

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной

и инновационной деятельности

КНИТУ-КАИ

д-р техн. наук, доцент

В.М. Бабушкин

2025 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Диссертация «Флуктуационно-шумовые и релаксационные электрические методы и приборы интеллектуального контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов» выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на кафедре радиоэлектроники и информационно-измерительной техники.

В период работы над диссертацией и по настоящее время соискатель Денисов Евгений Сергеевич работает в КНИТУ-КАИ на кафедре радиоэлектроники и информационно-измерительной техники в должности доцента.

В 2006 году Денисов Е.С. окончил Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева Минобрнауки РФ с присвоением квалификации магистр техники и технологии по направлению «Радиотехника». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Флуктуационно-шумовая диагностика и контроль водородного топливного элемента с протонообменной мембраной» защитил в 2012 году в совете Д 212.079.09, созданном на базе КНИТУ-КАИ.

Научный консультант – Евдокимов Юрий Кириллович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники и информационно-измерительной техники КНИТУ-КАИ.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность выполненной работы

Одними из наиболее перспективных электрохимических источников тока (ЭХИТ) для стационарных, портативных и транспортных приложений в настоящее время являются твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ) с протонообменной мембраной. Перспективность таких элементов обусловлена уникальной совокупностью характеристик: внешний накопитель водорода, низкие рабочие температуры 60-90°C, высокие КПД и плотность мощности, быстрый запуск и малые массогабаритные характеристики. ТПТЭ имеют ряд ограничений к широкому внедрению: высокая стоимость и деградация катализаторов, сложное управление режимами увлажнения, недостаточные надежность и долговечность. Несмотря на достижения в совершенствовании конструкции и оптимизации физико-химических процессов ТПТЭ, полностью преодолеть указанные недостатки в настоящее время не удалось. Повышение надежности и срока безотказной работы таких элементов требует разработки и применения новых малоинвазивных и оперативных средств контроля и диагностики. Диагностика ЭХИТ традиционно реализуется на базе классических методов электрохимического анализа: вольтамперометрических, импедансных, импульсных и других. Применимость этих методов может быть ограничена вследствие недостаточной информативности, необходимости вывода объекта из рабочего режима, или дороговизны и сложности аппаратного и программного обеспечения.

Перспективным направлением для решения таких задач является использование информационных свойств электрических шумов и флуктуаций, наблюдающихся в процессе работы объекта. Такой подход хорошо известен при исследовании дефектов и отбраковки компонентов в электронике и электротехнике. Высокая эффективность шумовых методов исследования электрохимических систем была установлена и подтверждена в работах В.А. Тягая, G.C. Barker, F. Huet, Б.М. Графова, Р.Р. Нигматуллина, А.Е. Укше, С.А. Мартемьянова, и других авторов. Работы этих ученых заложили теоретические и экспериментальные основы применения электрохимических флуктуаций для исследования процессов коррозии, электроосаждения и газовой выделения.

Исследования электрических шумов ТПТЭ освещены в современной научной литературе гораздо слабее из-за сложности экспериментальных исследований, построения моделей и обработки данных вследствие малого уровня сигналов, продолжительности измерительных процедур, большого количества воздействующих факторов и разнообразия режимов работы. Большинство из соответствующих работ применительно к ТПТЭ выполнены в последние два десятилетия. Несмотря на все возрастающий интерес к этой области и успехов понимания природы электрических флуктуаций и влияния на них режимов работы, систематических исследований электрошумовых методов недостаточно для разработки и организации комплексных систем контроля и диагностики ТПТЭ. В научно-технических источниках информации отсутствуют данные по измерениям, анализу электрических флуктуаций батарей ТПТЭ и их диагностической ценности.

Большое количество параметров, определяющих функционирование ТПТЭ и разнообразие режимов работы, приводят к накоплению больших объемов экспериментальных данных, извлечение диагностических признаков из которых является сложной задачей. Решение этой проблемы может быть найдено путем повышения уровня интеллектуализации приборов и систем диагностики и контроля путем внедрения методов машинного обучения.

Таким образом, проведение систематических исследований электрических флуктуаций, шумов и релаксационных процессов ТПТЭ, а также их применение для создания и разработки перспективных методов оперативного контроля и диагностики является актуальной научно-технической проблемой. Приложение этих методов позволит решить важную задачу повышения надежности функционирования и стабильности режимов работы источников электрической энергии на основе ТПТЭ.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Предложен новый класс малоинвазивных оперативных методов флуктуационно-шумового и релаксационного контроля твердополимерных топливных элементов и создана научно-методологическая основа их применения для оценки режимов работы и технического состояния узлов ТПТЭ, позволяющие в 2-10 раз повысить оперативность принятия диагностических решений за счет использования широкополосных измерительных сигналов при минимальном воздействии на объект измерения, существенно упрощающем аппаратную реализацию предложенных методов по сравнению с конкурентами;

2. Найдены диагностические свойства и статистические характеристики электрических шумов и флуктуаций, позволяющие реализовывать малоинвазивные методы контроля избыточного и недостаточного увлажнения мембранно-электродных блоков, неравномерности распределения плотности тока, избыточные диффузионные потери и снижение эффективности работы катализатора, а также технического состояния основных узлов ТПТЭ и их батарей;

3. Предложена и разработана диагностическая флуктуационно-шумовая модель ТПТЭ, связывающая статистические характеристики измеряемых стохастических сигналов с режимами работы, техническим состоянием и процессами деградации;

4. Предложены методики и алгоритмы оценки деградации состояния, прогнозирования остаточного ресурса и планирования технического обслуживания ТПТЭ, позволяющие оценивать и уточнять динамику деградации отдельных компонент мембранно-электродного блока и его эффективной площади по мере накопления данных о текущих режимах эксплуатации;

5. Предложены научные и методические основы построения алгоритмического, аппаратного и программного обеспечения интеллектуальных систем контроля и диагностики ТПТЭ по флуктуационным, шумовым и релаксационным процессам, позволившие разработать нейросетевые модели, обеспечивающие оценку диагностических параметров с погрешностью менее 2% и прогнозирование режимов работы ТПТЭ с упреждением до 10 секунд при надежности прогноза свыше 93%.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Предложены и разработаны экспериментальные установки с улучшенными метрологическими характеристиками, позволяющие измерять и исследовать шумовые, флуктуационные и релаксационные процессы для выявления диагностических признаков ТПТЭ;

2. Разработана система оценки частотных характеристик импеданса по релаксационному отклику на скачкообразное возмущение электрического тока с погрешностью амплитудно-частотных характеристик менее 1,6% и уменьшенной в 4-10 раз продолжительностью измерения.

3. Предложена и разработана система оценки спектральной плотности мощности электрических флуктуаций с компенсацией собственных токовых и потенциальных шумов входных измерительных каскадов и режекцией электромагнитных сетевых помех, позволяющая увеличить более чем на

порядок информативную составляющую частотный диапазон флуктуационно-шумового сигнала;

4. Предложено и разработано оригинальное аппаратное, алгоритмическое и программное обеспечение приборов контроля и диагностики ТПТЭ и их батарей по электрическим флуктуационно-шумовым или релаксационным характеристикам;

5. Нейросетевые модели для построения интеллектуальных систем контроля и прогнозирования режимов работы ТПТЭ по флуктуационным, шумовым и релаксационным процессам.

Основные результаты работы были использованы при выполнении гранта молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан (Соглашение с Академией наук Республики Татарстан 139/2024-ПД от 16.12.2024), Государственного задания Минобрнауки РФ № 8.2568.2011 «Разработка теоретического и алгоритмического обеспечения интегрированного комплекса моделирования специализированных программно-определяемых радиоэлектронных инфокоммуникационных систем» (2011-2013 гг.), Государственного задания Минобрнауки РФ по Соглашению № 075-03-2020-051/6 от 06.11.2020 (номер темы fzsu-2020-0020), Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение № 075-15-2021-1140), 2021-2022, грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) №16-38-00464 мол_а «Технический контроль электрохимических источников энергии и прогнозирование их критических режимов работы» (2016-2017 гг.), НИР в рамках международного российско-французского гранта РФФИ-CNRS № 07-08-92167 ИЦНИ_а и проекта PICS (INTERNATIONAL PROJECTS OF SCIENTIFIC COOPERATION 2007) «Изучение нестационарных и флуктуационных явлений в топливных элементах с протонообменной мембраной», проекта PROPICE (Prognostics et Health Management de Systemes Piles a Combustible de Type PEMFC, ANR-12-PRGE-0001), поддержанного French National Research Agency (2013-2016). Результаты диссертационной работы внедрены в научно-исследовательскую деятельность и образовательный процесс КНИТУ-КАИ, а также на предприятиях 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 НПП «Радиоэлектроника» имени В.И. Шимко (г. Казань), АО «Казанское приборостроительное конструкторское бюро» (г. Казань), ОП «ТАТНЕФТЬ-ДОБЫЧА» ПАО «ТАТНЕФТЬ» им. В.Д. Шашина.

Ценность научных работ соискателя

Предложена концепция построения нового класса методов и систем неразрушающего контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов на использовании электрических шумов и флуктуаций. Разработаны и обоснованы научные и методические основы построения методов малоинвазивного и оперативного контроля, диагностики и прогнозирования режимов работы ТПТЭ, основанных на электрических шумах, флуктуациях и релаксационных процессах. Теоретически и экспериментально подтверждены диагностических свойств статистических спектральных и корреляционных характеристик электрических шумов и флуктуаций ТПТЭ. Разработаны и обоснованы системные нелинейная и линейная модели и электрическая флуктуационно-шумовая модель ТПТЭ для идентификации диагностической информации флуктуационно-шумовых, релаксационных и импедансных характеристик в решении задач контроля и диагностики режимов работы ТПТЭ. Разработаны и апробированы малоинвазивные экспериментальные методы и стенды для исследования диагностических свойств электрических шумов, флуктуаций и релаксационных процессов ТПТЭ, в том числе способы повышения точности оценки параметров и оперативности принятия диагностических решений. Исследованы долговременных временных трендов режимов работы ТПТЭ и диагностические признаки для оценки и прогнозирования рабочих режимов и технического состояния. Разработаны и обоснованы методы малоинвазивного оперативного контроля и диагностики режимов работы ТПТЭ и их приборная реализация. Созданы научно-методические основы построения интеллектуальных систем контроля, диагностики и прогнозирования режимов работы ТПТЭ.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По материалам диссертации опубликованы 101 печатная работа, в том числе 17 статей в журналах из перечня рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.2.8; 8 статей в журналах, входящих в международные наукометрические базы Scopus/WoS, приравняемые к категориям K1/K2 журналов, рекомендованным ВАК РФ, 13 статей в других изданиях наукометрических баз Scopus и WoS, 1

статья ВАК по смежной специальности, 4 раздела в коллективных монографиях, 6 патентов РФ на изобретение, 15 свидетельств на программы для ЭВМ и 40 публикаций в трудах и сборниках конференций. Автор имеет более 12 единоличных публикаций, в том числе 3 статьи в журналах ВАК по специальности 2.2.8, 1 статью в журнале Scopus/WoS, 1 свидетельство на программу для ЭВМ, 7 работ в материалах всероссийских и международных конференций.

Список публикаций, отражающих основное содержание диссертации.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.2.8.

1. Денисов, Е.С. Оценка возможности реализации распределенных систем диагностики водородных топливных элементов с использованием локальных и глобальных телекоммуникационных сетей / Е.С. Денисов, Р.Р. Енилиев, Н.Р. Гайсин и др. // Интеллектуальные системы в производстве. – 2024. – Т. 22, № 1. – С. 4-10. (К2, Вклад соискателя – 30%).

2. Денисов, Е.С. Оценка влияния собственных шумов измерительной аппаратуры при измерении импеданса водородных топливных элементов на основе широкополосных зондирующих сигналов / Е.С. Денисов, Г.В. Никишина, К.В. Коньков // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – №2(54). – С. 33-39. (К2, Вклад соискателя – 40%)

3. Особенности реализации метода контроля технического состояния литиевых источников тока на основе анализа релаксационных процессов, вызванных изменением нагрузки / Е. С. Денисов, Г. В. Никишина, Р. Р. Енилиев и др. // Контроль. Диагностика. – 2023. – Т. 26, № 7(301). – С. 36-43. (К1, Вклад соискателя – 40%)

4. Денисов, Е. С. Нейросетевая система релаксационной диагностики водородных топливных элементов / Е. С. Денисов, Н. Р. Гайсин, А. Р. Хаирова // Южно-Сибирский научный вестник. – 2023. – № 1(47). – С. 16-22. (К2, Вклад соискателя – 50%)

5. Денисов Е.С. Повышение точности оценки параметров электрического шума для систем диагностики водородных топливных элементов / Е.С. Денисов // Вестник Казанского гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. – 2022. – Т. 78. – № 1. – С. 86-91. (К2, Вклад соискателя – 100%)

6. Денисов Е.С. Система измерения электрохимического импеданса водородных топливных элементов на основе широкополосных зондирующих сигналов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2022. – Т. 78. – № 1. – С. 92-98. (К2, Вклад соискателя – 100%)

7. Денисов Е.С. Идентификация параметров электрической модели электрохимических источников тока на основе анализа переходных процессов, вызванных изменениями нагрузки / Г.В. Никишина, Т.П. Никишин, Е.С. Денисов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2022. – Т. 78, № 3. – С. 121-128. (К2, Вклад соискателя – 40%)

8. Денисов Е.С. Схемотехническая реализация квазираспределенного РС датчика с древовидной структурой и особенности его применения / Е.С. Денисов, Ю.К. Евдокимов, И.Д. Шафигуллин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2022. – № 8. – С. 6-14. (К1, Вклад соискателя – 40%)

9. Денисов Е.С. Диагностика электрохимических источников тока на основе анализа переходных процессов, вызванных изменениями нагрузки / Г.В. Никишина, Е.С. Денисов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2021. – Т. 77. – № 2. – С. 74-81. (К2, Вклад соискателя – 50%)

10. Денисов Е.С. Контроль и прогнозирование критических режимов работы водородных топливных элементов в процессе эксплуатации на основе искусственных нейронных сетей / Е.С. Денисов, Н.Р. Гайсин, Т.П. Никишин и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 12. – С. 11-16. (К1, Вклад соискателя – 30%)

11. Денисов Е.С. Квазираспределённый резистивный датчик с древовидной структурой / Е.С. Денисов, И.Д. Шафигуллин, Ю.К. Евдокимов // Автометрия. – 2021. – Т. 57. – № 2. – С. 117-121. (Scopus, Q3, К1, Вклад соискателя – 40%)

12. Денисов Е.С. Релаксационные процессы батарей твердополимерных водородных топливных элементов и оценка их диагностических свойств / Т.П. Никишин, Е.С. Денисов, Н.А. Адьютантов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2020. – № 7. – С. 1-12. (К1, Вклад соискателя – 40%)

13. Денисов Е.С. Исследование диагностических возможностей вейвлет-преобразования для анализа электрических флуктуаций водородного топливного элемента / О.В. Шиндор, Е.С. Денисов, Ю.К. Евдокимов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2013. – № 4. – С. 120-124. (К2, Вклад соискателя – 30%)

14. Денисов Е.С. Построение систем контроля и диагностики водородного топливного элемента на основе наблюдения его электрических флуктуаций и шумов // Е.С. Денисов, Ю.К. Евдокимов // Вестник Казанского государственного

технического университета им. А.Н. Туполева. – 2011. – № 1. – С. 47-54. (К2, Вклад соискателя – 50%)

15. Денисов Е.С. Прогнозирование режимов работы водородного топливного элемента на основе вейвлет-анализа / О.В. Шиндор, Е.С. Денисов, Ю.К. Евдокимов // Нелинейный мир. – 2011. – Т. 9. – № 12. – С. 813-817. (К2, Вклад соискателя – 30%)

16. Денисов Е.С. Электрический шум водородного топливного элемента и исследование его диагностических свойств / Ю.К. Евдокимов, С.А. Мартемьянов, Е.С. Денисов // Нелинейный мир. – 2009. – Т. 7. – № 9. – С. 706-712. (К2, Вклад соискателя – 40%)

17. Денисов Е.С. Нелинейная и линейная электрические модели водородного топливного элемента и идентификация его параметров / Е.С. Денисов // Нелинейный мир. – 2008. – Т. 6. – № 8. – С. 81-85. (К2, Вклад соискателя – 100%)

Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в Scopus/WoS

18. Denisov E.S. Small-Signal Electrical Model of PEM Fuel Cell / E.S. Denisov // Theoretical Foundation of Chemical Engineering. – 2024. – V. 49. – №. 3. – P. 152-158 – P. 1-6. (Вклад соискателя – 100%).

19. Denisov E.S. One-dimensional continuously distributed sensors for thermophysical fields: method of measurement, model, and numerical algorithm / Yu.K. Evdokimov, E.S. Denisov, L.Y. Fadeeva // Measurement. – 2021. – V. 186. – P. 110082 (Вклад соискателя – 30%).

20. Electrochemical noise analysis of a PEM fuel cell stack under long-time operation: noise signature in the frequency domain / S. Martemianov, A. Thomas, E. Denisov, et al. // Journal of Solid State Electrochemistry. – 2020. – V. 24. – №. 11. – P. 3059-3071 (Вклад соискателя – 20%).

21. Lithium battery transient response as a diagnostic tool / E. Denisov, R. Nigmatullin, Y. Evdokimov, et al. // Journal of Electronic Materials. – 2018. – V. 47. – № 8. – P. 4493-4501 (Вклад соискателя – 30%).

22. Electrochemical noise as a diagnostic tool for PEMFC / E.S. Denisov, Y.K. Evdokimov, S. Martemianov, et al. // Fuel Cells. – 2017. – Т. 17. – №. 2. – С. 225-237 (Вклад соискателя – 30%).

23. Spectral method for PEMFC operation mode monitoring based on electrical fluctuation analysis / E. Denisov, Yu.K. Evdokimov, R.R. Nigmatullin, et al. // Scientia Iranica. – 2017. – Т. 24. – №. 3. – С. 1437-1447 (Вклад соискателя – 30%).

24. New approach for PEMFC diagnostics based on quantitative description of quasi-periodic oscillations / R.R. Nigmatullin, S. Martemianov, E. Denisov, et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – V. 41. – №. 29. – P. 12582-12590 (Вклад соискателя – 30%).

25. Generation of Statistical Descriptors for Running PEM Fuel Cell Stack by Means of Long-Time Electrochemical Noise Measurements / A. Thomas, N. Adiutantov, E. Denisov, et al. // Nanobiotechnology Reports. – 2021. – V. 16. – №. 2. – P. 222-230 (Вклад соискателя – 25%).

26. Denisov E. Automated System for Lithium-Ion Batteries Study Based on Relaxation Processes Analysis // R. Eniliev, E. Denisov, G. Nikishina // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – IEEE, 2022. – P. 153-156 (Вклад соискателя – 40%).

27. Denisov E.S. Automated System for Physical Fields Measurements Based on a Quasi-distributed Resistive Sensor / I.D. Shafigullin, E.S. Denisov, Yu.K. Evdokimov // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – IEEE, 2021. – P. 365-369 (Вклад соискателя – 40%).

28. Denisov E. Electrochemical power sources relaxations related with step-like load variation / E. Denisov, G. Nikishina, A. Demidov // Proc. of the Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology. – 2020. – P. 230-233 (Вклад соискателя – 40%).

29. Denisov E. Automated excitation signal generation system for time-domain impedance spectroscopy / E. Denisov, G. Nikishina, A. Demidov // Proc. of the Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology. – 2019. – P. 328-331 (Вклад соискателя – 40%).

30. Denisov E.S. Study of lithium battery fluctuations in the open-circuit conditions / G.V. Timergalina, E.S. Denisov // Proc. of the International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – 2018. – P. 153-155 (Вклад соискателя – 50%).

31. Denisov E.S. Relaxation processes in fuel cells / T.P. Nikishin, E.S. Denisov // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – IEEE, 2018. – С. 83-88 (Вклад соискателя – 50%).

32. Electrochemical Sensors for Vanadium Determination / E.V. Gogol, E.S. Denisov, I.V. Lunev, et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – V. 225. – №. 1. – P. 012251 (Вклад соискателя – 30%).

33. Application of new signal processing methods for electrochemical power source relaxation modes detection / G. Timergalina, T. Nikishin, E.S. Denisov, et al. //

Proc. of the Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2017. – 7997561 (Вклад соискателя – 40%).

34. Denisov E.S. Fluctuation-noise model for PEM fuel cell / E.S. Denisov, A.Sh. Salakhova, N.A. Adiutantov, Yu.K. Evdokimov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – V. 225. – №. 1. – P. 012110 (Вклад соискателя – 35%).

35. Application of new statistical methods for triangular sensor signal analysis / G.V. Timergalina, T.P. Nikishin, E.S. Denisov, et al. // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – IEEE, 2016. – Т. 2. – С. 1-6 (Вклад соискателя – 40%).

36. Quasi-distributed resistive sensor for steady-state field measurements / E. Denisov, N. Adiutantov, Yu. K. Evdokimov, et al. // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2016. – С. 1-5. (Вклад соискателя – 40%).

37. Vanadium redox flow batteries diagnostics adapted for telecommunication application / E. Denisov, A. Salakhova, A. Poudyal, et al. // 2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – IEEE, 2014. – С. 165-168. (Вклад соискателя – 30%).

38. Denisov E.S. Fluctuation-noise diagnostics of optical system power supply units based on fuel cell / Y.K. Evdokimov, E.S. Denisov // Optical Technologies for Telecommunications 2012. – SPIE, 2013. – V. 8787. – P. 91-101. (Вклад соискателя – 50%).

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК по смежным специальностям:

39. Денисов Е.С. Оценка диагностических свойств электрического шума водородного топливного элемента / Е.С. Денисов, А.Ш. Салахова, Н.А. Адъютантов и др. // Нелинейный мир. – 2017. – Т. 15. – № 1. – С. 71-77. (Вклад соискателя – 35%).

Патенты и свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ:

40. Патент РФ №2791425 Квазираспределенный термоанемометрический датчик для измерения распределения скорости потока газа: опубл. 07.03.2023 / Е.С. Денисов, И.Д. Шафигуллин, Ю.К. Евдокимов. – 14 с. (Вклад соискателя – 35%).

41. Патент РФ №2787301 Способ определения нестационарного теплового потока: опубл. 09.01.2023 / Ю.К. Евдокимов, Л.Ю. Фадеева, И.Д. Шафигуллин, Е.С. Денисов. – 16 с. (Вклад соискателя – 20%).

42. Патент РФ №2787300 Способ определения нестационарного теплового

потока: опубл. 09.01.2023 / Ю.К. Евдокимов, Л.Ю. Фадеева, И.Д. Шафигуллин, Е.С. Денисов. – 11 с. (Вклад соискателя – 20%).

43. Патент РФ №2766991 Квазираспределенный резистивный датчик и способ измерения распределенных параметров физических величин на его основе: опубл. 16.03.2022 / Денисов Е.С., Шафигуллин И.Д., Евдокимов Ю.К. – 15 с. (Вклад соискателя – 40%).

44. Патент РФ №2753085 Способ оценки технического состояния электрохимического источника тока и устройство, его реализующее: опубл. 11.08.2021 / Денисов Е.С., Никишина Г.В. – 19 с. (Вклад соискателя – 50%).

45. Патент РФ №2739719 Способ определения концентрации газа Евдокимов Ю.К., Фадеева Л.Ю., Денисов Е.С. // 28.12.2020. Заявка № 2020126167 от 03.08.2020. (Вклад соискателя – 30%).

47. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2023613458 (15.02.2023) Программа для автоматизированных измерений электрического импеданса // Е.С. Денисов, И.Д. Шафигуллин. – №2023612455, Заявл. 13.02.2023. (Вклад соискателя – 50%).

48. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2022663898 (21.07.2022) Программное обеспечение для обучения нейросетевого алгоритма идентификации параметров эквивалентной электрической схемы // Е.С. Денисов, А.Р. Хаирова, Н.Р. Гайсин. – №2022662479, Заявл. 06.07.2022. (Вклад соискателя – 40%).

49. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2022662485 (04.07.2022) Программа для автоматизированных измерений электрических сопротивления и емкости чувствительных элементов в квазираспределенном RC-датчике с древовидной структурой / Е.С. Денисов, И.Д. Шафигуллин. – №2022662097, Заявл. 30.06.2022. (Вклад соискателя – 50%)

50. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2022619667 (24.05.2022) Программный модуль для дробного дифференцирования сигналов электрохимического датчика, записанного в Excel-файлах / Е.С. Денисов, Ю.С. Хованская. – №2022619084, Заявл. 14.05.2022. (Вклад соискателя – 70%).

51. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2021660199 (23.06.2021) Программный модуль для оценки параметров модели переходного процесса электрохимического источника тока при неизвестном моменте скачкообразного изменения сигнала / Е.С. Денисов. – №2021618892, Заявл. 10.06.2021. (Вклад соискателя – 100%).

52. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2021667473 (29.10.2021) Программа для регистрации релаксационных процессов литиевых аккумуляторов, вызванных изменением сопротивления нагрузки, с защитой от избыточного разряда / Е.С.

Денисов, Г.В. Никишина, Р.Р. Енилиев. – №2021666729, Заявл. 25.10.2021. (Вклад соискателя – 40%).

53. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2021667719 (02.11.2021) Программа для формирования набора данных для обучения нейросетевых алгоритмов диагностики электрохимических источников тока по переходным характеристикам / Е.С. Денисов, Г.В. Никишина, А.Р. Хаирова и др. – №2021666702, Заявл. 25.10.2021. (Вклад соискателя – 30%).

54. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2021614455 (24.03.2021) Программное обеспечение автоматизированной системы измерения на основе квазираспределенного резистивного датчика с древовидной структурой / И.Д. Шафигуллин, Е.С. Денисов. – №2021612968, Заявл. 11.03.2021. (Вклад соискателя – 50%).

55. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2020610350 (13.01.2020) Программное обеспечение модуля формирования зондирующего сигнала для систем диагностики электрохимических источников тока по переходным характеристикам / А.М. Демидов, Е.С. Денисов, Г.В. Никишина. – №2019665628, Заявл. 02.12.2019. (Вклад соискателя – 40%).

56. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2020664715 (18.11.2020) Программа для измерения параметров модели второго порядка переходной характеристики электрохимических аккумуляторов / Е.С. Денисов, Г.В. Никишина. – №2020619251, Заявл. 10.08.2020. (Вклад соискателя – 50%).

57. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2020662997 (21.10.2020) Программа оценки частотных характеристик импеданса электрохимической системы по переходным характеристикам / Е.С. Денисов, Г.В. Никишина. – №2020619142, Заявл. 10.08.2020. (Вклад соискателя – 50%).

58. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2020619992 (26.08.2020). Программа для исследования трендов параметров модели водородных топливных элементов // Т.П. Никишин, Е.С. Денисов. – № 2020619165, Заявл. 10.08.2020. (Вклад соискателя – 50%).

59. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2019666322 (09.12.2019). Программа для определения величин сопротивлений в квази-распределенном датчике на основе матрицы резистивных элементов / И.Д. Шафигуллин, Е.С. Денисов, Г.В. Никишина и др. – № 2019665572, Заявл. 02.12.2019. (Вклад соискателя – 30%).

60. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2011617357 (21.09.2011). Программное обеспечение автоматизированной системы флуктуационно-шумовой диагностики

топливного элемента. / Е.С. Денисов, Ю.К. Евдокимов. – №2011617357, Заявл. 21.07.2011. (Вклад соискателя – 50%).

61. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ №2011617356 (21.09.2011). Программа оценки оптимальной величины порога для целей флуктуационно-шумовой диагностики водородного топливного элемента. / Е.С. Денисов, Ю.К. Евдокимов. – №2011617356, Заявл. 21.07.2011. (Вклад соискателя – 50%).

Монографии:

62. Денисов Е.С. Фрактальная обработка сигналов. Распределенные измерительные среды и системы / Ю.К. Евдокимов, Р.Р. Нигматуллин, Е.С. Денисов. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2024. – 448 с. (Вклад соискателя – 100%).

63. New methods of complex systems inspection: Comparison of the ADC device in different operating modes / R.R. Nigmatullin, Yu.K. Evdokimov, E.S. Denisov, W. Zhang // Computational problems in science and engineering. – Springer, Cham, 2015. – P. 187-204. (Вклад соискателя – 30%).

64. Фрактальный анализ флуктуаций и статистической динамики для количественной оценки сложных систем / Ю.К. Евдокимов, Е.С. Денисов, Д.В. Шахтурин // Динамические явления в сложных системах. – Казань: Изд-во МОН РТ, 2011. – С. 103-126. (Вклад соискателя – 35%).

65. Денисов Е.С. Методы фрактальной геометрии и фрактальных процессов в задачах анализа и диагностики сложных систем / Ю.К. Евдокимов, Е.С. Денисов, Д.В. Шахтурин // Фракталы и дробные операторы: коллективная монография. – М.: Фэн, 2010. – Гл. 3. – С. 191-251. (Вклад соискателя – 30%).

Статьи [3, 18, 35] описывают разработанные модели, позволяющие описывать диагностические связи физико-химические процессы и техническое состояния компонентов ТПТЭ с электрическими флуктуационно-шумовыми, релаксационными и импедансными характеристиками. В работах [14-17, 20, 22-25, 31, 35, 39, 41, 60-65] Денисовым Евгением Сергеевичем проведено исследование информационных свойств электрических флуктуаций и шумов топливных элементов и их применение для решения задач оперативного контроля и диагностики. Работы [4, 7, 8, 10, 13, 21, 26, 29, 32, 34, 38, 42, 47, 49, 50, 53-55, 58-60] описывают научно-методологические основы разработки релаксационных и импедансных методов контроля и диагностики электрохимических источников энергии. Подходы и аппаратно-программные средства повышения метрологических характеристик средств измерения флуктуационно-шумовых и релаксационных характеристик изложены в [2, 6,

28, 30, 40, 62]. Оригинальные методы и устройства для измерения параметров режимов работы ТПТЭ описаны в работах [9, 12, 19, 27, 33, 36-37, 43-46, 48, 52, 57, 62]. В публикациях [1, 5, 11, 48, 53] описываются принципы интеллектуализации методов контроля, диагностики и прогнозирования режимом работы и технического состояния водородных топливных элементов.

В диссертационной работе не выявлено использования материалов или отдельных результатов без ссылок на автора или источник заимствования, включая работы, выполненных соискателем лично и/или в соавторстве.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих российских и международных семинарах и конференциях: Научный семинар (НС) «Физико-химические методы мониторинга окружающей среды» (Казань, 2023 г.), Республиканский НС «Методы моделирования» (Казань, 2023 г.), Всероссийская научно-техническая конференция (НТК) «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2018, 2020, 2022 гг.), International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (Бхилаи, Индия, 2023 г.), Совещание «Фундаментальные проблемы ионики твердого тела» (Черноголовка, 2021 г.), Международный форум «Kazan Digital Week» (Казань, 2020, 2021 гг.), Молодежная международная НТК (МНТК) «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы» (Казань, 2015, 2021 гг.), Всероссийская НТК «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (Чебоксары, 2009, 2010, 2019, 2021, 2023 гг.), Международная научно-практическая конференция (НПК) «Перспективы развития энергетических систем: декарбонизация экономики, водородная энергетика» (Казань, 2021 г.); International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (Уфа, 2021 г.), Молодежная МНК «Туполевские чтения» (Казань, 2013, 2015, 2021 гг.), European conference on renewable energy systems (Анталия, 2015 г., Сараево, 2017 г., Стамбул, 2018, 2021 гг., Мадрид, 2019 г.), Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (Екатеринбург, 2019, 2020 гг.), ВНК «Наука, технологии, инновации» (Новосибирск, 2020 г.), МНТК «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» (Чебоксары, 2019), МНТК «Научный форум телекоммуникации: теория и технологии, ТТТ» (Казань, 2008, 2012, 2014, 2017, 2019, 2023 гг.), International Conference on Actual Problems of Electron Devices

Engineering (Саратов, 2016, 2018, 2022 г.), МНК «Нигматуллинские чтения» (Казань, 2018, 2023 гг.), МНТК Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (Казань, 2017 г.), International Conference on Materials, Alloys and Experimental Mechanics (Казань, 2013, 2014, 2017 г.), International Siberian Conference on Control and Communications (Москва, 2016 г.), МНТК «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики» (Казань, 2015 г.), International Conference on Fundamentals & Development of Fuel Cells (Toulouse, France, 2015 г.), 225 th Electrochemical Society Meeting (Orlando, USA, 2014), International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (Санкт-Петербург, 2014 г.), Hydrogène, Systèmes et Piles à Combustible (Poitiers, France, 2014 г.).

Специальность, которой соответствует диссертация.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» по следующим пунктам:

п. 1. «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды» (разработаны научно-технические основы применения флуктуационно-шумовых и релаксационных характеристик для оперативного контроля и диагностики технического состояния и критических режимов работы твердополимерных топливных элементов);

п. 3. «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды» (разработаны методы контроля и диагностики твердополимерных топливных элементов на основе анализа флуктуационно-шумовых и релаксационных характеристик и типовые структуры соответствующих приборов и систем);

п. 6 «Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии» (разработаны нелинейная и линейная системные, линейная электрическая и флуктуационно-шумовая модели твердополимерного топливного элемента, алгоритмическое и программное

обеспечение приборов и систем контроля и диагностики на основе анализа флуктуационно-шумовых и релаксационных характеристик);

п. 7. «Автоматизация технологий, приборов контроля и средств диагностирования, способствующая снижению трудоёмкости, увеличению оперативности и достоверности оценки эксплуатационного ресурса изделий, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды» (разработаны типовые структуры локальных и распределённых автоматизированных систем интеллектуального оперативного контроля и диагностики твердополимерных топливных элементов).

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение – создание оперативных неразрушающих методов контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов.

Личное участие в получении результатов, изложенных в диссертации заключается в научно-техническом обосновании и развитии теории и техники систем диагностики водородных ТПТЭ на основе электрических шумовых, флуктуационных и релаксационных процессов; определении направлений развития научных исследований по указанной тематике и в смежных отраслях; в апробации, опубликовании и внедрении результатов исследований. Все теоретические и экспериментальные результаты получены автором лично или при его определяющем участии. Работы, отражающие основные результаты диссертации, написаны автором лично или при его непосредственном взаимодействии с членами научного коллектива.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Методология работы базируется на известных математических, физических и электрохимических моделях, экспериментальных результатах и методах измерений слабых сигналов, цифровой обработки сигналов. Полученные в работе данные, а также выявленные закономерности не противоречат фундаментальным принципам и данным, известным из научно-технической литературы. В работе использовались методы математической статистики, методы математического моделирования, методы параметрической идентификации, а также методы исследования электрохимических систем.

Электрические шумовые, флуктуационные и релаксационные процессы

регистрировались путем измерения наэкспериментальных установках на основе разработанных и сертифицированных измерительных средств. Для обработки данных и моделирования использовались лицензионные программные пакеты MATLAB, Anaconda Spyder, Jupyter Notebook, NI Multisim, NI LabVIEW.

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов подтверждается независимой экспертизой, проведенной при рецензировании опубликованных статей и регистрации объектов интеллектуальной собственности, корректностью использования статистических методов, применением высокоточной измерительной аппаратуры, совпадением результатов моделирования, теоретических и экспериментальных исследований, а также совпадением результатов с опубликованными данными других исследователей.

Характер результатов диссертации

Характер результатов диссертации соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства образования и науки РФ.

ВЫВОДЫ

Представленная Денисовым Евгением Сергеевичем диссертация на тему «Флуктуационно-шумовые и релаксационные электрические методы и приборы интеллектуального контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов» является завершенным научным исследованием, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые на защиту, имеющие существенное значение для развития систем контроля и диагностики водородных топливных элементов и источников электропитания на их основе. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые на защиту, свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

Работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, принятого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, в последней редакции Постановления Правительства РФ от 26 октября 2023 года №1786, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук.

Диссертация «Флуктуационно-шумовые и релаксационные электрические методы и приборы интеллектуального контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов» рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8. «Приборы и методы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и

природной среды».

Заключение принято на расширенном заседании кафедры радиоэлектроники и информационно-измерительной техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева- КАИ» Минобрнауки РФ.

Присутствовало на заседании 21 человек. Из них семь членов диссертационного совета 24.2.311.02. Результаты голосования: «за» – 21 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 5 от 22 января 2025 г.

Председательствующий на заседании:

Шахтурин Денис Владимирович,
канд. техн. наук, доцент,
и.о. заведующего кафедрой
радиоэлектроники и информационно-
измерительной техники



Секретарь заседания:

Куншина Наталия Борисовна,
старший преподаватель кафедры
радиоэлектроники и информационно-
измерительной техники



Сведения о лице, утвердившем заключение

Бабушкин Виталий Михайлович,

Проректор по научной и инновационной деятельности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», доктор технических наук, доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»: 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10.

сайт: <https://kai.ru/>, e-mail: kai@kai.ru, тел.: +7 (843) 231-97-34