

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., доцента Горбачева Максима Михайловича на диссертацию АЛЬ-ТЕКРИТИ БАТБАН ХАЛИД ФАХМИ, «ANALYSIS OF THE VIBRATION EFFECTS ON COMBINED CYCLE POWER PLANTS' MECHANICAL PARTS» (Оценка воздействия вибрации на механическое оборудование электростанций комбинированного цикла), представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.7 «Турбомашины и поршневые двигатели» в диссертационный совет ПДС 2022.013 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

На отзыв представлены следующие материалы:

1. Диссертационная работа (на английском языке), состоящая из введения, 6 глав, списка литературы из 112 источников и 3 приложений. Общий объем диссертационной работы – 203 страницы, основное содержание работы изложено на 174 страницах (включая список литературы).
2. Автореферат диссертационной работы на английском языке объемом 19 страниц.
3. Автореферат диссертационной работы на русском языке объемом 22 страницы.

1. Актуальность темы и содержания диссертации

Актуальность темы и содержания диссертационной работы подтверждается широким применением газовых турбин большой мощности в составе парогазовых установок в тепловой энергетике. Мировой тренд постепенного перехода от регламентной оценки технического состояния сложного и дорогостоящего оборудования, включая паровые и газовые турбины, двигатели внутреннего сгорания и т.д., приводит к необходимости разработки новых инструментов и методик обработки виброакустических сигналов. Применение элементов искусственного интеллекта и машинного обучения в данном случае оправдано большим объемом входных данных, а также значительным количеством вариантов сочетания параметров вибрационных полигармонических сигналов, возникающих при развитии дефектов механического оборудования. Соискатель рассматривает данную проблему с точки зрения как теоретического, так и практического применения нейросетей для анализа и выявления аномальных проявлений в вибрационных сигналах, характерных для дефектов при эксплуатации газовых турбин большой мощности. Применение подобных методик может снизить количество аварийных случаев с тяжелыми экономическими и социальными последствиями, что также подчеркивает актуальность и необходимость проведения исследований в данной области.

2. Достоверность результатов

Достоверность результатов теоретических и практических исследований подтверждается применением апробированных методов и подходов к решению задач по измерению и анализу вибрационных сигналов, в том числе применением традиционного гармонического анализа Фурье. Достоверность результатов измерений обеспечивается применением системы «VIBRO-METER» производства компании «MEGGITT» с пьезоэлектрическими акселерометрами модели СА 202 промышленного исполнения, имеющих частотный диапазон измеряемых вибросигналов от 0,5 до 6000 Гц с погрешностью до 2%. Это обеспечивает измерение вибрационных сигналов (возникающих в элементах газовых турбин) в необходимом частотном диапазоне и с высокой точностью.

3. Научная новизна

Научная новизна диссертации заключается в разработке модели LSTM-автоэнкодера, что представляет собой новый подход в области обнаружения отклонений в характере вибрационных сигналов при эксплуатации газовых турбин. К научной новизне также можно отнести методику обработки вибрационных сигналов при помощи LSTM-автоэнкодера.

4. Практическая значимость

Практическая значимость диссертации заключается в результатах применения LSTM-автоэнкодера для выявления неисправностей газовой турбины Siemens SGT5-4000F, установленной на электростанции в г. Киркук, Ирак. К практической значимости можно отнести образцы вибрационных сигналов, полученных соискателем при эксплуатации газовых турбин фирмы Siemens, как при их нормальном техническом состоянии, так и при возникновении дефектов. К практической значимости диссертации следует отнести 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Разработка компьютерной программы для обнаружения вибрационных аномалий вращающегося оборудования на основе различных практических алгоритмов», «Интеллектуализация обнаружения аномалий с высокой точностью в системе онлайн-мониторинга турбин электростанций», «Улучшенная модель ARIMA на основе компьютерного кода для раннего обнаружения аномалий в работе электростанции», «Улучшение структуры машинного обучения с использованием модели временной сверточной сети - автоэнкодер: для улучшения обнаружения неисправностей в промышленном оборудовании».

5. Апробация результатов исследования

Основные положения диссертационной работы докладывались на международной конференции РУДН в г. Москва (в 2023 году), на 4-ой Международной конференции, посвященной искусственному интеллекту и его будущим перспективам в области электротехники, вычислительной

техники, механики и телекоммуникаций в Иране (в 2024 году), на 3-ей международной конференции для студентов-механиков и аэрокосмических инженеров в Иране (в 2024 году).

6. Публикации основных результатов диссертации в научной печати

Основное содержание диссертации опубликовано в 5 статьях в международных рецензируемых журналах Scopus / Web of Science, 1 статье в международном журнале (не рецензируемом Scopus / Web of Science), 1 статье в журнале, рецензируемом РИНЦ, результаты исследований были представлены на 3 международных конференциях с публикациями в сборниках докладов. По результатам исследований соискателем получено 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

7. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Автореферат отражает содержание диссертации, передает ее основные положения и соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (утвержденного ученым советом РУДН (протокол № УС-1 от 22.01.2024 г.)).

8. Оценка и анализ содержания диссертации

Диссертация представляет собой завершённую работу, в которой теоретические и экспериментальные исследования доведены до практического применения.

Во введении обоснована актуальность перехода диагностики технического состояния энергетического оборудования тепловых станций, включая газовые турбины от регламентного метода к оценке по факту за счет применения безразборной вибродиагностики. Приведены общие сведения о характере проведенных соискателем исследований и области их применения.

В первой главе приводится описание особенности эксплуатации газовых турбин в составе энергетических объектов на базе парогазовых циклов и существующие методы обнаружения дефектов при помощи измерения и анализа вибрационных сигналов. В первой главе обоснована необходимость внедрения в анализ вибрации методов машинного обучения в связи с большими объемами исходных данных и широким вариационным рядом возможных диагностических критериев. В первой главе обозначены цель и задачи исследования, описана методология, на которой базируется диссертационная работа.

Во второй главе представлен обзор ранее проведенных исследований, включая анализ причин, вызывающих изменение параметров вибрации газотурбинного агрегата при изменении его технического состояния, а также

видов последствий от возникающих дефектов. Описан комплексный подход к анализу вибрации и обоснована необходимость использования элементов искусственного интеллекта и нейросетей. Исследованы типовые примеры отказов и повреждений элементов газовых турбин, которые приводят к изменению параметров вибрации, в том числе - дисбаланс, расцентровка роторов и т.д.

В третьей главе рассматриваются технологии измерения и мониторинга вибрации в роторных тепловых двигателях, а также структура вибрационного сигнала. В главе подробно рассмотрена конструкция и принцип действия акселерометров, проксиметров, велосиметров, тензометрических датчиков, лазерных вибрографов и других технических решений для измерения динамических параметров газовой турбины.

В четвертой главе представлено описание и характеристики тепловой электростанции в городе Киркук (Ирак). Представлена информация о конструкции и особенностях эксплуатации газотурбинной установки Siemens SGT5-4000F, характерных дефектах и отказах, обнаруженных при эксплуатации агрегата в составе парогазовой установки. Приведено описание системы измерения вибрации «VIBRO-METER» и ее элементов.

В пятой главе рассматриваются методы анализа вибрационных сигналов, полученных в ходе практических измерений и методика формирования базы для обнаружения аномалий при помощи предложенного соискателем LSTM-автоэнкодера. Приводятся данные по разработанным алгоритмам выявления дефектов и описание методики машинного обучения LSTM-автоэнкодера. Произведена оценка точности определения дефектов LSTM-автоэнкодером по сравнению с другими нейросетями при помощи известного метода «Confusion Matrix», широкого используемого для проверки адекватности работы элементов искусственного интеллекта.

В шестой главе приводятся выводы по проведенному исследованию и рекомендации соискателя по развитию применения нейросетей для выявления дефектов газотурбинных агрегатов с использованием вибродиагностики и дальнейшей реализации концепции технического обслуживания газовых турбин по их фактическому состоянию.

9. Замечания по диссертации и автореферату

Замечания по содержанию:

1. В диссертационной работе и автореферате слабо представлен анализ ранее проведенных работ специалистов России в области исследования вибрации турбинных агрегатов, таких как - Костюков В.Н., Костюков А.В., Науменко А.П., Розенберг Г.Ш. и др.
2. Не указано количество используемых для исследования датчиков, имеется ли проверка измерительного оборудования и какова доля участия соискателя в разработке, монтаже и настройке измерительной системы.
3. В качестве цели диссертации соискатель обозначил разработку нейронной сети, что на наш взгляд является частной задачей, по сути -

инструментом для достижения главной цели – повышения надежности (в данном случае - безотказности) при эксплуатации газовой турбины.

5. В диссертационной работе и автореферате не указаны погрешности результатов проведенных измерений вибрации, а также соответствие величины данных погрешностей принятым в нормативно-технической документации предельным значениям.

6. В автореферате диссертации на рис. 2 (в диссертации Figure 4.6) представлена панель управления системы защиты от превышения частоты вращения ротора газовой турбины, которую соискатель использовал для исследований. Поскольку подобные системы используются для аварийной остановки при достижении определенной частоты вращения, следует пояснить, каким образом данные от датчиков системы защиты могут обеспечить измерение вибрации. Либо соискатель не указал полные функциональные возможности данной системы с возможностью остановки не только по частоте вращения, но и по предельным значениям вибрации. Или данная система является штатной подсистемой в системе вибромониторинга, которую часто используют в газовых турбинах фирмы Siemens (например модели Siemens SGT-400).

7. В диссертационной работе нет четкого соответствия выявленных дефектов и диагностических критериев, полученных при помощи нейросети, разработанной соискателем. Например, какие диагностические критерии по параметрам вибрации, установленные нейросетью будут свидетельствовать о наличии дисбаланса ротора или износе подшипниковых узлов.

8. В диссертационной работе указано, что обработка вибрационных сигналов производилась при помощи преобразования Фурье, однако данный метод пригоден в большей степени для стационарных процессов, поэтому необходимо пояснить, каким образом будет анализироваться вибрационный сигнал для нестационарных процессах – при пуске, остановке, выбеге ротора и т.д.

Замечания по оформлению:

1. Рис. (Figure) 4.1, 4.2 в диссертации непропорциональны и деформированы, что усложняет их восприятие.

2. На рис. 7 в автореферате наименование горизонтальной оси должно быть «выборка или выборочная совокупность», но не «номер образца». Также неясно, что имеет ввиду автор под термином «смещение вибрации вала», вероятно – виброперемещение.

10. Заключение

Анализ представленных соискателем материалов, содержание диссертации, автореферата и опубликованных трудов позволяют сделать вывод о том, что диссертационная работа «ANALYSIS OF THE VIBRATION EFFECTS ON COMBINED CYCLE POWER PLANTS' MECHANICAL PARTS» (Оценка воздействия вибрации на механическое оборудование

электростанций комбинированного цикла), несмотря на имеющиеся замечания, является законченной научно-квалификационной работой.

Полученные автором диссертации результаты имеют важное значение для повышения надежности и безопасности эксплуатации газовых турбин.

Рекомендуется использовать разработанные автором элементы искусственного интеллекта и нейросети для решения следующих задач:

- разработка базы диагностических критериев технического состояния газотурбинных установок по параметрам вибрации;
- выявление зарождения и развития дефектов, возникающих при эксплуатации газовых турбин;
- формирование базы данных для повышения качества предложенной соискателем нейросети в рамках машинного обучения;
- прогнозирование остаточного ресурса элементов газовых турбин – подшипниковых узлов, уплотнений и т.д.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, согласно п. 2.2 раздела II (кандидатская) Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного ученым советом РУДН протокол № УС-1 от 22.01.2024 г.

Автор диссертационной работы - Аль-Текрити Ватбан Халид Фахми заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.7 «Турбомашины и поршневые двигатели».

Официальный оппонент:

Доктор технических наук 2.5.20, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация водного транспорта и промышленное рыболовство», институт морских технологий, энергетики и транспорта, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»

 Горбачев Максим Михайлович

« 05 » декабря 2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет»

Адрес: 414056, Астраханская область, городской округ город Астрахань, г. Астрахань, ул. Татищева, 16.

Телефон кафедры «ЭВТиПР» ФГБОУ ВО «АГТУ»: (8512) 61-42-14

Телефон моб.: +7-927-663-1207,

Электронная почта: e-mail: max9999_9@mail.ru

Подпись Горбачева М.М. заверяю.

Начальник отдела кадров ФГБОУ ВО «АГТУ»  Дубиш Н.М.

