

ОТЗЫВ

официального оппонента – доктора технических наук
Султанова Махсуда Мансуровича
на диссертационную работу Бубнова Кирилла Николаевича
на тему «Совершенствование методов диагностики оборудования
паротурбинных установок ТЭС на основе математического моделирования»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

1.Актуальность темы.

В настоящее время предлагаются различные подходы к построению систем диагностики, мониторинга, расчета и прогнозирования показателей надежности энергетического оборудования, направленные на повышение эффективности работы теплогенерирующего оборудования. Ввод новых мощностей и продление срока службы эксплуатируемого генерирующего оборудования являются и остаются ключевыми задачами для обеспечения стабильной работы энергетических систем и комплексов страны. С учетом значительной наработки оборудования энергетических систем заслуживают особого внимания разработка и внедрение дополнительных мер и средств развития технического обслуживания и ремонта оборудования. Так, на данном этапе, на ТЭС и АЭС формируются подходы к применению систем мониторинга и диагностики технического состояния оборудования, различающиеся способами построения и использования математических методов расчета и прогнозирования. Указанные системы позволяют контролировать техническое состояние, проводить его диагностику и прогнозировать возможные изменения.

Стоит отметить, что в системах мониторинга и диагностики наиболее часто используются модели, в основе которых находятся методы статистической обработки экспериментальных данных. Однако разработка таких моделей требует использования большого массива данных об эксплуатационных режимах работы оборудования, включая нештатные и аварийные состояния. Получение достаточного количества экспериментальных данных затруднено из-за различных факторов, таких как ограниченность ресурсов и сложность проведения экспериментов. Использование же математических моделей для диагностирования состояния может быть не связано с указанными ограничениями. Таким образом, совершенствование методов и алгоритмов диагностики технического состояния паровой турбины и вспомогательного теплообменного оборудования паротурбинной установки (ПТУ) на основе их математических моделей является актуальной задачей для повышения надежности и эффективности работы энергетических систем и комплексов.

Целью диссертационной работы Бубнова К.Н. является совершенствование эксплуатации оборудования ТЭС за счет разработки и реализации алгоритмов диагностики технического состояния паровой турбины и вспомогательного теплообменного оборудования ПТУ на основе их математических моделей.

Объектом исследования являются паровая турбина и вспомогательное теплообменное оборудование, входящие в состав ПТУ ТЭС.

2. Структура, объем и содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, включающего 230 наименований, и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 206 страниц машинописного текста, 63 рисунка и 33 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования. Представлены сведения о степени разработанности темы диссертации, определена цель, сформулированы задачи. Указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Приведены положения, выносимые на защиту, а также информация о реализации и апробации результатов работы и личном вкладе автора.

В первой главе автор на основе литературного обзора рассматривает существующие способы технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Проведен анализ требований, которые регламентируют организацию тепловых (балансовых) испытаний и экспресс-испытаний энергетического оборудования. Уделено внимание анализу существующих систем мониторинга и диагностики оборудования, подходов к математическому моделированию и расчету тепловой схемы паровой турбины и вспомогательного теплообменного оборудования системы ее регенерации. Автором отмечена необходимость в совершенствовании традиционных методов диагностики оборудования ПТУ за счет математических моделей. Исходя из проведенного обзора, автором определено направление диссертационного исследования и сформулирована его цель и задачи, направленные на достижение поставленной цели.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию математических моделей проточной части паровой турбины и регенеративного подогревателя в рамках методологии матричной формализации для решения обратной задачи диагностики технического состояния энергетического оборудования. В частности, особенностью разработанной математической модели изменения состояния проточной части паровой турбины является учет площади проходного сечения турбинных решеток при определении распределения давления по ее проточной части, а для математической модели регенеративного подогревателя – учет структуры потоков теплоносителей и фазового перехода горячего теплоносителя при расчете температуры питательной воды и конденсата греющего пара на выходе из подогревателя. На основании разработанных моделей автор определил исходные данные для проведения диагностики технического состояния, сформулировал и решил задачи диагностики указанного оборудования в виде многомерных оптимизационных задач.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований ПТУ с целью параметрической идентификации и проверки на адекватность предложенных автором во второй главе диссертации математических моделей для решения прямой задачи моделирования и

обратной задачи диагностики технического состояния. В качестве объектов были рассмотрены конденсационная турбоустановка с турбиной типа К-300-240 ЛМЗ Костромской ГРЭС и теплофикационная турбоустановка с турбиной типа Т-100/120-130 УТЗ ТЭЦ ВАЗа. В данной главе представлены результаты обработки результатов измерений технологических параметров, полученных от штатных контрольно-измерительных приборов, и их метрологическое обеспечение. Получены результаты, подтверждающие адекватность предложенных математических моделей энергетического оборудования, а также перспективность их использования для решения прикладных задач в условиях эксплуатации энергетического оборудования.

В четвертой главе приведены результаты практической реализации разработанных во второй главе диссертации математических моделей и алгоритмов решения обратной задачи диагностики технического состояния энергетического оборудования. В качестве объектов, на которых продемонстрирована возможность решения прикладных задач в условиях эксплуатации энергетического оборудования в рамках диагностики технического состояния, автором были рассмотрены паровая турбина Т-250/305-240-ДБ УТЗ и подогреватель ПВ-900-380-66. Для верификации разработанных алгоритмов автором проведены численные эксперименты. Выполненный анализ результатов численных экспериментов, в частности сопоставление полученных результатов тестовых модельных возмущений с данными решения многомерной оптимизационной задачи, позволил сделать вывод о корректности постановки и решения обратной задачи диагностики для указанного оборудования.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы в соответствии с целью исследования и поставленными задачами. Приведены перспективы дальнейшей разработки темы диссертационного исследования.

В приложении приведены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и акты внедрения результатов исследования.

3. Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем: в разработке комбинированной математической модели изменения состояния проточной части паровой турбины, построенной в рамках методологии матричной формализации балансовых соотношений энергии и массы с учетом формулы Стодолы-Флюгеля и найденной аппроксимирующей зависимости относительного внутреннего КПД паровой турбины от расхода пара, позволяющей определить распределение давления по проточной части при ограниченном объеме экспериментальных данных; в разработке алгоритма решения обратной задачи диагностики технического состояния проточной части паровой турбины на основе комбинированной математической модели, позволяющего оперативно выявить и локализовать неисправности (дефекты) по отсекам проточной части паровой турбины; в разработке матричной математической модели трехступенчатого регенеративного подогревателя, учитывающей структуру потоков теплоносителей и фазовый переход горячего теплоносителя, позволяющей при ограниченном объеме экспериментальных

данных осуществить решение обратной задачи диагностики технического состояния подогревателя.

4. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования теплоэнергетического оборудования, согласованностью результатов работы с данными, опубликованными в работах других авторов, применением гостированных методов обработки результатов экспериментального исследования, совпадением результатов экспериментального исследования и данных численного моделирования.

5. Значимость полученных автором результатов для науки и практики.

Научная значимость результатов проведенного диссертационного исследования автором состоит в разработке математических моделей в рамках методологии матричной формализации для постановки и решения прямой задачи моделирования и обратной задачи диагностики технического состояния паровой турбины и вспомогательного теплообменного оборудования ПТУ.

Практическая значимость результатов работы заключается в программной реализации разработанных математических моделей и алгоритмов решения обратной задачи диагностики технического состояния исследуемого оборудования. Указанное подтверждается полученными автором свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ: № 2023662771; № 2023687166; № 2022682363; № 2023662774; № 2022615258; № 2023684423; № 2023687167; № 2023618286; № 2024662938.

6. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Полученные в ходе диссертационного исследования результаты рекомендуется использовать в проектных организациях и научно-исследовательских институтах, занимающихся анализом и оценкой технического состояния энергетического оборудования электростанций. Кроме того, их следует использовать при пусконаладочных работах, проводимых оперативным персоналом электростанций, с целью оценки качества ремонта энергетического оборудования. Модули расчета распределения давления по проточной части паровой турбины и трехступенчатого регенеративного подогревателя высокого давления рекомендуется использовать в учебном процессе в рамках подготовки бакалавров по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и магистров по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» с целью повышения вовлеченности обучающихся в учебный процесс.

7. Публикации основных результатов диссертационной работы.

Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, а также опубликованы в 28 печатных работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 14 тезисах и полных текстах докладов конференций, получено 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

8. Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы».

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

1. Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования.

2. Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии.

3. Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативных топлив, и возобновляемых видов энергии, водоподготовки и водно-химических режимов, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду, повышения надежности и ресурса элементов энергетических систем, комплексов и входящих в них энергетических установок.

4. Разработка научных подходов, методов, алгоритмов, технологий конструирования и проектирования, контроля и диагностики, оценки надежности основного и вспомогательного оборудования энергетических систем, станций и энергокомплексов и входящих в них энергетических установок.

9.Замечания и вопросы по диссертационной работе.

1. Автор выделяет целесообразность использования метода матричной формализации для моделирования процессов теплопередачи. Чем это обусловлено?

2. В тепловой схеме ПТ-65/75-130/13 (стр. 67 диссертации) не представлена группа ПВД. Учтено ли их наличие в расчетной модели?

3. В тепловой схеме Т-100/120-130 (стр. 73 диссертации) теплофикационный отбор представлен обобщенным без двух ступеней

подогрева. Включает ли расчетная модель возможность оценки режимов при одно- и двухступенчатом режимах теплофикации?

4. Во второй главе, автором производится проверка адекватности математической модели по оценке эффективности проточной части через показатель удельного расхода тепловой энергии на турбоустановку. Однако, данный показатель имеет достаточную чувствительность к режиму работы регенеративной системы ПТУ. В данном случае, для оценки эффективности проточной части турбоустановки целесообразнее было использовать показатель внутреннего относительного КПД отсеков/цилиндров паровой турбины, рассчитанные по формулам 2.3, 2.8, 2.13, 2.16 и 2.17., а проверку адекватности осуществлять с нормативными значениями η_{oi} отсеков/цилиндров паровой турбины.

5. На работу паротурбинной установки, в частности паровой турбины и теплообменного оборудования системы ее регенерации, влияет целый ряд различных факторов, связанных с изменением режимов работы основного и вспомогательного оборудования. Каким образом осуществляется адаптация разработанных автором математических моделей и алгоритмов мониторинга и диагностики применительно к изменению режимов работы оборудования? Что для этого необходимо?

6. В диссертации автор при реализации программного комплекса использует показатель «Индекс технического состояния». Какой смысл автор вкладывает в данный термин и как этот показатель связан с используемым в энергетике индексом технического состояния энергетического оборудования согласно Приказу Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. N 676 "Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей"?

10. Заключение.

Указанные замечания и отмеченные недостатки в диссертации не снижают ее научную и практическую значимость.

Диссертационная работа Бубнова Кирилла Николаевича «Совершенствование методов диагностики оборудования паротурбинных установок ТЭС на основе математического моделирования», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» (технические науки), является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой разработаны новые научно обоснованные технические решения, основывающиеся на использовании математических моделей для решения обратной задачи диагностики технического состояния паровой турбины и вспомогательного теплообменного оборудования ПТУ действующих энергоблоков электростанций, имеющие важное значение по обеспечению надежной и экономичной работы оборудования энергетических систем и комплексов страны.

Диссертационная работа «Совершенствование методов диагностики оборудования паротурбинных установок ТЭС на основе математического моделирования» соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки РФ, установленным в п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в актуальной редакции), а ее автор, **Бубнов Кирилл Николаевич**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» (технические науки).

Даю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с работой диссертационного совета 24.2.303.01.

Официальный оппонент:

Директор филиала
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
университет «МЭИ» в г. Волжском,
доктор технических наук, доцент

Султанов Махсуд Мансурович

«10» февраля 2025 г.

Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в городе Волжском
404110, Россия, Волгоградская область, г. Волжский, проспект Ленина, 69
Тел.: +7 (8443) 21-01-60, факс: +7 (8443) 21-01-66
E-mail: vfmei@vfmei.ru

Подпись Султанова М.М. заверяю:

Ученый секретарь ученого совета филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в городе Волжском, доктор технических наук, доцент

«10» февраля 2025 г.

