



**МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ**

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский политехнический университет»
(Московский Политех)

Б.Семеновская ул., д.38, Москва, 107023
Тел.+7 495 223 05 23, Факс +7 499 785 62 24
www.mospolytech.ru | E-mail: mospolytech@mospolytech.ru
ОКПО 04350607, ОГРН 1167746817810,
ИНН/КПП 7719455553/771901001

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

А.Ю. Наливайко

«23» июня 2025 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

**федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Московский политехнический университет»
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 темы диссертационного исследования

Разработка интеллектуальных систем прогнозирования технического состояния промышленного оборудования на основе методов искусственного интеллекта представляет собой перспективное направление в рамках цифровой трансформации промышленности. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обработки возрастающих объемов телеметрических данных сложных технологических систем, где традиционные методы диагностики становятся недостаточно эффективными. Применение машинного обучения позволяет выявлять скрытые закономерности в эксплуатационных параметрах, прогнозировать остаточный ресурс оборудования и оптимизировать стратегии технического обслуживания.

Внедрение таких систем обеспечивает значительный экономический эффект за счет сокращения незапланированных простоев и затрат на ремонт, а также минимизирует риски катастрофических отказов. Кроме того, прогнозная аналитика способствует повышению энергоэффективности и промышленной безопасности, что соответствует современным требованиям устойчивого развития производственных предприятий. Решение данной задачи имеет важное значение для повышения надежности и конкурентоспособности промышленного сектора экономики.

Структура, объем и содержание работы

Диссертационная работа 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.

Во введении содержится комплексное обоснование актуальности выбранной тематики, сформулированы ключевые цели и задачи, а также определены объектная и предметная области изучения. В работе детализированы элементы научной новизны, подчеркнута теоретико-методологическая ценность и прикладная значимость полученных результатов. Приведены основные тезисы, выносимые на защиту, а также данные, подтверждающие апробацию разработанных решений.

В первой главе диссертации представлена систематизация методологических подходов к проектированию автоматизированных систем мониторинга технического состояния промышленного оборудования в условиях цифровой трансформации производственных процессов. В работе проведен комплексный анализ современных научных разработок в области интеллектуального прогнозирования, где особое внимание уделено предиктивному обслуживанию как перспективной парадигме технической эксплуатации.

В главе детально проанализированы методологические аспекты разработки прогностических моделей, при этом особо подчеркивается, что проблема идентификации предаварийных состояний существенно осложняется высокой размерностью пространства контролируемых параметров. Представлена оригинальная таксономия методов прогнозирования отказов с критическим анализом их операционных характеристик и областей применимости. Обосновано, что алгоритмы машинного обучения эффективно моделируют сложные нелинейные взаимосвязи и существенно расширяют возможности классических статистических методов.

Особое внимание уделено методологии анализа временных рядов, включая одношаговые и многошаговые прогностические модели. На основании критического анализа научных публикаций сделан вывод о том, что реализация автоматизированной системы прогнозирования технического состояния на базе современных методов искусственного интеллекта и машинного обучения позволяет существенно повысить эффективность эксплуатационной деятельности за счет: превентивного выявления потенциальных отказов, точного прогнозирования остаточного ресурса оборудования и оптимизации стратегий технического обслуживания.

Во второй главе диссертации изложены подходы к разработке методологии построения функциональной архитектуры автоматизированной системы предиктивной аналитики технического состояния промышленного оборудования. В работе проведен сравнительный анализ модульного и алгоритмического подходов к проектированию систем прогнозирования, на основании которого предложена гибридная архитектурная концепция, интегрирующая преимущества обоих методов в рамках единой системы искусственного интеллекта.

В исследовании формализована постановка задачи диагностики неисправностей с применением ансамблевого метода "мягкого" голосования, объединяющего три разнородных классификационных алгоритма: сверточные нейронные сети (CNN), логистическую регрессию и метод опорных векторов (SVM). Детально исследованы методы оптимизации функции потерь, включая применение адаптивного моментального алгоритма (Adam) и современных техник регуляризации в контексте глубокого обучения. Представлена оригинальная архитектура CNN-сети, а для оценки качества классификации предложена комплексная метрическая система, основанная на анализе ошибок I и II рода с использованием индекса Жаккара в качестве интегрального критерия.

Для решения задачи детектирования аномалий разработан двухэтапный алгоритмический комплекс, сочетающий метод изолирующего леса (Isolation Forest) для первичного выявления аномальных событий и LSTM-сеть для их последующей классификации. В работе приведен детальный анализ архитектурных особенностей LSTM-сетей, включая механизмы управления информационными потоками, процессы селективного забывания и долгосрочного запоминания контекстных зависимостей. Для задачи прогнозирования остаточного ресурса оборудования предложена оригинальная метрическая система оценки, основанная на F1-мере с учетом взвешенной матрицы ошибок. Завершает главу формализация методологии прогнозирования остаточного срока эксплуатации, представляющая собой теоретико-прикладную основу для разработки систем предиктивного обслуживания промышленного оборудования.

В третьей главе представлен комплексный анализ объекта технической диагностики – эксгаустера агломерационной машины, включая детальное рассмотрение технологического процесса спекания, конструкционных особенностей оборудования и ключевых эксплуатационных параметров. Представлен 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.

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.

В четвертой главе представлены результаты 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.

Наилучшие результаты показали ансамблевые модели, особенно для электроаппаратуры, вибропреобразователя, улиты и корпуса. Однако для некоторых узлов, таких как ротор и подшипники, модель иногда выдавала ложные предупреждения, что связано с разнообразием причин отказов и недостаточной репрезентативностью данных в обучающей выборке.

При прогнозировании отказов учитывалось, что данные события являются краткосрочными, поэтому тестовые данные включали интервалы за три месяца до отказа. Анализ показал, что ключевыми индикаторами для ротора и подшипников являются температура, вибрация и давление масла, тогда как для электродвигателя и электроаппаратуры — токи. Метод изолирующего леса успешно выявлял аномалии, но качество классификации варьировалось: наивысшие метрики ($F1 = 0,9\text{--}0,92$) были у ротора и подшипников, а самые низкие ($F1 = 0,38$) — у электроаппаратуры из-за стремительного развития неисправностей.

Для прогноза остаточного ресурса (RUL) использовалась LSTM-сеть, анализирующая 24-часовые интервалы. Наилучшие результаты достигнуты для ротора ($WRMSE = 2,3\%$ при прогнозе на неделю) и подшипников ($WRMSE = 3,5\%$ на месяц), где аномалии проявляются заблаговременно. Для электродвигателя и электроаппаратуры точность оказалась ниже из-за быстрого развития дефектов, требующих сокращения горизонта прогнозирования до 3 часов.

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 приведены выводы по работе и намечены перспективы ее практического использования.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработана функциональная структура автоматизированной системы прогнозирования технического состояния промышленного оборудования, включающая инновационную подсистему управления моделями. Данная подсистема обеспечивает возможность адаптивного дообучения моделей в условиях изменяющихся параметров производственного процесса.
2. Разработан алгоритм диагностики технических состояний на основе ансамблевого подхода, обеспечивающий высокую точность прогнозирования неисправностей и отказов промышленного оборудования за счет комбинации нескольких моделей машинного обучения.
3. Предложен и реализован алгоритм прогнозирования остаточного

ресурса оборудования с использованием современных архитектур нейронных сетей (LSTM), продемонстрировавший высокую точность при горизонте прогнозирования, равному одному месяцу.

4. Реализована функциональная структура автоматизированной системы прогнозирования технического состояния оборудования, предоставляющая пользователям прогнозы и рекомендации по предотвращению отказов. Система обладает функцией автономного дообучения на новых данных без необходимости вмешательства разработчиков.

5. Проведены испытания системы в условиях, приближенных к реальной эксплуатации, подтвердившие её эффективность для мониторинга технического состояния эксгаустеров агломашины. Результаты тестирования показали возможность раннего выявления неисправностей и планирования превентивных мероприятий.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Теоретическая значимость состоит в совершенствовании методик создания интеллектуальных систем для автоматического предсказания неисправностей промышленного оборудования.

Практическая значимость исследования заключается в создании инновационной автоматизированной системы прогнозирования, которая вносит существенный вклад в цифровизацию промышленных предприятий. Разработанное решение представляет собой интеллектуальный аналитический комплекс, свободно интегрируемый в современные системы управления производственными процессами. Система обеспечивает не только сбор и хранение, а глубокий интеллектуальный анализ больших массивов телеметрии оборудования в режиме реального времени, что позволяет с высокой точностью прогнозировать возникновение критических неисправностей.

Особую практическую ценность представляет уникальная адаптивная архитектура системы, обеспечивающая непрерывное самообучение алгоритмов на поступающих производственных данных без необходимости вмешательства разработчика. Эта особенность позволяет системе постоянно повышать точность прогнозов и адаптироваться к изменяющимся условиям работы оборудования.

Реализованный механизм предиктивной аналитики предоставляет службам технического обслуживания готовые управленческие решения в форме ранних предупреждений и конкретных рекомендаций по профилактике. Это принципиально меняет подход к обслуживанию оборудования – от реактивного к превентивному.

Эффективность разработанной системы получила практическое подтверждение в ходе ее эксплуатации в компании ООО «ГИСвер Интегро», где она была интегрирована в комплексную автоматизированную систему управления производством. Факт успешного внедрения и достигнутые результаты официально зафиксированы в акте внедрения, который приводится в приложении к диссертационной работе.

Достоверность основных положений, выводов и результатов работы

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов исследования обеспечивается применением корректного математического аппарата и методов анализа. Использование исходных данных, собранных в реальных производственных условиях, обеспечивает валидность экспериментальных результатов. Согласованность полученных результатов с выводами других исследователей в данной области подтверждает научную обоснованность работы. Подтверждением достоверности служит успешная апробация разработанных методов в условиях, приближенных к реальным производственным процессам.

Оформление диссертации, публикации, апробация, содержание автореферата

Диссертация отличается четкой структурной организацией и логической целостностью изложения, соответствует требованиям к диссертационным исследованиям. Техническое оформление выполнено в соответствии с действующими нормативными требованиями и подкреплено достаточным количеством графических и табличных материалов. Содержательные блоки исследования демонстрируют системную взаимосвязь и направлены на последовательное решение поставленных научных задач, обеспечивая концептуальное единство всей работы.

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. В работе отмечается недостаточная терминологическая строгость при оперировании ключевыми техническими понятиями. В частности, использование разговорного термина «поломки» вместо общепринятых в технической диагностике понятий «отказы» или «критические состояния» снижает научную корректность изложения. Также вызывает вопросы однозначность трактовки терминов «остаточный срок службы» и «остаточный ресурс» (стр. 22), требующих четкого определения исходных параметров оборудования и критериев предельного состояния. Кроме того, применение нестандартного термина «техническое место» в подразделе 4.3.2 вместо общепринятых обозначений элементов или узлов оборудования затрудняет однозначное понимание описываемых технических объектов.

2. В работе мало внимания уделено таким характеристикам, как нормативный срок эксплуатации оборудования и дата его ввода в эксплуатацию, что в

перспективе могло бы позволить более точно адаптировать прогностические модели под реальные условия работы промышленного оборудования, повысить точность определения остаточного ресурса и улучшить качество прогнозирования потенциальных отказов, особенно для оборудования с длительным сроком службы.

3. В разделе 2.4.2 описано применение LSTM-архитектур для задач прогнозирования отказов промышленного оборудования, но не рассмотрена возможность применения альтернативных подходов к моделированию временных рядов, такие как CNN, Transformer или гибридные модели. Проведение сравнительного анализа позволило бы более строго обосновать выбор модели.

4. Некоторые рисунки диссертации трудночитаемы, например рисунки: 2.10, 2.11, 3.4.

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 соответствует паспорту специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, представляет собой завершенное научное исследование, в котором решена важная задача разработки инновационных автоматизированных систем диагностики промышленного оборудования. В работе предложены принципиально новые подходы, основанные на применении методов искусственного интеллекта для обработки больших массивов данных в режиме реального времени, что обеспечивает возможность перехода к превентивным моделям технического обслуживания.

Теоретические положения, выводы и практические рекомендации, сформулированные в исследовании, отличаются научной обоснованностью и достоверностью. Полученные результаты, принадлежащие А.В. Чернухину, обладают выраженной научной новизной и имеют существенное практическое значение для развития современных систем мониторинга и диагностики промышленного оборудования. Разработанные методы и алгоритмы открывают новые перспективы для создания интеллектуальных систем предиктивного обслуживания в промышленности.

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.

Диссертация, автореферат и отзыв были рассмотрены и одобрены на заседании кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств им. проф. М.Б. Генералова» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», протокол №74-24/25 от 02 июня 2025 года.

Заведующий кафедрой

«Аппаратурное оформление и автоматизация

технологических производств им. проф. М.Б. Генералова»

ФГАО ВО «Московский политехнический университет»

кандидат технических наук

Кирсанов Андрей Сергеевич

Подпись, должность, учёную степень

А.С. Кирсанова заверяю

ВЕДУЩИЙ СПЕЦИАЛИСТ
ПО КАДРОВОМУ
ДЕЛОПРОИЗВОДСТВУ
ШИПЕВА Е.Д.

Данные о ведущей организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»

Адрес: 107023, г. Москва, Б. Семеновская ул., д. 38.

Телефон: +7 (495) 223-05-23

E-mail: mospolytech@mospolytech.ru