

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 681.518

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.3.455-467>**Системная модель твердополимерного топливного элемента и ее приложение к задачам диагностики и управления рабочими режимами****Е.С. Денисов , Ю.К. Евдокимов***Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия* *genia-denisov@yandex.ru***Аннотация**

Рассмотрены особенности построения систем мониторинга технического состояния водородных топливных элементов по наблюдениям их электрических флуктуаций в режиме функционирования. Описана системная модель твердополимерных топливных элементов, позволяющая выявлять диагностические признаки на основе анализа функциональных зависимостей между воздействующими и выходными сигналами твердополимерных топливных элементов. Показано, что реализация оперативной диагностики возможна только на основе адаптированной малосигнальной системной модели. Рассмотрены вопросы применения электрических флуктуаций топливного элемента для раннего выявления критических режимов работы и формирования управляющих воздействий для их корректировки на примере соблюдения водного баланса в мембранно-электродном блоке. Установлена возможность обнаружения режимов с избыточной и недостаточной увлажненностью на основе анализа спектральных характеристик электрических флуктуаций. Приведены результаты анализа критических режимов и неисправностей твердополимерных топливных элементов, которые могут быть обнаружены с использованием электрических флуктуаций.

Ключевые слова: водородная энергетика, твердополимерный топливный элемент, оперативный контроль, диагностика, электрохимический шум, управление режимами работы, водный баланс, неисправность

Благодарности. Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (Соглашение от 16.12.2024 № 139/2024-ПД).

Для цитирования: Денисов Е.С., Евдокимов Ю.К. Системная модель твердополимерного топливного элемента и ее приложение к задачам диагностики и управления рабочими режимами // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2025. Т. 167, кн. 3. С. 455–467.
<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.3.455-467>.

ORIGINAL ARTICLE

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.3.455-467>

System model of proton-exchange membrane fuel cell and its application in solving the tasks of diagnostics and control of operating modes

E.S. Denisov ✉, Yu.K. Evdokimov

*Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia*✉ genia-denisov@yandex.ru

Abstract

The construction of systems for online monitoring of the technical state of hydrogen fuel cells by analyzing their electrical fluctuations during operation was explored. A system model of proton-exchange membrane fuel cells that considers the relationships between input and output signals as a source of diagnostic information was described. The results show that only an adapted small-signal system model enables effective online diagnostics. The use of electrical fluctuations for early detection of critical operating modes and taking timely corrective control actions was illustrated by maintaining the water balance in a membrane electrode assembly as an example. The possibility of detecting modes with excessive and insufficient humidification based on the analysis of the spectral characteristics of electrical fluctuations was established. The critical modes and faults of solid polymer fuel cells detectable through electrical fluctuations were examined.

Keywords: hydrogen economy, proton-exchange membrane fuel cell, online monitoring, diagnostics, electrochemical noise, operating mode control, water balance, fault

Acknowledgments. This study was supported by the grant from the Tatarstan Academy of Sciences for young Candidate of Sciences degree holders (postdoctoral students) aimed to support them in writing doctoral dissertations, performing research work, and fulfilling professional responsibilities within scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan as part of the State Program of the Republic of Tatarstan “Scientific and technological development of the Republic of Tatarstan” (agreement no. 139/2024-PD dated December 16, 2024).

For citation: Denisov E.S., Evdokimov Yu.K. System model of proton-exchange membrane fuel cell and its application in solving the tasks of diagnostics and control of operating modes. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2025, vol. 167, no. 3, pp. 455–467. <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.3.455-467>. (In Russian)

Введение

Твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ) являются одними из наиболее перспективных элементов будущей водородной энергетики, поскольку они обладают уникальным набором эксплуатационных характеристик: высокая удельная мощность, внешний накопитель топлива и окислителя, твердый электролит, малые массогабаритные характеристики. При реализации источников электрической энергии на основе ТПТЭ возникают технические сложности, связанные с обеспечением необходимой надежности и долговечности. Для коммерчески успешных продуктов требуется обеспечить ресурс сорока тысяч часов для стационарных источников энергии и двадцати тысяч часов для мобильных применений [1].

Надежность ТПТЭ ограничивается двумя основными причинами: неисправностями (деградацией) основных элементов и неправильным управлением рабочих режимов. Минимизация влияния обеих причин возможна при использовании методов оперативной диагностики, позволяющих обнаруживать неисправности и критические режимы работы на начальных этапах их развития.

При решении задачи оперативной диагностики ТПТЭ требуется учитывать комплексный характер физико-химических процессов в мембранно-электродных блоках (МЭБ) и газотранспортных каналах ТПТЭ [2–5]: поддержание водного баланса, доставка реагентов, работа катализатора, холодный старт и др. Кроме того, оперативная диагностическая информация может позволить повысить эффективность управления рабочими режимами ТПТЭ в процессе функционирования.

Для оперативной диагностики ТПТЭ могут применяться методы, использующие слабое возмущение режимов работы [6, 7], например, анализ импедансных и релаксационных характеристик. В последнее десятилетие активно развивается флуктуационно-шумовой метод, показывающий высокую информативность как для отдельных ТПТЭ [8–11], так и их батарей [12]. Отличительной особенностью этого метода является отсутствие возмущения рабочего режима.

В работе рассмотрен вопрос систематизации поиска диагностических признаков и их использования для решения задачи оперативного управления режимами работы ТПТЭ.

1. Системная модель твердополимерного топливного элемента

Для анализа диагностических возможностей сигналов ТПТЭ рассмотрим системную модель ТПТЭ (рис. 1), позволяющую учесть воздействующие факторы и выходные сигналы, характеризующие рабочий режим. В предложенной модели в качестве выходных сигналов используются электрическая мощность P_E , тепловой поток Q_T и скорость образования воды \dot{m}_{H_2O} . Среди факторов, влияющих на работу ТПТЭ, выделим наиболее важные: расход топлива \dot{m}_a и окислителя \dot{m}_c , давление в газотранспортных каналах на анодной P_a и катодной P_c сторонах мембранно-электродного блока, увлажненности водорода H_a и окислителя H_c , температура ячейки T_{FC} и сопротивление нагрузки R_L .

В общем случае выходные сигналы P_E , Q_T и \dot{m}_{H_2O} имеют сложную нелинейную параметрическую зависимость от воздействующих величин:

$$\begin{cases} P_E = f_p(R_L, T_{FC}, \dot{m}_a, \dot{m}_c, P_a, P_c, H_a, H_c); \\ Q_T = f_q(R_L, T_{FC}, \dot{m}_a, \dot{m}_c, P_a, P_c, H_a, H_c); \\ \dot{m}_{H_2O} = f_m(R_L, T_{FC}, \dot{m}_a, \dot{m}_c, P_a, P_c, H_a, H_c). \end{cases} \quad (1)$$

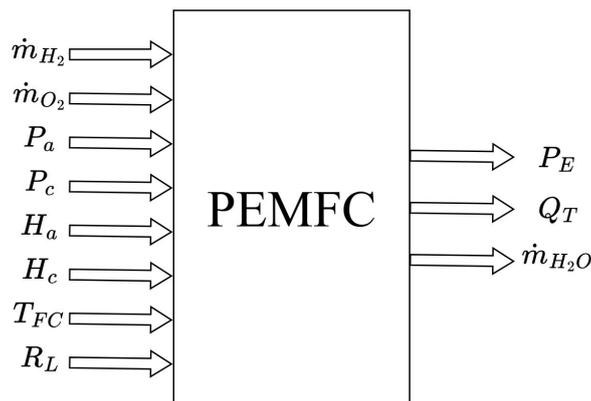


Рис. 1. Системная модель ТПТЭ

Fig. 1. PEMFC system model

Выходной сигнал P_E может выражаться через измеряемые параметры тока I_L и напряжения U_L нагрузки.

Существуют методы контроля и диагностики ТПТЭ, использующие подобные нелинейные зависимости, например, методы диагностики на основе анализа поляризационной кривой. Однако применение соответствующих подходов требует большого количества экспериментальных данных и вывода объекта из рабочего режима, что не позволяет их использовать для оперативной оценки технического состояния ТПТЭ.

С другой стороны, ТПТЭ часто функционируют в режимах работы, близких к стационарным, которые можно охарактеризовать некоторой рабочей точкой

$$\mathbf{x}_0 = (R_L, T_{FC}, \dot{m}_a, \dot{m}_c, P_a, P_c, H_a, H_c)$$

и небольшими отклонениями от нее воздействующих ΔR_L , ΔT_{FC} , $\Delta \dot{m}_a$, $\Delta \dot{m}_c$, ΔP_a , ΔP_c , ΔH_a , ΔH_c и выходных ΔP_E , ΔQ_T и $\Delta \dot{m}_{H_2O}$ параметров. При малых возмущениях нелинейные соотношения (1) могут быть линеаризованы путем использования разложения Тейлора для функции многих переменных и линейной (главной) части ее полного дифференциала в рабочей точке:

$$\mathbf{y} = \mathbf{K}(\mathbf{x}_0, \omega, t)\mathbf{x}, \quad (2)$$

где \mathbf{x} – вектор возмущений воздействующих факторов, \mathbf{K} – матрица малосигнальных коэффициентов передачи, \mathbf{y} – вектор возмущений выходных сигналов ТПТЭ. Малосигнальные коэффициенты передачи показывают связь между малыми изменениями влияющих параметров и вызванными ими изменениями выходных параметров (сигналов) и могут быть определены как частные производные от выходных сигналов по соответствующим влияющим параметрам.

В общем случае из-за нелинейности уравнений (1) и инерционности физико-химических процессов в ТПТЭ малосигнальные коэффициенты передачи \mathbf{K} в соотношении (2) будут зависеть от текущего режима работы \mathbf{x}_0 и частоты ω . Кроме того, эти коэффициенты будут изменяться во времени из-за изменения режимов работы или технического состояния элементов ТПТЭ. Последний факт обуславливает то, что коэффициенты \mathbf{K} потенциально содержат диагностическую информацию о различных элементах ТПТЭ и протекающих в них процессах. Основным преимуществом использования таких коэффициентов для целей диагностирования и контроля является отсутствие необходимости сильного отклонения от текущего режима работы, что обеспечивает возможность их применения в режиме

нормального функционирования ТПТЭ. Формированием слабых воздействий на объект исследования и измерениями отклика обеспечивается возможность получения необходимого объема диагностической информации. При этом каждый из рассматриваемых коэффициентов имеет различную чувствительность к разным неисправностям или некорректным режимам работы, что позволяет использовать их для обнаружения конкретного вида неисправности и оценивать уровень ее развития. В ряде случаев дополнительная селекция возможна по анализу частотных зависимостей, как это делается, например, в электрохимической импедансной спектроскопии [6].

При функционировании любого реального ТПТЭ происходят стохастические изменения (флуктуации) воздействующих параметров, обусловленные действием множества случайных внешних и внутренних факторов. Кроме того, любой электрической системе присущи шумы, имеющие тепловую, дробовую и фликкер-шумовую природу. На электрические шумы и флуктуации влияют режимы работы и техническое состояние ТПТЭ (рис. 2), поэтому они могут рассматриваться как основа новых методов контроля и диагностики. Кроме того, слабые возмущения могут возникать без внешнего вмешательства вследствие естественных флуктуаций параметров, указанных выше:

$$\delta \mathbf{y} = \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}} \delta \mathbf{x} + \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{K}} \delta \mathbf{K} + \delta \mathbf{u}, \quad (3)$$

где $\delta \mathbf{x}$ – вектор флуктуаций воздействующих сигналов, $\delta \mathbf{y}$ – вектор флуктуаций выходных сигналов ТПТЭ, $\delta \mathbf{K}$ – матрица флуктуаций малосигнальных коэффициентов передачи, $\delta \mathbf{u}$ – вектор, обусловленный влиянием собственных шумов ТПТЭ. Отклонение параметров электрических флуктуаций (3) от их номинальных значений может служить признаком изменения режимов работы и/или возникновения неисправностей и использоваться для целей диагностики, позволяющей обнаруживать такие критические режимы работы, как недостаточное или избыточное увлажнение МЭБ, сложности доставки реагентов в область электрохимической реакции, изменение проводимости полимерной мембраны и другие.

2. Электрические флуктуации топливного элемента и их использование для обнаружения критических режимов увлажнения ТПТЭ

При работе любых электрохимических систем, в том числе ТПТЭ, электрические напряжение и ток случайным образом изменяются около средних значений V_0 и I_0 , определяемых текущим режимом работы:

$$V_{FC} = V_0 + u(t), \quad I_{FC} = I_0 + i(t).$$

Такие случайные отклонения $u(t)$ и $i(t)$ будем называть электрическими флуктуациями напряжения и тока соответственно.

Рассмотрим задачу использования электрических флуктуаций для обнаружения неисправностей ТПТЭ на примере критических режимов увлажнения ТПТЭ. Из-за особенностей конструкции и функционирования ТПТЭ борьба с развитием таких режимов является одной из приоритетных задач, поскольку они существенно снижают энергетическую эффективность и стабильность работы. Для выявления соответствующих диагностических признаков электрических флуктуаций будем использовать тот факт, что механизмы их формирования характеризуются различной инерционностью и, соответственно, должны иметь различия в спектральном составе наблюдаемых флуктуаций.

Для экспериментальной оценки спектральной плотности мощности электрических флуктуаций целесообразно использовать метод периодограмм Уэлча, использующий усреднение по ансамблю реализаций флуктуационного сигнала $x^{(k)}[m]$ и позволяющий уменьшить смещение и дисперсию спектральных оценок:

$$S(f) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{1}{U n \Delta t} X^{(k)} X^{(k)'}(f),$$

где m – номер отсчета, k – номер реализации измеренного сигнала, $X^{(k)}(f)$ – дискретное или быстрое преобразование Фурье k -й взвешенной реализации сигнала, U – энергия весовой оконной функции, апостроф – операция комплексного сопряжения. Поскольку сигнал напряжения ТПТЭ содержит постоянную составляющую, для ее устранения использовалась операция детрендинга на основе полинома пятого порядка. Для проверки возможности обнаружения критических режимов увлажнения на основе анализа электрических флуктуаций были обработаны экспериментальные данные, полученные для водород-воздушного ТПТЭ с МЭБ на основе полимерной мембраны Nafion 112 и двух электродов из углеродной ткани площадью 5 см^2 и платиновым катализатором (0.5 мг/см^2). Флуктуационный сигнал напряжения измерялся с использованием модуля сбора данных NI PXI-5922 фирмы National Instruments с разрешением 24 бит при частотах дискретизации до 50 кГц.

Для выявления наличия необходимых диагностических признаков электрических флуктуаций проведены исследования зависимости флуктуаций (рис. 2) от параметров, влияющих на режим увлажнения мембранно-электродных блоков: расхода окислителя, температуры ячейки и температуры катодной системы увлажнения. Анализ полученных результатов показывает, что электрические флуктуации имеют высокую чувствительность к избыточному увлажнению мембранно-электродного блока, что подтверждается, например, возрастанием спектральной плотности мощности флуктуаций при увеличении температуры катодной системы увлажнения реагентов (рис. 2, d) и уменьшении температуры ячейки ТПТЭ (рис. 2, c). По мере приближения к точке росы значительно возрастают флуктуации во всех частотных диапазонах. При этом в эксперименте с изменением температуры ячейки с сохранением постоянной относительной влажности окислителя (рис. 2, b), наоборот, наблюдается возрастание спектральной плотности мощности флуктуаций при увеличении температуры ячейки, что обусловлено снижением увлажненности мембранно-электродного блока. При понижении расхода окислителя (рис. 2, a) до 150 мл/мин флуктуации возрастают в низко- и среднечастотной областях, что может быть связано с недостаточной эффективностью эвакуации воды из мембранно-электродного блока и, соответственно, дополнительным увеличением его увлажненности. Таким образом, можно предположить, что анализ частотных особенностей флуктуационных сигналов позволит выявить признаки для обнаружения критических режимов работы и сформировать рекомендации для систем управления ТПТЭ.

Рассмотрим примеры сигналов (рис. 3), соответствующих недостаточной и избыточной увлажненностям мембранно-электродного блока. При недостаточной увлажненности наблюдаются медленные квазипериодические колебания (рис. 3, a), механизм возникновения которых связан с комплексным взаимодействием процессов получения и эвакуации воды, изменением сопротивления полимерной мембраны и условий протекания диффузии реагентов. При работе ТПТЭ в режиме избыточного увлажнения характер электрических флуктуаций (рис. 3, b) изменяется: возникают короткие импульсы, приводящие к уве-

личению спектральной плотности мощности в высокочастотной области. Для проверки последнего факта увеличения высокочастотных компонент спектральной плотности мощности флуктуационных сигналов было проведено следующее исследование (рис. 4).

В начальный момент времени ТПТЭ функционировал в номинальном режиме, характеризующимся высокой стабильностью характеристик электрических флуктуаций во всех частотных диапазонах (рис. 4, область 1). Затем путем повышения температуры катодной системы увлажнения до 50 °С был установлен режим с избыточным увлажнением, который характеризовался увеличением среднеквадратических значений флуктуаций, соответствующих среднечастотному (1–10 Гц) и высокочастотному (10–100 Гц) диапазонам (рис. 4, область 2). Последующее увеличение температуры катодной системы увлажнения до 70 °С привело к частичному затоплению мембранно-электродного блока и нестабильной работе ТПТЭ (рис. 4, область 3). Индикатором этого процесса является увеличение флуктуаций во всех рассматриваемых частотных диапазонах. Эти выводы также подтверждаются появлением и увеличением интенсивности коротких импульсных сигналов в структуре электрических флуктуаций в области 2 измерений, характеризующейся избыточным увлажнением МЭБ (рис. 4).

Таким образом, можно утверждать, что два критических режима работы ТПТЭ, связанных с увлажнением мембранно-электродного блока, различаются по поведению спектральной плотности мощности в различных диапазонах частот: при сильном увлажнении возрастают флуктуации в высокочастотном диапазоне, а при пересыхании – в низкочастотном.

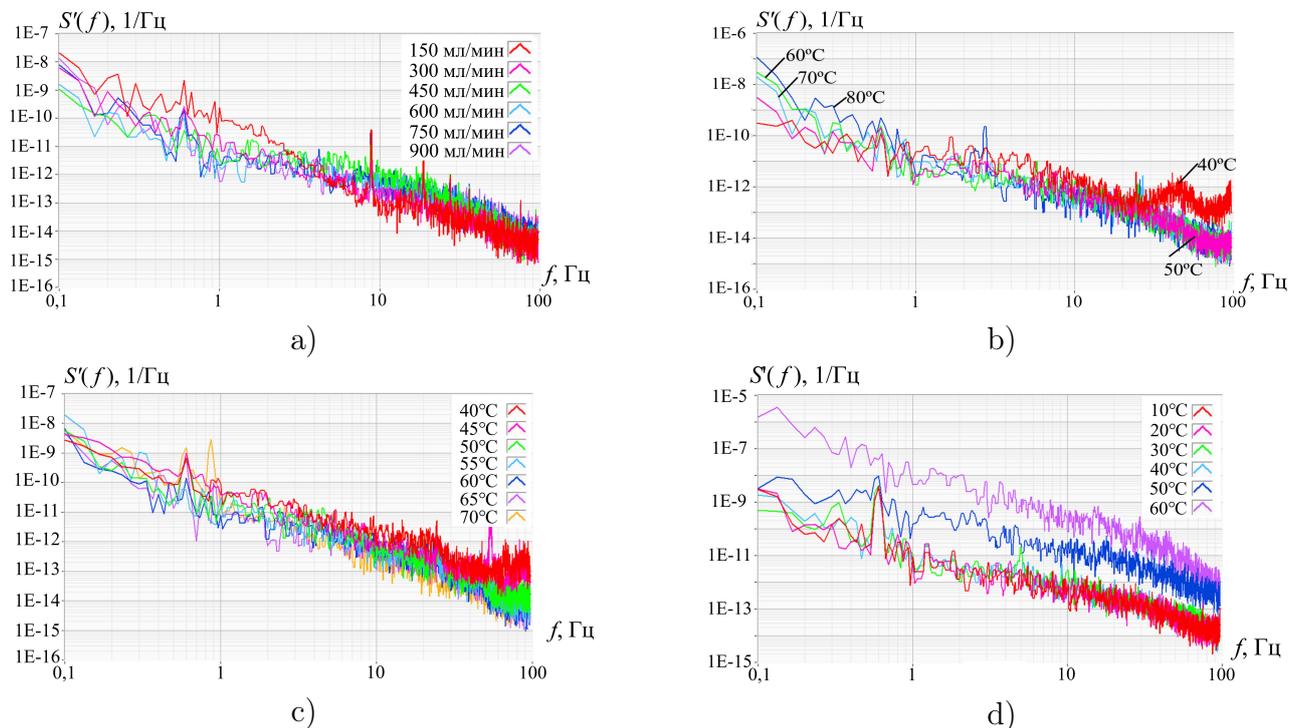


Рис. 2. Зависимость приведенного спектра электрических флуктуаций ТПТЭ от массового расхода окислителя (а), температуры ячейки при постоянной (b) и нефиксированной увлажненности (с) окислителя, температуры катодной системы увлажнения (d)

Fig. 2. Dependence of the reduced spectrum of PEMFC electrical fluctuations on mass flow rate of the oxidizer (a), cell temperature at constant (b) and non-fixed humidification (c) of the oxidizer, and temperature of the cathode humidification system (d)

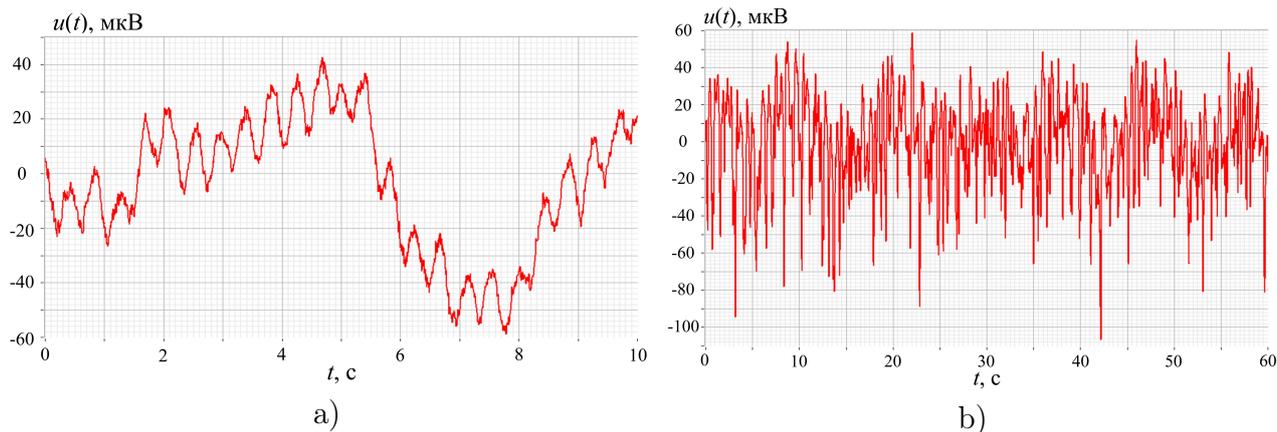


Рис. 3. Электрические флуктуации ТПТЭ при развитых критических режимах работы: недостаточном (а) и избыточном (б) увлажнении мембранно-электродного блока

Fig. 3. PEMFC electrical fluctuations in critical operating modes: insufficient (a) and excessive (b) humidification of the membrane electrode assembly

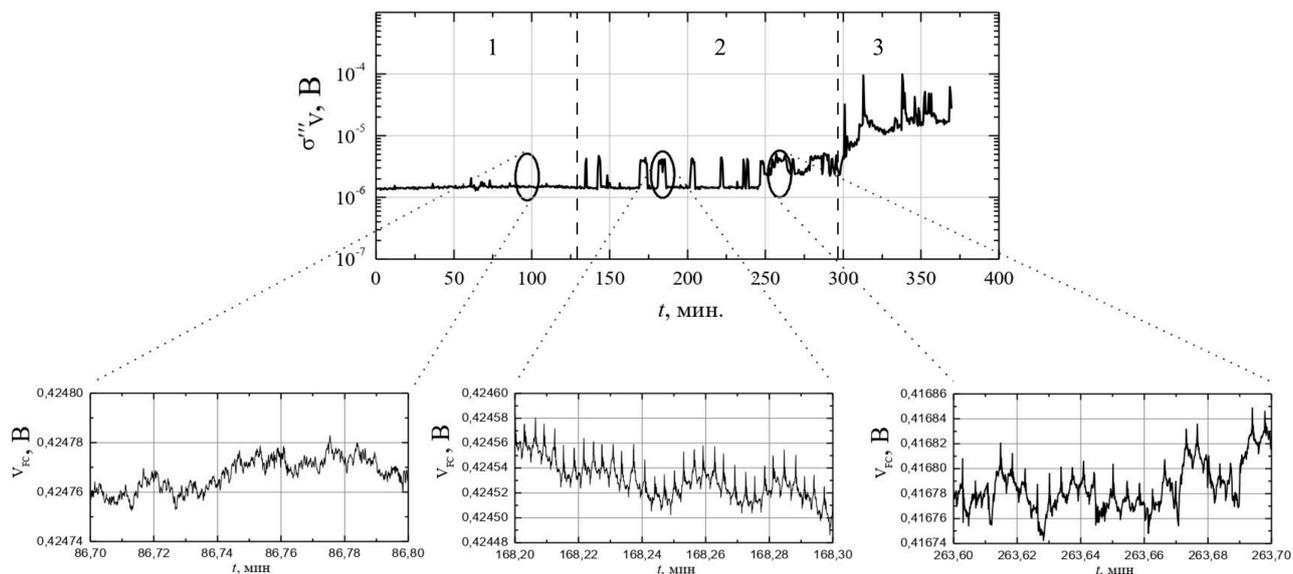


Рис. 4. Высокочастотные электрические флуктуации ТПТЭ при изменении режимов увлажнения мембранно-электродного блока: 1. Номинальный режим; 2. Избыточное увлажнение; 3. Частичное затопление

Fig. 4. PEMFC high-frequency electrical fluctuations under the changes in the humidification modes of the membrane electrode assembly: 1. Nominal mode; 2. Excessive humidification; 3. Partial flooding

3. Особенности применения электрических флуктуации топливного элемента для диагностики и управления режимами работы ТПТЭ

В процессе функционирования ТПТЭ может наблюдаться большое количество различных критических режимов работы и неисправностей, таких как некорректные режимы увлажнения мембранно-электродного блока, деградация катализатора, неравномерное распределение электрического тока по поверхности мембраны, замедление процессов диффузии. Для их обнаружения по флуктуационным сигналам требуется проводить настройку диагностических признаков для каждой конкретной конструкции ТПТЭ. Однако

можно сформировать некоторые общие рекомендации для связи критических режимов работы с возникновением избыточных флуктуаций в разных диапазонах частот (табл. 1).

Табл. 1. Распределение механизмов возникновения электрических флуктуаций по частотному диапазону

Table 1. Distribution of the mechanisms causing electrical fluctuations across the frequency range

<i>n</i>	Частотный диапазон	Механизм возникновения	Неисправности
1.	Низкие частоты, 0.1–1 Гц	Процессы диффузии	Недостаточное увлажнение [8, 9], неравномерная плотность тока [9], деградация газодиффузионного слоя [12]
2.	Средние частоты, 1–10 Гц	Перенос заряда, проводимость мембраны	Переувлажнение [8, 9], недостаточное увлажнение [8, 9], неравномерная плотность тока [9], замедление электрохимической реакции (деградация катализатора) [9]
3.	Высокие частоты, 10–100 Гц	Перенос заряда, шунтирующее действие емкости двойного электрического слоя	Переувлажнение [9], неравномерная плотность тока [9], замедление электрохимической реакции [12], изменение структуры электродов [9], снижение проводимости мембраны [8]

Табл. 1 построена на основе анализа данных [8, 9, 12], общих принципов работы ТПТЭ и опыта их экспериментальных исследований.

Рассмотрим пример использования диагностических признаков электрических флуктуаций ТПТЭ для случая обнаружения избыточного или недостаточного увлажнения мембранно-электродного блока. Типовая структура соответствующей системы управления режимами представлена на рис. 5. Измеренный сигнал напряжения поступает на вход модуля измерения электрических флуктуаций (МИЭФ), где проводятся операции аналого-цифрового преобразования, устранения тренда, вычисления спектральной плотности мощности и оценки параметров, характеризующих флуктуации. В блоке принятия решения (БПР) проводится обработка полученных параметров и с учетом параметров текущего режима принимается решение о нормальной работе или некорректном увлажнении мембранно-электродного блока. Соответствующая информация передается в блок формирования управляющих сигналов, где определяются действия, необходимые для компенсации начинающегося критического режима увлажнения путем подачи соответствующего сигнала для системы управления увлажнением. При обнаружении избыточного увлажнения БПР может использовать следующий алгоритм: если наблюдается резкое повышение среднеквадратичного отклонения флуктуаций в высокочастотной области спектра σ_v''' более величины 5 мкВ (см. рис. 4), величина σ_v''' сопротивления вычисляется по формуле

$$\sigma_v''' = \int_{10}^{100} S(f)df,$$

где верхний и нижний пределы интегрирования соответствуют границам исследуемого диапазона. Обнаружение режима с недостаточной увлажненностью может осуществляться по превышению среднеквадратичного отклонения флуктуаций в низкочастотном диапазоне при их неизменности в высокочастотном.

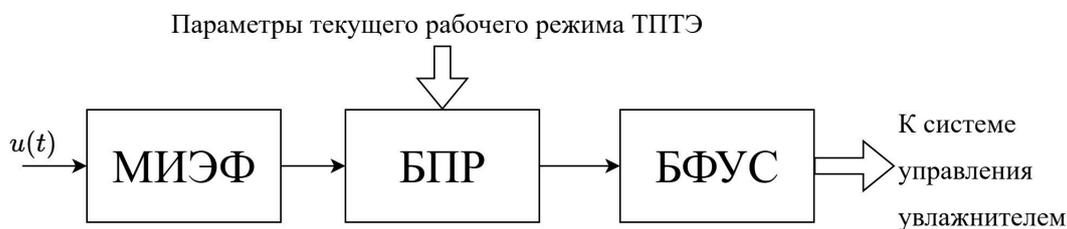


Рис. 5. Типовая структура системы управления режимами увлажнения ТПТЭ

Fig. 5. Typical structure of the control system for PEMFC humidification modes

Экспериментальные исследования показывают, что достаточно надежная оценка электрических флуктуаций в задачах диагностики получается при измерении около десяти сегментов по тридцать секунд и использовании на их основе периодограммного метода оценки спектра Уэлча. При этом во многих случаях достаточно чувствительности АЦП с разрядностью 18 бит и выше. Учитывая инерционность процессов в ТПТЭ, во многих случаях подобной организации получения оценок достаточно для эффективного управления их рабочими процессами.

Заключение

Системная модель ТПТЭ, рассматривающая связи между входными и выходными сигналами, может быть надежным источником диагностической информации. Однако ввиду сложности, взаимосвязанности и нелинейного характера зависимости этих сигналов их учет является сложной задачей, а необходимость вывода ТПТЭ из рабочего режима делает эту модель неподходящей для целей оперативной диагностики. Для решения указанной задачи предложена малосигнальная системная модель, позволяющая выявлять диагностические признаки на основе малых возмущений воздействующих переменных или при их флуктуациях в процессе естественного функционирования. Методы, основанные на учете малых возмущений, достаточно хорошо известны, например, электрохимическая импедансная спектроскопия, поэтому основное внимание было уделено использованию электрических флуктуаций для обнаружения критических режимов работы и выработки сигналов для их корректировки. Показана возможность обнаружения критических режимов поддержания водного баланса мембранно-электродного блока ТПТЭ, имеющего решающее значение для его надежности, стабильности и энергетической эффективности. Описана методика обнаружения режимов с избыточной и недостаточной увлажненностью на основе анализа спектральных характеристик электрических флуктуаций: при переувлажнении возрастает мощность в средне- и высокочастотной областях, а при недостаточном увлажнении – в низкочастотной. Приведены результаты анализа критических режимов и неисправностей ТПТЭ, которые могут быть обнаружены с использованием электрических флуктуаций с оценкой частотных диапазонов, в которых они, вероятно, будут проявляться, например, неравномерное распределение тока, изменение проводимости мембраны и деградации катализатора. Анализ полученных результатов

показал, что предложенная малосигнальная системная модель ТПТЭ является перспективным инструментом для поиска методов оперативного контроля.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. *Smit M.* Towards 40 000 hours of operation for Nedstack's FCS XXL PEM fuel cell stacks // *Fuel Cells Bulletin*. 2014. V. 2014, No 8. P. 12–15. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(14\)70238-X](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(14)70238-X).
2. *Daud W.R.W., Rosli R.E., Majlan E.H., Hamid S.A.A., Mohamed R., Husaini T.* PEM fuel cell system control: A review // *Renewable Energy*. 2017. V. 113. P. 620–638. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.027>.
3. *Lebreton C., Benne M., Damour C., Yousfi-Steiner N., Grondin-Perez B., Hissel D., Chabriat J.-P.* Fault tolerant control strategy applied to PEMFC water management // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2015. V. 40, No 33. P. 10636–10646. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.115>.
4. *Luna J., Jemei S., Yousfi-Steiner N., Husar A., Serra M., Hissel D.* Nonlinear predictive control for durability enhancement and efficiency improvement in a fuel cell power system // *J. Power Sources*. 2016. V. 328. P. 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.08.019>.
5. *Grigor'ev S.A., Klimova M.A.* Strategies of the cold start of polymer electrolyte membrane fuel cells // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2024. V. 97, No 1. P. 82–91. <https://doi.org/10.1007/s10891-024-02870-w>.
6. *Yuan X., Wang H., Sun J.C., Zhang J.* AC impedance technique in PEM fuel cell diagnosis — a review // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2007. V. 32, No 17. P. 4365–4380. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.05.036>.
7. *Nasser-Eddine A., Huard B., Gabano J.-D., Poinot T., Martemianov S., Thomas A.* Fast time domain identification of electrochemical systems at low frequencies using fractional modeling // *J. Electroanal. Chem.* 2020. V. 862. Art. 113957. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.113957>.
8. *Евдокимов Ю.К., Мартемьянов С.А., Денисов Е.С.* Электрический шум водородного топливного элемента и исследование его диагностических свойств // *Нелинейн. мир*. 2009. Т. 7, № 9. С. 706–712.
9. *Denisov E.S., Evdokimov Y.K., Martemianov S., Thomas A., Adiutantov N.* Electrochemical noise as a diagnostic tool for PEMFC // *Fuel Cells*. 2017. V. 17, No 2. P. 225–237. <https://doi.org/10.1002/fuce.201600077>.
10. *Астафьев Е.А.* Сравнение различных подходов в анализе электрохимических шумов на примере водородно-воздушного топливного элемента // *Электрохим.* 2020. Т. 56, № 2. С. 167–174. <https://doi.org/10.31857/S0424857020020036>.
11. *Maizia R., Dib A., Thomas A., Martemianov S.* Proton exchange membrane fuel cell diagnosis by spectral characterization of the electrochemical noise // *J. Power Sources*. 2017. V. 342. P. 553–561. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.053>.
12. *Thomas A., Adiutantov N., Denisov E., Evdokimov Yu., Hissel D., Martemianov S.* Generation of statistical descriptors for running PEM fuel cell stack by means of long-time electrochemical

noise measurements // Nanobiotechnology Reports. 2021. V. 16, No 2. P. 222–230.
<https://doi.org/10.1134/S2635167621020166>.

References

1. Smit M. Towards 40 000 hours of operation for Nedstack's FCS XXL PEM fuel cell stacks. *Fuel Cells Bull.*, 2014, vol. 2014, no. 8, pp. 12–15. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(14\)70238-X](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(14)70238-X).
2. Daud W.R.W., Rosli R.E., Majlan E.H., Hamid S.A.A., Mohamed R., Husaini T. PEM fuel cell system control: A review. *Renewable Energy*, 2017, vol. 113, pp. 620–638. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.027>.
3. Lebreton C., Benne M., Damour C., Yousfi-Steiner N., Grondin-Perez B., Hissel D., Chabriat J.-P. Fault tolerant control strategy applied to PEMFC water management. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2015, vol. 40, no. 33, pp. 10636–10646. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.115>.
4. Luna J., Jemei S., Yousfi-Steiner N., Husar A., Serra M., Hissel D. Nonlinear predictive control for durability enhancement and efficiency improvement in a fuel cell power system. *J. Power Sources*, 2016, vol. 328, pp. 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.08.019>.
5. Grigor'ev S.A., Klimova M.A. Strategies of the cold start of polymer electrolyte membrane fuel cells. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2024, vol. 97, no. 1, pp. 82–91. <https://doi.org/10.1007/s10891-024-02870-w>.
6. Yuan X., Wang H., Sun J.C., Zhang J. AC impedance technique in PEM fuel cell diagnosis — a review. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2007, vol. 32, no. 17, pp. 4365–4380. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.05.036>.
7. Nasser-Eddine A., Huard B., Gabano J.-D., Poinot T., Martemianov S., Thomas A. Fast time domain identification of electrochemical systems at low frequencies using fractional modeling. *J. Electroanal. Chem.*, 2020, vol. 862, art. 113957. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.113957>.
8. Evdokimov Yu.K., Martemianov S.A., Denisov E.S. Hydrogen fuel cell electrical noise and study of its diagnostics properties. *Nonlinear World*, 2009, vol. 7, no. 9, pp. 706–712. (In Russian)
9. Denisov E.S., Evdokimov Y.K., Martemianov S., Thomas A., Adiutantov N. Electrochemical noise as a diagnostic tool for PEMFC. *Fuel Cells*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 225–237. <https://doi.org/10.1002/fuce.201600077>.
10. Astaf'ev E.A. Comparison of approaches in electrochemical noise analysis using an air–hydrogen fuel cell. *Russ. J. Electrochem.*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 156–162. <https://doi.org/10.1134/S1023193520020032>.
11. Maizia R., Dib A., Thomas A., Martemianov S. Proton exchange membrane fuel cell diagnosis by spectral characterization of the electrochemical noise. *J. Power Sources*, 2017, vol. 342, pp. 553–561. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.053>.
12. Thomas A., Adiutantov N., Denisov E., Evdokimov Yu., Hissel D., Martemianov S. Generation of statistical descriptors for running PEM fuel cell stack by means of long-time electrochemical noise measurements. *Nanobiotechnol. Rep.*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 222–230. <https://doi.org/10.1134/S2635167621020166>.

Информация об авторах

Евгений Сергеевич Денисов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационно-измерительной техники, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

E-mail: genia-denisov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9677-8375>

Юрий Кириллович Евдокимов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники и информационно-измерительной техники, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

E-mail: evdokimov1@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7285-8984>

Author Information

Evgenii S. Denisov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Radioelectronics and Information Measuring Equipment, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

E-mail: genia-denisov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9677-8375>

Yury K. Evdokimov, Dr. Sci. (Engineering), Full Professor, Department of Radioelectronics and Information Measuring Equipment, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

E-mail: evdokimov1@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7285-8984>

Поступила в редакцию 19.08.2025

Принята к публикации 28.08.2025

Received August 19, 2025

Accepted August 28, 2025