

ОТЗЫВ 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 на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

На оппонирование представлены:

- диссертация на 376 страницах, включая 205 рисунков, 9 таблиц и приложения;
- автореферат диссертации на 40 страницах;
- 101 публикация по теме диссертации, из них 17 статей в научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 8 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и SCOPUS, 13 публикаций в материалах докладов международных научных конференций, индексируемых в международных базах данных Web of Science и/или SCOPUS, 1 статья в журнале ВАК по смежной специальности, 6 патентов РФ на изобретение, 15 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, 4 раздела в коллективных монографиях и 37 публикаций в материалах научных конференций.

Актуальность темы

Оперативный контроль режимов работы водородных твердополимерных топливных элементов является важной научно-технической задачей, поскольку соблюдение правильных режимов работы и раннее обнаружение и прогнозирование развития критических режимов работы определяют эффективность и надежность энергоустановок на основе этих элементов. Особый интерес здесь представляют подходы к контролю и прогнозированию режимов работы на основе не нарушающих режим работы воздействий. В настоящее время среди таких подходов наиболее широкое распространение

получили методы электрохимического импеданса. Однако, несмотря на высокую информативность, применение подобных методов в основном ограничивается лабораторными исследованиями. Использование флуктуационно-шумовых и релаксационных сигналов, предлагаемых в рамках данной работы, имеет большие перспективы для реализации встроенных систем контроля для опытных и серийных источников электрической энергии на базе водородных топливных элементов. Поэтому усовершенствование методов контроля и прогнозирования режимов работы и их практическая реализация особенно актуальны для достижения ресурса топливных элементов, составляющего 20000 и 40000 часов соответственно для автомобильных и стационарных приложений.

Общая характеристика и структура диссертационной работы

Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, содержащее решение актуальной научно-технической проблемы, имеет четкую логическую структуру из шести глав и изложена грамотным техническим языком.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы защищаемые положения, обозначены новизна, практическая значимость и другие параметры диссертации.

Первая глава содержит обзор особенностей функционирования и эксплуатации твердополимерных топливных элементов, а также типовых неисправностей, возникающих при их работе. Проведен критический анализ существующих и перспективных подходов к контролю и диагностике режимов работы твердополимерных топливных элементов. Выявлена необходимость развития методов маловозмущающих методов контроля на основе анализа релаксационных и флуктуационно-шумовых процессов. Установлена возможность применения предлагаемых методов контроля в процессе функционирования топливных элементов. Обоснованы цель и задачи диссертации.

В главе 2 проведена разработка нелинейной и линейной системных моделей твердополимерных топливных элементов. Проведена адаптация малосигнальной электрической модели топливного элемента на основе аппроксимации диффузионного импеданса в форме модели Кауэра второго и третьего порядков. Такая адаптация существенно упрощает использование модели и идентификацию ее параметров по измеряемым релаксационным характеристикам. Разработана оригинальная флуктуационно-шумовая модель, позволяющая связать между собой электрические флуктуационно-шумовые процессы и особенности протекания физико-химических процессов в твердополимерном топливном элементе. Анализ предложенных моделей позволил выявить основные направления малоинвазивных методов контроля и диагностики.

Глава 3 посвящена разработке научно-технических основ диагностики и контроля твердополимерных топливных элементов по релаксационным характеристикам. Показана возможность оценки импеданса по результатам анализа релаксационного отклика электрохимических систем на ступенчатое изменение рабочего тока. Предложен и обоснован метод релаксационного контроля, использующего модуляцию нагрузки в качестве зондирующего сигнала. Разработан способ идентификации параметров электрической модели по соответствующим релаксационным характеристикам. Предложенный подход позволит реализовывать системы встроенного контроля и диагностики твердополимерных топливных элементов, а также повысить в 2-10 раз оперативность принятия диагностических решений.

В главе 4 теоретически и экспериментально исследуются диагностические свойства электрических флуктуационно-шумовых характеристик твердополимерных топливных элементов. Разработана классификация наблюдаемых флуктуационно-шумовых сигналов. Теоретически показана возможность обнаружения неравномерного распределения тока по поверхности мембраны, критических режимов увлажнения мембранно-электродных блоков и других некорректных режимов работы топливных элементов. Проведен большой объем экспериментальных

исследований, позволивший установить высокие диагностические свойства спектральных характеристик флуктуационно-шумовых сигналов. Показана возможность использования квазипериодических сигналов для оценки долговременных трендов.

В главе 5 рассматривается вопрос расширения диапазона применения предложенных малосигнальных методов для контроля, диагностики и прогнозирования режимов работы батарей твердополимерных топливных элементов. Высокая эффективность предложенных подходов была показана на основе данных, полученных в процессе долговременного эксперимента в лаборатории FCLAB (Бельфор, Франция). Был предложен метод контроля батарей топливных элементов по статистическим моментам флуктуационно-шумовых сигналов.

Глава 6 посвящена разработке научно-методических основ интеллектуализации систем контроля и диагностики твердополимерных топливных элементов. На основе технологии искусственных нейронных сетей решены задачи контроля, диагностики, а также прогнозирования режимов работы. Предложены распределенные измерительные структуры для получения информации о распределении физических полей внутри мембранно-электродных блоков. Разработаны модели для прогнозирования процессов деградации и остаточного ресурса топливного элемента по малосигнальным характеристикам. Предложена обобщенная структура встроенных систем диагностики и контроля, реализующая предложенные методы.

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

Достоверность результатов работы обеспечена: совпадением результатов теоретических и экспериментальных исследований диагностических свойств импедансных, релаксационных и флуктуационно-шумовых сигналов; совпадением результатов математического моделирования с экспериментальными данными; совпадением полученных результатов с опубликованными данными других исследователей.

Научная новизна положений диссертационной работы

Автором комплексно решена проблема оперативной диагностики режимов работы твердополимерных топливных элементов (ТПТЭ) на основе нового класса методов флуктуационно-шумового и релаксационного контроля.

1. Разработан 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 по сравнению традиционными импедансными методами 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. Предложена и 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 и планирования технического обслуживания ТПТЭ, позволяющие оценивать и уточнять динамику деградации отдельных компонентов 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.

Полученные результаты обладают научной новизной и практической значимостью.

Значимость результатов диссертации для науки и практики

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

Разработана система оценки частотных характеристик импеданса по релаксационному отклику на скачкообразное возмущение электрического тока, обеспечивающая продолжительность измерения меньше в 2-10 раз по сравнению с традиционными импедансными методами.

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 частотного диапазона флуктуационно-шумового сигнала.

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

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

Апробация, публикации и внедрение результатов работы

Основные положения диссертационной работы в достаточной мере апробированы на профильных отечественных и международных конференциях, сделано 50 публикаций в их материалах. Основное содержание диссертации

опубликовано в 17 статьях в научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 8 статьях в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и SCOPUS. Получено 6 патентов на изобретение РФ и 15 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Опубликовано 4 раздела в коллективных монографиях.

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 НПЦ «Радиоэлектроника» имени В.И. Шимко (г. Казань), АО «Казанское приборостроительное конструкторское бюро» (г. Казань), ОП «ТАТНЕФТЬ-ДОБЫЧА» ПАО «ТАТНЕФТЬ» им. В.Д. Шашина. Внедрения подтверждены соответствующими актами.

Соответствие специальности

Диссертация соответствует научной специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» и отвечает пунктам паспорта специальности:

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».

Замечания

1) В работе приводятся данные измерений релаксационных и флуктуационно-шумовых характеристик при работе топливного элемента на резистивную нагрузку, хотелось бы видеть оценки влияния индуктивного или емкостного характера электрической нагрузки.

2) 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?

3) Хотелось бы видеть более детальный анализ диагностических свойств флуктуаций среднего уровня, поскольку их использование позволило бы существенно упростить требования к характеристикам измерительного оборудования.

4) На рисунке 4.46 диссертации приводится распределение механизмов возникновения флуктуационно-шумовых сигналов по частотному спектру. Возможно ли использование этого распределения в случае кратных неисправностей.

5) При разработке нейронной сети для прогнозирования режима работы было бы интересно видеть результаты для различных конструкций батарей твердополимерных топливных элементов.

Данные замечания не ставят под сомнение основные защищаемые положения диссертационной работы Денисова Е.С.

Заключение по диссертационной работе

Диссертация является законченным, актуальным научным исследованием, обладает внутренним единством и решает научно-техническую проблему, имеющую важное хозяйственное значение – создание методов и приборов флуктуационно-шумового и релаксационного контроля водородных твердополимерных топливных элементов, позволяющих реализовывать

