которые сложно формализовать традиционными методами. Однако, в отличие от спектрограмм, на скалограммах лучше различимы низкочастотные составляющие сигнала, что объясняется логарифмическим представлением оси частот.

Для каждого состояния построено и сохранено по 150 спектрограмм и 150 вейвлет-скалограмм в виде цветных изображений с разрешением 781×781 pix. Сформированный датасет использован для обучения СНС и анализа эффективности их применения.

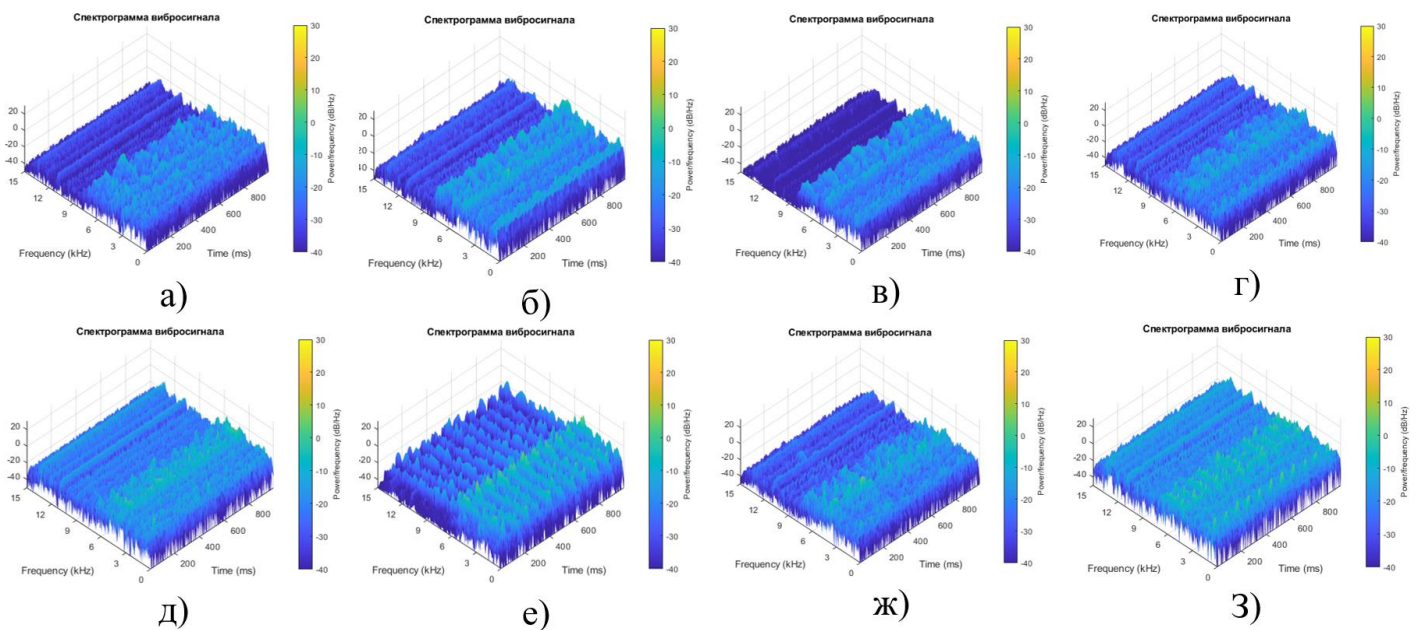


Рисунок 18 — Спектрограммы вибрации подшипника (в виде 3D-графиков) при различных состояниях передачи: а) состояние № 1, б) состояние № 2, в) состояние № 3, г) состояние № 4, д) состояние № 5, е) состояние № 6, ж) состояние № 7, з) состояние № 8

Классификация изображений с помощью СНС осуществлялась в пакете Matlab 2020. Для этой цели была написана программа, на которую получено свидетельство о госу-

¹ <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/spectrogram.html>

² https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/cwt.html?searchHighlight=cwt&s_tid=srchtitle_cwt_1

дарственной регистрации № 2021661786. В процессе исследований совершенствовалась архитектура свёрточной нейронной сети. Структурная схема разработанной сети представлена на рис. 20.

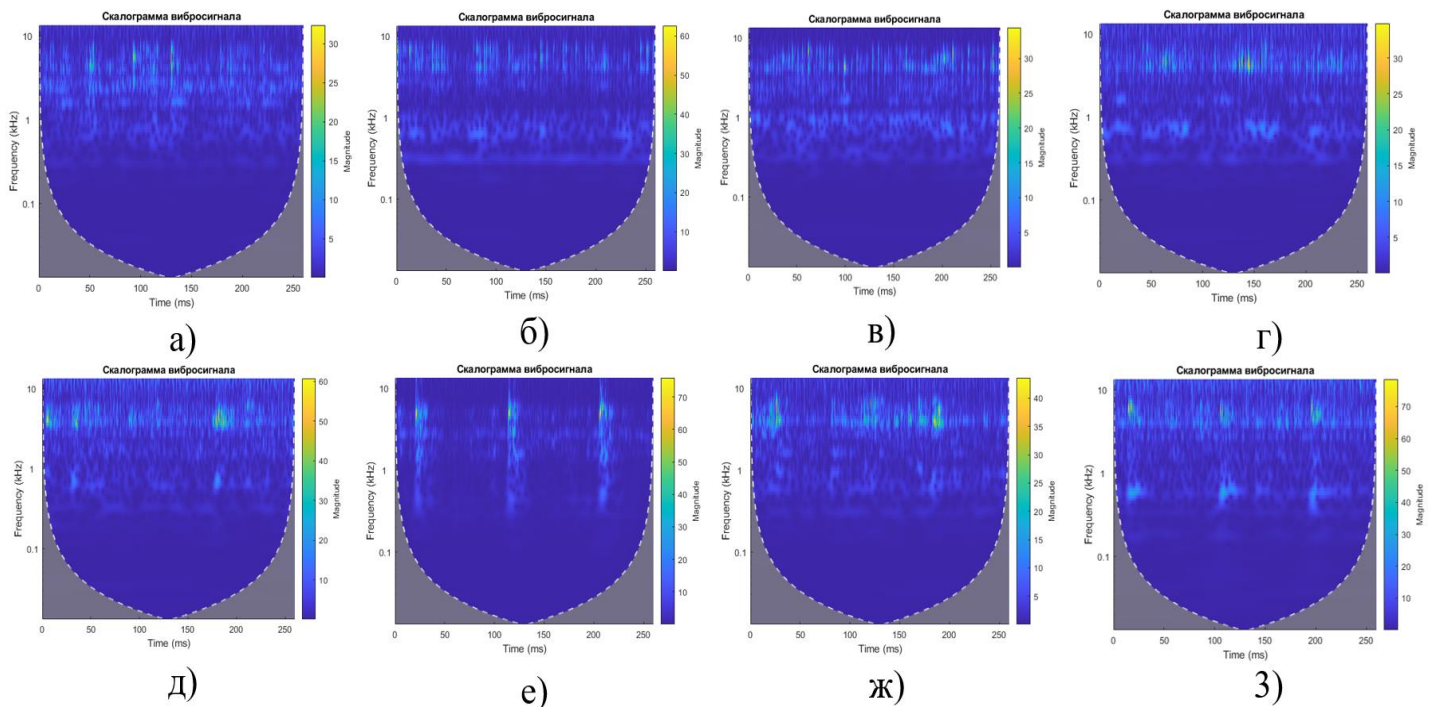


Рисунок 19 — Вейвлет-скалограммы вибрации подшипника при различных состояниях: а) состояние № 1, б) состояние № 2, в) состояние № 3, г) состояние № 4, д) состояние № 5, е) состояние № 6, ж) состояние № 7, з) состояние № 8

Архитектура разработанной СНС с оптимальными параметрами слоев в нотации Matlab имеет вид:

```
layers = [
    imageInputLayer([781 781 3],"Name","imageinput")
    convolution2dLayer([3 3],12,"Name","conv_1","Padding","same","Stride",[2 2])
    batchNormalizationLayer("Name","batchnorm_1")
    reluLayer("Name","relu_1")
    maxPooling2dLayer([3 3],"Name","maxpool_1","Padding","same","Stride",[2 2])
    convolution2dLayer([3 3],24,"Name","conv_2","Padding","same")
    batchNormalizationLayer("Name","batchnorm_2")
    reluLayer("Name","relu_2")
    maxPooling2dLayer([3 3],"Name","maxpool_2","Padding","same","Stride",[2 2])
    convolution2dLayer([3 3],48,"Name","conv_3","Padding","same")
    batchNormalizationLayer("Name","batchnorm_3")
    reluLayer("Name","relu_3")
    maxPooling2dLayer([3 3],"Name","maxpool_3","Padding","same","Stride",[2 2])
    convolution2dLayer([3 3],48,"Name","conv_4","Padding","same")
    batchNormalizationLayer("Name","batchnorm_4")
    reluLayer("Name","relu_4")
    maxPooling2dLayer([3 3],"Name","maxpool_4","Padding","same","Stride",[2 2])
    convolution2dLayer([3 3],48,"Name","conv_5","Padding","same")
    batchNormalizationLayer("Name","batchnorm_5")
    reluLayer("Name","relu_5")
    maxPooling2dLayer([4 1],"Name","maxpool_5","Padding","same","Stride",[2 2])
    dropoutLayer(0.2,"Name","dropout")
    fullyConnectedLayer(4,"Name","fc")
    softmaxLayer("Name","softmax")
    classificationLayer("Name","classoutput");
```

Графики процесса обучения и валидации СНС по спектрограммам и скалограммам вибросигнала представлены на рис. 21. Результаты обучения и тестовых проверок сети показали достоверность распознавания одного из восьми классов технического состояния зубчатой передачи по спектрограммам — 100 %, по скалограммам — 97 %.



Рисунок 20 — Архитектура разработанной свёрточной нейронной сети

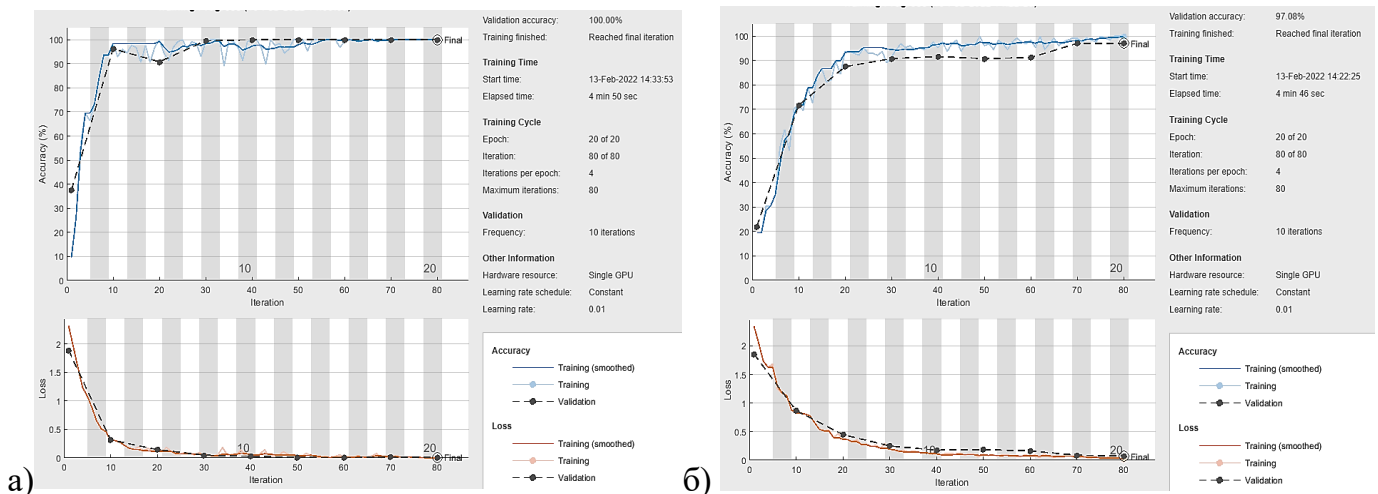


Рисунок 21 — Результаты обучения СНС и классификации восьми технических состояний зубчатой передачи: а) по спектрограммам, б) по скалограммам вибрации

Таблица 5 — Результаты нейросетевой классификации состояний ременной передачи

№	Признаки	Cross-Entropy	Кол-во эпох/ итераций	Достоверность на тестовых данных
Зубчатая передача (8 целевых классов)				
ИНС				
1	Амплитуды спектра виброускорения	$1,75 \cdot 10^{-5}$	134	99,0%
2	Амплитуды спектра виброскорости	$5,4 \cdot 10^{-7}$	102	100%
3	Амплитуды спектра огибающей виброускорения (3,5–5,0 кГц)	$1,1 \cdot 10^{-4}$	74	100%
4	Амплитуды спектра огибающей виброускорения (6,0–8,0 кГц)	$4,6 \cdot 10^{-6}$	97	100%

5	Амплитуды спектра акустического сигнала	$3,7 \cdot 10^{-7}$	22	100%
6	Амплитуды спектра сигнала датчика тока	$5,16 \cdot 10^{-7}$	37	100%
СНС				
7	Спектрограмма виброускорения	-	20/80	97,45%
8	Скалограмма виброускорения	-	20/80	97,08 %
9	Спектрограмма аудиосигнала	-	20/120	96,11%
10	Скалограмма аудиосигнала	-	20/120	93,06%
11	Спектрограмма сигнала датчик тока	-	30/180	92,22%
12	Скалограмма сигнала датчик тока	-	30/180	91,11%

Исследования эффективности методов нейросетевой классификации состояний ременной передачи проведены на экспериментальной установке (рис. 13). Смоделировано семь технических состояний ременной передачи: 1) исправная передача (выверенная геометрия шкивов, новый клиновой ремень), 2) дисбаланс ведомого шкива 52 г·см, 3) локальный дефект ремня (локальное выкрашивание резины на сопрягаемой поверхности в виде полусферы радиусом 4 мм), 4) угловой перекося ведомого шкива 2° , 5) дисбаланс ведомого шкива 52 г·см и локальный дефект ремня, 6) эксцентриситет ведомого шкива 0,65 мм и локальный дефект ремня, 7) эксцентриситет ведомого шкива 0,65 мм.

Обобщённые результаты работы ИНС и СНС при классификации состояний ременной передачи по спектрам и изображениям спектрограмм и скалограмм сигнала виброускорения, акустического сигнала и сигнала датчика тока представлены в табл. 6.

Таблица 6 — Результаты нейросетевой классификации состояний ременной передачи

№	Признаки	Cross-Entropy	Кол-во эпох/итераций	Достоверность
ИНС				
1	Амплитуды спектра виброускорения	0,009	53	99,0%
2	Амплитуды спектра виброскорости	$1,1 \cdot 10^{-6}$	80	100%
3	Амплитуды спектра огибающей виброускорения (3,5–5,0 кГц)	0,0325	65	97,5%
4	Амплитуды спектра огибающей виброускорения (6,0–8,0 кГц)	0,025	70	97,5%
5	Амплитуды спектра акустического сигнала	$1,24 \cdot 10^{-7}$	20	100%
6	Амплитуды спектра сигнала датчика тока	$7,1 \cdot 10^{-7}$	66	100%
СНС				
7	Спектрограмма виброускорения	-	30/150	97,45%
8	Вейвлет-скалограмма виброускорения	-	30/150	89,84 %
9	Спектрограмма аудиосигнала	-	20/80	77,78%
10	Вейвлет-скалограмма аудиосигнала	-	20/80	91,56%
11	Спектрограмма сигнала датчика тока	-	20/80	98,89%
12	Вейвлет-скалограмма сигнала датчика тока	-	20/80	95,56%

Исследования эффективности методов нейросетевой классификации состояний подшипника. Проведено натурное моделирование четырёх технических состояний подшипника качения типа 102 (EU 6002): 1) исправный подшипник, 2) отсутствие смазки, 3) локальный дефект внешнего кольца, 4) загрязнение песком. Частота вращения вала — 1500 об/мин (25 Гц).

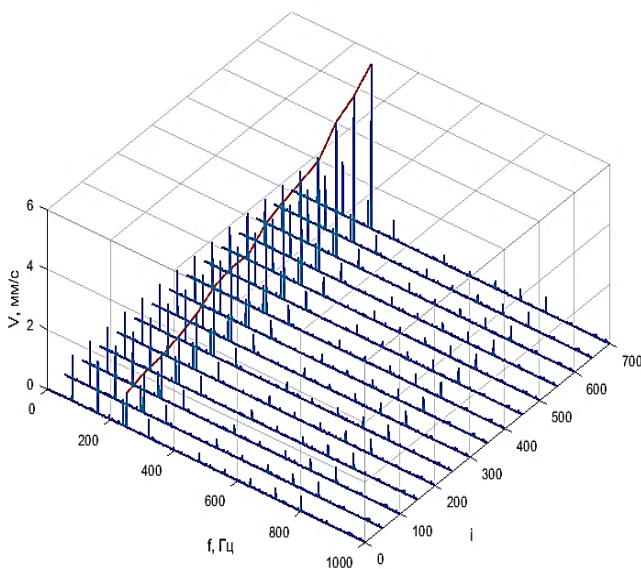
Обобщённые результаты работы ИНС и СНС при классификации состояний подшипника по спектрам и изображениям спектрограмм и скалограмм сигнала виброускорения, акустического сигнала и сигнала датчика тока представлены в табл. 7.

Изучен вопрос нейросетевого прогнозирования развития дефекта путём анализа тренда значений его диагностического признаков. С использованием диагностической

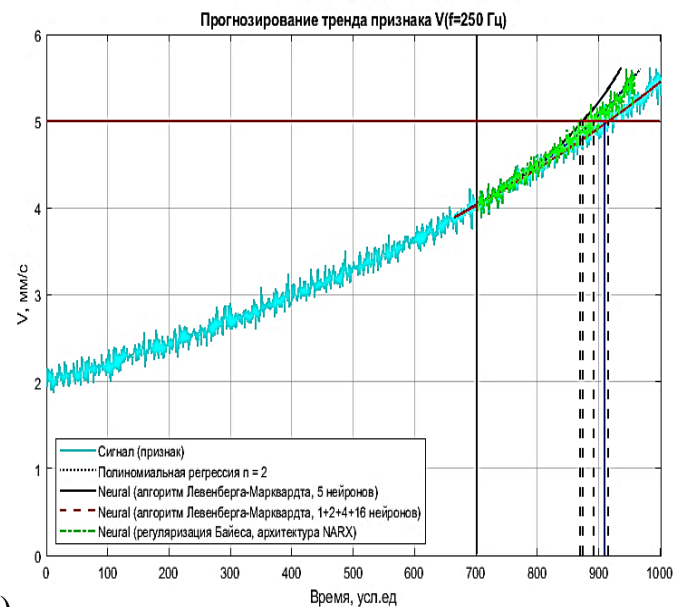
модели вальцового станка 1 р.с. смоделирован износ зубьев колёс межвальцовой передачи. Величина износа развивается по экспоненциальному закону. В результате моделирования получен тренд спектров виброскорости цапфы б/в вальца. На сигнал дополнительно наложен гауссовский шум (10 dB), моделирующий погрешности измерений. Диагностическим признаком износа зубьев является рост амплитуды колебаний на частоте их пересопряжения – 248 Гц. Т.к. диагностические измерения осуществляются через определённый интервал времени, временной ряд представлен в условных единицах времени. На рис. 22 показан каскад из 700 спектров вибрации подшипникового узла станка при деградации зубчатой передачи и линия тренда диагностического признака.

Таблица 7 — Результаты нейросетевой классификации состояний подшипника

№	Признаки	Cross-Entropy	Кол-во эпох/итераций	Достоверность на тестовых данных
ИНС				
1	Амплитуды спектра виброускорения	$8,8 \cdot 10^{-7}$	96	100%
2	Амплитуды спектра виброскорости	$9,1 \cdot 10^{-4}$	55	100%
3	Амплитуды спектра огибающей виброускорения (3,5–5,0 кГц)	$1,3 \cdot 10^{-6}$	65	97,5%
4	Амплитуды спектра огибающей виброускорения (6,0–8,0 кГц)	$5,6 \cdot 10^{-5}$	72	97,5%
5	Амплитуды спектра акустического сигнала	$1,3 \cdot 10^{-9}$	68	100%
6	Амплитуды спектра сигнала датчика тока	$2,78 \cdot 10^{-7}$	52	100%
СНС				
7	Спектрограмма виброускорения	-	30/90	100%
8	Вейвлет-скалограмма виброускорения	-	30/90	100 %
9	Спектрограмма аудиосигнала	-	20/80	99%
10	Вейвлет-скалограмма аудиосигнала	-	20/80	100%
11	Спектрограмма сигнала датчика тока	-	20/80	99%
12	Вейвлет-скалограмма сигнала датчика тока	-	20/80	65%



а)



б)

Рисунок 22 — Анализ тренда диагностического признака дефекта зубчатого зацепления: а) каскад спектров, б) линия тренда диагностического признака и результаты регрессионного анализа при решении задачи прогнозирования технического состояния

Для аппроксимации временного ряда значений признака по первым 700 замерам и последующей экстраполяции модели регрессии до ПДЗ признака, равного 5 мм/с, использованы полиномиальная модель регрессии (традиционный подход) и модели регрессии на основе ИНС различных архитектур:

1. Полиномиальная регрессия 2-го порядка $V=1,48 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0,00184 \cdot x + 2,01$, $R^2 = 0,87$.
2. Регрессионная модель на базе ИНС № 1 — сеть прямого распространения, 5 нейронов, 2 слоя, алгоритм Левенберга–Марквардта. $R^2 = 0,66$, $MSE = 3 \cdot 10^{-5}$.
3. Регрессионная модель на базе ИНС № 2 — сеть прямого распространения, 5 слоёв с архитектурой промежуточных 1+2+4+16 нейронов, алгоритм Левенберга–Марквардта. $R^2 = 0,961$, $MSE = 4,5 \cdot 10^{-7}$.
4. Регрессионная модель на базе ИНС № 3 — регуляризация Байеса, архитектура NARX. $R^2 = 0,928$, $MSE = 0,0013$.

Исследования показали, что наилучшей обобщающей способностью обладает сеть № 2. При решении подобных задач также представляют интерес рекуррентные нейронные сети (RNN).

Задача совместного применения различных типов признаков, методов анализа и дополнительной информации об объекте контроля решена путём создания управляющей программы (супервизора) — нейронной сети, которая в качестве исходной информации, при постановке окончательного диагноза, использует результаты классификации специализированных ИНС, работающих с диагностическими признаками, и дополнительной априорной информации об объекте контроля (время наработки, кол-во пусков, величина технологической нагрузки, показатели надёжности и пр.). Структурная схема разработанного метода диагностики на базе комплектной оценки результатов нейросетевой классификации представлена на рис. 23.

Рассмотрена модельная задача по решению задачи классификации технических состояний технологической машины по совокупности признаков различных типов. Модельные данные сгенерированы по математическим законам, соответствующим экспериментальным данным. Состояние машины определяется 11 признаками. Семь из них — результаты диагностирования ИНС в виде класса состояния: ТС1, ТС2, ТС3 и ТС4 (категориальные признаки представлены в виде бинарного вектора) с априорной вероятностью правильного диагноза 80%. Четыре признака (температура, наработка, потребляемый ток, время наработки после последнего ТОиР) представлены в виде количественных (непрерывных) переменных разного порядка. Рассмотрено четыре технических состояния машины: норма, дефект подшипника, дисбаланс вальца, дефект зубчатой передачи. Для каждого состояния было сгенерировано по 200 векторов значений признаков. Получены следующие результаты для ИНС различных архитектур:

- 1) алгоритм обучения — масштабированный метод сопряжённых градиентов, 10 нейронов (СЕ достигла 0,0024 за 30 эпох обучения);
- 2) алгоритм — Левенберга–Марквардта, 10 нейронов ($MSE = 0,0015$);
- 3) алгоритм — Левенберга–Марквардта, 20 нейронов ($MSE = 0,00154$);
- 4) алгоритм — Переменный градиентный спуск, 10 нейронов ($MSE = 0,013$);
- 5) алгоритм — Байесова регуляризация, 10 нейронов ($MSE = 0,0008$).

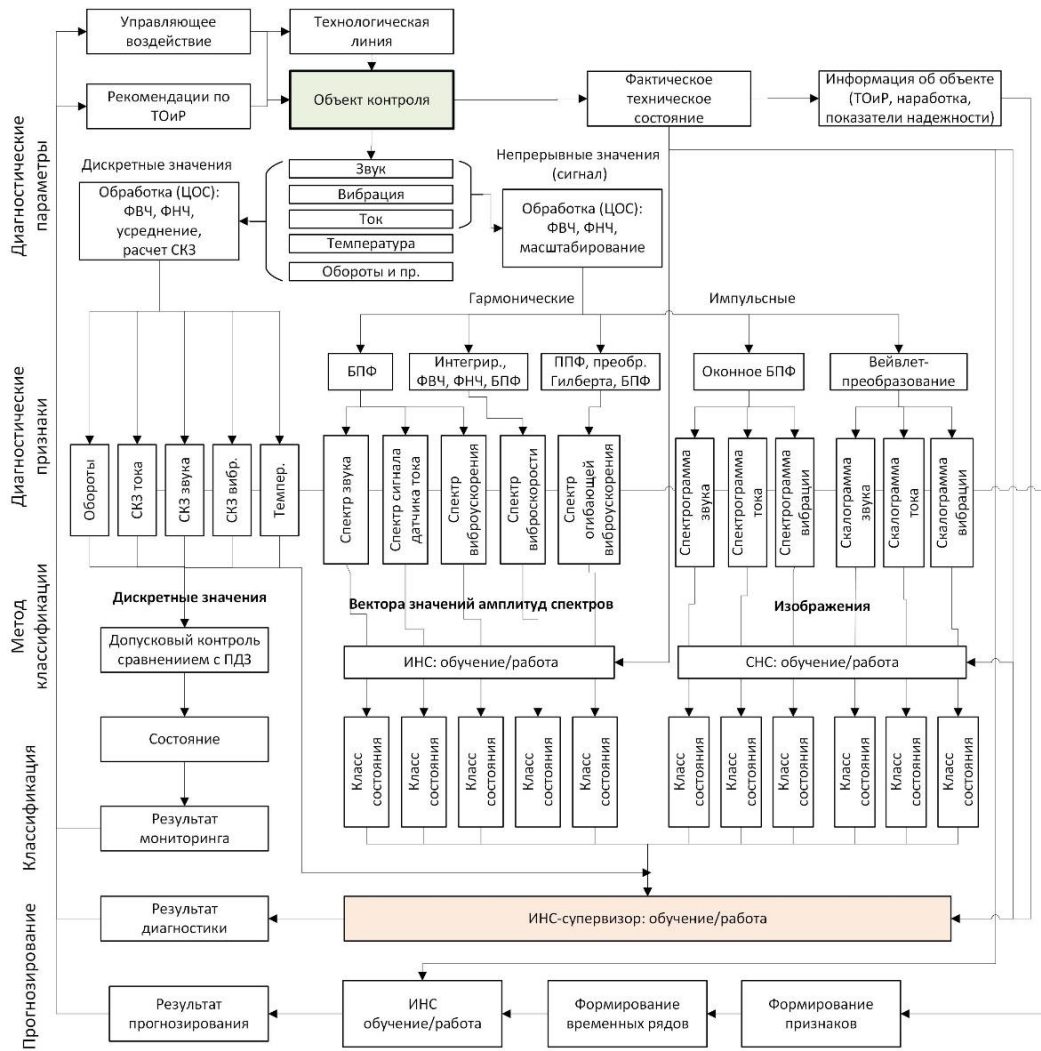


Рисунок 23 — Структурная схема разработанного метода диагностики на базе комплектной оценки результатов нейросетевой классификации

Сравнительный анализ результатов обучения и классификации ИНС пяти различных архитектур показал, что все сети эффективно обучаются и обладают высокой обобщающей способностью. Согласно обобщённой матрице ошибок, сеть № 5 выдала максимальное количество правильных ответов — 99,8% по всей совокупности данных (рис.24).

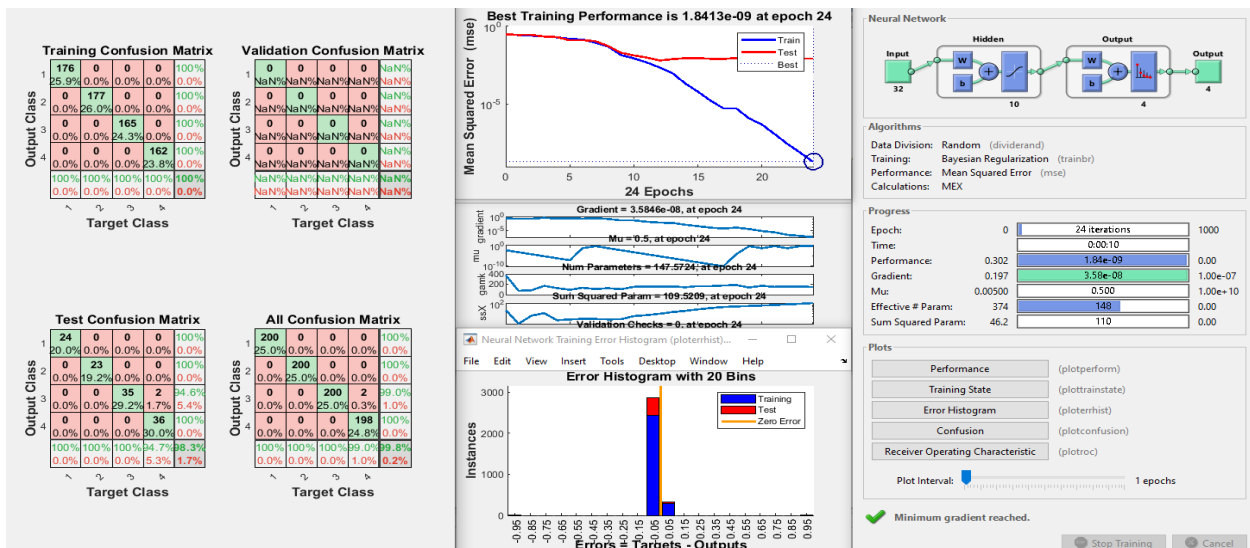


Рисунок 24 — Результаты работы ИНС при классификации по совокупности признаков (алгоритм обучения — Байесова регуляризация, 10 нейронов)

Шестая глава посвящена практической реализации научных исследований. В ФГБОУ ВО «МГУПП» разработана концепция и создан опытный образец системы мониторинга. Основной системы является разработанный нами прибор СТМ-12Т (рис. 25) (Патент РФ № 195763) с набором датчиков. Прибор осуществляет измерение, предварительную обработку, анализ и сравнение текущих значений различных диагностических параметров (вибрация, температура, потребляемый ток, излучаемый звук, частота вращения ротора) с ПДЗ и информирование персонала в случае превышения последних. Прибор состоит из одноплатного компьютера и специально разработанной измерительной платы с микроконтроллером dsPIC30F6012. Микропрограмма (свидетельство о гос. рег. № 2020614100) работает по принципу «конечный автомат» и обеспечивает связь с микрокомпьютером, тестирование датчиков, измерение диагностических параметров, допусковый контроль, включение внешней сигнализации.

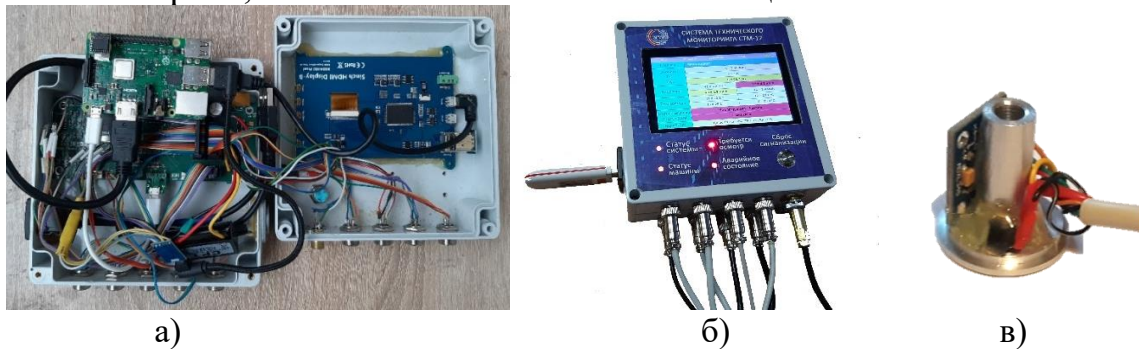


Рисунок 25 — Технические средства системы мониторинга СТМ-12Т: а) устройство прибора, б) общий вид, в) конструкция комбинированного датчика вибрации и температуры

В качестве интерфейсной платы используется одноплатный микрокомпьютер типа Raspberry Pi, к которому подключён сенсорный дисплей. Управляющая программа прибора реализована в виде Unix-приложения с графическим интерфейсом и сенсорным управлением (рис. 26). Он обеспечивает визуализацию на экране информации о состоянии машины, передачу данных через коммуникационный порт на FTP-сервер.

Для прибора специально разработан комбинированный датчик вибрации и температуры (ДВТ) (рис. 25в) на базе MEMS-акселерометра компании Analog Devices и сенсора температуры DS18B20. ДВТ снабжён МК dsPIC30F6012 и драйвером RS485.

Данные с прибора по интерфейсу RS485 или WiFi, GSM/GPRS через TCP/IP сети передаются на FTP-сервер в БД, к которой подключается специализированное приложение для дополнительной обработки, статистического анализа, прогнозирования и принятия управленческих решений.

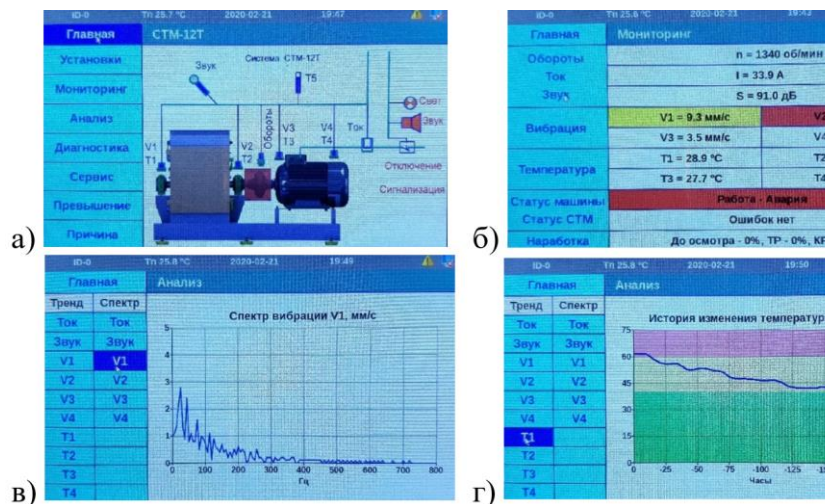


Рисунок 26 — Интерфейс прибора СТМ-12Т: а) главное окно программы; б) окно «Мониторинг»; в) окно «Анализ–Спектр»; г) окно «Анализ–Тренд»

Доступ пользователей к текущей информации из БД может быть реализован удалённо, посредством web-интерфейса или с использованием графического приложения на ПК. В рамках настоящей работы реализован интерфейс пользователя системы мониторинга в среде разработки App Designer (Matlab2020). Разработано два графических интерфейса к БД: «Мониторинг оборудования предприятия» (рис. 27а) и «Мониторинг и диагностика машины» (рис. 27б).

После входа в систему мониторинга оператор получает доступ к информации, хранящейся в БД, посредством графического интерфейса (рис. 27). Он имеет возможность просматривать текущие значения контролируемых параметров по всем машинам предприятия, тренды параметров за последние 10 часов работы машины, архивные данные. В случае превышения диагностическими признаками ПДЗ уровней «Осмотр» и «Авария» текущее значение признака подсвечивается соответственно жёлтым и красным цветами. В нижней части программы выводится сервисная информация об ошибках измерительной системы, статусе машины и системы мониторинга.

Развитие системы мониторинга промышленного оборудования связано с решением системной задачи, связанной с интеграцией объектов контроля и пользователей системы в одно общее информационное пространство. При этом эффективным решением является создание распределённой системы сбора и анализа диагностической информации и ее интеграция в SCADA-систему предприятия. Это поможет разработчикам и производителям контролировать техническое состояние своего оборудования, проводить ресурсные испытания новых машин, оценивать показатели надёжности оборудования, определить квалификационные требования к обслуживающему персоналу, требования к видам и срокам ТОиР оборудования.



Рисунок 27 — Элементы интерфейса системы удалённого мониторинга STM-12Т: а) окно «Мониторинг оборудования предприятия», б) окно «Мониторинг и диагностика машины»

Концептуальное решение распределённой системы мониторинга и диагностики (РСМиД) технологического оборудования заключается в следующем (рис. 28):

1. Технологические машины снабжены стационарно установленными датчиками физических величин (тока, звука, оборотов, давления и пр.) с аналоговым проводным интерфейсом – токовая петля 4-20 мА и вход по напряжению, а также комбинированные датчики вибрации и температуры (ДВТ) со встроенным МК (типа SMT32F407) и трансивером интерфейса RS485 для подключения к прибору по протоколу Modbus RTU.

2. Прибор диагностики реализован на базе специально разработанной измерительной платы (контроллер сбора данных – КСД) и одноплатного микрокомпьютера в промышленном исполнении.
3. Для платы КСД используется МК типа SMT32F407. На плате расположены: трансиверы RS485 для подключения ДВТ и связи КСД с микрокомпьютером по протоколу Modbus RTU, 24-х битные АЦП для аналоговых датчиков, усилители, стабилизаторы питания, модули гальванической развязки и пр.
Программное обеспечение КСД обеспечивает:
 - процедуры измерения сигналов от различных датчиков с заданной последовательностью и частотой опроса, предварительную обработку сигналов методами ЦОС (фильтрацию, масштабирование, нормирование, интегрирование, БПФ, и пр.), расчет СКЗ сигналов, сравнение значений текущих показаний датчиков с ПДЗ, в случае превышения – включение аварийной сигнализации;
 - формирование диагностических признаков для нейросетевых классификаторов (формирование векторов значений амплитуд спектров сигналов, формирование изображения вейвлет-скалограмм сигналов);
 - связь КСД с микрокомпьютером и передачу данных.
В качестве одноплатного компьютера могут использоваться аналоги Raspberry Pi в промышленном исполнении: ModBerry M500, RPI-CM3+/16GB, Onion Omega2+, NVIDIA Jetson Nano Developer Kit, ASUS Tinker Board S и др. с TCP/IP каналом доступа к сети Internet. Прототипом аппаратной реализации прибора является наша разработка — прибор СТМ-12Т. Программное обеспечение КСД обеспечивает:
 - формирование пакетов данных, передачу их с использованием SSH-туннелей по TCP/IP в БД для хранения и дальнейшего анализа, прием настроечных данных из БД;
 - классификацию текущего состояния объекта контроля по спектрам измеренных сигналов с использованием обученных и встроенных в прибор ИНС;
 - формирование трендов значений диагностических признаков для построения регрессионной модели с использованием ИНС и последующего прогнозирования сроков безопасной эксплуатации;
 - постановку окончательного диагноза машине с использованием ИНС-супервизора по совокупности результатов классификации состояний специализированными ИНС с привлечением дополнительных признаков, отражающих работу машины (нагрузку, температуру, строки проведения ТОиР и пр.), выдачу интеллектуальных решений и рекомендаций по дальнейшей эксплуатации оборудования;
 - сохранение информации в БД прибора.
4. Собранная в БД на сервере информация посредством серверных приложений передается в специализированный математический пакет, например Matlab, статистически обрабатывается, анализируется специалистами в области ТД с целью оценки корректности работы системы, проводится дополнительное обучение ИНС на новых данных. Процедура обработки данных и создание ИНС могут быть реализованы на популярном языке Python с применением специализированных библиотек Pandas, TensorFlow, Keras и др.

5. Доступ заинтересованных лиц к информации из БД о текущем техническом состоянии машины и результатах прогнозирования обеспечивается через сеть Internet посредством веб-браузера.
6. Обслуживающий персонал обеспечивает настройку приборов через web-интерфейс и ввод дополнительной информации о техническом состоянии оборудования. Информация вводится в систему в виде заранее определенных кодов, определяющих класс состояний, виды дефектов и мероприятий ТО, а также в виде текстовых сообщений. Последние в дальнейшем подлежат анализу администратором и кодированию.
7. Интеграция информации из системы мониторинга в SCADA-систему предприятия осуществляется посредством OPC-шлюза.
8. Администратор системы управляет правами доступа пользователей к информационной системе, обеспечивает тех. поддержку пользователей.
9. Обновление нейросетевых классификаторов стационарных приборов обеспечивается администратором распределенной системы мониторинга удаленно, через сеть Internet.

В седьмой главе представлены результаты апробации системы СТМ-12Т на промышленном зерноперерабатывающем оборудовании, установленном на кафедре ПМИ-ИТС (ФГБУ ВО «МГУПП»). Экспериментальные установки созданы на базе машин ударного измельчения зернового сырья — энтолейтора РЗ-БЭР (рис. 29а), деташера А1-БДГ (рис. 29б) и вальцового станка А1-БЗН (рис. 29в). Для измерений использовались прибор СТМ-12Т и разработанная измерительная система на базе АЦП Е-440.

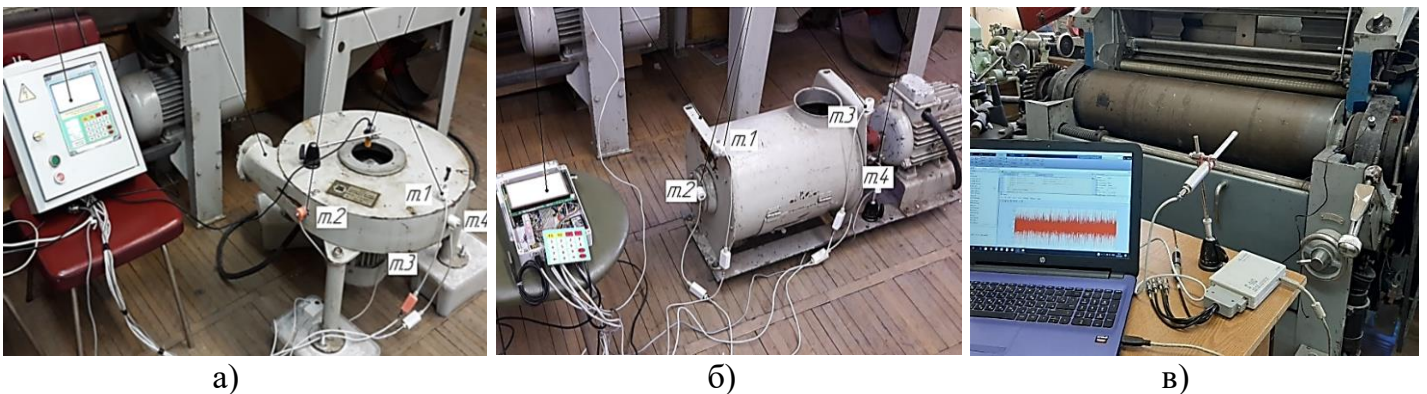


Рисунок 29 — Общий вид экспериментальных установок: а) на базе энтолейтора РЗ-БЭР; б) на базе деташера А1-БДГ; в) на базе вальцового станка А1-БЗН

Вибрации корпуса энтолейтора и деташера измерялись с помощью датчиков ДВТ. Точки измерений обозначены на рис. 29 соответственно: т.1, т.2, т.3, т.4.

Проведены исследования типового дефекта энтолейтора — дисбаланса ротора. Рассмотрены технические состояния: 1) «норма» (ротор уравновешен по ГОСТ 22061-76), 2) «предаварийное состояние» (дисбаланс ротора $D_1=120$ г·см), 3) «аварийное состояние» (дисбаланс ротора $D_2=240$ г·см). Частота вращения ротора — 2950 об/мин. Для каждого состояния проведено по 30 измерений.

Измеренные с помощью прибора СТМ-12Т данные по беспроводному (GSM) каналу связи переданы в БД под управлением SQL Server. Дальнейший статистический анализ результатов измерений проведён в программе Matlab. Диаграммы размаха СКЗ виброскорости (в диапазоне 1–1000 Гц) энтолейтора в различных точках измерения

вибрации для трёх состояний показали хорошую воспроизводимость результатов измерений. Данные, измеренные в т. 2, имеют наиболее значимые различия.

Исследования связаны с оценкой возможностей нейросетевого метода классификации для определения класса технического состояния энтолейтора по спектрам его вибрации в т. 2, огибающей сигнала потребляемого тока и излучаемого звука. В качестве входных данных ИНС использовались векторы из 128 значений амплитуд соответствующих спектров. Выходом сети являются три класса состояний. Каждому состоянию соответствовало 30 векторов.

Наилучшие результаты были получены при использовании в качестве входного вектора признаков значений амплитуд спектра виброскорости. Использовалась ИНС с одним скрытым слоем с 10 нейронами, алгоритм оптимизации — ММСТГ, функция оценки — кросс-энтропия. MSE составила 0,17 за 17 эпох обучения. Обобщённая матрица ошибок показала правильность классификации первого состояния — 93,7%, второго — 96,4%, третьего — 95,3%.

При использовании в качестве вектора входных признаков ИНС значения амплитуд спектра звукового сигнала минимальное значение MSE составило 0,35, а при использовании амплитуд спектра огибающей тока — 0,3. Полученные результаты свидетельствуют о низкой информативности спектра звука и тока при диагностике дисбаланса ротора энтолейтора.

Проведены натурные исследования по оценке эффективности применения СНС для классификации технических состояний деташера. Исследовано пять технических состояний: 1) исправное состояние; 2) статический дисбаланс ротора 300 г·см; 3) статический дисбаланс ротора 600 г·см; 4) угловой перекося валов муфты — $1,2^{\circ}$; 5) угловой перекося валов муфты — $2,0^{\circ}$.

Усредненные спектры виброскорости корпуса деташера в т. 2 для пяти технических состояний показаны на рис. 30. Наблюдаются визуальные отличия между спектрами в низкочастотном диапазоне — до 200 Гц. Увеличение амплитуды колебаний на частоте вращения валов (12,5 Гц) для состояний №2 и №3 (рис. 30б,в) является признаком дисбаланса ротора. Значительное увеличение амплитуды на частотах 50 и 100 Гц при перекося валов (рис. 30г,д) объясняется более интенсивным кинематическим взаимодействием кулачков полумуфт на частотах, кратных частоте вращения валов.

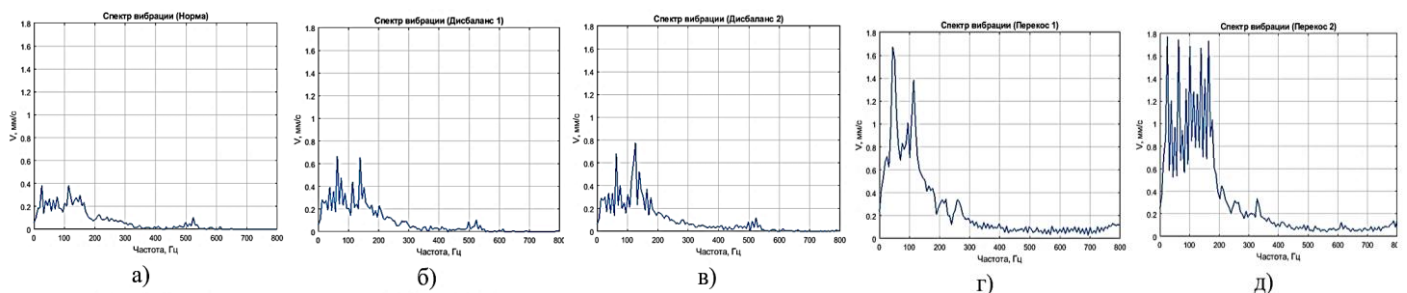


Рисунок 30 — Зависимость спектра вибрации деташера в т. 2 от технического состояния: а) состояние № 1, б) состояние № 2, в) состояние № 3, г) состояние № 4, д) состояние № 5

MSE при работе ИНС со значениями амплитуд спектров виброскорости корпуса деташера составила 0,0196 за 68 эпох обучения. Обобщённая матрица ошибок показала правильность классификации пяти состояний 95,8 %.

При использовании векторов амплитуд спектров звука и огибающей тока MSE соответственно равны 0,21 и 0,107. Обобщённая матрица ошибок показала правильность классификации состояний соответственно 84,6 % и 80,7 %.

Проведены исследования по оценке эффективности применения СНС для классификации технических состояний вальцового станка А1-БЗН. В процессе исследований станок работал на холостом ходу в режиме «привал» с увеличенным зазором – 1,0 мм. Частота вращения быстровращающегося вальца — 420 об/мин, медленно вращающегося — 340 об/мин. В ходе натуральных экспериментов было смоделировано четыре состояния станка: 1) исправный станок, 2) дисбаланс шкива 2000 кг·м, 3) дефект зубчатого колеса (уменьшение толщины зуба на 1 мм), 4) сопряжение вальцов с правого края.

Классификация состояний по изображениям спектрограмм и вейвлет-скалограммам сигналов датчика вибрации с помощью СНС осуществлялась в пакете Matlab. В исследованиях использовался сформированный датасет из 600 скалограмм (по 150 для каждого из четырёх состояний). Точность классификации по спектрограммам виброускорения подшипникового узла быстровращающегося вальца составила 89,8 %, по вейвлет-скалограммам — 97,4 %, что на практике подтверждает высокую эффективность разработанной методики нейросетевой классификации технических состояний зерноперерабатывающего оборудования по изображениям спектрограмм и вейвлет-скалограмм путём использования СНС.

Основные выводы и результаты работы

В результате проведённых исследований разработаны научно-практические основы создания распределённых систем автоматического мониторинга, диагностики и прогнозирования технического состояния зерноперерабатывающего оборудования с использованием методов нейросетевого анализа диагностической информации. Основные **выводы**:

1. Актуальность исследований в области создания автоматизированных систем технического мониторинга и диагностики оборудования обусловлена высокой категорией пожарной опасности помещений зерноперерабатывающих предприятий, низкой эффективностью используемых стратегий ТОиР оборудования и недостаточным уровнем контроля эффективности технологических процессов.
2. На основе системного анализа современного уровня развития информационных технологий, методов сбора и обработки диагностической информации, методов технического диагностирования определены направления развития диагностических систем – создание автоматических распределённых систем сбора и анализа диагностической информации с использованием нейросетевых методов анализа данных.
3. Применение современных методов ЦОС (цифровых фильтров, преобразований Фурье, Гилберта, интегрирование цифровых сигналов) позволяет повысить соотношение «полезный сигнал/помеха», выделить наиболее информативные, детерминированные с дефектом составляющие сигнала. Перспективными методами формирования диагностических признаков при ударном характере взаимодействий кинематических пар являются оконное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование.
4. Изучено влияние неисправностей технологических машин на показатели их эффективности. Установлено, что дисбаланс мукомольных вальцов 4 кг·см приводит к увеличению зольности продукта на 0,02-0,04%, уменьшению извлечения на 2-11%. Исследования влияния износа молотков на показатели работы дробилки А1-ДДП, при

использовании сит с размером отверстий от 8 до 2 мм показали, что износ молотков приводит к снижению производительности на 3-10% и увеличению удельных энергозатрат на 2-6%; анализ гранулометрического состава смеси показал снижение коэффициента выравненности на 3-6%, уменьшение среднего размера частиц на 5-8%. Исследования влияния изменения величины рабочего зазора шелушителя (в следствии износа дисков) при частоте вращения ротора 1500 об/мин 2000 об/мин показали, что при частоте вращения ротора 2000 об/мин увеличение рабочего зазора с 13 до 19 мм приводит к снижению энергозатрат на 2 кВт·ч/т, но при этом коэффициент шелушения снижается на 6%. Результаты исследований представлены уравнениями регрессии, которые определяют взаимосвязь технологических показателей с техническим состоянием машин и их диагностическими признаками.

5. Разработано четыре типа диагностических моделей оборудования: 1) роторная механическая система с консольным креплением рабочего органа на валу электродвигателя, 2) роторная система с консольным креплением ротора и механической передачей, 3) роторная двухопорная система с механической передачей, 4) двухроторная система с механической связью между роторами. Диагностические модели представлены в виде систем дифференциальных уравнений. В них заложены возможности моделирования различных дефектов оборудования: механических передач, подшипников, рабочих органов, дисбаланса, дефектов подачи продукта и пр.
6. Анализ результатов численного диагностического моделирования работы технологических машин при отсутствии и наличии дефектов показал наличие детерминированных связей между техническим состоянием и параметрами колебаний машин, позволил определить зависимости между неисправностями и их диагностическими признаками – амплитудно-частотным составом вибрации ротора.
7. Создана автоматизированная экспериментальная установка для научных исследований зависимостей между различными неисправностями машин и их диагностическими признаками. Установка включает механический стенд для моделирования неисправностей механизмов, набор датчиков и контрольно-измерительную аппаратуру на базе АЦП Е-440, а также набор специально написанных на языке Matlab программ для автоматизации процедур сбора, математической обработки, статистического анализа результатов измерений с использованием ИНС.
8. На созданной экспериментальной установке проведены исследования эффективности работы полносвязных ИНС различных архитектур и алгоритмов обучения при классификации технических состояний зубчатой, ременной передач, подшипников качения по значениям амплитуд спектров виброускорения, виброскорости, огибающей вибросигнала, тока и звука. Наилучшую обобщающую способность показала ИНС обученная методом обратного распространения ошибки с алгоритмом оптимизации ММСГ. Самые хорошие результаты классификации (по критерию СЕ) достигнуты при использовании спектров виброскорости.
9. Задача классификации состояний по изображениям спектрограмм и скалограмм сигналов с различных датчиков решена путем применения глубоких СНС. Оптимальная архитектура сети и параметры входных изображений подобраны опытным путем. Достоверность классификации по спектрограммам и скалограммам вибрации деталей механизмов во всех экспериментах составила более 95%. При использовании сигнала звука и тока достоверность составила более 85%.

10. Разработан метод прогнозирования изменения технического состояния машин с использованием ИНС. Сравнительный анализ различных моделей регрессионного анализа временного ряда диагностического признака показал, что наилучшую обобщающую способность имеют сеть прямого распространения (5 слоев с архитектурой промежуточных $1+2+4+16$ нейронов и алгоритм оптимизации Левенберга–Марквардта).
11. Разработана методика комплектной оценки технического состояния объекта контроля с использованием результатов классификации специализированных ИНС и дополнительной информации о работе оборудования (температура, потребляемый машиной ток, время наработки после ТОиР и пр.) путем создания ИНС верхнего уровня диагностики — супервизора. Математические эксперименты проведены с ИНС различных архитектур. Наилучшие результаты классификации при использовании модельных данных показала сеть с одним скрытым слоем из 10 нейронов, алгоритм обучения — Байесова регуляризация ($MSE = 0,0008$, 99,8% правильных результатов классификации).
12. На базе современных электронных компонентов, в т.ч. одноплатного микрокомпьютера в промышленном исполнении (типа Raspberry Pi4), разработаны аппаратная часть и программное обеспечение, собраны опытные образцы прибора системы диагностики СТМ-12Т (Патент РФ № 195763) и микропроцессорного комбинированного датчика ДВТ.
13. Разработана концепция распределенной online-системы мониторинга, согласно которой контролируемое оборудование снабжается приборами мониторинга с внедренными технологиями нейросетевой классификации и прогнозирования состояний. Данные с приборов передаются в БД для дополнительно анализа специалистами и используются для обучения ИНС. Доступ пользователей к информации из БД обеспечивается через сеть Internet посредством веб-интерфейса. При этом используются облачные сервисы, а поддержкой системы занимается специализированная организация. Интеграция информации из системы мониторинга в SCADA-систему предприятия осуществляется посредством OPC-шлюза.
14. Система СТМ-12Т прошла апробацию на лабораторных установках кафедры ПМи-ИТС (ФГБОУ ВО «МГУПП»). При автоматической классификации состояний зерноперерабатывающих машин по спектрам вибрации точность составила более 95%.
15. Разработанные методы диагностики и аппаратные средства (прибор СТМ-12Т с набором датчиков) пошли успешную апробацию на промышленных предприятиях (имеются соответствующие акты внедрения) и используются в учебном процессе кафедр «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» и «Информатика и вычислительная техника пищевых производств» (ФГБОУ ВО «МГУПП»).

Список работ, опубликованных по теме диссертации

I. Публикации в изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ

1. Глебов Л. Вибродиагностика оборудования предприятий хлебопродуктов / Глебов Л., Зверев С., **Яблоков А.** // Хлебопродукты. 2001. № 2. – С. 30-31.
2. **Яблоков А.Е.** Диагностическое моделирование в задачах вибродиагностики оборудования предприятий пищевых производств / Яблоков А.Е., Глебов Л.А., Потеря А.А. // Контроль. Диагностика. 2003. № 7. – С. 37-39.
3. Антонычев С.В. Вопросы технической диагностики станов холодной прокатки труб / Антонычев С.В., Поважный Д.В., **Яблоков А.Е.** // Производство проката. 2005. № 6. – С. 31-35.
4. Чернышев Д.Ю. Использование возможностей системы CosmosFloWorks при моделировании процессов в зерноочистительных воздушных сепараторах / Чернышев Д.Ю., Веденьев В.Ф., **Яблоков А.Е.** // Хранение и переработка сельхозсырья. 2008. № 3. – С. 78-81.
5. **Яблоков А.Е.** Разработка методов и средств виброакустической диагностики оборудования комбикормового производства / Яблоков А.Е. Терехин С.Ю., Глебов Л.А. // Естественные и технические науки. 2008. № 5 (37). – С. 154.
6. Терехин С. Техническая диагностика и обслуживание оборудования / Терехин С., Глебов Л., **Яблоков А.** // Комбикорма. 2008. № 6. С. 57-59.
7. **Яблоков А.Е.** Роль систем автоматизированного проектирования в процессе конструирования оборудования пищевых производств / Яблоков А.Е. // Пищевая промышленность. 2012. № 4. – С. 32-33.
8. **Яблоков А.** Техническая диагностика оборудования: перспективные методы и средства / Яблоков А. // Комбикорма. 2013. № 5. – С. 57-59
9. **Яблоков А.Е.** Математическое моделирование дефектов экспериментальной молотковой дробилки / Яблоков А.Е., Терехин С.Ю., Крицкий М.С. // Глобальный научный потенциал. 2013. № 12 (33). – С. 89-91.
10. **Яблоков А.Е.** Вибродиагностика оборудования комбикормового завода / Терехин С.Ю., Яблоков А.Е. // Естественные и технические науки. 2014. № 1 (69). – С. 136-138.
11. **Яблоков А.Е.** Повышение эффективности работы молотковой дробилки, снижение шума и вибрации / Яблоков А.Е., Казаров А.Р. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2014. № 5. – С. 41-44.
12. **Яблоков А.Е.** Продление ресурса оборудования пищевых производств путем восстановления деталей методом плазменной наплавки / Яблоков А.Е., Красновский С.В. // Естественные и технические науки. 2014. № 5 (73). – С. 91-93.
13. **Яблоков А.Е.** Стратегия технического обслуживания оборудования на базе методов диагностики / Яблоков А.Е., Погорельцев С.Г. // Молочная промышленность. 2014. № 12. – С. 12-14.
14. **Яблоков А.Е.** Влияние резинометаллических опор ротора на динамику дробилки / Яблоков А.Е., Казаров А.Р. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2015. № 5. – С. 50-54.
15. Костин А.М. Распределенные автоматизированные системы интеллектуального мониторинга оборудования пищевых предприятий / Костин А.М., **Яблоков А.Е.**, Благовещенский И.Г., Носенко С.М. // Пищевая промышленность. 2015. № 6. – С. 26-30.
16. **Яблоков А.Е.** Нейросетевые технологии в задаче мониторинга машин комбикормового производства / Яблоков А.Е. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2015. № 6. – С. 41-44.
17. **Яблоков А.Е.** Автоматизация контроля качества и гранулометрического состава продуктов размола / Яблоков А.Е., Александров А.А. // Наука и бизнес: пути развития. 2015. № 7 (49). – С. 48-51.
18. **Яблоков А.** Влияние размера отверстий сит дробилки на показатели измельчения / Яблоков А. // Комбикорма. 2016. № 11. – С. 63-65.
19. **Яблоков А.Е.** Разработка мукомольного вальца повышенной жесткости / Яблоков А.Е., Латышев М.А., Якушев А.О. // Перспективы науки. 2018. № 6 (105). – С. 16-19.
20. **Яблоков А.** Технический мониторинг, диагностика и защита оборудования / Яблоков А., Федоренко Б., Латышев М. // Комбикорма. 2018. № 6. – С. 32-34.
21. **Яблоков А.Е.** Диагностика состояния машин мукомольного производства по спектру огибающей СКЗ потребляемого тока / Яблоков А.Е., Латышев М.А., Костин А.М. // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 7 (85). – С. 6-9.
22. Алфёров Б.В. Применение нейросетевого метода для идентификации технического состояния оборудования / Алфёров Б.В., **Яблоков А.Е.**, Гускова Т.В., Федоренко Б.Н. // Перспективы науки № 7(118) 2019. – С. 12-14.
23. **Яблоков А.Е.** Вибродиагностика оборудования зерноперерабатывающих предприятий с использованием методов нейросетевого анализа данных // Яблоков А.Е., Федоренко Б.Н., Латышев М.А., Габуня Т.Г., Ольшанова Е.А. // Наука и бизнес: пути развития, № 7 (97), 2019. – С. 10-13.
24. **Яблоков А.Е.** Распределенная система мониторинга и технической диагностики оборудования // Яблоков А.Е., Благовещенский И.Г., Ольшанова Е.А. // Комбикорма, №1, 2021. – С. 33-35 DOI: 10.25741/2413-287X-2021-01-2-132
25. **Яблоков А.Е.** МГУПП: новые подходы к обучению методам автоматизированного проектирования / Яблоков А.Е., Благовещенский И.Г., Федоренко Б.Н. // Комбикорма, № 6, 2021. – С. 33-35. DOI 10.25741/2413-287X-2021-07-2-143
26. **Яблоков А.Е.** Применение СНС в вибродиагностике по спектрограммам и вейвлет-скалограммам сигнала / Яблоков А.Е., Жила Т.М. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №12 2021. – С.452-456. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-452-457

II. Учебники, учебные пособия и монографии

27. Науменко А.М., Вибрация и виброизолирующие системы машин: Учебное пособие / Науменко А.М., Огурцов Ю.М., **Яблоков А.Е.** – М., МГУПП, 2005, – 56 с.
28. Глебов Л.А. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Технологическое оборудование предприятий хлебопродуктов» / Глебов Л.А., Ведентьев В.Ф., Огурцов Ю.М., Науменко А.М., **Яблоков А.Е.** – М., МГУПП, 2006, – 136 с.
29. **Яблоков А.Е.** Методические указания к использованию расчетных модулей САПР при курсовом и дипломном проектировании. – М., МГУПП, 2006, – 47 с
30. Глебов, Л.А. Технологическое оборудование и поточные линии предприятий по переработке зерна: учебник / Л.А. Глебов, А.Б. Демский, В.Ф. Веденьев, **А.Е. Яблоков.** – М.: ДеЛи принт, 2010. – 696 с
31. **Яблоков А.Е.** Научные основы проектирования и конструирования машин и аппаратов зерноперерабатывающих предприятий: Монография. – М.: МГУПП, 2021. – 164 с.
32. **Яблоков А.Е.** Научные основы создания интеллектуальных систем мониторинга и диагностики оборудования зерноперерабатывающих предприятий: Монография. – М., МГУПП 2022. –176 с.

III. Научные публикации в прочих изданиях:

33. Таранин С А. Оптимизация процесса шелушения ячменя в малогабаритном шелушителе / Таранин С А., **Яблоков А.Е.** // Объединенный научный журнал. 2005. № 22. – С. 87-89.
34. Терехин С. Ю. Научно-практические аспекты диагностики оборудования зерноперерабатывающих предприятий / Терехин С. Ю., Глебов Л. А., **Яблоков А. Е.** // Объединенный научный журнал. 2008. № 10 (216). – С. 49–50.
35. **Яблоков А. Е.** Информационное обеспечение функциональной диагностики оборудования пищевых предприятий / Терехин С. Ю., Глебов Л. А., **Яблоков А. Е.** // Труды Московского государственного университета пищевых производств. Выпуск 1 / под общей редакцией С. А. Хуршудяна. – М.: ИК МГУПП, 2008. – С. 235–244.
36. Modern condition of the problem of the technical diagnostics of cold pilgering roll mills meer kpw Antonychev S.V., **Yablokov A.E.** Technical Diagnostics and Nondestructive Testing. 2005. № 4. – С. 8.
37. Казаров А.Р. Исследование повышенной вибрации оборудования мелькомбинатов / Казаров А.Р., **Яблоков А.Е.** // Научно-исследовательские публикации. 2014. № 13 (17). – С. 26-31.
38. Казаров А.Р. Повышенная вибрация оборудования мелькомбинатов / Казаров А.Р., **Яблоков А.Е.** // Общество и цивилизация. 2014. № 3 (10). – С. 69-74.
39. **Яблоков А.Е.** Перспективные методы технической диагностики оборудования пищевых производств / Яблоков А.Е., Костин А.М., Благовещенская М.М. // Вопросы науки. №7. 2015 – С. 4-10.
40. The role of the didactic features of the textbook on food engineering in the efficiency of bachelor training / Fedorenko B.N., Kirsh I.A., **Yablokov A.E.**, Zhitkov V.V. / EDULEARN18 Материалы конференции. 2018 Издательство: IATED Academy Десятая международная конференция по образованию и новым технологиям обучения - EDULEARN18 Пальма, Испания, 02-04 июля 2018. DOI: 10.21125 / edulearn.2018.2625
41. **Яблоков А.Е.** Комбинированный датчик вибрации и температуры для системы мониторинга технологического оборудования / Яблоков А.Е., Федоренко Б.Н., Благовещенский И.Г., Ольшанова Е.А. // Scientific discussion (Чехия), №32 (июнь) 2019. – С.51-54
42. **Яблоков А.Е.** Диагностика технологического оборудования по интегральным характеристикам вибрации и звука с использованием методов машинного обучения / Яблоков А.Е., Федоренко Б.Н., Благовещенский И.Г. // Проблемы современной науки и образования №7 (140), 2019. – С.25-29
43. Белова Ю.Н. Развитие индустрии здорового питания с использованием прогрессивных информационных решений / Белова Ю.Н., Максимов А.С., Ношин А.А., Суворов О.А., **Яблоков А.Е.**, Якушев А.О. // Health, Food & Biotechnology, 2020. 2(1), – С. 24-33.
44. Гольдюшов А.И. Анализ эффективности интеллектуальной системы диагностики СТМ-12Т / Гольдюшов А.И., **Яблоков А.Е.** // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 5-1 (61). – С. 82-88.
45. **Яблоков А.Е.** Физическая и программная реализация цифрового датчика вибрации и температуры для системы технического мониторинга / Яблоков А.Е., Ольшанова Е.А., Терехин С.Ю. // Заметки ученого. 2021. № 1. – С. 35-42.
46. **Яблоков А.Е.** Повышение безопасности производства путем разработки и внедрения систем мониторинга технологических машин / Яблоков А.Е., Генералов А.С., Жила Т.М. // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 4-2 (72). – С. 262-267.
47. **Яблоков А.Е.** Совершенствование методов вибрационной диагностики оборудования пищевых производств / Яблоков А.Е., Ярешко А.И., Генералов А.С. // Наука, техника и образование. 2021. № 5 (80). – С.14-18.
48. **Яблоков А.Е.** Проблема повышенного уровня шума и вибраций оборудования зерноперерабатывающих предприятий / Яблоков А.Е., Астахов В.А., Хамлова К.А. // Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса: сборник статей Международной научно-практической конференции молодых ученых. Том IV/ Пензенский ГАУ. – Пенза: РИО ПГАУ, 2021. – С.185-188.
49. **Яблоков А.Е.** Применение методов ЦОС в задачах акустической диагностики оборудования зерноперерабатывающих предприятий / Яблоков А.Е., Жила Т.М. // Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса: сборник статей Международной научно-практической конференции молодых ученых. Том IV/ Пензенский ГАУ. – Пенза: РИО ПГАУ, 2021. – С.203-206
50. Якушев А.О. Симуляторы и цифровые двойники. Технологии будущего. / Якушев А.О., Федоренко Б.Н., **Яблоков А.Е.**, Быков А.В. // Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности: сборник научных докладов конференций. М.: МГУПП, 2021. – С.161-176

51. Федоренко Б.Н. Инженерное обеспечение конвергентных природоподобных технологий / Федоренко Б.Н., Яблоков А.Е., Якушев А. // Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности: сборник научных докладов конференции. М.: МГУПП, 2021. – С.411-426
52. Яблоков А.Е. Диагностика оборудования по спектрограммам вибросигнала методами машинного обучения / Яблоков А.Е., Жила Т.М., Генералов А.С. // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд : науч. сб. Вып. XV/ ФГБУ НИИПХ Росрезерва; под общ. ред. С. А. Сучкова. – М.: Галлея-Принт, 2021. – С. 288-297
53. Яблоков А.Е. Применение СНС в задаче классификации технического состояния оборудования по вейвлет-скалограмм вибрации / Яблоков А.Е., Жила Т.М. // Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов №5 2021. – С. 18-24.

III. Доклады на научных конференциях

54. Яблоков А.Е. Применение методов функциональной вибродиагностики вальцовых станков с целью повышения эффективности процесса измельчения / Яблоков А.Е., Глебов Л.А., Зверев С.В. // В книге: Управление свойствами зерна в технологии муки, крупы и комбикормов Тезисы докладов 2-ой Международной научной конференции. 2000. – С. 39-40.
55. Терехин С. Ю. Информационные технологии в проектировании оборудования пищевых производств / Терехин С. Ю., Яблоков А.Е., Чернышев Д. Ю. // Сборник докладов V юбилейной конференции «Высокоэффективные пищевые технологии, методы и средства для их реализации». М.: МГУПП, 2007. – С. 396–397.
56. Яблоков А.Е. Качество работы оборудования — качество готовой продукции / Яблоков А.Е., Терехин С. Ю. // Сборник докладов V юбилейной конференции «Высокоэффективные пищевые технологии, методы и средства для их реализации». М.: МГУПП, 2007. – С. 384–386.
57. Яблоков А.Е. Разработка методов и средств виброакустической диагностики оборудования комбикормового производства / Яблоков А.Е., Терехин С. Ю. // Сборник докладов VI научно-технической конференции с международным участием «Высокоэффективные пищевые технологии, методы и средства их реализации: эффективное использование ресурсов отрасли» (г. Москва). М.: МГУПП, 2008. – С. 183.
58. Терехин С. Ю. Виброакустическая диагностика оборудования комбикормового производства / Терехин С. Ю., Глебов Л. А., Яблоков А. Е. // Сборник докладов VI научно-технической конференции с международным участием «Высокоэффективные пищевые технологии, методы и средства их реализации: эффективное использование ресурсов отрасли» (г. Москва). М.: МГУПП, 2008. – С. 184–185.
59. Яблоков А. Е. Разработка стационарной системы диагностики (ССД-01) технологического оборудования зерноперерабатывающих предприятий / Яблоков А. Е. Терехин С. Ю., Соколов А. В. // Живые системы и биологическая безопасность населения: Материалы X Международной научной конференции студентов и молодых ученых. М.: МГУПП, 2013. – С. 258–260.
60. Казаров, А.Р. Чувствительность молотковой дробилки к дисбалансу / Казаров, А.Р., Яблоков А.Е. // XI научно-практическая конференция с международным участием «Живые системы» / Отв. ред. к.т.н. А.В. Лаврова, к.п.н., доц. Т.А. Стахи. – М.: ИК МГУПП, 2013. – С. 40-44.
61. Яблоков А.Е. Анализ признаков отказа машин мукомольного производства методами математического и натурального моделирования / А.Е. Яблоков, Т.В. Старостина, Д.В. Сосулин, И.А. Конюхов // XI научно-практическая конференция с международным участием «Живые системы» / Отв. ред. к.т.н. А.В. Лаврова, к.п.н., доц. Т.А. Стахи. – М.: ИК МГУПП, 2013. – С. 106-110.
62. Казаров А.Р. Определение АФЧХ молотковой дробилки путем анализа ее колебаний на выбеге ротора / Казаров А.Р., Яблоков А.Е. // XI научно-практическая конференция с международным участием «Экспертиза, оценка качества, подлинности и безопасности пищевых продуктов» / Отв. ред. к.т.н. А.В. Лаврова, к.п.н., доц. Т.А. Стахи. – М.: ИК МГУПП, 2013. – С. 30-33.
63. Казаров А.Р. Совершенствование методов и средств снижения шума и вибрации оборудования на зерноперерабатывающих предприятиях / Казаров А.Р., Яблоков А.Е. // VI межведомственная научно-практическая конференция «Тавароведение, общественное питание и технологии хранения продовольственных товаров». – М.: ИК МГУПП, 2013. – 92с. – С. 168 – 171.
64. Яблоков А. Е. Размольный узел мукомольного вальцового станка / Старостина Т.В., Конюхов И.А. Яблоков А.Е. // Общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов «День науки». Сборник материалов в 4 ч. / Ч III: Общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов «День наука». Сборник материалов / Отв. ред. д.т.н. проф. Ю.А. Тырсин. – М.: ИК МГУПП, 2014. – С.135-138.
65. Казаров А.Р. Избыточный шум на мелькомбинатах / Казаров А.Р., Яблоков А.Е. // Достижения и перспективы технических наук сборник статей III Международной научно- практической конференции (10 октября 2014 г., г. Уфа). – Уфа: Аэтерна, 2014. – С. 37 – 41.
66. Казаров А.Р. Повышенная вибрация оборудования мелькомбинатов / Казаров А.Р., Яблоков А.Е. // Общество и цивилизация: Тенденции и перспективы развития в XXI веке / сборник статей по материалам международной научно-практической конференции (24 октября 2014 г. Воронеж). – Воронеж, 2014, № 3(10). - 100 с. – С. 69 – 74.
67. Яблоков А.Е. Обеспечение эксплуатационной надежности оборудования методами вибрационной диагностики / Яблоков А.Е. // Сборник научных трудов SWorld. – Выпуск 3(36). Том 4. – Одесса: КУПРИ-ЕНКО СВ, 2014 – 114 с. – С. 97-100.
68. Яблоков А. Е. Повышение эффективности методов технического обслуживания оборудования молочного производства / Яблоков А. Е. Погорельцев С. Г. // Сборник трудов III Международный форум «Инновационные технологии обеспечения безопасности и качества продуктов питания. Проблемы и перспек-

- тивы»: в 2 ч. / Ч. 2: Сборник трудов III Международного форума «Инновационные технологии обеспечения безопасности и качества продуктов питания. Проблемы и перспективы». / Отв. ред. – М.: ИК МГУПП, 2014. – С. 208-211.
69. **Яблоков А. Е.** Повышение эффективности методов технического обслуживания оборудования молочного производства / **Яблоков А. Е.** Погорельцев С. Г. // Общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов «День наука». Сборник материалов в 4 ч. / Ч I: Общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов «День наука». Сборник материалов / Отв. ред. д.т.н. проф. Ю.А. Тырсин. – М.: ИК МГУПП, 2014. – С.273-275.
 70. Казаров А.Р. Шум и вибрация как факторы, влияющие на качество продуктов зерноперерабатывающих предприятий / Казаров А.Р., **Яблоков А.Е.** // Ч. 2: Сборник трудов III Международного форума «Инновационные технологии обеспечения безопасности и качества продуктов питания. Проблемы и перспективы». V Международная научно-техническая конференция «Безопасность и качество продуктов питания. Наука и образование» / Отв. ред. – М.: МГУПП, 2014. – С. 41-43.
 71. **Яблоков А.Е.** Экспертные системы в задачах технического диагностирования оборудования пищевых производств / Яблоков А.Е. и др. // Современные тенденции технических наук / Материалы IV Международной научной конференции. Казань, Октябрь 2015. – С. 96-101.
 72. **Яблоков А.Е.** Влияние измельчаемого продукта на шумовибрационные характеристики дробилкой молотковой МДУ-1 / Яблоков А.Е., Казаров А.Р. // В сборнике: тенденции формирования науки нового времени сборник статей международной научно-практической конференции. УФА, 2015. с. 27-28.
 73. **Яблоков А.Е.** Оптимизация конструкции вальцового станка на основе статического анализа методом конечных элементов в системе SolidWorks / Яблоков А.Е., Винокуров Ф.Б. // В сборнике: день науки общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов, сборник материалов. 2015. – С. 46-49.
 74. **Яблоков А.Е.** Аэродинамический анализ системы рециркуляции воздушного потока зерноочистительных машин методом компьютерного моделирования / Яблоков А.Е., Ковалев В.С. // В сборнике: день науки общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов, сборник материалов. 2015. – С. 112-115.
 75. **Яблоков А.Е.** Экспертные системы в задачах технического диагностирования оборудования пищевых производств / Яблоков А.Е., Костин А.М., Благовещенская М.М. // В сборнике: современные тенденции технических наук материалы IV международной научной конференции. Казань, 2015. с. 96-101.
 76. **Яблоков А.Е.** Аэродинамический анализ системы рециркуляции воздушного потока зерноочистительных машин методом компьютерного моделирования / **Яблоков А.Е.**, Ковалев В.С., Нуждин А.А., // В книге: День науки общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов, сборник материалов. 2015. – С. 112-115.
 77. **Яблоков А.Е.** Пути снижения шума и вибрации молотковой дробилки / **Яблоков А.Е.**, Моисеев А.В. // В сборнике: Сборник материалов конференций 2015. – С. 149-152.
 78. **Яблоков А.Е.** Модернизация вальцового станка путем использования шести вальцов / **Яблоков А.Е.**, Рыжов Д.В. // В сборнике: Сборник материалов конференций 2015. – С. 184-187.
 79. Гусев С.О. Совершенствование конструкции мукомольного вальцового станка. Гусев С.О., Сомонов И.А., **Яблоков А.Е.** // В сборнике: Сборник материалов конференций 2015. – С. 48-51.
 80. Винокуров Ф.Б. Оптимизация конструкции вальцового станка на основе статистического анализа методом конечных элементов в системе SolidWorks / Винокуров Ф.Б., **Яблоков А.Е.** // В сборнике: Сборник материалов конференций. 2015. – С. 37-39.
 81. Казаров А.Р. Снижение шума и вибрации в источнике их возникновения / Казаров А.Р., **Яблоков А.Е.** // В книге: День науки Общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов, сборник материалов. 2015. С. 100-102.
 82. Перов К.А. Применение резинометаллических опор ротора в конструкции молотковой дробилки / Перов К.А., **Яблоков А.Е.** // В сборнике: День Науки. Общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов. 2016. С. 162-165.
 83. **Яблоков А.Е.** Обзор дробилок ударного действия. Пальцевая дробилка / Яблоков А.Е. Максименков Е.А. // В сборнике: День Науки Общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов. 2016. С. 134-137.
 84. Сахаров М.Е. Разработка размольного блока вальцового станка / Сахаров М.Е., **Яблоков А.Е.** // В сборнике: День Науки Общеуниверситетская научная конференция молодых учёных. 2016. – С. 203-204
 85. **Яблоков А.Е.** Совершенствование машин для измельчения зернового сырья / Ейвин С., Воскобойников Д., Яблоков А. // В сборнике: День Науки общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов. 2016. – С. 64-67.
 86. **Яблоков А.Е.** Модернизация межвальцовой передачи вальцового станка А1-БЗН / Яблоков А.Е., Мокроусова В.Е. // В сборнике: День Науки Общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов. 2016. – С. 150-153.
 87. **Яблоков А.Е.** Использование распределенных автоматизированных систем для интеллектуального мониторинга оборудования зерноперерабатывающих предприятий / Костин А.М., Яблоков А.Е., Благовещенская М.М., Карелина Е.Б. // В сборнике: автоматизация и управление технологическими и бизнес-процессами в пищевой промышленности сборник научных докладов II международной научно-практической конференции. 2016. – С. 10-16.
 88. **Яблоков А.Е.** Модернизация узла подачи продукта в вальцовый станок ВС / Яблоков А.Е., Тимошенко Т.В. // В сборнике: День Науки Общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов. 2016. – С. 214-217.

89. **Яблоков А.Е.** Модернизация узла подачи продукта в вальцовый станок / **Яблоков А.Е.,** Сметкин В.И. // В сборнике: День Науки Общеуниверситетская научная конференция молодых учёных и специалистов. 2016. – С. 206-209.
90. **Яблоков А.Е.** Использование нейросетевых технологий в задачах мониторинга / оборудования зерноперерабатывающих предприятий / **Яблоков А.Е.,** Савкин И.А., // В книге: Общеуниверситетская студенческая конференция студентов и молодых ученых "День науки" Сборник материалов конференции: в 6 частях. 2017. – С. 63-66.
91. **Яблоков А.Е.** Модернизация механизма регулирования рабочего зазора вальцового станка А1-БЗН / **Яблоков А.Е.,** Блудов А.А. // В книге: Общеуниверситетская студенческая конференция студентов и молодых ученых "День науки" Сборник материалов конференции: в 6 частях. 2017. – С. 19-21.
92. **Яблоков А.Е.** Модернизация питателя вальцового станка А1-БЗН / **Яблоков А.Е.,** Рачкова А.И. // В книге: Общеуниверситетская студенческая конференция студентов и молодых ученых "День науки" Сборник материалов конференции: в 6 частях. 2017. – С. 45-47.
93. Коломиец А.В. Модернизация сепаратора путем использования системы рециркуляции воздушного потока / Коломиец А.В., **Яблоков А.Е.** // В книге: Общеуниверситетская студенческая конференция студентов и молодых ученых "День науки" Сборник материалов конференции: в 6 частях. 2017. – С. 27-30.
94. Нужных И.А. Модернизация цилиндрического триера с целью повышения эффективности очистки зерна / Нужных И.А., **Яблоков А.Е.** // В книге: Общеуниверситетская студенческая конференция студентов и молодых ученых "День науки" Сборник материалов конференции: в 6 частях. 2017. – С. 35-37.
95. **Яблоков А.Е.** Применение системы технического мониторинга СТМ-12Т для контроля дисбаланса ротора / **Яблоков А.Е.,** Алфёров Б.В. // В сборнике: Новые решения в упаковке пищевой продукции I научно-практическая конференция с международным участием «Передовые пищевые технологии: состояние, тренды, точки роста», Секция: Новые решения в упаковке пищевой продукции. 2018. – С. 6-15.
96. Житков В.В. Пивная дробина как источник альтернативной энергии / Житков В.В., Федоренко Б.Н., **Яблоков А.Е.,** Мачнев А.В. // В сборнике: Современные научные исследования: тенденции и перспективы Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под общей редакцией Е.А. Назарова. 2020. – С. 34-41.
97. **Яблоков А.Е.** Разработка и экспериментальная проверка математической диагностической модели оборудования роторного типа / **Яблоков А.Е.,** Олышанова Е.А. // В сборнике: Исследователь года 2020. Сборник статей IV Международного научно-исследовательского конкурса. МЦНП «Новая наука». 2020. – С. 52-59. (Диплом за 1-е место в Международном конкурсе «Исследователь 2020 года»).
98. **Яблоков А.Е.** Классификация технического состояния оборудования по спектрограммам вибрации с применением СНС / **Яблоков А.Е.,** Жила Т.М., Генералов А.С. // В сборнике: Международного научно-исследовательского конкурса (28 июня 2021 г.) – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2021. – С. 9-17.
99. **Яблоков А.Е.** Повышение информативности спектрограмм вибросигнала и их использование в нейросетевой классификации состояния оборудования / **Яблоков А.Е.** Жила Т.М. // В сборнике: Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути [зб. наук, пр.]: матеріали XXI міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Київ, 22 жовтня 2021 р.). Київ, 2021. – С. 322-333.

IV. Авторские свидетельства и программы для ЭВМ

100. Патент на изобретение RU 2135287 С1 / МПК В02С 4/06. Устройство подачи продукта в вальцовый станок. **Яблоков А.Е.,** Глебов Л.А. Оpubл. 27.08.1999. Заявка № 98113190/13 от 15.07.1998.
101. Патент на изобретение RU 2176549 С1 / МПК В02С 4/42. Привод вальцового станка. Глебов Л.А., Зверев С.В., **Яблоков А.Е.** Оpubл. 10.12.2001. Заявка № 2000111937/13 от 16.05.2000.
102. Патент на изобретение RU 2366506 Российская Федерация МПК В02С 4/06. Мукомольный валец / Терехин С. Ю., Глебов Л.А., **Яблоков А. Е.** Оpubл. 10.09.2009, бюл. № 25. Заявка № 2019110050 от 04.04.2019.
103. Патент на полезную модель RU 148345 В02С 4/38 (2006.01). Размольный узел мукомольного вальцового станка. **Яблоков А.Е.,** Конохов И.А., Сосулин Д.В., Старостина Т.В. Оpubл. 10.12.2014. Заявка № 2014110878/13 от 21.03.2014.
104. Патент на полезную модель RU 150 282 U1 / МПК В02С 13/04. Дробилка ударного действия. **Яблоков А.Е.** Оpubл. 10.02.2015, бюл. № 4. Заявка № 2014125856/13 от 26.06.2014.
105. Патент на полезную модель RU 195763 U1 МПК G05В 23/00. Устройство мониторинга и технической диагностики дробилки ударного действия / **Яблоков А.Е.,** Латышев М.А., Федоренко Б.Н., Быков А.В., Костин А.М. Оpubл. 05.02.2020. Заявка № 2019110050 от 04.04.2019.
106. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020614100. Программа для мониторинга и технической диагностики технологических машин. **Яблоков А. Е.,** Латышев М.А., Терехин С. Ю. Оpubл. 26.03.2020. Заявка № 2020612309 от 26.02.2020.
107. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020619541. Программа для цифрового комбинированного датчика вибрации и температуры системы технического мониторинга оборудования. **Яблоков А.Е.** Оpubл. 18.08.2020. Заявка №2020618737 от 31.07.2020.
108. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020660665 Программа для цифровой обработки и анализа сигналов в задаче технического диагностирования. **Яблоков А.Е.** Оpubл. 09.09.2020. Заявка №2020619601/69 от 20.08.2020.
109. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021661786 Программа для акустической диагностики оборудования по вейвлет-скалограмме излучаемого звука с использованием сверточной нейронной сети. **Яблоков А.Е.,** Благовещенский И.Г., Жила Т.М. Оpubл. 15.07.2021. Заявка №2021660923 от 09.07.2021.