

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**доктора технических наук, доцента Обухова Артёма Дмитриевича
на диссертационную работу Чернухина Артёма Валерьевича
«Автоматизированная система прогнозирования технического
состояния промышленного оборудования на базе методов
искусственного интеллекта»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами**

Актуальность работы

Создание интеллектуальных систем предиктивной аналитики технического состояния промышленного оборудования с использованием методов искусственного интеллекта является стратегически важным направлением цифровизации современного производства. Научная значимость данного исследования определяется растущей потребностью в обработке значительных массивов телеметрической информации от сложных технологических комплексов, где классические подходы к диагностике демонстрируют ограниченную эффективность. Современные алгоритмы машинного обучения обеспечивают выявление скрытых корреляционных зависимостей в эксплуатационных параметрах, точное прогнозирование остаточного ресурса технологического оборудования и оптимизацию регламентов технического обслуживания.

Практическая реализация подобных систем позволяет достичь существенного экономического эффекта благодаря сокращению внеплановых остановок производства и затрат на восстановительные работы, а также минимизации вероятности критических отказов. Дополнительным преимуществом является повышение энергетической эффективности производственных процессов и уровня промышленной безопасности, что полностью соответствует принципам устойчивого развития современных предприятий. Реализация указанных подходов имеет принципиальное значение для обеспечения технологической надежности и усиления конкурентных преимуществ промышленных предприятий в условиях цифровой экономики.

В условиях развития концепции Индустрии 4.0 и расширения возможностей промышленного Интернета вещей, задача прогнозирования отказов и остаточного ресурса оборудования выходит на первый план. Диссертация Чернухина А.В. затрагивает эти ключевые аспекты, предлагая автоматизированную систему, способную в реальном времени диагностировать неисправности и предсказывать отказы на основе методов искусственного интеллекта. Применение современных методов машинного обучения и гибкой архитектуры системы прогнозирования, адаптируемой под производственные условия, делает диссертационное исследование актуальным как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Анализ основных положений диссертационной работы

Диссертационная работа Чернухина А.В. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых сокращений и обозначений, списка литературы и приложения. Основное содержание работы изложено на 186 страницах, включая 65 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 177 наименований. В приложении представлен акт о внедрении результатов исследования.

Введение диссертационного исследования содержит развернутое обоснование актуальности выбранной темы, основанное на анализе современных тенденций цифровизации промышленного производства и возрастающей потребности в интеллектуальных системах мониторинга оборудования. В рамках исследования четко сформулированы цели, направленные на разработку методологии предиктивного анализа технического состояния промышленных агрегатов, а также определены конкретные исследовательские задачи, решение которых способствует достижению поставленных целей. Детально обозначены объектная и предметная области исследования, что позволяет четко определить границы научного поиска. В работе представлены элементы научной новизны, подкрепленные теоретико-методологической значимостью и практической применимостью полученных результатов. Особое внимание уделено основным тезисам, выносимым на защиту, а также приведены данные, подтверждающие апробацию разработанных решений в реальных промышленных условиях.

Первая глава посвящена систематизации методологических подходов к проектированию автоматизированных систем мониторинга технического состояния промышленного оборудования в контексте цифровой трансформации производственных процессов. В ней проведен всесторонний анализ современных научных разработок в области интеллектуального прогнозирования, с акцентом на предиктивное обслуживание как ключевую парадигму технической эксплуатации. Рассмотрены методологические аспекты разработки прогностических моделей, при этом особое внимание уделено проблеме идентификации предаварийных состояний, усложняющейся высокой размерностью пространства контролируемых параметров. Предложена оригинальная таксономия методов прогнозирования отказов, сопровождаемая критическим анализом их операционных характеристик и областей применимости. Обосновано, что алгоритмы машинного обучения обладают значительным потенциалом в моделировании сложных нелинейных взаимосвязей, расширяя возможности классических статистических методов.

Значительное внимание уделено методологии анализа временных рядов, включая одношаговые и многошаговые прогностические модели. На основе критического обзора научной литературы сделан вывод о том, что внедрение автоматизированной системы прогнозирования технического состояния, основанной на современных методах искусственного интеллекта и машинного

обучения, способно существенно повысить эффективность эксплуатационной деятельности. Ключевыми преимуществами такой системы являются превентивное выявление потенциальных отказов, точное прогнозирование остаточного ресурса оборудования и оптимизация стратегий технического обслуживания.

Вторая глава посвящена разработке функциональной структуры и математических моделей автоматизированной системы прогнозирования технического состояния промышленного оборудования. В главе проведен сравнительный анализ модульного и алгоритмического подходов к проектированию систем прогнозирования, обоснован их комбинированный вариант для решения поставленной задачи. Модульный подход обеспечивает гибкость и масштабируемость системы за счет декомпозиции на специализированные компоненты, в то время как алгоритмический подход фокусируется на разработке эффективных вычислительных методов обработки данных.

Основное внимание уделено разработке трех взаимосвязанных методов прогнозирования: идентификации неисправностей, предсказания отказов и оценки остаточного ресурса (RUL). Для задачи бинарной классификации состояний оборудования предложен ансамблевый метод, сочетающий сверточные нейронные сети, логистическую регрессию и метод опорных векторов с механизмом "мягкого голосования". Прогнозирование отказов реализовано двухэтапным подходом, включающим детектирование аномалий с помощью изолирующего леса и их классификацию посредством LSTM-сетей. Для оценки остаточного ресурса разработана рекуррентная нейронная сеть, учитывающая временные зависимости в данных.

В главе представлено детальное описание архитектур нейронных сетей, алгоритмов обучения и методов оценки качества. Особое внимание уделено проблемам обработки временных рядов, борьбы с переобучением и работы с несбалансированными данными. Для каждого метода предложены специализированные метрики оценки: индекс Жаккара для классификации неисправностей, F-мера для прогнозирования отказов и взвешенная среднеквадратичная ошибка для оценки RUL.

Предложенные решения учитывают специфику промышленного оборудования и направлены на обеспечение превентивного обслуживания. Комплексный характер разработанных методов позволяет не только детектировать текущие состояния оборудования, но и прогнозировать их развитие во времени, что принципиально отличает данную работу от существующих аналогов. Применение ансамблевого подхода на основе голосования является оправданным и корректным, учитывая, что автор провел предварительный анализ и выбрал модели с низкой корреляцией предсказаний, что повышает гибкость и точность подхода в различных условиях.

Третья глава содержит комплексный анализ объекта технической диагностики — эксгаустера агломерационной машины, включая детальное рассмотрение технологического процесса спекания, конструкционных

особенностей оборудования и ключевых эксплуатационных параметров. Проведен критический анализ существующей системы управления технологическим процессом, выявивший необходимость внедрения интеллектуальных методов прогнозирования. В работе детально описана разработанная архитектура автоматизированной системы прогнозирования, основанная на современных методах искусственного интеллекта. Особое внимание уделено методологическим аспектам реализации функциональных подсистем: модуля импорта и предварительной обработки данных, распределенного хранилища на базе СУБД ClickHouse и PostgreSQL, а также системы управления жизненным циклом прогностических моделей. Приведены технические решения по организации гибкой микросервисной архитектуры с использованием технологий контейнеризации и оркестрации, обеспечивающих масштабируемость и отказоустойчивость системы. Автор полностью изложил весь цикл функционирования системы, использовал современные программные решения при ее разработке и развертывании.

Практическая реализация системы сопровождается подробным анализом проблем программной реализации на языке Python, включая фрагменты кода и интерфейсы взаимодействия с компонентами системы. Особое внимание уделено методологическим аспектам интеграции подсистемы визуализации данных и платформы управления моделями машинного обучения, что позволило обеспечить эффективное взаимодействие пользователей с системой прогнозирования.

Четвертая глава посвящена результатам тестирования разработанной интеллектуальной системы прогнозирования технического состояния промышленного оборудования. В работе последовательно рассмотрены все этапы обработки данных – от первичной нормализации входных сигналов до комплексной апробации трех ключевых прогностических задач: диагностики неисправностей, детектирования отказов и оценки остаточного ресурса оборудования.

Экспериментальные исследования ансамблевого метода прогнозирования неисправностей выявили существенную зависимость точности предсказаний от динамики развития дефектов. Наибольшая эффективность достигнута для быстроразвивающихся отказов электроаппаратуры и электромеханических компонентов, что обусловлено выраженностью их диагностических признаков в временных рядах контролируемых параметров.

При решении задачи детектирования отказов как редких событий с кратковременными предвестниками особое внимание уделено анализу поздних стадий деградации. Результаты тестирования показали более высокую эффективность метода для узлов с длительным периодом накопления повреждений по сравнению с быстропротекающими аварийными процессами.

Применение LSTM-архитектуры для прогнозирования остаточного ресурса продемонстрировало возможность учета нелинейных временных зависимостей.

Заключительная часть главы содержит результаты комплексного тестирования системы в условиях, приближенных к промышленной эксплуатации. Проведены испытания интерфейсов сенсорных систем, валидация потоковой обработки данных, стресс-тесты подсистемы хранения, оценка эффективности инкрементального дообучения моделей и анализ отказоустойчивости системы. Полученные результаты подтверждают соответствие системы промышленным требованиям по точности, производительности и масштабируемости.

В заключении диссертации подведены итоги проведенного исследования, сформулированы основные выводы и намечены перспективы дальнейшего практического использования разработанных решений в промышленности.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработана функциональная структура автоматизированной системы прогнозирования технического состояния промышленного оборудования, отличающаяся качественно новой подсистемой управления моделями, позволяющей дообучать модели с учетом динамически изменяющихся условий производственного процесса.
2. Предложен алгоритм диагностики технических систем, основанный на ансамблевом подходе, который позволяет создавать и обучать с высокой точностью модели прогнозирования неисправностей и отказов промышленного оборудования.
3. Предложен и реализован новый алгоритм прогнозирования остаточного срока службы оборудования, основанный на современных архитектурах нейронных сетей, показавший высокие метрики точности для горизонта прогнозирования, равного одному месяцу.
4. Реализована функциональная структура автоматизированной системы прогнозирования технического состояния оборудования, предоставляющей пользователю доступ к прогнозам и рекомендациям по предотвращению неисправностей и отказов, способной в автоматическом режиме без привлечения разработчиков обучаться на накапливающемся массиве данных.
5. Проведено тестирование автоматизированной системы прогнозирования технического состояния промышленного оборудования в приближенных к реальности условиях, подтвердившее высокую эффективность её использования для решения задач контроля технического состояния эксгаустера агломашины.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Теоретическая значимость заключается в развитии методов построения интеллектуальных систем автоматизированного прогнозирования неисправностей промышленного оборудования.

Практическая значимость работы подтверждается тем, что разработанная автоматизированная система прогнозирования представляет

большой интерес для разработчиков комплексных автоматизированных систем управления производственным процессом, так как выполняет функции сбора, хранения и обработки большого объема информации о состоянии промышленного оборудования, с высокой точностью прогнозирует его неисправности в режиме реального времени, а также обладает гибкой функциональной структурой.

Система способна оперативно предоставлять лицам, принимающим решение, доступ к прогнозам и рекомендациям по предотвращению неисправностей и отказов, основанным на большом массиве данных, который оператор не может эффективно обработать самостоятельно. Это достигается в том числе за счет возможности переобучения моделей в автоматическом режиме без привлечения разработчиков на накапливаемом массиве данных. Практическая значимость работы подтверждена представленным в приложении диссертации актом внедрения в ООО «ГИСвер Интегро», в рамках разрабатываемой комплексной автоматизированной системы управления производственным процессом.

Достоверность основных положений, выводов и результатов работы

Достоверность выводов и результатов работы подтверждается применением апробированного математического аппарата, корректным использованием исходных данных, согласованностью полученных результатов с результатами работ других исследователей.

Оформление диссертации, публикации, апробация, содержание автореферата

Диссертационное исследование характеризуется строгой структурной организацией и логической последовательностью изложения материала, что в полной мере соответствует установленным требованиям к работам данного уровня. Формально-техническое оформление рукописи выполнено в строгом соответствии с действующими нормативными документами и дополнено обширным иллюстративным материалом, включающим графики, диаграммы и таблицы, которые способствуют наглядному представлению полученных результатов.

Содержательные разделы работы образуют целостную систему, в которой прослеживается четкая взаимосвязь между теоретическими положениями, методологическими разработками и практическими решениями. Такой подход обеспечивает последовательное достижение поставленных исследовательских целей и решение сформулированных научных задач, что в совокупности придает работе концептуальную завершенность и методологическую стройность. Логика изложения материала подчинена единому научному замыслу, что способствует формированию целостного представления о проведенном исследовании и его результатах.

Основные положения диссертации и полученные автором результаты прошли апробацию на российских и международных конференциях. По теме диссертационной работы опубликовано 9 работ, из них 3 статьи – в изданиях, рекомендованных ВАК России для публикации научных результатов на

соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами и 2 работы в зарубежных изданиях, индексируемых в международной базе научного цитирования Scopus.

Автореферат диссертации в полном объеме соответствует содержанию диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе

1. Помимо «мягкого» голосования (подраздел 2.3.2), в диссертации не рассмотрены другие методы ансамблирования, такие как стекинг (Stacking), кроме того, можно было рассмотреть ансамблевые методы композиции, включающие случайный лес (Random Forest) и адаптивный бустинг (AdaBoost).
2. Целесообразно было бы провести более комплексную оценку качества классификации, используя расширенный набор метрик (помимо описанных в подразделах 2.3.2 и 2.4.2), что позволило бы более объективно оценить сбалансированность модели в условиях возможного дисбаланса классов и дифференцированно проанализировать ошибки классификации.
3. Представление технических характеристик на странице 87 требует методологической доработки, поскольку текущий формат не соответствует стандартным способам визуализации данных в научных работах. Следует унифицировать оформление, выбрав четкий формат - либо табличный для систематизированного представления параметров, либо графический с поясняющими схемами.
4. Объемное включение программного кода в основной текст раздела 3.2 является избыточным, так как с методологической точки зрения детализированные реализации алгоритмов целесообразнее выносить в приложения, оставив в основном тексте лишь концептуально значимые фрагменты: блок-схемы, формализованный псевдокод либо выборочные листинги ключевых фрагментов.
5. В ходе решения задач классификации и прогнозирования автором использовались различные варианты данных и характеристик, а также источники получения информации (датчиков), описание размерностей которых распределены по разным пунктам диссертации, что усложняет понимание размерности и содержания данных для обучения моделей классификации и прогнозирования. Компонировка этой информации в рамках единой таблицы намного бы упростила данную проблему.
6. Полученные в 4 разделе результаты классификации для некоторых технических мест, близкие к случайным (точность 0.57 на рисунке 4.6), приводят к выводу о необходимости рассмотрения помимо ансамблевых методов более сложных и современных архитектур, например, нейронных сетей типа Transformer, способных более эффективно работать на сложных наборах данных.
7. На рисунке 4.9 стоило бы унифицировать обозначение классов, приведя его к аналогичному по тексту (вместо 0-3 указать 1-4).

8. В тексте присутствуют некоторые технические ошибки, включая некорректные падежи, пропущенные или лишние символы, ряд формул имеет низкое качество. Так, например, указывается, что «алгоритм принимает 4D тензор размера 6×16 », хотя с учетом размера пакета данных, тензор трехмерный.

Соответствие диссертации предъявляемым требованиям

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям и результатам исследований, диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, включая следующие направления исследований:

П.6 – «Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами»;

П.11 – «Методы создания, эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая базы данных и методы их оптимизации, промышленный интернет вещей, облачные сервисы, удаленную диагностику и мониторинг технологического оборудования, информационное сопровождение жизненного цикла изделия»;

П.15 – «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др.».

Автореферат отражает основное содержание диссертации, актуальность темы, новизну, практическую значимость и личный вклад автора в проведенное исследование.

Заключение

Диссертационная работа Чернухина Артёма Валерьевича представляет собой завершённое научное исследование, полностью соответствующее требованиям паспорта специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами. В исследовании успешно решена актуальная научно-практическая задача разработки инновационных автоматизированных систем диагностики промышленного оборудования, имеющая важное значение для современной промышленности.

Основным научным достижением работы является разработка принципиально новых подходов к обработке больших массивов данных в реальном времени с применением современных методов искусственного интеллекта. Предложенные автором решения создают теоретическую и методологическую основу для перехода от традиционных схем технического обслуживания к перспективным превентивным моделям, что существенно повышает эффективность эксплуатации промышленного оборудования.

Теоретические положения и выводы, представленные в диссертации, отличаются высокой степенью научной обоснованности и подтверждены комплексом экспериментальных исследований. Практические рекомендации автора базируются на достоверных данных и могут быть успешно реализованы в промышленных условиях.

Научные результаты, полученные А.В. Чернухиным, характеризуются выраженной новизной и представляют значительный практический интерес для развития современных систем мониторинга и диагностики. Разработанные автором методы и алгоритмы открывают новые перспективы для создания интеллектуальных систем предиктивного обслуживания, способствуя цифровой трансформации промышленных предприятий и повышению их технологической эффективности.

Считаю, что представленная диссертация полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, предусмотренным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева № 103 ОД от 14 сентября 2023 г., а ее автор, Чернухин Артём Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Официальный оппонент

доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ведущий научный сотрудник НИЛ «Лаборатория медицинских VR тренажерных систем для обучения, диагностики и реабилитации» управления фундаментальных и прикладных исследований

Адрес: 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2.

Рабочий e-mail: obu@mail.com

Рабочий телефон: +7 475 261 15 15

Научная специальность, по которой присуждена степень доктора технических наук: 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации»

Обухов Артём Дмитриевич

()
05.06.2025
(дата)

