

ИНТЕГРИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

В.Ю. Казаров^{1,2}, Р.Ш. Хастиев¹, А.А. Камалеева¹, Б.И. Валеев¹, Т.А. Аглиуллин¹

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева–КАИ

Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

²АО «Стелла-к»

Российская Федерация, г. Казань, ул. Липатова, д.37г, к.4

Аннотация. Рассматривается комплексная задача повышения автономности и ресурса электрохимических источников энергии (ЭХИ) беспилотных транспортных систем за счёт использования композиционных полимерных электролитов (КПЭ) с *in situ* синтезированными неорганическими наночастицами. Обсуждаются проблемы обеспечения однородного распределения наполнителя в полимерной матрице, формирования частиц с развитой поверхностью и управляемого синтеза в миниреакторах, создаваемых в объёме полимера. Показано, что для обоснования режимов синтеза и оценки деградационных процессов в КПЭ требуется сочетание встроенных методов самодиагностики. Аналитически рассмотрены возможности электрохимической импедансной спектроскопии с использованием распределения времён релаксации, анализа флуктуаций и переходных процессов для идентификации механизмов старения ЭХИ в реальном времени. Проанализирован потенциал волоконно-оптических сенсорных систем на основе волоконных брэгговских решёток и распределённых методов зондирования для получения пространственно-разрешённых карт температуры, деформации и влажности внутри топливных элементов. Показано отсутствие унифицированных протоколов синхронной съёмки и кросс-калибровки данных импедансной и волоконно-оптической диагностики. Сформулированы требования к интегрированной диагностической системе КПЭ в ЭХИ, обеспечивающей раннее обнаружение деградации, повышение надёжности и информированное проектирование силовых установок беспилотных транспортных средств.

Ключевые слова: композиционные полимерные электролиты; электрохимические источники энергии; протон-обменные топливные элементы; электрохимическая импедансная спектроскопия; распределение времён релаксации; электрохимический шум и переходные процессы; волоконно-оптические датчики; волоконные брэгговские решётки; оптическая рефлектометрия в частотной области; распределённый мониторинг температуры и влажности; беспилотные транспортные системы.

Современная тенденция развития транспортной инфраструктуры (в ее военной части – доставка боевых зарядов, разведка и пр.; в ее гражданской части – доставка грузов, видеонаблюдение и пр.) неразрывно связана с развитием беспилотных систем различного типа (авиационных, наземных, водных). Повышение эффективности применения беспилотных систем является комплексной задачей, состоящей из решения сопряженных друг с другом подзадач. Одна из основных подзадач направлена на повышение автономности беспилотных транспортных средств с одновременным снижением их массогабаритных характеристик, что в частности определяется типом используемой силовой установки, ее энергетической эффективностью, а также системами контроля и управления ее параметрами.

Перспективные электрические силовые установки требуют использования элементов электропитания с наибольшей удельной энергетической эффективностью (единица мощности на единицу массы элемента питания) и безопасных (неэлектрических)

интегрированных систем встроенной диагностики. Одним из заметных трендов в успешном решении этой комплексной проблемы является использование ЭХИ с полимерным электролитом. Это обусловлено относительно высокой мощностью на единицу массы таких топливных элементов.

Композиционные полимерные электролиты являются перспективными для создания ЭХИ беспилотных транспортных систем [1, 2]. Одна из основных проблем при создании полимерных электролитов связана с достижением однородного распределения неорганических частиц наполнителя [3], например, в растворе (геле) полимерной матрицы [4, 5]. Агломерация таких частиц, их седиментация существенно снижает ресурс ЭХИ с полимерным электролитом. Вторая проблема – формирование частиц с развитой площадью поверхности, обеспечивающей хорошее сопряжение с полимерной матрицей [6]. Решить эти проблемы возможно за счет использования метода синтеза неорганических частиц *in situ*, непосредственно в полимерной матрице [7]. Для достижения контролируемого синтеза таких частиц инициируют формирование миниреакторов в растворах полимеров. Условия синтеза частиц в миниреакторах отличаются от условий окружающей среды и могут быть контролируемы за счет целенаправленного воздействия на них, например, электромагнитным полем высокой частоты [8], или выбором химического состава миниреакторов и прекурсора для синтеза самих частиц [9, 10]. Следует отметить, что такой подход к получению композиционных полимерных электролитов (КПЭ) позволяет исключить стадии гомогенизации дисперсных частиц в полимерном растворе или геле, вязкость которого существенно ограничивает однородное распределение частиц. Обоснование и выбор условий формирования таких миниреакторов, методы управления синтезом неорганических частиц в них, является нетривиальной задачей, требующей использования современных методов диагностики процессов, происходящих внутри среды. Кроме того, определение процессов, влияющих на ресурс ЭХИ, процессов деградации КПЭ также требует разработки встроенных методов самодиагностики. Встроенные в КПЭ датчики должны обеспечивать неинвазивную диагностику, а, следовательно, не могут быть электрическими. К перспективным методам диагностики следует отнести электрохимическую импедансную спектроскопию и методы, основанные на использовании волоконно-оптических датчиков. Причем, если электрохимическая импедансная спектроскопия требует решения обратной задачи для определения и идентификации процессов, происходящих внутри топливного элемента, то вторые методы – являются прямыми, и, как следствие, обладают большей адекватностью и достоверностью. Это обусловлено тем, что обратные задачи математической физики не имеют единственного решения [11], что становится особенно острой проблемой в присутствии многочисленных шумов и флуктуаций в реальной системе.

Электрохимическая импедансная спектроскопия ЭХИ является одним из стандартов диагностики энергоустановок нового поколения, позволяющая выявлять различные механизмы деградации и осуществлять мониторинг процессов переноса заряда в литий-полимерных ячейках. Переход от традиционного анализа электро-химического импеданса в частотной области к анализу переходных процессов и распределения времён релаксации является ключевым трендом последних лет, который позволяет сократить продолжительность измерительных процедур, снимает часть неоднозначности подбора эквивалентных схем и позволяет получить устойчивые признаки типичных отказов [12], что показано как на модельном и теоретическом уровне, так и на реальных источниках промышленного размера. Одной из основных проблем литий-полимерных ЭХИ является мониторинг уровня заряда и оценка его достаточности для выполнения поставленной задачи.

На наборе типичных неисправностей (перезаряд, переразряд, перегрев, деградация электродов и электролита) анализ распределения времён релаксации даёт характерные пики/сдвиги, которые можно использовать как признаки для автоматической диагностики

и раннего предупреждения дефектов, включая задачи управления [13–15]. Анализ собственных флуктуаций напряжения/тока в рабочем режиме зарекомендовал себя как простая не инвазивная диагностика состояния и однородности работы энергоустановок. На стеках некоторых типов электрохимических источников электрического тока показаны устойчивые шумовые признаки и методы контроля технического состояния, показавшие свою эффективность при длительных (от 100 до 1200 ч) испытаниях [16, 17]. Показана чувствительность к локальным дефектам и смене режимов работы. В отдельных работах показаны примеры использования низкочастотного шума, позволяющего давать оценки состояния на отдельных элементах [18, 19] батарейных сборок. К ограничениям относятся требования к экранированию/развязыванию от силовой электроники и продолжительности измерений для достоверной оценки спектров. Прерывание тока отсечка является одним из распространённым способом оперативной оценки сопротивления электролита в реальном времени. Этот метод используется с середины 2000-х и хорошо формализован [20]. Прерывание тока и ступенчатые изменения нагрузки используются для извлечения характерных времен деградационных процессов в электрохимических ячейках, имеются примеры диагностики по форме переходного отклика и характерным временам отклика на характерные измерения тока в условиях эксплуатации [21]. Важным вопросом является постоянный мониторинг уровня заряда аккумуляторной батареи. Следует особое внимание уделить влиянию температурных режимов работы на характеристики релаксационных процессов. Кроме того, работы последних лет подчёркивают, что температурные неоднородности и локальные точки нагрева существенно влияют на деградацию литий-полимерных ЭХИ, поэтому информация о температурных режимах работы, в том числе с неоднородным температурным распределением, должна учитываться при интерпретации импедансных и релаксационных характеристик [22, 23].

Волоконно-оптические точечные датчики и распределённые технологии зондирования позволяют получить пространственно-разрешённые карты температуры и деформации прямо внутри объекта контроля, в том числе, и ЭХИ и/или их стека. Электромагнитная инертность, полная противопожарная безопасность, компактность, возможность мультиплексирования делают волоконно-оптические датчики их наиболее привлекательными в задачах интеграции сенсоров в ЭХИ [24, 25, 25].

Классические работы показали, что волоконные брэгговские решетки (ВБР) можно встраивать как в активную область ячейки с протон-обменной мембраной, так и в полимерные материалы, и по ним получать распределённую температуру с относительной погрешностью менее $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне от 20 до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ [26]. Интегрированные непосредственно в полимер ВБР датчики позволяют проводить измерения как дефлорации, так и относительной влажности и кислотности [27]. Актуальные исследования подтверждают практическую реализуемость подхода и описывают нюансы интеграции на биполярные пластины, включая влияние прижима на показания сенсоров [24, 28].

К ЭХИ применимы два класса распределённых волоконно-оптических измерительных систем. Первая — это оптическая рефлектометрия в частотной области с сантиметровой (и даже миллиметровой) пространственной дискретизацией и высокой чувствительностью [24]. Второе — это распределённые термометрические системы с длинной базой и дискретизацией в несколько метров. Коммерчески доступны (Silixa [29], Yokogawa [30], в России это КБ «Метротек», ГК «ОПТЭН», «ОПТЕЛ»), которые широко описаны в обзорах и для компактных стеков это чаще внешний мониторинг (корпус, трубопроводы), а не активная зона [31]. Подходы на основе эффекта Брюллиена (Brillouin) занимают промежуточное место (распределённом измерении деформации/температуры, вплоть до динамических режимов), и рассматриваются как перспективное дополнение к ВБР и распределённой рефлектометрии в частотной области в энергетических

установках. Есть работы по комбинированной Релей/Бриллюен/Раман (Rayleigh/Brillouin/Raman) схеме для многопараметрического мониторинга [32, 33].

Внутри ЭХИ необходимо измерять ряд параметров, которые позволяют в полной мере контролировать его работу. Контроль температуры осуществляется волоконными датчиками на основе ВБР и оптической рефлектометрии в частотной области, что позволяет получить полную информацию по карте температуры [24, 26, 28]. Контроль относительной влажности и воды также ведется при помощи ВБР, которые становятся чувствительными к относительной влажности после нанесения особых полимерных покрытий [27], существуют решения с встроенными в полимер чувствительными к водородному показателю ВБР, описаны методы развязки температуры и относительной влажности [34]. Кроме того, ВБР традиционно применяются и как точные тензометрические датчики, позволяющие контролировать локальные напряженно-деформированные состояния КПЭ, возникающие как в процессе их формирования, так и в процессе эксплуатации ЭХИ на их основе [35]. Практика использования ВБР требует температурной компенсации и парных/комбинированных сенсоров [36]. Для ввода/вывода оптоволоконна используются герметичные оптоволоконные вводы, включая серийно доступные решения для вакуума/давления/высокой влажности, что упрощает промышленную упаковку без нарушения герметичности корпуса.

Существуют существенные ограничения с актуальными нерешенными задачами. Главное — это совместимость сенсоров со средой топливных элементов. Высокая влажность, температура около 80 °C и химическая активность требуют устойчивых покрытий и герметизации. Несмотря на то, что полиамидные с технологией записи ВБР через покрытие снижают риски, остается необходимость исключения прижима и радиальной деформации волокна, что необходимо учитывать [24]. Следующая проблема — это избирательная чувствительность и долговечность волоконных датчиков. Легирование волокна, наноструктурирование и различные защитные/каталитические верхние слои, заметно ускоряют кинетику и снижают гистерезис [37–39]. Существуют и нерешенные методические вопросы по распределенному волоконному зондированию. Распределенный датчик температуры (Raman-DTS) оптимален для протяженных участков и трубопроводов, но обладает слишком малой дискретизацией для активной зоны ЭХИ, кроме того, оптическая рефлектометрия в частотной области решает задачу внутри элемента, но требовательна к механике укладки волокна, выводу его наружу и к обработке сигналов [24, 31].

Для интегрированной сенсорной системы можно сделать следующие практические выводы. Картирование температуры внутри ЭХИ осуществляется за счет оптической рефлектометрии в частотной области или линейки ВБР на блоке питания и вдоль каналов, что обеспечивает раннее выявление «горячих точек» и неравномерного увлажнения. Контроль относительной влажности может быть обеспечен за счет локальных ВБР с полимерным покрытием в активной зоне с обязательной температурной компенсацией. Утечки можно контролировать за счет точечных оптоволоконных датчиков. Промышленная упаковка важна как для герметичных вводов оптоволоконна с низкопрофильной укладкой волокна, так и для снижения контактной нагрузки.

Волоконные брэгговские решетки и оптическая рефлектометрия в частотной области позволяют получить тепловую и, при желании, деформационную картину внутри топливного элемента, а ВБР с чувствительностью к влажности дополняют информационную картину. Узкие места — это долговечность и перекрестная чувствительность покрытий, механика укладки и химическая совместимость.

Состояние вопроса можно резюмировать в трёх взаимосвязанных выводах. Во-первых, электрохимическая импедансная спектроскопия в режиме реального времени через преобразователи с распределением времён релаксации надёжно определяет процессы. Во-вторых, волоконно-оптические сенсорные системы (при помощи ВБР

и распределенных измерений) позволяют уверенно создавать карты температуры, деформации и влажности как на поверхности ЭХИ, так и внутри него. В-третьих, нет единых протоколов синхронной съёмки и кросс-калибровки, позволяющих однозначно связать данные электрохимической импедансной спектроскопии с данными распределённого контроля физико-химических характеристик полимерного электролита. Что позволило бы в режиме реального времени выявлять факты и причины деградации топливных элементов, формировать на их основе рекомендации по оптимизации, проектированию и модификации структуры полимерного электролита и ЭХИ в целом.

Благодарность

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Список использованных источников

1. Altaf F. Novel sepiolite reinforced emerging composite polymer electrolyte membranes for high-performance direct methanol fuel cells / F. Altaf et al. // *Materials Today Chemistry*. Elsevier. – 2022. – V. 24. – P. 100843.
2. Zhang Q. Preparation and electrochemical study of PVDF-HFP/LATP/g-C₃N₄ composite polymer electrolyte membrane / Q. Zhang et al. // *Inorganic Chemistry Communications*. Elsevier. – 2021. – V. 131. – P. 108793.
3. A Critical Review for an Accurate Electrochemical Stability Window Measurement of Solid Polymer and Composite Electrolytes [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/14/3840> (дата обращения: 13.11.2025).
4. Lü H. Uniform garnet nanoparticle dispersion in composite polymer electrolytes / H. Lü et al. // *Acta Physico-Chimica Sinica*. Elsevier, 2024. – V. 40, № 3. – P. 2305016.
5. Ahn J.-H. Nanoparticle-dispersed PEO polymer electrolytes for Li batteries / Ahn J.-H. et al. // *Journal of power sources*. Elsevier. – 2003. – V. 119. – P. 422–426.
6. Khan S. Inorganic-polymer composite electrolytes: basics, fabrications, challenges and future perspectives / Khan S. et al. // *Reviews in Inorganic Chemistry*. – 2024. – V. 44, № 3. – P. 347–375.
7. Bobina E. Novel in situ synthesis of copper oxide nanoparticles in epoxy network: kinetics, composite mechanical and dielectric properties / Bobina E. et al. // *Karbala International Journal of Modern Science*. – 2024. – V. 10. – P. 277–285.
8. Третьяков Ю. Д. Синтез функциональных нанокомпози́тов на основе твердофазных нанореакторов / Ю.Д. Третьяков, А.В. Лукашин, А.А. Елисеев // *Успехи химии*. – АНО организация Издательство журнала Успехи химии, 2004. – Т. 73, № 9. – С.974–998.
9. Tsuzuki T. Mechanochemical synthesis of metal oxide nanoparticles / T. Tsuzuki // *Communications Chemistry*. Nature Publishing Group UK London, 2021. – V.4, № 1. – P. 143.
10. Tso C. Stability of metal oxide nanoparticles in aqueous solutions / C. Tso et al. // *Water science and technology*. IWA Publishing, 2010. – V. 61, № 1. – P. 127–133.
11. Lavrent'ev M. M. One-dimensional inverse problems of mathematical physics.
12. Kulikovskiy A. A Kernel for Calculating PEM Fuel Cell Distribution of Relaxation Times / A. Kulikovskiy // *Front. Energy Res*. – 2021. – V.9. – P. 780473.
13. Simon Araya S. Fault Characterization of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack / S. Simon Araya et al. // *Energies*. – 2019. – V. 12, № 1. – P. 152.

14. Nasarre Artigas S. Use of distribution of relaxation times analysis as an in-situ diagnostic tool for water management in PEM fuel cells applications / S. Nasarre Artigas, H. Xu, F. Mack // *Journal of Power Sources*. – 2024. – V. 600. – P. 234179.
15. Huang H. Water Management Fault Diagnosis by Operando Distribution of Relaxation Times Analysis for Anion Exchange Membrane Fuel Cells / H. Huang et al. // *Advanced Science*. – 2025. – V. 12, № 28. – P. 2505304.
16. Martemianov S. Electrochemical noise analysis of a PEM fuel cell stack under long-time operation: noise signature in the frequency domain / S. Martemianov et al. // *J Solid State Electrochem*. – 2020. – V. 24, № 11–12. – P. 3059–3071.
17. Martemianov S. Electrochemical noise diagnostics of PEM fuel cell stack for micro-cogeneration application / S. Martemianov et al. // *J Solid State Electrochem*. – 2021. – V. 25, № 12. – P. 2835–2847.
18. Maizia R. Proton exchange membrane fuel cell diagnosis by spectral characterization of the electrochemical noise / Maizia R. et al. // *Journal of Power Sources*. – 2017. – Maizia R. и др. V. 342. – P. 553–561.
19. Szewczyk A. Assessment of Fuel Cells' State of Health by Low-Frequency Noise Measurements / Szewczyk A. et al. // *Energies*. – 2021. – V. 14, № 24. – P. 8340.
20. Cooper K. R. Electrical test methods for on-line fuel cell ohmic resistance measurement / K. R. Cooper, M. Smith // *Journal of Power Sources*. – 2006. – V. 160, № 2. – P. 1088–1095.
21. Smith P. J. et al. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Transient Load Response: E-19964. – 2021.
22. Yang L. et al. A review on thermal management in proton exchange membrane fuel cells: Temperature distribution and control / L. Yang et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2023. – V. 187. – P. 113737.
23. Yakubu A. U. A comprehensive review of primary cooling techniques and thermal management strategies for polymer electrolyte membrane fuel cells PEMFC / A. U. Yakubu et al. // *Heliyon*. 2024. – V. 10, № 19. – P. e38556.
24. Muck N. Integrating Fiber Sensing for Spatially Resolved Temperature Measurement in Fuel Cells / N. Muck, C. David, T. Knöri // *Energies*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024. – V. 17, № 1. – P. 16.
25. Mihailov S.J. Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments: 2 / S.J. Mihailov // *Sensors*. Molecular Diversity Preservation International, 2012. – V. 12, № 2. – P. 1898–1918.
26. David N.A. In-fibre Bragg grating sensors for distributed temperature measurement in a polymer electrolyte membrane fuel cell / N.A. David et al. // *Journal of Power Sources*. – 2009. – V. 192, № 2. – P. 376–380.
27. David N. In situ measurement of relative humidity in a PEM fuel cell using fibre Bragg grating sensors / N. David et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – V. 39, № 31. – P. 17638–17644.
28. Hasselø M. H. In-situ optical fiber measurements of the temperature within a proton exchange membrane fuel cell / M.H. Hasselø, O.S. Burheim, J.J. Lamb // *International Journal of Sustainable Energy*. – 2025. – V. 44, № 1. – P. 2492654.
29. Principles of Distributed Temperature Sensing [Электронный ресурс] // Silixa Ltd. URL: <https://silixa.com/principles-of-distributed-temperature-sensing/> (дата обращения: 04.10.2025).
30. Distributed Fiber Optic Temperature Sensor [Электронный ресурс]. URL: <https://www.yokogawa.com/us/solutions/products-and-services/measurement/field-instruments-products/fiber-optic-sensor/> (дата обращения: 04.10.2025).
31. Pieracci A. A Novel Approach to Raman Distributed Temperature-Sensing System for Short-Range Applications / Pieracci A. et al. // *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024. – V. 24, № 9. – P. 2669.
32. Coscetta A. Distributed Dynamic Strain Sensing Based on Brillouin Scattering in Optical Fibers / A. Coscetta, A. Minardo, L. Zeni // *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. – V. 20, № 19. – P. 5629.

33. Huang L. Single-end hybrid Rayleigh Brillouin and Raman distributed fibre-optic sensing system / L. Huang // *gxjzz.* – 2023. – V.4, № 3. – P. 1.
34. Hartings M. Humidity responsive photonic sensor based on a carboxymethyl cellulose mechanical actuator / Hartings M. et al. // *Sensors and Actuators B: Chemical.* – 2018. – V. 265. – P. 335–338.
35. Yassin M. H. Fiber Bragg grating (FBG)-based sensors: a review of technology and recent applications in structural health monitoring (SHM) of civil engineering structures / Yassin M. H. et al. // *Discov Civ Eng.* – 2024. – V.1, № 1. – P. 151.
36. Luyckx G. Strain Measurements of Composite Laminates with Embedded Fibre Bragg Gratings: Criticism and Opportunities for Research / G. Luyckx et al. // *Sensors. Molecular Diversity Preservation International*, 2011. – V. 11, № 1. – P. 384–408.
37. Darmadi I. High-Performance Nanostructured Palladium-Based Hydrogen Sensors—Current Limitations and Strategies for Their Mitigation / I. Darmadi, F. A. A. Nugroho, C. Langhammer // *ACS Sens.* American Chemical Society, 2020. – V.5, № 11. – P. 3306–3327.
38. Bannenberg L., Schreuders H., Dam B. Tantalum-Palladium: Hysteresis-Free Optical Hydrogen Sensor Over 7 Orders of Magnitude in Pressure with Sub-Second Response.
39. Sousanis A., Biskos G. Thin Film and Nanostructured Pd-Based Materials for Optical H₂ Sensors: A Review / A. Sousanis, G. Biskos // *Nanomaterials.* Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. – V. 11, № 11. – P. 3100.

INTEGRATED ELECTROCHEMICAL AND FIBER-OPTIC DIAGNOSTICS OF COMPOSITE POLYMER ELECTROLYTES

V.Yu. Kazarov^{1,2}, R.Sh. Khastiev¹, A.A. Kamaleeva¹, B.I. Valeev¹, T.A. Agliullin¹

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI
10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation

²JSC "Stella-k"
room 4, 37g, Lipatova str., Kazan, Russian Federation

Abstract. This paper considers the complex problem of increasing the autonomy and service life of electrochemical energy sources (ECS) in unmanned transport systems through the use of composite polymer electrolytes (CPE) with in situ synthesized inorganic nanoparticles. The problems of ensuring a uniform filler distribution in a polymer matrix, the formation of particles with a developed surface area, and controlled synthesis in minireactors created within the polymer are discussed. It is shown that a combination of integrated self-diagnostic methods is required to substantiate synthesis modes and assess degradation processes in fuel cells. The capabilities of electrochemical impedance spectroscopy using relaxation time distribution, fluctuation analysis, and transient analysis for identifying ECI aging mechanisms in real time are analytically examined. The potential of fiber-optic sensor systems based on fiber Bragg gratings and distributed sensing methods for obtaining spatially resolved maps of temperature, deformation, and humidity inside fuel cells is analyzed. The lack of unified protocols for synchronous acquisition and cross-calibration of impedance and fiber-optic diagnostic data is demonstrated. Requirements for an integrated diagnostic system for the control and measurement of electrical components in the electrical engineering industry (EHI) are formulated. This system ensures early detection of degradation, increased reliability, and informed design of power plants for unmanned vehicles.

Keywords: composite polymer electrolytes; electrochemical energy sources; proton-exchange fuel cells; electrochemical impedance spectroscopy; relaxation time distribution; electrochemical noise and transients; fiber optic sensors; fiber Bragg gratings; frequency-domain optical reflectometry; distributed temperature and humidity monitoring; unmanned transport systems.

Статья представлена в редакцию 05 декабря 2025 г.