

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и
цифровому развитию
МГТУ им. Н.Э. Баумана

д.э.н., профессор

П.А. Дроговоз

«06» 05 2025 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет)»

(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Диссертация «Разработка предиктивных методов и алгоритмов для систем диагностирования оборудования АЭС с ВВЭР» выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре ядерных реакторов и установок и в АО научно-техническом центре «Диапром».

В период подготовки диссертации соискатель Коцоев Константин Игоревич являлся аспирантом очной формы обучения МГТУ им. Н.Э. Баумана. В настоящее время работает в ООО «КВАНТ ПРОГРАММ» в должности руководителя направления по исследованию данных.

В 2018 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по специальности 14.05.01 – Ядерные реакторы и материалы. Диплом специалиста 107718 0819974, дата выдачи 02 июля 2018 г., регистрационный номер 163э.

Справки о сдаче кандидатских экзаменов выданы в 2023 и 2025 годах МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель – Перевезенцев Владимир Васильевич, доктор технических наук, доцент, работает в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.

Handwritten signature in blue ink, likely of the scientific supervisor, Vladimir Vasilievich Perevezentsev.

Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре ядерных реакторов и установок в должности профессора.

Тема диссертации окончательно утверждена Учёным советом Научно-учебного комплекса «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана 28.04.2022 №02.09-03/227 Э.

По итогам обсуждения диссертационной работы принято следующее заключение:

Актуальность проблемы

Эксплуатационные характеристики таких сложных технических объектов как ядерные энергетические установки (ЯЭУ) содержат важную с точки зрения обеспечения безопасности и надежности информацию о протекающих в них процессах. При этом сигналы многочисленных (более тысячи) измерительных каналов испытывают взаимовлияние друг на друга, а уровни их шумов могут существенно превышать полезную составляющую сигнала. Анализ аномальных ситуаций, произошедших на объектах ядерной энергетики, показал, что развитие аномалии можно было обнаружить на ранней стадии по изменению связей и характерных признаков в эксплуатационных данных. Однако эта важная информация скрыта, замаскирована помехами и мешающими факторами, распределена по большому числу параметров. Извлечение такой информации позволит повысить безопасность эксплуатации и информативность технической диагностики.

В связи с этим необходимо совершенствовать методы диагностики – выделения характеристик сигналов, содержащих информацию о состоянии оборудования и отдельных элементов ЯЭУ или особенностях протекания тех или иных процессов в нем. При этом классические методы, алгоритмы обработки и представления сигналов многочисленных и различных по природе датчиков должны быть существенно расширены и развиты «в глубину» с целью надежного выявления причинно-следственной связи анализируемых процессов.

Применение методов интеллектуального анализа позволяет решать задачи диагностики в условиях неполноты или отсутствия необходимой априорной информации и позволяет своевременно (задолго до выхода измеряемых параметров за эксплуатационные пределы) предоставить эксплуатационному персоналу информацию о возникновении предаварийного состояния или о появлении аномалий в работе оборудования.

Таким образом, разработка методов и алгоритмов диагностики оборудования и повышения информативности штатных систем контроля оборудования и реакторной установки (РУ) в целом, учитывая потенциальную важность для обеспечения безопасной и надежной эксплуатации АЭС, является актуальной задачей, имеющей практическую ценность.

Научная новизна работы

Разработан новый алгоритм выделения полезного сигнала в измерительных каналах акустической системы контроля течи теплоносителя

(САКТ) в главном циркуляционном контуре (ГЦК), сокрытого в высокоамплитудных посторонних шумах, определяющегося по отношению к общей закономерности поведения во времени множества идентичных каналов, работающих в одинаковых условиях. Алгоритм отличается более высокой надежностью определения протечек трубопроводов РУ, за счет сокращения числа ошибок первого рода (ложных срабатываний) и более высокой чувствительностью, позволяя обнаруживать течи с расходом менее установленного концепцией «течь перед разрушением». Кроме того, исследована устойчивость предложенного алгоритма к различным фоновым акустическим выбросам.

Проведен анализ дефектов измерительных каналов системы акустического контроля течи и встроенной проверки работоспособности. На основании этого предложен и обоснован новый метод проверки работоспособности измерительных каналов САКТ и разработан каскадный нейросетевой классификатор в его основе, отличающийся способностью определять не только дефектные каналы, но и неисправные акустические датчики.

В работе разработан единый подход к анализу данных оперативного технического контроля для оценки состояния оборудования АЭС в процессе эксплуатации. На основании проведенных исследований сформированы модели диагностирования оборудования на примере главных циркуляционных насосов. В отличие от имеющихся систем диагностирования, направленных на выявление «симптомов» аварии или их проявления, предложенный метод позволяет своевременно выявлять аномалию и дает возможность более адекватно оценить ситуацию и принять решение по дальнейшей эксплуатации оборудования. Помимо этого, отличительной особенностью также является возможность определения покомпонентного вклада отдельного параметра в общее отклонение, что поможет эксперту в анализе первопричины и в составлении симптомно-ориентированной аварийной инструкции.

Разработан новый подход к использованию сверточной нейронной сети, используемой для сегментации изображений, для сегментации временных рядов, представленных сигналами активной мощности электроприводной арматуры (ЭПА), для разбиения циклограмм на однородные характерные интервалы времени, из которых извлекаются диагностические признаки. Проведен анализ наиболее подходящих для данной задачи функций потерь, для решения проблемы дисбаланса данных – когда один или несколько классов значительно превышают остальные. В результате предложен алгоритм, который, в отличие от имеющихся, позволяет автоматизировать процесс диагностирования ЭПА, значительно увеличить скорость диагностирования и выявление неисправности, а также исключить ошибки, связанные с человеческим фактором. За счет автоматизации процесса диагностирования ЭПА стало возможно проводить его в онлайн формате.

Практическая значимость работы

В работе решены практически важные задачи технического диагностирования АЭС с РУ ВВЭР. Все решения доведены до алгоритмов и программных продуктов:

- в составе системы акустического контроля течей НВАЭС-2 с РУ ВВЭР-1200 (энергоблоки №1 и №2) алгоритм фильтрации глобальных шумов в измерительных каналах систем контроля течей в модуле комплексного анализа течи. Практическая работоспособность алгоритма продемонстрирована на данных, полученных на основе экспериментального обоснования САКТ на специализированном стенде, а также имеющихся данных по протечкам на номинальных параметрах, эксплуатируемых РУ;

- в составе системы акустического контроля течей алгоритм выявления неисправностей измерительных каналов и акустических датчиков, прошедший, прошедший проверку на реальных данных САКТ НВАЭС-2 с РУ ВВЭР-1200 (энергоблоки №1 и №2);

- в составе системы предиктивной аналитики алгоритм обнаружения аномалий в работе реакторного оборудования. Эффективность разработанных алгоритмов продемонстрирована на примере работы главных циркуляционных насосов НВАЭС-2 с РУ ВВЭР-1200 (энергоблок №1). В процессе исследования использованы данные различных типов датчиков, включая вибрационные (виброакселерометры), датчики температуры и давления. На основе этих данных были разработаны критерии диагностирования, которые позволяют выявлять аномалии в работе оборудования и принимать меры по их устранению;

- в составе комплексной системы диагностирования арматуры (КСДА) алгоритм сегментации временных рядов. Для обоснования эффективности алгоритма использовались данные КСДА Нововоронежской АЭС-2 с РУ ВВЭР-1200 (энергоблок №1).

Анализ реальных данных оперативного контроля действующих АЭС показал эффективность представленных разработок. Системы прошли апробацию в составе специализированного программного обеспечения для систем технической диагностики комплекса систем контроля, управления и диагностики (СКУД) на энергоблоках №1 и №2 НВАЭС-2 с РУ ВВЭР-1200.

Достоверность полученных результатов.

Исследования в данной диссертационной работе основаны на современных подходах анализа данных, применяемым для контроля состояния оборудования.

В качестве методологической базы использовались современные алгоритмы машинного обучения, а также нормативные документы и материалы научных конференций, посвященных вопросам надежности и безопасности технически сложных промышленных объектов.

Достоверность представленных в диссертационной работе основных положений подтверждаются результатами экспериментальных исследований, и внедрением алгоритмов в системы диагностирования оборудования АЭС с

РУ ВВЭР. Все разработанные методы прошли проверку на экспериментальных данных и в реальных условиях эксплуатации АЭС.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные результаты получены лично автором.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им Н.Э. Баумана в период 2019-2023 годы, на 8-ой международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации. (ФТИ – 2021)» (Екатеринбург – 2021), на научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2022)» (Обнинск, 2022), на научно-техническом семинаре, проводимом в АО «СНИИП» «Развитие систем диагностирования реакторных установок (РУ)» (Москва – 2022).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в одной монографии (в соавторстве), 6 научных статьях, в рецензируемых ВАК научно-технических журналах.

1. Аркадов Г.В., Коцоев К.И., Лазарев Н.А., Павелко В.И., Трыков Е.Л., Трыкова И.В. Предиктивная аналитика и диагностика АЭС // Москва: Издательство «Наука», 2022, 143 с. (9,75 п.л./4,5 п.л.)

Соискатель выполнил обзор методов машинного обучения, в монографию вошли примеры практической реализации методов предиктивной аналитики в целях диагностирования оборудования АЭС. Отвечал за наполнение математическим функционалом системы предиктивной аналитики, описанной в данной монографии.

2. Katser ID, Kozitsin VO, Kotsoev KI, Maksimov IV, Larionov DA Data pre-processing methods for NPP equipment diagnostics algorithms: an overview // Nuclear Energy and Technology 7(2) – 2021: 111-125. (1,16 п.л./0,4 п.л.)

Соискателем описаны особенности данных, собираемых на АЭС, методы предварительной обработки, которая проводится перед этапами решения основных задач диагностики, а также специфика применения предварительной обработки в режиме реального времени.

3. Трыков Е.Л., Кудряев А.А., Коцоев К.И., Ананьев А.А. Эффективный метод фильтрации глобальных шумов измерительных каналов систем контроля течей АЭС с РУ ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020. – № 4. – С. 86-95. (0,9 п.л./0,45 п.л.)

Соискателем проведен обзор литературы по имеющимся методом фильтрации глобальных шумов в измерительных каналах системы акустического контроля течи, выполнен анализ возможных общих причин помех и на основании этого предложен метод для группировки каналов

необходимой для построения регрессионных моделей. Реализованы робастная байесовская регрессия и полносвязная нейронная сеть.

4. Коцоев К.И., Трыков Е.Л., Кудряев А.А., Перевезенцев В.В. Разработка алгоритма определения неисправности измерительных каналов системы акустического контроля течей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана – 2021. – №3. – С. 100-112. (1 п.л./0,85 п.л.)

Соискателем проведен анализ дефектов измерительных каналов системы акустического контроля течи и встроенной проверки работоспособности. На основании этого предложен новый метод проверки работоспособности и разработан каскадный нейросетевой классификатор дефектов.

5. Трыков Е.Л., Трыкова И.В., Коцоев К.И. Обнаружение аномалий в работе реакторного оборудования с помощью нейросетевых алгоритмов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020. – № 3. – С. 136-147. (1,16 п.л./0,65 п.л.)

Соискателем проведен предварительный анализ и предобработка данных, разработан метод анализа данных оперативного технического контроля для оценки состояния оборудования, который состоит из последовательно примененных метода оценки состояния и модели обнаружения аномалий. Реализован вариационный автоэнкодер с механизмом внимания на основе двунаправленных рекуррентных сетей в качестве модели оценки состояния и критерий Хотеллинга в качестве модели обнаружения аномалий, позволяющий определять вклад каждого отдельного параметра в общую статистику.

6. Коцоев К.И., Трыков Е.Л., Трыкова И.В. Применение свёрточной нейронной сети для сегментации сигналов электроприводной арматуры. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 2. – С. 158-167. (1,27 п.л./1 п.л.)

Соискателем предложен метод сегментирования временных рядов сверточными нейронными сетями, проведена предварительная обработка данных, преобразование данных в приемлемый для сети формат, выделены участки сигналов, максимально насыщенные характерными точками (диагностическими признаками), размечены данные. Проведен анализ наиболее подходящих функций потерь и реализована нейронная сеть.

7. Трыков Е.Л., Трыкова И.В., Коцоев К.И. Экспертная нейросетевая система диагностирования электроприводной арматуры. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 3. – С. 72-83. (1,39 п.л./0,3 п.л.)

В основу экспертной нейросетевой системы диагностирования вошел разработанный алгоритм сегментации сигналов электроприводной арматуры, из которых извлекаются диагностические признаки, на основании которых делается вывод о наличии того или иного дефекта.

Указанные научные публикации достаточно полно отражают содержание диссертационной работы Коцоева Константина Игоревича.

Заключение

Диссертация Коцоева Константина Игоревича «Разработка предиктивных методов и алгоритмов для систем диагностирования оборудования АЭС с ВВЭР» является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, имеющей практическую ценность.

Диссертационная работа удовлетворяет п.п. 9–14 ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук. В диссертационной работе решены важные задачи повышения эффективности обнаружения аномальных процессов в РУ с ВВЭР на ранних стадиях их развития, что способствует повышению надежности и безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР. Полученные результаты могут быть использованы и уже используются на энергоблоках НВАЭС-2 (энергоблоки №1 и №2)

Тема и содержание диссертации Коцоева Константина Игоревича «Разработка предиктивных методов и алгоритмов для систем диагностирования оборудования АЭС с ВВЭР» полностью соответствуют выбранной специальности 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

Заключение принято на заседании кафедры ядерных реакторов и установок МГТУ им. Н.Э. Баумана. Присутствовало на заседании – 9 человек
Результаты голосования: «за» – 9 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек, протокол № 04.79-04/20 от 23.05.2025.

Заведующий кафедрой ядерных реакторов
и установок МГТУ им. Н.Э. Баумана
Академик РАН, д.т.н., профессор

Ю.Г. Драгунов

23.05.2025