

## **О Т З Ы В**

официального оппонента на диссертационную работу Денисова Евгения Сергеевича «Флуктуационно-шумовые и релаксационные электрические методы и приборы интеллектуального контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов», представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»

### **1. Актуальность темы исследования**

Твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ) являются важным компонентом быстроразвивающейся водородной энергетики, что определяется уникальной совокупностью их эксплуатационных характеристик, определяемых твердым электролитом, высокими энергетическими и малыми массогабаритными характеристиками. Для практических применений необходимо обеспечить достаточно высокие требования по надежности, заключающиеся в достижении технического ресурса не менее 40 000 часов для мобильных приложений. Удовлетворение таких достаточно жестких требований с учетом большого количества деградиационных факторов, а также сложных процессов управления рабочими режимами на данном этапе развития водородных технологий требует разработки и внедрения оперативных методов контроля и диагностики ТПТЭ. Для решения указанной задачи оперативного контроля и диагностики технического состояния и рабочих режимов ТПТЭ в работе предложены оригинальные флуктуационно-шумовые методы, работающие без возмущения рабочего режима, и маловозмущающие релаксационные методы. Эффективность предложенных методов объясняется широкополосностью и большим динамическим диапазоном используемых измерительных сигналов, обеспечивающих их высокую информативность и скорость принятия диагностических решений. Следует также отметить возрастающее количество публикаций по данной тематике в ведущих профильных научных журналах, что подтверждает важность данной тематики.

Все вышесказанное подтверждает актуальность тематики диссертационной работы Денисова Е.С. для развития российской и мировой водородной энергетики.

## **2. Общая характеристика работы**

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ». Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 536 источников, и десяти приложений. Диссертация изложена на 376 страницах, содержит 205 рисунков, 9 таблиц и 293 формулы. Автореферат содержит 40 страниц.

Во введении приведена общая характеристика работы. Кратко описаны актуальность темы и степень ее разработанности, цель и основные задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации и публикациях, личном вкладе автора, соответствии диссертации научной специальности.

В первой главе приводится анализ принципов работы и типовых неисправностей ТПТЭ. Установлена необходимость существенного повышения надежности и срока службы для реализации коммерчески успешных источников электрической энергии на базе ТПТЭ. Показано, что одним из направлений решения этой задачи является разработка маловозмущающих оперативных методов контроля и диагностики. Критический анализ существующих методов позволил установить их недостаточность для решения поставленной данной задачи по совокупности показателей быстродействия, сохранения режима работы ТПТЭ и стоимости. Определены направления поиска эффективных технологий контроля и диагностики ТПТЭ. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены разработанные диагностические модели, позволяющие обосновать поиск связей между параметрами флуктуационно-шумовых и релаксационных процессов в ТПТЭ и его неисправностями и критическими режимами работы. Предложена и разработана оригинальная электрическая флуктуационно-шумовая модель ТПТЭ, объясняющая

диагностические связи между параметрами наблюдаемых электрических флуктуаций и шумов и особенностями физико-химических процессов в электрохимической системе.

В третьей главе представлены теоретические и экспериментальные исследования диагностических свойств импедансных и релаксационных характеристик ТПТЭ. Разработана методика оценки импедансных характеристик и идентификации параметров эквивалентной электрической схемы по релаксационному отклику на возмущение электрического тока. Предложены и экспериментально верифицированы методики оценки параметров электрической модели по временному отклику на скачкообразное возмущение тока или нагрузки с использованием аппроксимации эквивалентной схемы RC-моделью. Показано, что предложенное упрощение модели позволяет эффективно реализовывать анализ релаксационного отклика с использованием современных микропроцессорных средств. Разработаны методики контроля и диагностики режимов работы ТПТЭ по импедансным и релаксационным характеристикам.

В четвертой главе представлено теоретическое и экспериментальное исследование диагностических свойств электрических флуктуаций и шумов ТПТЭ, наблюдающихся при его функционировании. Предложены методики компенсации влияния электромагнитных сетевых наводок и собственных шумов измерительной аппаратуры на результаты оценки спектральной плотности мощности флуктуационно-шумовых сигналов. Проведен анализ большого объема экспериментальных данных по электрическим флуктуациям и шумам при различных режимах работы ТПТЭ. Предложена классификация флуктуационно-шумовых процессов ТПТЭ. Теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность использования флуктуационно-шумовых сигналов для обнаружения критических режимов работы и неисправностей ТПТЭ, разработаны соответствующие методики контроля и диагностики.

В пятой главе показана возможность обобщения разработанных методов и методик флуктуационно-шумового и релаксационного контроля и диагностики для анализа технического состояния батарей твердополимерных топливных элементов. Предложены четыре подхода для решения этой задачи, основанные на использовании: спектральных характеристик, моментов

высокого порядка, коэффициентов ряда Прони и вейвлет-разложения. Предложенные подходы отличаются по информативности и требованиям к аппаратно-программным средствам. Установлена возможность использования релаксационных характеристик для анализа долговременных трендов в батареях ТПТЭ.

В шестой главе представлена разработка научно-технических основ построения приборов и систем интеллектуального контроля и диагностики твердополимерных топливных элементов. Разработаны модели деградации параметров линейной модели ТПТЭ с возможностью прогноза эксплуатационных характеристик и его уточнения по мере накопления статистики для конкретного топливного элемента. Разработаны нейросетевые структуры для решения задач диагностики и прогнозирования режимов работы ТПТЭ и их батарей. Предложена обобщенная структура встроенных систем контроля и диагностики, с возможностью реализации предложенных в работе методов.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе. Показано, что решены поставленные задачи, позволяющие достичь цели проведенного исследования.

Приложения содержат акты внедрения результатов.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации и полученные в ней результаты.

### **3. Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности**

Материалы диссертации и автореферата соответствуют пп. 1, 6 и 7 паспорта научной специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»:

Разработаны и научно обоснованы новые методы флуктуационно-шумового и релаксационного оперативного контроля и диагностики технического состояния и критических режимов работы твердополимерных элементов, что соответствует п. 1. «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и

природной среды, способствующее повышению надежности изделий и экологической безопасности окружающей среды» паспорта специальности;

Разработаны системная, адаптированная электрическая и флуктуационно-шумовая модель ТПТЭ, алгоритмическое и программное обеспечение приборов и систем контроля и диагностики на основе анализа флуктуационно-шумовых и релаксационных характеристик, что соответствует 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 типовые структуры локальных и распределенных автоматизированных систем интеллектуального оперативного контроля и диагностики ТПТЭ, что соответствует 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».

#### **4. Методы исследования**

В диссертационном исследовании использовался комплексный подход, базирующийся на известных математических, физических и электрохимических моделях, экспериментальных результатах, методах измерений слабых сигналов и цифровой обработки сигналов. В работе использовались методы математической статистики, математического моделирования, параметрической идентификации и специализированные методы исследования электрохимических систем.

#### **5. Степень обоснованности научных положений и достоверности полученных результатов**

Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов определяется строгой аргументацией выбора направления исследования, применением теоретических и экспериментальных методов исследования в рассматриваемой области, подтверждена обсуждением

результатов на национальных и международных научно-технических конференциях и семинарах.

Достоверность полученных научных результатов подтверждается независимой экспертизой при рецензировании статей и регистрации объектов интеллектуальной собственности, корректностью использования статистических методов, применением высокоточной измерительной аппаратуры, совпадением результатов моделирования, теоретических и экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проводились в ведущих российских и мировых лабораториях в области водородной энергетики. Полученные автором экспериментальные результаты и их теоретическая интерпретация не противоречат исследованиям других авторов.

## **6. Уровень новизны научных положений, выводов и рекомендаций**

К новым результатам, полученным в диссертации, следуют отнести:

1. Предложенный новый класс малоинвазивных оперативных методов флуктуационно-шумового и релаксационного контроля твердополимерных топливных элементов и созданная 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. Найденные диагностические свойства и статистические характеристики электрических шумов и флуктуаций, позволяющие реализовывать маловозмущающие методы контроля избыточного и недостаточного увлажнения мембранно-электродных блоков, неравномерности распределения плотности тока, избыточных диффузионных потерь и эффективности работы катализатора, а также технического состояния основных узлов ТПТЭ и их батарей.

3. Предложенная и разработанная диагностическая флуктуационно-шумовая модель ТПТЭ, связывающая статистические характеристики

измеряемых случайных сигналов с режимами работы, техническим состоянием и процессами деградации.

4. Предложенные методики и алгоритмы оценки деградации, 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. Предложенные 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%.

## **7. Теоретическая и практическая ценность диссертационной работы**

Научная значимость работы определяется тем, что разработаны и экспериментально подтверждены теоретические основы использования флуктуационно-шумовых и релаксационных характеристик для оперативной диагностики режимов работы и прогнозирования развития деградационных процессов ТПТЭ.

Практическая значимость заключается в том, что:

1. Предложены и разработаны экспериментальные установки с улучшенными метрологическими характеристиками для исследования шумовых, флуктуационных и релаксационных процессов с целью выявления диагностических признаков ТПТЭ.

2. Разработана система оценки частотных характеристик импеданса по релаксационному отклику на скачкообразное возмущение электрического тока, обеспечивающая уменьшение продолжительности измерения в 4-10 раз.

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, расширяющая на порядок информационный 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. Разработаны нейросетевые модели для построения интеллектуальных систем контроля и прогнозирования режимов работы ТПТЭ по флуктуационным, шумовым и релаксационным процессам.

#### **8. Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати**

По теме диссертации опубликована 101 печатная работа, в том числе 17 статей в журналах из перечня рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.2.8. (Категории К1 и К2), 8 статей в журналах, входящих в международные наукометрические базы SCOPUS/WoS, приравняемых к категории К1 журналов, рекомендованных ВАК РФ, 13 статей в других изданиях наукометрических баз SCOPUS и WoS, 1 статья в журнале ВАК по смежной специальности, 4 раздела в коллективных монографиях, 6 патентов РФ на изобретение, 15 свидетельств на программы для ЭВМ и 37 публикаций в трудах и сборниках конференций.

#### **9. Соответствие полученных результатов поставленной цели и задачам**

Полученные результаты соответствуют поставленной цели. Сформулированные задачи решены.

#### **10. Замечания**

По работе имеются следующие замечания вопросы и замечания:

1. 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.

2. 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?

3. Хотелось бы видеть более подробную методику выбора величины дополнительной величины сопротивления нагрузки для реализации метода контроля и диагностики, представленного в разделе 3.3.4 диссертации.

4. На рис. 4.46 представлена связь между частотными диапазонами электрических шумов и флуктуаций и неисправностями, вызывающими изменение их спектрального состава. Хотелось бы видеть более подробное анализ возможности обнаружения двух и более одновременно действующих неисправностей.

5. 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.

6. Следовало бы отдельно описать требования к параметрам зондирующего сигнала для реализации релаксационных методов контроля и диагностики.

Приведенные замечания не снижают ценности основных результатов диссертации для науки и практики.

## **11. Заключение**

Диссертация Денисова Е.С. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований впервые комплексно решена проблема оперативной диагностики режимов работы

ТПТЭ на основе нового класса методов флуктуационно-шумового и релаксационного контроля, развитая от стадии теоретических исследований до практической реализации приборов контроля, диагностики и прогнозирования режимов работы, а совокупность представленных результатов диссертационного исследования можно квалифицировать как решение важной научно-технической проблемы повышения надежности и стабильности работы энергетических установок на основе водородных твердополимерных топливных элементов.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации имеются сведения о практической полезности результатов и рекомендации по использованию научных выводов.

Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях: 25 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ или приравненных к ним (статьи в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и SCOPUS), а также в 21 объекте интеллектуальной собственности (патенты и свидетельства).

Диссертация отвечает требованию указания ссылок на использованные материалы или отдельные результаты.

Автореферат корректно описывает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа Денисова Е.С. «Флуктуационно-шумовые и релаксационные электрические методы и приборы интеллектуального контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов» является законченной научно-квалификационной работой, соответствует паспорту специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» и отвечает требованиям пп. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. (в редакции от 16 октября 2024 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук.

Считаю, что Евгений Сергеевич Денисов заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8. – Методы

и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Официальный оппонент  
Профессор кафедры химии и  
электрохимической энергетики  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»,  
доктор технических наук по специальности  
05.14.08 «Энергоустановки на основе  
возобновляемых видов энергии», доцент по  
специальности 02.00.05 «Электрохимия»

Григорьев  
Сергей  
Александрович

09 сентября 2025 г.

Сведения:

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Юридический адрес: 111250, Россия, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

Телефон: +7 495 362-70-31. Эл. адрес: GrigoryevSA@mpei.ru

Должность: Профессор кафедры химии и электрохимической энергетики

Ф.И.О.: Григорьев Сергей Александрович

Я, Григорьев Сергей Александрович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Григорьев Сергей Александрович