

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Денисова Евгения Сергеевича

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

### Актуальность темы

В последнее десятилетие активное внимание уделяется водородной энергетике, что подтверждается принятием программ ее развития как в России (Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации №2162-р от 5 августа 2021 г.), так и в других странах мира. Одной из ключевых технологий водородной энергетики являются топливные элементы, позволяющие осуществлять прямое преобразование энергии химических связей водорода в электрическую энергию. Совокупность технических характеристик твердополимерных топливных элементов (ТПТЭ), заключающаяся в использовании твердого электролита, технологичности изготовления, низкой рабочей температуре и высокой удельной мощности, позволяет рассматривать их в качестве одного из наиболее перспективных источников электрической энергии. Однако применимость ТПТЭ во многом ограничивается недостаточными характеристиками надежности и временем безотказной работы, что обуславливается сложностью внутренних физико-химических процессов и наличием большого количества факторов, вызывающих деградацию.

Задача повышения надежности источников на основе ТПТЭ в этих условиях становится чрезвычайно важной. Одним из наиболее перспективных путей решения этой задачи является поиск новых средств оперативного контроля, позволяющих на ранних стадиях обнаруживать критические режимы работы (например, увлажнения мембранно-электродного блока) и процессы ускоренной деградации. В диссертационной работе Денисова Е.С. проведены комплексные исследования и разработка новых методов и приборов оперативного контроля при малом возмущении режима работы ТПТЭ (релаксационная диагностика) или без такого возмущения (флуктуационно-шумовая диагностика) позволяющие повысить характеристики методов контроля, диагностики и прогнозирования режимов работы ТПТЭ в плане повышения точности и оперативности. Большая вариативность режимов работы и особенностей протекания внутренних физико-химических процессов приводят к необходимости учета больших объемов экспериментальных данных и сложных математических моделей, в этом случае перспективными становятся подходы, использующие технологии искусственных нейронных сетей. Поэтому весьма актуальной является разработка методологии, алгоритмического, программного и аппаратного обеспечения флуктуационно-шумового и маловозмущающего релаксационного контроля водородных твердополимерных топливных элементов с возможностью оперативного обнаружения и прогнозирования критических режимов работы и деградации компонентов, а также алгоритмических средств их интеллектуализации на основе технологии искусственных нейронных сетей.

В настоящее время существуют только отдельные попытки использования флуктуационно-шумовых характеристик для решения проблемы технического контроля и диагностики твердополимерных топливных элементов, при этом в литературе практически

полностью отсутствуют данные о маловозмущающем релаксационном и флуктуационно-шумовом контроле батарей водородных топливных элементов, что является важной задачей для мониторинга и прогнозирования технического состояния источников электрической энергии на основе водородных топливных элементов.

С учетом представленной выше актуальности темы исследований совершенно правильной видится цель работы, состоящая в создании и разработке научно-методологических основ контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов по их электрическим флуктуационно-шумовым и релаксационным характеристикам и построении соответствующих малоинвазивных и оперативных диагностических систем. Поставленная цель позволяет решить важную научно-техническую проблему повышения надежности источников электрической энергии на основе водородных твердополимерных топливных элементов.

### **Оценка содержания диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка основных публикаций автора, списка литературы и десяти приложений. Общий объем работы составляет 376 страниц машинописного текста, включает 205 рисунков, 9 таблиц, библиографию из 536 источников.

Во введении диссертационной работы Денисова Е.С. приведена общая характеристика работы, кратко описываются 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 диссертационной работы рассмотрены научные и технические проблемы оперативной диагностики водородных твердополимерных топливных элементов (ТПТЭ). Обсуждены особенности физико-химических процессов, определяющих функционирование ТПТЭ, а также типовые критические режимы работы и неисправности. На основе анализа известных данных и результатов экспериментов в конце главы сформулированы необходимые требования к выполнению работы и основные концепции исследования.

Во второй главе диссертационной работы на основе первоначальных экспериментов автора по исследованию малосигнальных характеристик ТПТЭ и их диагностических свойств были разработаны малосигнальная системная, импедансная и флуктуационно-шумовая диагностические модели ТПТЭ и определены наиболее перспективные направления маловозмущающих методов оперативного контроля и диагностики ТПТЭ. Автором было установлено, что для повышения достоверности и оперативности оценки технического состояния ТПТЭ в процессе их функционирования и прогнозирования остаточного ресурса наиболее подходящими является исследование широкополосных релаксационных и флуктуационно-шумовых процессов, не требующих сильного возмущения режимов работы.

В третьей главе диссертации описаны разработка и апробация методологических основ применения релаксационных методов контроля водородных топливных элементов. С помощью предложенных диагностических моделей были разработаны и экспериментально верифицированы комплексные подходы к построению систем диагностики, включая этапы получения измерительной информации, их обработки, идентификации параметров модели и их применения для решения задачи контроля и диагностики. Особое внимание уделено вопросам эффективного формирования воздействия для получения релаксационного отклика. Показана эффективность

использования диагностических свойств релаксационного отклика на скачкообразное изменение нагрузки ТПТЭ. Разработаны методики, алгоритмы и программные средства для идентификации параметров на основе анализа такого релаксационного отклика.

В четвертой главе диссертационной работы представлены результаты изучения теоретических и экспериментальных исследований диагностических свойств электрических шумов и флуктуаций водородного ТПТЭ. На основе анализа экспериментальных данных предложена классификация электрических флуктуационно-шумовых процессов и описаны их спектральные и статистические характеристики. Представлены систематизированные результаты экспериментальных исследований диагностических свойств флуктуационно-шумовых сигналов, которые показали возможность обнаружения критических режимов увлажнения мембранно-электродного блока, неравномерного распределения тока по поверхности мембраны и других типов неисправностей. Описана процедура количественного описания квазипериодических флуктуаций и ее применение для выявления долговременных трендов. Большая часть описанных в этой главе экспериментальных результатов была получена в одной из ведущих в этой области лабораторий мира в Университете Пуатье (Франция).

В пятой главе диссертации представлены результаты адаптации предложенных подходов к релаксационной и флуктуационно-шумовой диагностике для оценки технического состояния батарей водородных топливных элементов. Показано, что такие диагностические подходы могут успешно использоваться для контроля и диагностики батарей ТПТЭ. Впервые проведены исследования электрических флуктуаций и шумов при долговременной работе мощной батареи ТПТЭ. Установлено качественное и количественное совпадение спектральных характеристик батарей и отдельных ячеек ТПТЭ. Показана возможность использования моментов случайных величин для описания электрических флуктуационно-шумовых процессов и эффективность такого подхода для исследования медленных деградиационных процессов. Показана возможность разработки встраиваемых систем диагностики для реализации релаксационной диагностики батарей ТПТЭ.

Шестая глава диссертационной работы посвящена вопросам практической реализации предложенных подходов и их интеллектуализации на основе использования искусственных нейронных сетей. Показана эффективность использования нейросетевых алгоритмов в задачах диагностики и прогнозирования режимов работы. Предложен подход, позволяющий снизить влияние собственных шумов измерительной аппаратуры на результаты флуктуационно-шумовой диагностики на основе двухканального измерителя с переключаемыми входными цепями. Разработаны модели деградации параметров эквивалентной электрической схемы ТПТЭ с возможностью уточнения в процессе их долговременного использования. Предложены аппаратно-программные средства для распределенных систем контроля, диагностики и прогнозирования режимов работы и неисправностей твердополимерных топливных элементов по результатам оценки их релаксационных и флуктуационно-шумовых характеристик.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

**Научная новизна полученных результатов состоит 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, обеспечивающие повышение оперативности

принятия диагностических решений за счет использования широкополосных измерительных сигналов при минимальном воздействии на объект измерения.

2. Выявлены 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. Разработана диагностическая флуктуационно-шумовая модель ТПТЭ, связывающая статистические характеристики измеряемых случайных сигналов с режимами работы, техническим состоянием и процессами деградации.

4. Предложены методики и алгоритмы оценки деградации, прогнозирования остаточного ресурса.

5. Предложены научные и методические основы построения алгоритмического, аппаратного и программного обеспечения интеллектуальных систем контроля и диагностики ТПТЭ по флуктуационным, шумовым и релаксационным процессам.

#### **Теоретическая и практическая ценность диссертационного исследования:**

1. Разработаны научно-методологические основы использования флуктуационно-шумовых и релаксационных характеристик для оперативной диагностики режимов работы и прогнозирования развития деградационных процессов ТПТЭ.

2. Разработаны экспериментальные установки с улучшенными метрологическими характеристиками, позволяющие измерять и исследовать шумовые, флуктуационные и релаксационные процессы для выявления диагностических признаков ТПТЭ.

3. Разработана система оценки частотных характеристик импеданса по релаксационному отклику на скачкообразное возмущение электрического тока, обеспечивающая уменьшение времени измерения по сравнению с традиционными методами в 2-10 раз за счет использования широкополосных сигналов.

4. Разработана система оценки спектральной плотности мощности электрических флуктуаций с компенсацией собственных шумов входных измерительных каскадов.

5. Создано оригинальное аппаратное, алгоритмическое и программное обеспечение приборов контроля и диагностики ТПТЭ и их батарей по электрическим флуктуационно-шумовым или релаксационным характеристикам.

6. Предложены нейросетевые модели для построения интеллектуальных систем контроля и прогнозирования режимов работы ТПТЭ по флуктуационным, шумовым и релаксационным процессам.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов и выводов подтверждаются независимой экспертизой при рецензировании статей в ведущих российских и мировых журналах, корректностью использования методов математической статистики, спектрального анализа и идентификации параметров моделей, применением высокоточной измерительной аппаратуры, совпадением результатов моделирования, теоретических и экспериментальных исследований, совпадением полученных результатов с данными других исследователей.

Основные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на десятках международных и всероссийских научно-технических конференций. Результаты диссертации опубликованы в 101 печатной работе. Автором опубликовано 17 статей в журналах из перечня ВАК РФ по специальности 2.2.8, 8 статей в журналах и 13 статей в других изданиях, входящих в международные наукометрические базы SCOPUS и Web of Science, одна статья в журнале из перечня ВАК

по смежной специальности, 4 раздела в коллективных монографиях, 21 объекте результатов интеллектуальной деятельности, зарегистрированных в ФИПС, и 37 публикациях в трудах и сборниках конференций. Среди этих публикаций 12 написаны автором единолично.

Автореферат достаточно полно и адекватно отражает основное содержание диссертационной работы, написан, как и сама диссертация, технически грамотным литературным языком с использованием принятой в данной области науки и техники терминологии.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Хотелось бы видеть более подробное описание требований к системам формирования возмущающего сигнала и точности измерения отклика для систем релаксационной диагностики твердополимерных топливных элементов.

2. Одними из наиболее информативных диагностических признаков флукуационно-шумовых процессов, найденных в Главе 4 диссертации, являются среднеквадратические значения флукуаций в низко-, средне- и высокочастотном диапазонах. Хотелось бы видеть более подробное описание методики адаптации границ этих частотных диапазонов для топливных элементов других конструкций и мощностей.

3. В работе следовало бы более подробно рассмотреть особенности влияния нагрузки с реактивными составляющими на спектральные характеристики флукуационно-шумовых сигналов.

4. При расширении предложенных методов и приборов на батареи с большим количеством элементов, очевидно, потребуется решать вопрос устранения большой синфазной составляющей. Одним из очевидных подходов здесь является использование гальванической развязки. Возможна ли реализация предложенных подходов в этом случае? Потребуется ли изменение диагностических моделей в этом случае?

5. Хотелось бы видеть более подробные экспериментальные исследования предложенных деградиационных моделей.

Высказанные замечания не снижают общего благоприятного впечатления от диссертационной работы и во многом носят характер пожеланий для будущего продолжения исследований.

### **Заключение**

Оценивая уровень работы в целом, считаю, что, несмотря на вышеуказанные замечания, диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, результаты которого можно квалифицировать как новые научно обоснованные технические и методологические решения, внедрение которых вносит существенный вклад в развитие водородной энергетики в Российской Федерации, а также содержит решение важной научно-технической проблемы создания методов и приборов флукуационно-шумового и релаксационного контроля водородных твердополимерных топливных элементов, позволяющих реализовывать оперативное обнаружение и прогнозирование критических режимов работы и деградации компонентов при минимальном уровне воздействия на объект контроля, а также в их интеллектуализации на основе технологии искусственных нейронных сетей.

Представленная диссертационная работа «Флукуационно-шумовые и релаксационные электрические методы и приборы интеллектуального контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов» соответствует паспорту специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов,

изделий, веществ и природной среды» по пунктам 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»; 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»; 7. «Автоматизация технологий, приборов контроля и средств диагностирования, способствующая снижению трудоемкости, увеличению оперативности и достоверности оценки эксплуатационного ресурса изделий, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды».

Диссертационная работа «Флуктуационно-шумовые и релаксационные электрические методы и приборы интеллектуального контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов» соответствует 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, а ее автор – Денисов Евгений Сергеевич – 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 радиоэлектронных систем  
федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королёва»,  
доктор технических наук по специальности 05.27.01  
«Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на  
квантовых эффектах», профессор

Пиганов Михаил  
Николаевич

Сведения:

Полное наименование организации:  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика  
С.П. Королёва»

Юридический адрес:

443086, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Телефон: +7 (846) 267-45-40, +7 (846) 267-45-39. Эл. адрес: kipres@ssau.ru

Должность: Профессор кафедры радиоэлектронных систем

Ф.И.О.: Пиганов Михаил Николаевич

