

В диссертационный совет
24.2.334.01 (Д 212.148.02) при
ФГБОУ ВО «Московский
государственный университет
пищевых производств»

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора Ольги Николаевны Красули на диссертационную работу Яблокова Александра Евгеньевича на тему: «Научно-практические основы создания автоматизированных систем технического мониторинга и диагностики оборудования зерноперерабатывающих предприятий на базе нейросетевых методов анализа данных», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»

Актуальность темы диссертационной работы

Зерноперерабатывающая отрасль России является важнейшим звеном в цепочке обеспечения населения страны продуктами питания. На комбикормовых, крупяных, мукомольных заводах реализовано поточное производство, где используются десятки технологических машин, работающих параллельно или последовательно. Выход из строя даже одной из них приводит к остановке всего производства.

Помещения зерноперерабатывающих предприятий имеют повышенную категорию взрывопожарной опасности. Причиной возгорания часто является неисправное оборудование. Вопросы повышения безопасности производства, технологической эффективности и эксплуатационной надежности технологических машин могут быть решены путем внедрения специализированных методов, а также средств технического мониторинга и диагностики.

Причиной низких темпов внедрения методов неразрушающего контроля оборудования на зерноперерабатывающих предприятиях является отсутствие доступных и адаптированных под специфику отрасли программно-аппаратных средств автоматизации процедур сбора, обработки и анализа диагностической информации, нехватка на предприятиях специалистов в области технического диагностирования.

Задача классификации технического состояния объекта контроля по диагностической информации является наиболее сложной в процедуре диагностирования. В настоящее время она решается путем привлечения специалистов-экспертов. Проблема автоматизации процедуры распознавания технических состояний объекта по текущим значениям диагностических признаков может быть решена путем использования научных разработок в области машинного обучения, в т.ч. методов нейросетевого анализа данных.

Учитывая изложенное выше, можно утверждать, что тема диссертационной работы Яблокова А.Е., выполненной в ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств», является актуальной т.к. направлена на решение комплекса задач, связанных с созданием автоматизированных систем технического мониторинга и диагностики оборудования зерноперерабатывающих предприятий на базе нейросетевых методов анализа данных.

Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Яблокова А.Е. содержит введение, семь глав, заключение, список используемых сокращений, библиографический список литературы, состоящий из 212 наименований российских и зарубежных источников, 24 приложения, в т.ч. 7 актов внедрения научно-исследовательских работ. Диссертация изложена на 377 страницах и оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ. Основной текст изложен на 330 страницах, диссертация содержит 177 рисунков и 31 таблицу.

Во **введении** изложены актуальность, цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, оценивается степень достоверности полученных результатов.

В **первой главе** рассмотрены существующие машинно-аппаратурные схемы, реализованные на зерноперерабатывающих предприятиях, проанализированы причины возникновения взрывоопасных ситуаций на производстве, перечислены типовые дефекты оборудования. Приведены результаты анализа существующих стратегий технического обслуживания, сделан обзор информационных систем, обеспечивающих автоматизацию процедур, связанных с техническим обслуживанием оборудования. Проанализированы современные методы, программные и аппаратные средства технического диагностирования, рассмотрены методы выделения диагностических признаков и повышения их информативности при использовании виброакустических методов диагностики и диагностики по потребляемому току. Сделано заключение о том, что наиболее сложной и мало

изученной проблемой в области технического диагностирования является процедура классификации технического состояния объекта контроля.

Во второй главе проведен системный анализ методов и информационных технологий с точки зрения возможности и эффективности их использования при разработке автоматизированных систем технического мониторинга и диагностики оборудования. На основе результатов обзора информационных источников по проблеме показана целесообразность применения теории распознавания образов к задаче диагностирования. Сделано заключение о том, что искусственные нейронные сети (ИНС) являются сбалансированным компромиссом между параметрическим и метрическим методами при решении задач классификации.

В результате рассмотрения современных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) автором обосновано решение дополнить традиционный спектральный анализ диагностических сигналов новыми методами анализа их спектрограмм и вейвлет-скалограмм. Проблему формализации задачи классификации состояний по изображениям спектрограмм и скалограмм автор предложил решить с использованием искусственных нейронных сетей сверточного типа.

В третьей главе изучены вопросы негативного влияния различных неисправностей оборудования на показатели технологической эффективности процессов измельчения и шелушения зернового сырья. В результате обработки экспериментальных данных автором получены эмпирические зависимости производительности и удельных энергозатрат от диаметра отверстий сит в молотковой дробилке при использовании комплекта новых и изношенных молотков, а также зависимости коэффициента шелушения и удельных энергозатрат от величины рабочего зазора. Сделан обоснованный вывод о том, что показатель удельных энергозатрат на рабочий процесс коррелирован с техническим состоянием машины и может быть использован в диагностических целях.

Четвертая глава посвящена решению проблемы диагностического моделирования технологических машин с целью определения зависимости между техническим состоянием технологической машины и ее вибрационным портретом. По результатам анализа конструкций зерноперерабатывающих машин автором разработано четыре типа диагностических моделей в виде систем дифференциальных уравнений динамики, которые могут быть использованы при моделировании работы машин зерноперерабатывающих предприятий. Математическое моделирование процесса функционирования машин в различных технических состояниях реализовано в системе Matlab

путем численного решения систем дифференциальных уравнений методом Рунге–Кутты. При идентификации инерционно-жестких характеристик моделей использован метод компьютерного моделирования оборудования в САД-системах.

На базе разработанных диагностических моделей проведена серия математических экспериментов по моделированию различных технических состояний энтолейтора РЗ-БЭР, молотковой дробилки А1-ДМР, шелушителя А1-ЗШН, обоечной машины РЗ-БГО-8, вентилятора ВЦП, вальцового станка А1-БЗН. Результаты численных решений представлены в виде спектров, спектрограмм и скалограмм вибраций цапф ротора в подшипниковых опорах. Анализ полученных результатов позволил установить зависимость между техническим состоянием машины и амплитудно-частотным составом ее колебаний. Полученные данные автор предлагает использовать в качестве обучающих выборок для обучения классификатора состояний на базе ИНС.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований, связанных с разработкой методов классификации технических состояний узлов и механизмов с использованием ИНС. Исследования проведены на разработанной автором экспериментальной установке в условиях лаборатории ФГБОУ ВО «МГУПП». В состав установки входит испытательный стенд, измерительная аппаратура на базе 24-х разрядного АЦП типа Е-440 с набором различных датчиков, виртуальная лаборатория на базе ПО LGraph и Matlab. Для автоматизации процедур сбора и обработки данных на языке Matlab были специально разработаны скрипты.

Автором проведена обширная работа и получены результаты по исследованию эффективности методов нейросетевой классификации состояний зубчатой, ременной передач, подшипника качения. При исследовании зубчатой передачи было смоделировано 8 различных технических состояний и проанализирована эффективность работы ИНС различных архитектур при решении задачи классификации состояний по спектрам сигналов с датчиков вибрации, тока, измерительного микрофона. Анализ матриц ошибок работы сетей с различными алгоритмами оптимизации показал, что наилучшую обобщающую способность показала ИНС, обученная методом обратного распространения ошибки с алгоритмом оптимизации – ММСГ. На основе анализа Cross-Entropy сделан вывод о том, что наиболее информативными диагностическими признаками являются значения амплитуд спектров виброскорости, акустического сигнала и датчика тока. При классификации состояний по изображениям спектрограмм и скалограмм наилучшие результаты показала СНС при работе с изображениями спектрограмм

виброускорения (97,45% правильных ответов).

Аналогичные исследования проведены для ременной передачи и подшипника качения. В целом, использование нейронных сетей показало хорошую обобщающую способность при решении задачи классификации состояний по спектрам, спектрограммам и скалограммам сигналов с различных датчиков.

Диссертантом рассмотрен вопрос прогнозирования деградации механизма путём анализа тренда значений его диагностического признака. Для аппроксимации тренда значений диагностического признака автором использованы ИНС различных архитектур. Исследования показали, что наилучшие результаты прогнозирования показала 2-х слойная сеть прямого распространения (метод оптимизации Левенберга–Марквардта).

Для решения задачи совместного применения различных типов признаков, методов анализа и дополнительной информации об объекте контроля разработана управляющая программа (супервизор) — нейронной сети, которая в качестве исходной информации, при постановке окончательного диагноза, использует результаты классификации специализированных ИНС, работающих с диагностическими признаками, и дополнительной информацией об объекте контроля (величина технологической нагрузки, показатели надёжности и пр.). На модельном примере автором показана возможность использования такого методологического подхода.

В шестой главе приведены результаты практической реализации научных исследований, полученных автором диссертации. В ФГБОУ ВО «МГУПП» разработана концепция и создан опытный образец системы мониторинга. Основой системы является разработанный прибор «СТМ-12Т» с набором датчиков. Приводится подробное описание конструкции и функций прибора, интерфейса разработанного графического меню.

Развитие системы мониторинга промышленного оборудования автор связывает 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. В главе приводится достаточно подробное описание предлагаемой распределённой системы мониторинга и диагностики (РСМиД) технологического оборудования, а также рекомендации по использованию аппаратных средств системы мониторинга.

В седьмой главе представлены результаты апробации системы на базе прибора «СТМ-12Т» на промышленном зерноперерабатывающем

оборудовании, установленном в ФГБОУ ВО «МГУПП». Экспериментальные установки созданы на базе машин ударного измельчения зернового сырья — энтолейтора РЗ-БЭР, деташера А1-БДГ и вальцового станка А1-БЗН. Для измерений использовались названный выше прибор и разработанная измерительная система на базе АЦП Е-440. При автоматической классификации состояний зерноперерабатывающих машин по спектрам вибрации точность составила более 95%.

В **заключении** отражены результаты работы, сформулированы выводы, определены направления развития дальнейших исследований.

Основные научные результаты, полученные соискателем:

1. Определены зависимости между техническим состоянием технологических машин, диагностическими признаками неисправностей и качественными показателями технологических процессов измельчения и шелушения зернового сырья;
2. 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;
3. В результате математического моделирования функционирования технологических машин (энтолейтора, молотковой дробилки, вентилятора, шелушителя, обоечной машины, вальцового станка) установлены зависимости между кинематическими, динамическими и технологическими отклонениями в работе оборудования и их диагностическими признаками – параметрами колебаний;
4. 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;
5. Разработаны новые методы прогнозирования технического состояния оборудования по трендовым характеристикам диагностических признаков с использованием нейросетевых методов анализа временных рядов;
6. 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.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические методы основаны на принципах системного анализа и математического моделирования, теории распознавания образов, методах машинного обучения и искусственных нейронных сетей, методах математической статистики.

Диагностические модели оборудования, представленные в виде дифференциальных уравнений динамики, построены с применением законов классической механики и кинетических уравнений Лагранжа 2-го рода. Моделирование проведено с использованием численных методов, алгоритмов и общепризнанных компьютерных программ.

Экспериментальные исследования проведены на экспериментальных установках и промышленном оборудовании. При измерениях использовались промышленные датчики и 24-х битный АЦП с прикладным программным обеспечением «LGraph2» ООО «Л-Кард». Математическая обработка и анализ измеренных диагностических сигналов проводились в системе Matlab.

Результаты апробации разработанных методов и средств мониторинга и диагностики в промышленных условиях получены на предприятиях ООО «Эрман», ООО «Русское поле», ООО «Экан», ООО «Северный лес», ООО «Пачелмское хозяйство» ОП «Пачелмское», они подтверждают обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных в диссертационной работе.

Практическая значимость полученных выводов и результатов

Основные результаты, определяющие практическую ценность работы, заключаются в следующем:

1. Разработана и защищена патентом РФ стационарная система мониторинга технического состояния молотковой дробилки;
2. По результатам исследований технологической эффективности работы вальцового станка разработаны и защищены патентами РФ: устройство подачи продукта в вальцовый станок; привод вальцового станка с пониженным уровнем вибрации; мукомольный валец повышенной жёсткости; размольный узел вальцового станка с устройством стабилизации рабочего зазора;

3. По результатам исследований динамики молотковой дробилки разработана и защищена патентом РФ система виброизоляции ротора дробилки;
4. Разработана автоматизированная система с использованием методов технической диагностики технологических машин по параметрам вибрации, потребляемого тока и излучаемого звука на базе АЦП E-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, в т.ч. для акустической диагностики оборудования по вейвлет-скалограмме излучаемого звука с использованием свёрточной нейронной сети. Получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ;
5. Разработана конструкция и ПО комбинированного датчика вибрации и температуры ДВТ-8g для системы мониторинга;
6. Разработана конструкторская документация и создан опытный образец прибора для сбора и первичной обработки диагностической информации «СТМ-12Т», который является базовым в распределённой системе мониторинга и диагностики;
7. Разработана, создана и прошла промышленную 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;
8. Разработаны архитектуры и обучены на распознавание механических дефектов оборудования ИНС прямого распространения и свёрточного типов;
9. Результаты исследований используются в учебном процессе при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов профильных специальностей.

Замечания по проведенному исследованию

Положительно оценивая работу в целом, считаю целесообразным сделать следующие замечания:

1. Излишне велик объём первой главы, в частности п.п.1.1, 1.4, 1.5.
2. При проведении практических исследований (глава 5) автор для работы ИНС использует датасет из 150 измерений (стр. 201). На мой взгляд, следовало бы

дать обоснование выбранному объёму выборки.

3. Из работы не ясно, чем обусловлена разрешающая способность 781x781 пикселей изображений скалограмм и спектрограмм (стр. 212, 216) при их использовании в качестве признаков для СНС;
4. Информация, приведенная на рис. 5.16, плохо читаема;
5. Нельзя назвать удачным представление спектрограмм вибрации в виде 3D – графиков (рис. 5.16, 5.49). Такое представление вводит в заблуждение относительно формы представления входных признаков СНС;
6. Следовало бы дать более подробное описание структуры БД, предлагаемой для дальнейшего использования в распределенной системе мониторинга;
7. В Заключение следовало бы сформулировать более подробные требования к амплитудно-частотным и временным характеристикам сигналов различных датчиков, а также привести рекомендации по используемым архитектурам ИНС и объёму обучающих выборок.

Отмеченные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы Яблокова А.Е., ее научной и практической значимости.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленных Положением о порядке присуждения ученых степеней

Несмотря на вышеизложенные замечания, диссертационное исследование Яблокова Александра Евгеньевича заслуживает общей положительной оценки. Тема исследования является актуальной, отвечает вызову четвертой промышленной революции, нацелена на повышение надёжности и эффективности технологического оборудования, имеет важное практическое значение и соответствует научно-техническим задачам специальности 2.3.3 — «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Выводы, сформулированные автором, аргументированы, достоверны, обладают несомненной научной новизной; основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых отечественных и зарубежных научных изданиях. Диссертация хорошо структурирована, качественно проиллюстрирована, оформление соответствует требованиям ВАК. Автореферат отражает основное содержание работы и личный вклад автора в проведенное исследование.

По структуре рукописи, объёму исследований, степени их аналитической проработки и прикладной значимости диссертационная работа отвечает требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней»,

утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (ред. от 01.10.2018 г), а её автор, Яблоков Александр Евгеньевич, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии хранения и переработки продуктов животноводства Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева»

РФ, г. Москва, ул. Тимирязевская, д.49, 127550

Тел.: +7 (499) 976-46-12

E-mail: okrasulya@rgau-msha.ru



Красуля О.Н.

Подпись профессора Ольги Николаевны Красули
удостоверяю

Руководитель службы кадров,
политики и приема персонала


