

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.518.5+004.75

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-4-10

### Оценка возможности реализации распределенных систем диагностики водородных топливных элементов с использованием локальных и глобальных телекоммуникационных сетей

*Е. С. Денисов*, кандидат технических наук, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия  
*Р. Р. Енилиев*, магистрант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия  
*Н. Р. Гайсин*, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия  
*И. Д. Шафигуллин*, аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

*Разработка эффективных методов и средств диагностики водородных топливных элементов в процессе их эксплуатации является актуальной задачей, поскольку их внедрение позволит повысить энергетические характеристики и стабильность работы путем обнаружения некорректных режимов работы и неисправностей на ранних этапах развития. Данная задача может решаться путем использования различных подходов, основанных на исследовании импедансных, релаксационных или флуктуационно-шумовых характеристик. Все указанные методы требуют реализации достаточно сложных вычислительных процедур и накопления достаточно большого количества статистических данных, что делает затруднительным реализацию устройств диагностики на недорогих встраиваемых микропроцессорных средствах. Для преодоления этого недостатка в данной работе предложено использовать распределенные системы диагностики с высокопроизводительными серверными устройствами, связанными с локальными модулями посредством глобальных или локальных телекоммуникационных сетей. Такая реализация позволит существенно упростить требования к локальным диагностическим модулям и удешевить их, однако при этом возникает вопрос об оперативности принятия диагностических решений такими системами. В работе проведено исследование задержек принятия диагностических и управляющих решений при использовании удаленных серверных устройств для обработки сигналов. Показано, что применение подобных систем обеспечивает возможность обеспечения задержек менее одной секунды даже при использовании межконтинентальных линий связи. Следует отметить, что в приложениях, критичных к временным задержкам, следует уменьшать расстояние между клиентскими и серверными системами. Преимуществами предложенного варианта реализации системы диагностики электрохимических источников энергии является возможность упрощения локальных систем измерения, устанавливаемых на отдельные источники, возможность ускорения обработки сигналов посредством применения более производительных вычислительных средств и накопления статистических данных.*

**Ключевые слова:** техническая диагностика, распределенные системы, релаксационный процесс, модуляция нагрузки, встроенные системы.

#### Введение

Топливные элементы с твердым полимерным электролитом (ТЭПЭ) являются одним из наиболее перспективных элементов генерации электричества в рамках быстро развивающейся области водородной энергетики. Такие элементы имеют целый ряд существенных преимуществ, таких как отсутствие движущихся механических частей, высокие значения КПД и удельной мощности, практически полное отсутствие негативного влияния на окружающую среду в процессе их функционирования. Спектр применений ТЭПЭ очень широк: от мощных стационарных энергетических установок и автомобилей до небольших мобильных устройств и портативной электроники. Существенным недостатком таких устройств является необходимость использования сложных устройств автоматического управления для поддержания высоких энергетических характеристик и обеспечения стабильной работы, а также специализированных систем контроля и диагностики для об-

наружения возможных неисправностей на ранних этапах их развития. К наиболее информативным методам контроля технического состояния ТЭПЭ следует отнести импедансную спектрометрию в частотной [1, 2] и временной [3] областях, анализ флуктуационно-шумовых [4–9] и релаксационных [10] процессов. В большинстве указанных выше методов из-за сложных физико-химических процессов, определяющих работу ТЭПЭ, требуются вычислительно сложные алгоритмы обработки измерительной информации. Это условие приводит к необходимости использования достаточно производительных вычислительных средств, имеющих высокую стоимость и энергопотребление. Для преодоления этого недостатка рассмотрим использование вычислительных устройств удаленных серверных устройств [11–13], взаимодействие с которыми осуществляется через локальные и глобальные телекоммуникационные сети. Основным вопросом, которому посвящена данная работа, является оценка временных задержек,

связанных с обработкой сигналов на удаленных устройствах.

**Метод релаксационной диагностики водородных топливных элементов при модуляции нагрузки**

Рассмотрим анализ задержек, возникающих при использовании удаленного сервера для принятия диагностических и управляющих решений для ТЭПЭ на примере одного из наиболее перспективных методов релаксационной диагностики [14]. Интерес к данному методу, основанному на анализе релаксационных процессов, вызванных скачкообразными изменениями нагрузки, обусловлен тем, что он

может быть реализован на достаточно простом и недорогом аппаратном обеспечении, не требующем мощных и высокоточных формирователей зондирующих сигналов.

Однако этот метод требует достаточно сложных процедур цифровой обработки измерительных сигналов, что делает целесообразным реализацию вычислений на удаленных серверных устройствах. Суть метода заключается в анализе релаксационного отклика электрохимической системы на изменение электрической нагрузки (рис. 1). Возможные динамические электрические модели можно найти в работах [15].

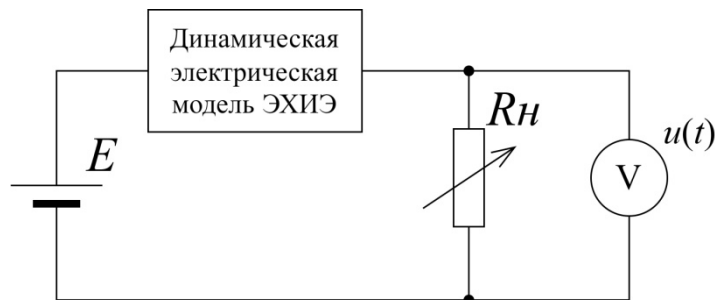


Рис. 1. Упрощенная схема формирования релаксационного отклика электрохимического источника энергии (ЭХИЭ) при изменении нагрузки

Fig.1. Simplified scheme for the electrochemical power source (EPS) relaxation response generation caused by load variation

Предлагаемый метод контроля технического состояния электрохимических источников энергии, описанный в работах [16], реализуется на основе алгоритма, включающего в себя пять основных этапов:

1. Формирование релаксационного отклика ТЭПЭ  $u_{ТЭ}(t)$  путем скачкообразного изменения нагрузки, например при коммутации дополнительного сопротивления  $\Delta R$  и измерение этого отклика.

2. Идентификация параметров математической модели релаксационного процесса. Для электрической RC-модели второго порядка релаксационный процесс описывается следующим уравнением:

$$u_{\text{нлт}}(t) = U_L + U_1 e^{-\alpha t} + U_2 e^{-\beta t}, \quad (1)$$

где  $U_L = F$ ,  $U_1 = -A \cdot R_1$ ,  $U_2 = -A \cdot R_3$ ,  $\alpha = C$ ,  $\beta = D$ .

3. Определение резистивных параметров эквивалентной электрической схемы (рис. 1) путем решения системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_{11}R_1 + \alpha_{12}R_2 + \alpha_{13}R_3 = \beta_1; \\ \alpha_{21}R_1 + \alpha_{22}R_2 + \alpha_{23}R_3 = \beta_2; \\ \alpha_{31}R_1 + \alpha_{32}R_2 + \alpha_{33}R_3 = \beta_3, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\alpha_{11} = -E(R_{H2} - R_{H1})$ ;  $\alpha_{12} = AR_{\Sigma 1}R_{\Sigma 2}$ ;  $\alpha_{13} = 0$ ;  $\beta_1 = -AR_{\Sigma 1}R_{\Sigma 2}R_{H2}$ ;  $\alpha_{21} = 0$ ;  $\alpha_{22} = CR_{\Sigma 1}R_{\Sigma 2}$ ;  $\alpha_{23} = -E(R_{H2} - R_{H1})$ ;  $\beta_2 = -CR_{\Sigma 1}R_{\Sigma 2}R_{H2}$ ;  $\alpha_{31} = 1$ ;  $\alpha_{32} = 1$ ;  $\alpha_{33} = 1$ ;  $\beta_3 = R_{\Sigma 1} - R_{H1}$ ;  $R_{H1}$  и  $R_{H2}$  – сопротивления нагрузки до и после коммутации соответственно;  $R_{\Sigma 1} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{H1}$ ;  $R_{\Sigma 2} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{H2}$ .

4. Оценка емкостных элементов двойного электрического слоя:

$$C_1 = \frac{1}{BR_1}; C_2 = \frac{1}{DR_3}. \quad (3)$$

5. Обнаружение критических режимов работы при отклонении одного или нескольких параметров от диапазона ожидаемых значений.

Рассмотренный алгоритм включает в себя этапы 2–4, сложные с вычислительной точки зрения для реализации на стандартных микропроцессорных средствах. В реальности для ТЭПЭ требуется решать эту же задачу с использованием более сложной модели Рэндлса – Эршлера, что делает рассматриваемые этапы алгоритма еще более вычислительно затратными. Кроме того, эффективная реализация этапа 5 требует накопления большого объема статистики для различных режимов работы и моделей ТЭПЭ, что требует наличия памяти, превышающей возможности недорогих микропроцессорных систем. Ввиду этих соображений можно считать оптимальной реализацию этапов 2–5 на удаленных серверных устройствах, обладающих необходимыми запасами вычислительных ресурсов и памяти.

Предложенный подход также оправдан экономически, поскольку позволит существенно сократить требования к аппаратному обеспечению локальных устройств распределенной системы диагностики ТЭПЭ.

Рассмотрим типовую структуру соответствующего локального устройства (рис. 2), которая включает в себя следующие основные элементы: устройство управления нагрузкой (УУН), канал измерения напряжения (КИН), система управления рабочими режимами (СУРР), микропроцессорная система (МПС),

приемопередатчик (ПП). Рассматриваемое локальное устройство работает следующим образом.

После формирования УУН скачкообразного изменения нагрузки КИН измеряет релаксационный отклик  $u_{TЭПЭ}(t)$  ТЭПЭ. Сигнал  $u_{TЭПЭ}(t)$  обрабатывается в МПС и вместе с информацией о текущих режимах работы ТЭПЭ отправляется на удаленный сервер

через глобальную или локальную телекоммуникационную сеть. После обработки измерительной информации на сервере приходит управляющий сигнал, на основании которого принимается решение о продолжении, приостановке или изменении режимов работы ТЭПЭ.

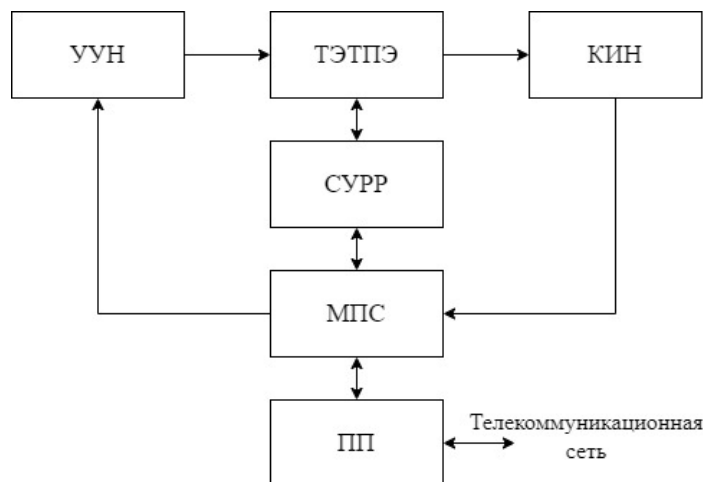


Рис. 2. Упрощенная структурная схема локальных устройств распределенной системы диагностики ТЭПЭ

Fig. 2. Simplified block diagram for local devices of PEMFC distributed diagnostic system

Поскольку режимы работы ТЭПЭ могут изменяться достаточно быстро, возникает вопрос, насколько оперативно можно оценивать техническое состояние и формировать управляющие воздействия с учетом задержек в телекоммуникационных сетях и обработки информации сервером.

Для этой цели была разработана процедура оценки задержек формирования управляющих сигналов и проведено их экспериментальное исследование.

#### Процедура оценки задержек формирования управляющих сигналов

Рассматриваемая распределенная система диагностики электрохимических источников энергии включает в себя два основных элемента: локальный измерительный модуль и удаленный сервер. Рассмотрим их работу более подробно.

Локальный измерительный модуль работает следующим образом:

1. Формируется сигнал скачкообразного изменения нагрузки.
2. Проводится измерение релаксационного отклика.
3. Формируется запрос на удаленный сервер, включающий в себя информацию о воздействии и релаксационном отклике.
4. Фиксируется момент отправки запроса на сервер.
5. Отправляется запрос на удаленный сервер.
6. Принимается ответ от удаленного сервера.
7. Фиксируется момент приема ответа от удаленного сервера.

8. Принимается то или иное диагностическое решение на основе результатов аппроксимации релаксационного процесса.

9. Проверяется, нужна ли остановка модуля. Если да, работа модуля останавливается. Если нет, возврат к п. 1.

Удаленный сервер работает следующим образом:

1. Проверяется, получен ли запрос. Если да, переход к п. 2. Если нет, возврат к п. 1.
2. Фиксируется момент приема запроса удаленным сервером.
3. Извлекаются данные из запроса.
4. Осуществляется идентификация параметров модели путем аппроксимации релаксационной характеристики.
5. Формируется ответ сервера.
6. Фиксируется момент отправки сообщения сервером.
7. Отправляется ответ сервера на локальный измерительный модуль.
8. Проверяется, нужна ли остановка модуля. Если да, работа модуля останавливается. Если нет, возврат к п. 1.

Таким образом, в передаваемом сообщении содержится информация по меньшей мере о четырех моментах времени: отправка запроса клиентом, прием серверным устройством запроса, отправка обработанного сообщения сервером и прием ответа локальным устройством. Это позволяет непосредственно оценивать любые временные задержки, возникающие в процессе функционирования

соответствующих распределенных диагностических систем.

### Экспериментальная оценка задержек формирования управляющих сигналов

На основании описанной выше процедуры оценки задержек формирования управляющих сигналов было проведено соответствующее экспериментальное исследование для четырех различных каналов передачи сообщений: «локальная сеть», «Казань-Казань», «Казань-Ташкент», «Казань-Канзас».

Такое распределение позволяет нам оценить задержки в сетях различного масштаба: локальной, городской, континентальной, межконтинентальной. При проведении измерений сервер на базе процессора AMD Ryzen 5 3500X 6-Core Processor с частотой 3,59 ГГц, установленного на материнской плате B450MS2H от Gigabyte Technology Co., Ltd., с 16 ГБ оперативной памяти, размещался в городе Казань. Сервер работал под управлением 64-разрядной операционной системы Windows 10. Клиентские приложения, запускаемые на различных компьютерах, располагались в отмеченных выше конечных точках различных каналов передачи сообщений.

Клиент передавал сообщение о сигнале релаксационного отклика и рабочих режимах ТЭПЭ объемом 31 кБ. Сервер проводил идентификацию параметров и оценку параметров, характеризующих техническое состояние электрохимической системы.

Результаты оценки времени задержки ответа сервера для анализируемых четырех каналов передачи данных показаны в виде гистограмм на рис. 3. Анализ полученных результатов показывает сложный характер распределений временных задержек для всех каналов. Все распределения можно характеризовать как распределения с «тяжелыми хвостами», то есть наличием редко встречающихся больших величин временных задержек. Большие временные задержки были убраны при построении гистограмм для повышения их наглядности.

Кроме того, все каналы, кроме локальной сети, демонстрируют полимодальный характер распределений, что, скорее всего, связано с наличием нескольких альтернативных маршрутов доставки сообщений. При этом следует также отметить, что задержки исследуемых каналов лежат в различных временных масштабах от десятков миллисекунд до нескольких секунд.

Численные статистические оценки времени задержки сообщений представлены в табл. 1. Анализ показывает, что наименьшие минимальные величины задержек были зафиксированы для локальной сети и линии связи «Казань-Казань», тогда как по мере увеличения расстояния между клиентом и сервером растет минимальная задержка до величин 140 мс («Казань-Ташкент») и 361 мс («Казань-Канзас»).

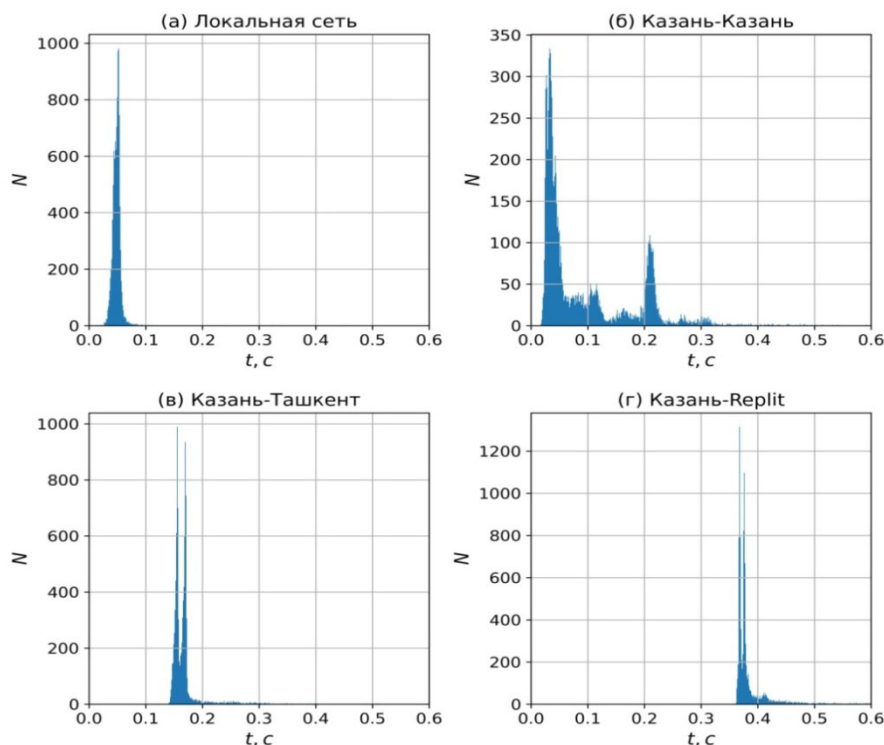


Рис. 3. Гистограммы распределения задержек передачи данных для четырех каналов передачи данных: «Локальная сеть» (а), «Казань-Казань» (б), «Казань-Ташкент» (в), «Казань-Канзас» (г)

Fig. 3. Distribution histograms of datatransmission delays for four different datatransmission channels: “Localnetwork” (a), “Kazan-Kazan” (б), “Kazan – Tashkent” (в), “Kazan – Kansas” (г)

Медианное значение задержек близко для локальной и внутригородской сети (49 и 50 с, соот-

ветственно) и также растет по мере увеличения расстояния между клиентом и сервером.

Интересным фактом, является близость квантильных оценок (0,95 и 0,99) для внутригородской («Казань-Казань») и международной («Казань-Ташкент») сетей. Этот факт может быть объяснен

наличием меньшего количества реализаций с большими величинами задержек из-за более стабильной линии связи или недостаточного объема статистики.

#### Оценки статистических характеристик задержек передачи данных

##### Estimates of statistical characteristics for data transmission delays

№	Измерение	Статистические метрики задержек, с				
		Минимальное	Среднее	Медианное	Квантиль 0,95	Квантиль 0,99
1.	Локальная сеть	0,019	0,050	0,049	0,057	0,076
2.	Казань – Казань	0,017	0,146	0,050	0,245	0,374
3.	Казань – Ташкент	0,140	0,176	0,163	0,223	0,349
4.	Казань – Канзас	0,361	0,391	0,375	0,477	0,661

В целом для всех типов оценок характерно увеличение задержек по мере роста расстояния. Можно утверждать, что даже при использовании очень удаленных межконтинентальных линий связи задержка с вероятностью 0,99 не превышает величину 0,661 с. Для повышения оперативности принятия решений требуется уменьшение расстояния между серверным и локальным устройствами.

#### Заключение

В работе приведены оценки статистических параметров задержек, возникающих при использовании удаленного сервера при принятии диагностических решений на основе анализа релаксационных характеристик. В качестве примера приведены результаты оценки для удаленной обработки сигналов системы на основе линейной RC-модели второго порядка.

Показано, что в 99 % случаев для локальной сети диапазон задержек лежит в пределах 19–76 мс, для внутригородской сети «Казань-Казань» – 17–349 мс; для международной сети «Казань-Ташкент» – 140–349 мс; а межконтинентальной сети «Казань-Канзас» – 361–661 мс. Эти результаты показывают достаточно высокую оперативность принятия диагностических и управляющих решений, не превосходящих 1 с в большинстве случаев.

Для повышения оперативности принятия решений требуется сократить расстояния между клиентскими и серверными устройствами. Анализ рассмотренных в данной статье задержек показывает достаточно высокую скорость обмена данными между «клиентом» и «сервером» для большинства применений диагностических систем электрохимических источников энергии.

С экономической точки зрения применение таких систем позволит уменьшить цену каждой единицы локального оборудования. Поэтому целесообразно рекомендовать к использованию подобные распределенные системы измерения, контроля и диагностики.

#### Библиографические ссылки

1. A review of online electrochemical diagnostic methods of on-board proton exchange membrane fuel cells / X. Zhang, T. Zhang, H. Chen, Y. Cao // *Applied Energy*. 2021. Vol. 286. P. 116481.

2. Rubio M.A., Urquia A., Dormido S. Diagnosis of performance degradation phenomena in PEM fuel cells // *International*

*Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35, No. 7. P. 2586-2590.

3. Fast measurement of proton exchange membrane fuel cell impedance based on pseudo-random binary sequence perturbation signals and continuous wavelet transform/ A. Debenjak, P. Boskoski, B. Musizza, J. Petrovic // *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 254. P. 112-118.

4. Spectral method for PEMFC operation mode monitoring based on electrical fluctuation analysis / E. Denisov, Y.K. Evdokimov, R.R. Nigmatullin, S. Martemianov // *Scientia Iranica*. 2017. Vol. 24. No. 3. P. 1437-1447.

5. Proton exchange membrane fuel cell diagnosis by spectral characterization of the electrochemical noise/ R. Maizia, A. Dib, A. Thomas, S. Martemianov // *Journal of Power Sources*. 2017. Vol. 342. P. 553-561.

6. Statistical short-time analysis of electrochemical noise generated within a proton exchange membrane fuel cell / R. Maizia, A. Dib, A. Thomas, S. Martemianov // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2018. Vol. 22. P. 1649-1660.

7. Астафьев Е. А. Сравнение различных подходов в анализе электрохимических шумов на примере водородно-воздушного топливного элемента // *Электрохимия*. 2020. Т. 56, № 2. С. 167–174.

8. Electrochemical noise of a hydrogen-air polymer electrolyte fuel cell operating at different loads / E. A. Astafev, A. E. Ukshe, E. V. Gerasimova, Yu.A. Dobrovolsky, R.A. Manzhos // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2018. Vol. 22. No. 6. P. 1839-1849.

9. Failure mode diagnosis in proton exchange membrane fuel cells using local electrochemical noise / M.A. Rubio, D.G. Sanchez, P. Gazdzicki, K.A. Friedrich, A. Urquia // *Journal of Power Sources*. 2022. Vol. 541. P. 231-582.

10. Fast time domain identification of electrochemical systems at low frequencies using fractional modeling / A. Nasser-Eddine, B. Huard, J.-D. Gabano, T. Poinot, S. Martemianov, A. Thomas // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2020. Vol. 862. P. 113957.

11. Евдокимов Ю. К., Салахова А. Ш. Экспериментальное исследование и имитационная модель динамики системы дистанционного управления экспериментом в многопользовательском режиме // *Нелинейный мир*. 2011. Т. 9, № 8. С. 507–514.

12. Салахова А. Ш., Шахтурин Д. В. Фрактальные свойства динамики обслуживания в телекоммуникационной системе дистанционного управления экспериментом // *Нелинейный мир*. 2010. Т. 8, № 6. С. 376–383.

13. Курсанов А. Ю., Салахова А. Ш. Экспериментальное исследование статистической динамики системы дистанционного управления экспериментом в многопользовательском режиме // *Нелинейный мир*. 2009. Т. 7, № 5. С. 405–409.

14. 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, Т. П. Никишин // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 7(301). С. 36–43.

15. AC impedance technique in PEM fuel cell diagnosis-A review / X. Yuan, H. Wang, J. Colin Sun, J. Zhang // International Journal of Hydrogen Energy. 2007. Vol. 32. No. 17. P. 4365-4380.

16. Никишина Г. В., Денисов Е. С. Диагностика электрохимических источников тока на основе анализа переходных процессов, вызванных изменениями нагрузки // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 2. С. 105–115.

### References

1. Zhang X., Zhang T., Chen H., Cao Y. [A review of online electrochemical diagnostic methods of on-board proton exchange membrane fuel cells]. *Applied Energy*, 2021, Vol. 286, pp. 116481.

2. Rubio M.A., Urquia A., Dormido S. [Diagnosis of performance degradation phenomena in PEM fuel cells]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, No. 7, pp. 2586-2590.

3. Debenjak A., Boskoski P., Musizza B., Petrovic J. [Fast measurement of proton exchange membrane fuel cell impedance based on pseudo-random binary sequence perturbation signals and continuous wavelet transform]. *Journal of Power Sources*, 2014, Vol. 254, pp. 112-118.

4. Denisov E.S., Evdokimov Y.K., Nigmatullin R.R., Martemianov S. [Spectral method for PEMFC operation mode monitoring based on electrical fluctuation analysis]. *ScientiaIranica*, 2017, vol. 24, No. 3, pp. 1437-1447.

5. Maizia R., Dib A., Thomas A., Martemianov S. [Proton exchange membrane fuel cell diagnosis by spectral characterization of the electrochemical noise]. *Journal of Power Sources*, 2017, Vol. 342, pp. 553-561.

6. Maizia R., Dib A., Thomas A., Martemianov S. [Statistical short-time analysis of electrochemical noise generated within a proton exchange membrane fuel cell]. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2018. Vol. 22. P. 1649-1660.

7. Astafyev E. A. [Comparison of different approaches in the analysis of electrochemical noise using the example of a hydro-

gen-air fuel cell]. *Elektrokhimiya*, 2020. Vol. 56, no. 2, pp. 167-174 (in Russ.).

8. Astafev E.A., Ukshe A.E., Gerasimova E.V., Dobrovolsky Yu.A., Manzhos R.A. [Electrochemical noise of a hydrogen-air polymer electrolyte fuel cell operating at different loads]. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2018. Vol. 22, no. 6, pp. 1839-1849.

9. Rubio M.A., Sanchez D.G., Gazdzicki P., Friedrich K.A., Urquia A. [Failure mode diagnosis in proton exchange membrane fuel cells using local electrochemical noise]. *Journal of Power Sources*. 2022. Vol. 541, pp. 231-582.

10. Nasser-Eddine A., Huard B., Gabano J.-D., Pointot T., Martemianov S. [A. Thomas Fast time domain identification of electrochemical systems at low frequencies using fractional modeling]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2020, Vol. 862, P. 113-957.

11. Evdokimov Y.K., Salakhova A.Sh. [Experimental study and simulation model of the dynamics of a remote control system for an experiment in multi-user mode]. *Nelineyniy mir*. 2011. Vol. 9, no. 8, pp. 507-514 (in Russ.).

12. Salakhova A.Sh., Shakhurin D.V. [Fractal properties of service dynamics in a telecommunication system for remote control of an experiment]. *Nelineyniy mir*. 2010. Vol. 8, no. 6, pp. 376-383 (in Russ.).

13. Kirsanov A.Y., Salakhova A.Sh. [Experimental study of the statistical dynamics of a remote control system for an experiment in multi-user mode]. *Nelineyniy mir*. 2009. Vol. 7, no 5, pp. 405-409 (in Russ.).

14. Denisov E.S., Nikishina G.V., Eniliev R.R., Nikishin T.P. [Features of the implementation of the method for monitoring the technical condition of lithium current sources based on the analysis of relaxation processes caused by load changes]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2023. Vol. 26, no. 7 (301), pp. 36-43 (in Russ.).

15. Yuan X., Wang H., Colin Sun J., Zhang J. [AC impedance technique in PEM fuel cell diagnosis-A review]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, vol. 32, No. 17, pp. 4365-4380.

16. Nikishina G.V., Denisov E.S. [Diagnostics of electrochemical current sources based on analysis of transient processes caused by load changes]. *Vestnik KGTU im. A. N. Tupoleva*. 2021. Vol. 77, no. 2, pp. 105-115 (in Russ.).

\* \* \*

### Assessing the Possibility of Implementing Distributed Diagnostic Systems for Hydrogen Fuel Cells Using Local and Global Telecommunication Networks

E. S. Denisov, PhD in Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI», Kazan, Russia

R. R. Eniliev, Master's Degree Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI», Kazan, Russia

N. R. Gaisin, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI», Kazan, Russia

I. D. Shafigullin, Post-graduate, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI», Kazan, Russia

*The development of effective methods and means for diagnosing hydrogen fuel cells during their operation is an urgent task, since their implementation will improve the energy characteristics and stability of operation by detecting incorrect operating modes and malfunctions at the early stages of development. This problem can be solved by using various approaches based on the analysis of impedance, relaxation or fluctuation-noise characteristics. All of these methods require the implementation of rather complex computational procedures and the accumulation of fairly large amount of statistical data, which makes it difficult to implement diagnostic devices on inexpensive embedded microprocessor tools. To overcome this drawback, this work proposes the use of distributed diagnostic systems with high-performance server devices connected to local modules via global or local telecommunication networks. Such an implementation will significantly simplify the requirements for local diagnostic modules and reduce their cost, but this raises the question of the efficiency of making diagnostic decisions by such systems. The work carried out, is a*

*study of delays in making diagnostic and control decisions when using remote server devices for signal processing. It has been shown that the use of such systems makes it possible to achieve delays of less than one second even when using intercontinental communication lines. It should be noted that in applications critical to time delays, the distance between the client and server systems should be reduced. The advantages of the proposed implementation of a diagnostic system for electrochemical energy sources are the possibility of simplifying local measurement systems installed on individual sources, the possibility of accelerating signal processing through the use of more productive computing tools and the accumulation of statistical data.*

**Keywords:** technical diagnostics, distributed systems, relaxation processes, load modulation, embedded systems.

Получено: 01.11.23

#### Образец цитирования

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. Д. Шафигуллин // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 1. С. 4–10. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-4-10.

#### For Citation

Denisov E.S., Eniliev R.R., Gaisin N.R., Shafigullin I.D. [Assessing the possibility of implementing distributed diagnostic systems for hydrogen fuel cells using local and global telecommunication networks]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 4-10 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-4-10.