

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.310.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 10 октября 2025 г., № 9

О присуждении Денисову Евгению Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Флуктуационно-шумовые и релаксационные электрические методы и приборы интеллектуального контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов» по специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» принята к защите 25 июня 2025 г. (протокол заседания № 6) диссертационным советом 24.2.310.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский государственный энергетический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, приказ № 717/нк от 09.11.2012 г.

Соискатель Денисов Евгений Сергеевич, 18 февраля 1983 года рождения,

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Флуктуационно-шумовая диагностика и контроль водородного топливного элемента с протонообменной мембраной» защитил в 2012 году в диссертационном совете, созданном на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального

образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ».

Работает в должности доцента кафедры радиоэлектроники и информационно-измерительной техники в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре радиоэлектроники и информационно-измерительной техники ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – доктор технических наук Евдокимов Юрий Кириллович, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», кафедра радиоэлектроники и информационно-измерительной техники, профессор.

Официальные оппоненты:

1. **Григорьев Сергей Александрович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, кафедра химии и электрохимической энергетики, профессор;

2. **Пиганов Михаил Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара, кафедра радиоэлектронных систем, профессор;

3. **Славутский Леонид Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, кафедра автоматики и управления в технических системах, профессор,

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, г. Москва, в своем **положительном** отзыве, подписанном

Дуниковым Дмитрием Олеговичем, кандидатом физико-математических наук, лаборатория №13 Водородных энергетических технологий, заведующим лабораторией, и утвержденном Петровым Олегом Федоровичем, доктором физико-математических наук, Академиком РАН, профессором, директором указала, что диссертация Денисова Е.С. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, характеризуется внутренним единством, содержит новые обоснованные научные результаты и выводы. Основные научные результаты диссертации прошли апробацию, что отражено в научных работах, опубликованных в рецензируемых изданиях, указанных в перечне Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России, и приравненных к ним, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Разработанные Денисовым Е.С. малосигнальные флуктуационно-шумовые и релаксационные электрические методы и приборы интеллектуального контроля и диагностики обеспечат повышение достоверности и оперативности оценки и прогнозирования технического состояния твердополимерных топливных элементов, что является важным для развития водородной энергетики в Российской Федерации. По своей актуальности, новизне, значимости для теории и практики неразрушающего и аналитического контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды диссертация соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Соискатель имеет 101 опубликованную работу по теме диссертации общим объемом 59,51 п.л. и авторским вкладом 28,82 п.л.; из них в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК по специальности 2.2.8., – 17, общим объемом 12,88 п.л. и авторским вкладом 6,12 п.л., в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в

международных наукометрических базах данных SCOPUS/WoS, и приравняваемых к категории К1 изданий, рекомендованных ВАК РФ – 8, общим объемом 10,38 п.л. и авторским вкладом 5,07 п.л., статьях в других рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных SCOPUS и WoS – 13, общим объемом 7,54 п.л. и авторским вкладом 3,03 п.л., 1 статье в журнале, входящем в Перечень ВАК по смежной специальности, объемом 0,58 п.л. и авторским вкладом 0,29 п.л., авторских разделах в 4 коллективных монографиях общим объемом 11,75 п.л. и авторским вкладом 6,88 п.л., патентах РФ на изобретение – 6, общим объемом 5,44 п.л. и авторским вкладом 1,93 п.л., свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ – 15, общим объемом 1,88 п.л. и авторским вкладом 0,97 п.л., других публикациях по теме диссертации – 37, общим объемом 9,06 п.л. и авторским вкладом 4,53 п.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Nigmatullin R.R., Martemianov S., Evdokimov Y.K., Denisov E., Thomas A., Adiutantov N. New approach for PEMFC diagnostics based on quantitative description of quasi-periodic oscillations // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. V. 41. №. 29. P. 12582-12590 (статья в рецензируемом научном издании МБД Q1 по SJR, приравнено к ВАК К1, вклад соискателя – 48%).

2. Denisov E.S., Evdokimov Y.K., Martemianov S., Thomas A., Adiutantov N.A. Electrochemical noise as a diagnostic tool for PEMFC // Fuel Cells. 2017. V. 17. №. 2. P. 225-237. (статья в рецензируемом научном издании МБД Q2 по SJR, приравнено к ВАК К1, вклад соискателя – 51%).

3. Denisov E., Evdokimov Yu.K., Nigmatullin R.R., Martemianov S., Thomas A., Adiutantov N. Spectral method for PEMFC operation mode monitoring based on electrical fluctuation analysis // Scientia Iranica. 2017. V. 24. №. 3. P. 1437-

1447 (статья в рецензируемом научном издании МБД Q3 по SJR, приравнено к ВАК К1, вклад соискателя – 45%).

4. Denisov E., Nigmatullin R., Evdokimov Y., Timergalina G. Lithium battery transient response as a diagnostic tool // Journal of Electronic Materials. 2018. V. 47. № 8. P. 4493-4501 (статья в рецензируемом научном издании МБД Q2 по SJR, приравнено к ВАК К1, вклад соискателя – 46 %).

5. Martemianov S., Thomas A., Adiutantov N., Denisov E., Evdokimov Y., Hissel D. Electrochemical noise analysis of a PEM fuel cell stack under long-time operation: noise signature in the frequency domain // Journal of Solid State Electrochemistry. 2020. V. 24. №. 11. P. 3059-3071 (статья в рецензируемом научном издании МБД Q2 по SJR, приравнено к ВАК К1, вклад соискателя – 47%).

6. Denisov E.S. Small-Signal Electrical Model of PEM Fuel Cell / E.S. Denisov // Theoretical Foundation of Chemical Engineering. 2024. V. 58. № 3. P. 549-554 (статья в рецензируемом научном издании МБД WoS, SCOPUS, RSCI, приравнено к ВАК К1, вклад соискателя – 100%).

7. Денисов Е.С., Никишина Г.В., Енилиев Р.Р., Никишин Т.П. Особенности реализации метода контроля технического состояния литиевых источников тока на основе анализа релаксационных процессов, вызванных изменением нагрузки // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 7(301). С. 36-43 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К1, вклад соискателя – 42%).

8. Денисов Е.С., Гайсин Н.Р., Никишин Т.П., Адъютантов Н.А. Контроль и прогнозирование критических режимов работы водородных топливных элементов в процессе эксплуатации на основе искусственных нейронных сетей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 12. С. 11-16 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К1, вклад соискателя – 55%).

9. Денисов Е.С., Гайсин Н.Р., Хаирова А.Р. Нейросетевая система релаксационной диагностики водородных топливных элементов // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 1(47). С. 16-22 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2, вклад соискателя – 43%).

10. Денисов Е.С. Повышение точности оценки параметров электрического шума для систем диагностики водородных топливных элементов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2022. Т. 78. № 1. С. 86-91. (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2, вклад соискателя – 100%).

На диссертацию и автореферат поступило 10 отзывов. Из них положительных – 10. С замечаниями – 10. Отзывы прислали:

1. Главный научный сотрудник лаборатории механики композиционных материалов ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН», доктор физико-математических наук Думанский А.М. Замечания: 1) в автореферате отсутствуют требования, предъявляемые к формирователю зондирующего сигнала для метода релаксационной диагностики. В связи с этим не ясно, какие должны обеспечиваться время нарастания и спада ступенчатого зондирующего сигнала; 2) рассматриваемая в работе батарея содержит достаточно небольшое количество, а именно 8 ячеек, в коммерческих батареях, например, для транспортных средств, количество ячеек может достигать нескольких сотен штук. К сожалению, вопросы возможности применения предложенных подходов для контроля режимов таких батарей в автореферате не рассмотрены.

2. Профессор кафедры общей физики Института физики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», доктор технических наук, доцент Захаров Ю.А. Замечания: 1) из текста автореферата осталось неясным, какие допущения приняты автором при разработке метода флуктуационно-шумовой диагностики твердополимерных топливных элементов; 2) не приведена информация о воспроизводимости спектральных характеристик флуктуационно-шумовых сигналов.

3. Профессор кафедры «Физика» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», доктор химических наук, профессор Кадиров М.К. Замечания: 1) на рисунке 12 автореферата представлено распределение механизмов возникновения флуктуационно-

шумовых сигналов по частотному спектру. При этом возникает вопрос о возможности обнаружения кратных неисправностей при использовании соответствующего метода диагностики; 2) в автореферате хотелось бы видеть более подробные оценки технических параметров измерительной аппаратуры для реализации предложенных методов.

4. Директор Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, г.Новосибирск, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор Маркович Д.М. Замечания: 1) из текста автореферата осталось неясным, возможна ли адаптация предложенных методов флуктуационно-шумовой диагностики к другим типам водородных топливных элементов; 2) интерес представляют оценка минимального времени измерения флуктуационно-шумового сигнала, то есть динамические возможности метода, обеспечивающего заданную точность принятия диагностических решений. К сожалению, в автореферате нет этих сведений.

5. Профессор кафедры «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», доктор технических наук Овчинникова Е.В. Замечания: 1) в автореферате не приведены оценки времени необходимого для достоверной оценки диагностических параметров флуктуационно-шумовых сигналов; 2) хотелось бы видеть информацию о точности аппроксимации релаксационного процесса трехэкспоненциальной моделью (формула (10) в автореферате). Всегда ли она предпочтительнее модели второго порядка, представленной на рисунке 9.

6. Заведующий кафедрой «Химия и химическая технология» ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», доктор химических наук, доцент Плетнев М.А. Замечание: в разделе 3 «Основные результаты работы» автор пишет, что им «решены следующие задачи: 1. Аналитический обзор показал, что для расширения области применения источников электрической энергии на базе ТПТЭ требуется решить актуальную задачу создания маловозмущающих методов

контроля и диагностики, обеспечивающих оперативное обнаружение неисправностей ТПТЭ и их критических режимов работы, а также формирование рекомендаций, минимизирующих влияние на эксплуатационные характеристики». С моей точки зрения, этот текст является не решением, а постановкой задачи и должен быть помещен в соответствующий раздел автореферата.

7. Профессор кафедры «Управление и контроль в технических системах» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», доктор технических наук Ростокин И.Н. Замечание: В автореферате не отражены ответы на вопросы, касающиеся: 1) особенности обнаружения двух и более неисправностей водородных топливных элементов, упомянутых на рис. 17; 2) детальной информации по подготовке базы данных для обучения нейронных сетей для других конструкций твердополимерных топливных элементов.

8. Профессор кафедры проектирования и производства электронно-вычислительных средств ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола, доктор технических наук Рябов И.В. Замечания: 1) в автореферате не представлены требования к собственным шумам измерительной аппаратуры, позволяющие реализовывать предложенную автором флуктуационно-шумовую диагностику; 2) для обозначения спектров электрических флуктуаций используются два обозначения S' и S_U , при этом из текста автореферата не ясно, в чем их отличие.

9. Профессор кафедры неорганической и технической химии ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», доктор химических наук, доцент Сидельников А.В. Замечания: 1) какие варианты адаптации предложенных методов оперативного контроля можно предложить к другим электрохимическим системам? Уточните, к каким системам это можно применить; 2) хотелось бы видеть оценку воспроизводимости измеряемых спектральных характеристик электрических шумов и флуктуаций

твердополимерного элемента.

10. Ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела метрологического обеспечения средств и систем измерений расхода и количества жидкости Всероссийского научно-исследовательского института расходомерии (ВНИИР) – филиала ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», доктор технических наук Щелчков А.В., заместитель генерального директора ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, кандидат технических наук Чекирда К.В. Замечания: 1) не рассмотрено возможное влияния степени турбулентности газотранспортных потоков на электрические флуктуационно-шумовые характеристики твердополимерных топливных элементов; 2) не указаны значения точности поддержания температурных и газодинамических режимов работы в процессе исследования релаксационных и флуктуационно-шумовых характеристик.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их известностью своими достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследований и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Оппонент Григорьев Сергей Александрович является ведущим российским специалистом в области разработки водородных электрохимических систем, моделирования и оптимизации твердополимерных топливных элементов.

Оппонент Пиганов Михаил Николаевич является ведущим специалистом в области разработки и оценки надежности радиоэлектронной аппаратуры, методов и приборов для измерения, контроля и диагностики электронных изделий, цифровой обработки сигналов.

Оппонент Славутский Леонид Анатольевич является ведущим специалистом в области интеллектуальной обработки сигналов для решения задач контроля и диагностики, разработки контрольно-измерительной

аппаратуры, автоматизации эксперимента.

Ведущая организация, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, является крупным научным центром, занимающимся научной деятельностью в области современной энергетики и теплотехники, решения проблем создания эффективной, безопасной, надежной и экологически чистой энергетики, в том числе водородной, энергоресурсосбережения и энергоэффективных технологий, химической энергетики, повышения эффективности использования природных топлив и сырья, использования возобновляемых источников энергии. Специалисты лаборатории №13 Водородных энергетических технологий занимаются исследованиями в области контроля, диагностики и управления режимами работы водородных топливных элементов, имеют соответствующие публикации в ведущих российских и зарубежных журналах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработаны:

- научная концепция применения электрических флуктуационно-шумовых и релаксационных процессов в водородных твердополимерных топливных элементах для решения задач их контроля и диагностики;

- малоинвазивные оперативные методы флуктуационно-шумового и релаксационного контроля и диагностики режимов работы и технического состояния твердополимерных топливных элементов;

- флуктуационно-шумовая электрическая модель твердополимерного топливного элемента, связывающая статистические характеристики параметров модели с режимами работы, техническим состоянием и процессами деградации;

- алгоритмы оценки и прогнозирования уровня деградации элементов мембранно-электродного блока по изменениям в процессе эксплуатации параметров электрической модели, идентифицированной на основе шумовых и релаксационных процессов в топливном элементе;

- научно-методические основы построения алгоритмического, аппаратного и программного обеспечения приборов контроля и диагностики твердополимерных топливных элементов, интеллектуализации приборов контроля и диагностики на основе нейросетевых алгоритмов и обучения в процессе эксплуатации;

предложен оригинальный подход к построению приборов малоинвазивного контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов на основе измерения характеристик шумовых, флуктуационных и релаксационных электрических процессов, протекающих в топливном элементе;

доказана перспективность использования предложенных идей о связи между техническим состоянием твердополимерного топливного элемента и статистическими характеристиками флуктуационно-шумовых и релаксационных процессов, а также выявленных соответствующих диагностических закономерностей для обнаружения и прогнозирования критических режимов работы, повышения оперативности в 2-10 раз принятия диагностических решений за счет широкополосности шумовых и релаксационных процессов при минимальном уровне воздействий на объект контроля.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны диагностические свойства флуктуационно-шумовых электрических процессов в топливном элементе и их спектральных характеристик для решения задач контроля, диагностики и прогнозирования критических режимов работы твердополимерного топливного элемента, а также научно обоснована методология построения аппаратно-алгоритмического обеспечения средств контроля и диагностики;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы методы цифровой обработки измерительных сигналов и экспериментальных данных, методы математической статистики, методы

математического моделирования, методы параметрической идентификации, нейросетевые технологии и методы обучения, а также методы исследования флуктуационно-шумовых, релаксационных и импедансных характеристик электрохимических систем;

изложены анализ связей режимов работы топливного элемента со статистическими характеристиками электрических флуктуационно-шумовых сигналов водородных топливных элементов; обоснования использования электрических релаксационных процессов, вызванных изменением нагрузки, для решения задач оперативного контроля и диагностики, а также оптимизация вычислительных процедур при идентификации параметров математических моделей процессов релаксации;

раскрыты в соответствии с теорией существенные изменения статистических характеристик флуктуационно-шумовых сигналов и параметров релаксационных процессов при отклонении режимов работы топливного элемента от номинальных;

изучены противоречия между существующими методами оценки технического состояния и требованиями повышения оперативности принятия диагностических решений для своевременного обнаружения, идентификации и мониторинга развития критических режимов работы твердополимерных топливных элементов, что привело к идее использования диагностических свойств широкополосных флуктуационно-шумовых и релаксационных сигналов и разработке соответствующих методов контроля и диагностики;

проведена модернизация известных электрических моделей водородных твердополимерных топливных элементов посредством учета и количественного представления шумовых процессов и флуктуаций параметров элементов модели в целях разработки научных основ и методов флуктуационно-шумовой и релаксационной диагностики.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены экспериментальные установки с улучшенными

метрологическими свойствами по измерению шумовых, релаксационных и импедансных характеристик; система оценки импеданса по релаксационному отклику на скачкообразное возмущение тока; метод оценки спектра электрических флуктуаций с компенсацией собственных токовых и потенциальных шумов; оригинальное аппаратное, алгоритмическое и программное обеспечение приборов контроля и диагностики твердополимерных топливных элементов; нейросетевые модели для построения интеллектуальных систем контроля и прогнозирования режимов работы в Казанском национальном исследовательском техническом университете им. А.Н. Туполева – КАИ, ООО «Ай Джи Эф-Инжиниринг» (г. Казань), ООО «СТЕМ Инструментс» (г. Москва), ООО «НПП РИСАЛ» (г. Казань), Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (г. Казань), ООО «ИРЗ ТЭК» (г. Ижевск), ФГУП «Федеральный НПЦ «Радиоэлектроника» имени В.И. Шимко (г. Казань), АО «Казанское приборостроительное конструкторское бюро» (г. Казань), ОП «Татнефть-Добыча» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

определены перспективы практического использования предложенных методов оперативного контроля и диагностики твердополимерных топливных элементов и повышения эффективности решения задач мониторинга, контроля и прогнозирования посредством интеллектуализации на основе нейросетевых технологий;

создана система практических рекомендаций по разработке средств получения измерительной информации, обработки данных и принятия решений для обеспечения требуемых метрологических характеристик контроля и диагностики режимов работы топливных элементов;

представлены методические рекомендации по дальнейшему совершенствованию и построению алгоритмов оперативного контроля и диагностики режимов работы топливных элементов путем расширения предложенных подходов на высокоэнергетические установки на основе батарей

топливных элементов при их длительной эксплуатации, а также по повышению уровня интеллектуализации и автоматизации методов контроля и диагностики.

Оценка достоверности результатов исследований выявила:

для экспериментальных работ эксперименты с твердополимерными топливными элементами и высокоэнергетическими установками на основе их батарей проводились на сертифицированных специализированных стендах ведущих научных центров водородной энергетики; продолжительными непрерывными испытаниями показана достоверность и высокая степень воспроизводимости флуктуационно-шумовых и релаксационных характеристик твердополимерных топливных элементов;

теория согласуется с известными положениями фундаментальных наук, с опубликованными результатами теоретических и экспериментальных исследований электрохимических процессов независимых авторов, а также с результатами экспериментальных исследований автора диагностических свойств флуктуационно-шумовых и релаксационных характеристик топливных элементов;

идея флуктуационно-шумового контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов **базируется** на достижениях в области теории и практики исследования электрошумовых процессов в электрохимических и полупроводниковых системах отечественных (В.А. Тягая, Б.М. Графова, С.Ф. Тимашева, Г.П. Жигальского, А.В. Якимова, Р.М. Юльметьева, В.С. Пряникова, Р.Р. Нигматуллина, С.А. Мартемьянова, А.Е. Укше) и зарубежных ученых (G.C. Barker, A. Van der Ziel, L.K.J. Vandamme, M.J. Buckingham, F. Huet);

использованы сравнения авторских данных с данными других исследователей по рассматриваемой тематике, в частности, по импедансным и шумовым характеристикам и моделям электрохимических систем;

установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках, а также результатов моделирования с результатами физических экспериментов;

использованы современные методы получения и цифровой обработки флуктуационно-шумовых и релаксационных сигналов с последующим мониторингом и оценкой режимов работы водородных топливных элементов для задач контроля и диагностики.

Личный вклад соискателя состоит в научно-техническое обосновании и развитии теории и техники систем диагностики водородных твердополимерных топливных элементов, основанные на протекающих в них электрических шумовых, флуктуационных и релаксационных процессах; определении направлений развития научных исследований по указанной тематике; апробации, опубликовании и внедрении результатов исследований, в определяющем участии в получении всех теоретических и экспериментальных результатов, в написании публикаций, отражающих основные результаты диссертации, при непосредственном взаимодействии с членами научного коллектива.

Диссертационный совет рекомендует использование результатов диссертационной работы при разработке, совершенствовании и интеллектуализации методов, алгоритмов и приборов контроля и диагностики водородных топливных элементов, а также высокоэнергетических установок на их основе научно-исследовательскими центрами и специализированными организациями в области исследования и разработок водородных энергетических установок: Объединенным институтом высоких температур РАН (г. Москва), Федеральным исследовательским центром проблем химической физики и медицинской химии РАН (г. Черноголовка), Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт» (г. Москва), ООО «Н2 Чистая Энергетика» (г. Москва), «ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» (г. Москва), ПАО «КАМАЗ» (г. Набережные Челны), Национальным исследовательским университетом «МЭИ» (г. Москва), ПАО «ТАТНЕФТЬ» (г. Альметьевск) и другими родственными организациями.

В ходе защиты диссертации критических замечаний, ставящих под сомнение суть работы, не было. Были высказаны следующие замечания:

1. Следовало бы более подробно осветить вопрос технических требований к генератору возмущающего сигнала при исследовании релаксационных процессов твердополимерного топливного элемента. Какие ограничения накладываются на время нарастания и спада прямоугольного сигнала возмущения? (*ведущая организация*).

2. Требуется более подробного освещения вопроса применения найденных диагностических признаков флуктуационно-шумовых сигналов для конкретных энергетических установок на твердополимерных топливных элементах (*ведущая организация*).

3. Экспериментальные результаты, представленные в работе, получены для топливного элемента с определенными параметрами МЭБ. В частности, на стр. 115 упомянуто, что был использован электрокатализатор с 20% масс. тефлона (PTFE). Было бы интересно увидеть результаты для МЭБ с другими параметрами. Так, снижение содержания PTFE в электрокатализаторах с 20 до 10% определенным образом повлияет на режим увлажнения мембраны. Хотелось бы видеть методику адаптации предложенных подходов к контролю и диагностике для этого случая (*оппонент Григорьев С.А.*).

4. На стр. 90 упоминается о проведении измерений импеданса водород-воздушного ТПТЭ, изготовленного с использованием протонообменной мембраны Nafion 117. Данная мембрана характеризуется относительно высокой толщиной (около 180 мкм) и предназначена, в основном, для применения в электролизерах воды, работающих под давлением, нежели для ТПТЭ (в них используются мембраны значительно меньшей толщины: от нескольких единиц до приблизительно 50 мкм). Чем обусловлен выбор именно мембраны Nafion 117 и важна ли толщина мембраны при проведении данного эксперимента? (*оппонент Григорьев С.А.*).

5. Хотелось бы видеть более подробную методику выбора дополнительной величины сопротивления нагрузки для реализации метода контроля и диагностики, представленного в разделе 3.3.4 диссертации (*оппонент Григорьев С.А.*).

6. На рис. 4.46 представлена связь между частотными диапазонами электрических шумов и флуктуаций и неисправностями, вызывающими изменение их спектрального состава. Хотелось бы видеть более подробный анализ возможности обнаружения двух и более одновременно действующих неисправностей (*оппонент Григорьев С.А.*).

7. В работе отсутствует оценка необходимого объема набора данных для реализации нейросетевых методов контроля и прогнозирования режимов работы топливного элемента. Каким образом, можно повысить точность соответствующих методов? (*оппонент Григорьев С.А.*).

8. В работе следовало бы более подробно рассмотреть особенности влияния нагрузки с реактивными составляющими на спектральные характеристики флуктуационно-шумовых сигналов (*оппонент Пиганов М.Н.*).

9. При рассмотрении метода оценки электрохимического импеданса по результатам оценки релаксационных процессов приводятся результаты для частотного диапазона порядка сотен герц. Можно ли расширить этот диапазон? Какие ограничения накладываются на параметры зондирующего сигнала? (*оппонент Славутский Л.А.*).

10. Из текста автореферата осталось неясным, какие допущения приняты автором при разработке метода флуктуационно-шумовой диагностики твердополимерных топливных элементов (*отзыв на автореферат от Захарова Ю.А.*).

11. Установка состоит из систем, обслуживающих топливный элемент, для подачи газа, поддержания давления, температуры и прочее, а также электрических измерений. Мне кажется, в электрических измерениях уже существуют готовые системы, например, спектроанализаторы с известными параметрами. Так оно или нет? (*член диссертационного совета Гарифьянов Н.Н.*).

12. В положениях на слайде 37 Вы, как достижение, указываете режекцию сетевой частоты, но существующие системы уже это могут делать. В чем особенность Вашего подхода? (*член диссертационного совета*

Гарифьянов Н.Н.

13. В целом Вы решаете специфическую математическую статистическую задачу, когда у Вас есть «черный ящик», в данном случае это топливный элемент, и есть нагрузка, на которой Вы все измеряете. Эта задача могла бы решаться для любого топливного элемента, были упомянуты и литиевые элементы. Казалось бы, Ваши результаты должны быть универсальными. Однако Ваша тематика связана конкретно с твердополимерными топливными элементами. В чем особенность используемых моделей? (*член диссертационного совета Степанов А.Л.*)

Соискатель Денисов Е.С. ответил на замечания следующим образом:

1. В топливных элементах в основном наблюдаются низкочастотные процессы ниже 1 кГц. Поэтому формирование таких сигналов, с точки зрения инерционности и быстродействия, для современной элементной базы электроники не представляет сложности. В случае метода возмущения дополнительной нагрузкой инерционность будет определяться скоростью коммутации. Грубая оценка – если работаем в частотном диапазоне до 1кГц, время нарастания и спада возмущающего сигнала должно составлять менее 1мс.

2. Найденные диагностические признаки могут использоваться для мониторинга текущих режимов работы и обнаружения критических режимов, связанных с неправильным управлением режимами увлажнения мембранно-электродного блока, недостатком топлива или окислителя и другими. Предложенные подходы во многом подходят для реализации встраиваемых систем мониторинга и контроля. В последнее время, например, совместно с ООО «Рисал» была разработана система мониторинга батареи ТПТЭ для автомобиля КАМАЗ.

3. Предложенные методики позволяют обнаруживать процессы избыточного увлажнения, приводящие к образованию конденсата воды и блокировки мембранно-электродного блока. При изменении концентрации PTFE переувлажнение мембранно-электродного блока также будет

наблюдаться, но в других режимах. Вода будет хуже удаляться, что будет диагностироваться предложенными методами. Потребуется изменение пороговых величин для принятия диагностических решений, поскольку вероятность избыточной аккумуляции воды становится выше.

4. Мембранно-электродные блоки, используемые в экспериментах, не изготавливались специально для наших экспериментов. Это были блоки, используемые в Университете Пуатье для собственных исследовательских целей. Получение дополнительных результатов для этого нестандартного применения полимерной мембраны не влияет на общность полученных результатов. Следует отметить, что даже в этом случае предложенные методики могут быть использованы.

5. Дополнительное сопротивление нагрузки выбирается из двух условий: 1. Система должна оставаться в линейном режиме, т.е. возмущение не должно вызывать появление нелинейных эффектов. 2. Амплитуда вызванного релаксационного процесса должна быть относительно большой для его точного измерения. Величины амплитуды релаксационного процесса должны быть не более 10 мВ.

6. При постоянном мониторинге несколько неисправностей, в большинстве случаев, будут наблюдаться последовательно, что может быть зарегистрировано предложенными алгоритмическими средствами. Различение нескольких уже наблюдающихся неисправностей будет зависеть от конкретной их комбинации. Для некоторых таких комбинаций потребуется дополнительная информация. Например, возможно применение импедансной спектроскопии.

7. Для повышения точности нейросетевых алгоритмов требуется дальнейшее увеличение экспериментальных данных. В этом случае перспективным является применение предложенной системы удаленного мониторинга, которая позволяет накапливать статистику большого количества различных топливных элементов.

8. Реактивная нагрузка будет искажать результаты при измерении шумов, импеданса и релаксационных скачков, что можно учесть в модели. Следует

также отметить, что топливные элементы напрямую не нагружаются на реактивную нагрузку. Как правило, к выходу топливных элементов подключаются DC/DC или DC/AC преобразователи, обеспечивающих активную нагрузку.

9. Для флуктуационно-шумовой диагностики частотный диапазон в основном определяется чувствительностью аппаратуры, поскольку с увеличением частоты уменьшается интенсивность наблюдаемых фликкер-шумовых процессов. Следовательно, для расширения частотного диапазона требуются более высокоточные средства измерений. Что касается релаксационной диагностики, здесь частотный диапазон в основном определяется инерционностью процессов внутри топливного элемента.

10. При разработке метода флуктуационно-шумовой диагностики твердополимерных топливных элементов были приняты следующие допущения: 1) линейность исследуемой системы в окрестности рабочей точки; 2) стационарность флуктуационно-шумового процесса.

11. Для каких-то задач они существуют. Но, например, при измерении импеданса нужно возмущать такую мощную систему, как топливный элемент, вырабатывающий десятки ампер. Для синусоидального или другого воздействия требуется большая мощность. В работе были предложены оригинальные решения, позволяющие при создании возмущения использовать энергию самого топливного элемента.

12. Предложенный подход является элементом, встроенным в разработанный метод диагностики и контроля. Это являлось необходимым условием при реализации измерений.

13. Литиевые источники в рамках данной работы использовались только как модельные системы для отладки некоторых предложенных подходов. Существует порядка семи различных видов топливных элементов. Есть высокотемпературные, например, расплавные карбонатные топливные элементы, топливные элементы на основе высокотемпературных керамических материалов. Они различаются между собой принципами работы, возможными

неисправностями. Мы исследовали и анализировали режимы работы именно низкотемпературного твердополимерного топливного элемента ввиду его широкого применения.

На заседании 10 октября 2025 года диссертационный совет за решение научной проблемы, имеющей важное значение для развития методов и приборов контроля и диагностики водородных топливных элементов и источников энергии на их основе, принял решение присудить Денисову Евгению Сергеевичу ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящего в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 14, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета



Ившин Игорь Владимирович

Ученый секретарь

диссертационного совета



Калимуллин Рустем Ирекович

10 октября 2025 г.



Ившина И. В. Калимуллин Р. И.
Хайбрахманова А. А.