

УДК 681.518.5
DOI: 10.14489/td.2025.04.pp.013-022

ОЦЕНКА ИМПЕДАНСА ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА



Е. С. Денисов,
канд. техн. наук,
ФГБОУ ВО «Казанский
национальный
исследовательский
технический университет
им. А. Н. Туполева – КАИ»,
Казань, Россия.
E-mail: genia-denisov@
yandex.ru



Ю. К. Евдокимов,
д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «Казанский
национальный
исследовательский
технический университет
им. А. Н. Туполева – КАИ»,
Казань, Россия.
E-mail: evdokimov1@mail.ru



О. В. Шиндор,
канд. техн. наук,
ФГАОУ ВО «Казанский
(Приволжский)
федеральный
университет»,
Казань, Россия.
E-mail: o_v_sh@mail.ru



К. В. Коньков,
ФГБОУ ВО «Казанский
национальный
исследовательский
технический университет
им. А. Н. Туполева – КАИ»,
Казань, Россия.
E-mail: kw.k@yandex.ru

Повышение эффективности и надежности твердополимерных топливных элементов требует разработки средств оперативного контроля и диагностики технического состояния. Предложена методика оценки электрохимического импеданса на основе непрерывного вейвлет-преобразования с использованием комплексного вейвлета Морзе. Преимуществом данного подхода является возможность лучшего согласования зондирующих сигналов и частотных характеристик импеданса с позиции частотно-временного разрешения. Показано, что высокая точность оценки частотных характеристик импеданса в частотном диапазоне 0,1...100 Гц достигается при использовании зондирующего сигнала с продолжительностью 2...10 с. Установлено, что в качестве зондирующего воздействия могут использоваться последовательности прямоугольных импульсов и другие сигналы со схожим спектральным составом. Анализ влияния собственных шумов измерительной аппаратуры на точность оценки частотных характеристик импеданса показал возможность реализации системы оценки на коммерчески доступных измерительных усилителях. Практическая значимость полученных результатов заключается в предоставлении возможности расширения функциональных и эксплуатационных характеристик методов и приборов импедансного контроля твердополимерных топливных элементов и других электрохимических источников энергии при использовании естественных или вынужденных импульсных возмущений электрического режима работы топливного элемента в априори неизвестные моменты времени.

Ключевые слова: водородный топливный элемент, электрохимический импеданс, широкополосный сигнал, вейвлет-анализ, вейвлет Морзе, собственные шумы измерительной аппаратуры.

E. S. Denisov¹, Yu. K. Evdokimov¹, O. V. Shindor², K. V. Konkov¹

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

²Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

HYDROGEN FUEL CELL IMPEDANCE ESTIMATION BASED ON WAVELET TRANSFORM

Improving the efficiency and reliability of Proton Exchange Membrane Fuel Cells requires the development of on-line monitoring and diagnostics means. In the paper a method of electrochemical impedance estimation based on continuous wavelet transformation using Morse wavelet is proposed. The advantage of this approach is the possibility for better matching the probing signals and the impedance frequency characteristics under consideration from the point of view of frequency-time resolution. The high precision the frequency characteristics of impedance estimation in the frequency range of 0.1...100 Hz is achieved using a probing signal in the form of rectangular pulses with a total duration 2...10 s. It is established that sequences of rectangular pulses and other signals with similar spectral composition can be used as a probing signal. The analysis of influence the measuring equipment's intrinsic noise on the accuracy of impedance estimation was carried out. The results of the analysis showed that is possible to implement an evaluation system on commercially available measuring amplifiers. The practical significance of the obtained results is the possibility of extending the functional and operational characteristics of the methods and devices of impedance monitoring of proton exchange membrane fuel cells when using both natural and artificial perturbations of the electrical operation mode of the fuel cell operation at a priori unknown moments of time.



Keywords: hydrogen fuel cell, electrochemical impedance, broadband signal, wavelet analysis, morse wavelet, intrinsic noise of measuring equipment.

Статья поступила в редакцию 20.09.2024

Received 20.09.2024

Введение

Твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ) на сегодняшний день являются одним из наиболее перспективных направлений развития электрохимической энергетики за счет их высокой экологичности, технологичности производства и достаточно высокой эффективности. Многие применения ТПТЭ, такие как системы автономного и резервного питания, источники энергии для электрических транспортных средств, имеют повышенные требования к надежности и времени безотказной работы, которые могут быть удовлетворены при использовании систем контроля и диагностики, позволяющих обнаруживать критические режимы работы на ранних этапах развития.

Анализ частотных характеристик импеданса относится к наиболее информативным инструментальным методам контроля технического состояния топливных элементов и других электрохимических систем [1 – 5]. В работах [1 – 3, 6 – 8] показано, что импедансные характеристики содержат качественную и количественную информацию о внутренних процессах электрохимических источников энергии: состоянии электролита и токопроводящих элементов, особенностях протекания электрохимической реакции, состоянии двойного электрического слоя, скорости процесса диффузии ионов к области протекания электрохимических реакций.

Несмотря на высокую информативность, существующие модели импедансметров в основном могут решать эту задачу в лабораторных условиях и требуют существенной доработки для обеспечения возможности их использования в реальных приложениях для оперативного контроля состояния ТПТЭ при сохранении экономической целесообразности. Кроме того, критические режимы работы ТПТЭ, связанные с неправильным водным балансом и другими неисправностями, развиваются достаточно быстро (характерная продолжительность составляет несколько минут, а в некоторых случаях несколько десятков секунд). Поэтому применение традиционных методов измерения и интерпретации импеданса, лежащих в основе современных аппаратно-диагностических комплексов, основанных на поочередной оценке отклика электрохимической системы на отдельно взятой частоте, является довольно затруднительным в силу продолжительного времени измерений и фильтрации результатов. Иными словами, такие подходы для диагностики состояния ТПТЭ могут давать ошибочный резуль-

тат интерпретации состояния топливного элемента в силу высокой скорости протекания процессов внутри ТПТЭ.

Для сокращения временного разрыва между продолжительностью измерений и характерным временем развития критических режимов работы ТПТЭ предлагается использовать методы импедансной спектроскопии, основанные на применении зондирующих сигналов с широким спектром [2, 7 – 13], и идентификацию параметров эквивалентной электрической схемы [2, 14 – 16]. Данный подход позволяет проводить ускоренную обработку импеданса за счет измерений одновременно на нескольких частотах или их диапазоне. Реализация систем измерения импеданса, основанных на импульсных зондирующих сигналах с широким спектром, имеет большие перспективы вследствие применения цифровых схемотехнических решений для генерации зондирующих сигналов.

Основной проблемой при разработке соответствующих методов и средств оценки импеданса является определение оптимального соотношения между длительностью широкополосных измерительных сигналов и получаемым частотным разрешением с учетом неотъемлемо присутствующих собственных шумов измерительной аппаратуры. Данная проблема может быть решена при использовании вейвлет-преобразования [17], которое уже показывало свою эффективность при анализе диагностических сигналов ТПТЭ [18 – 21]. Таким образом, *цель данной работы* можно сформулировать как исследование возможности использования вейвлет-преобразования для оценки электрохимического импеданса ТПТЭ с учетом шумов измерительной аппаратуры и разработки соответствующего алгоритмического обеспечения.

Разработка методики оценки импеданса водородных топливных элементов с использованием вейвлет-преобразования

Под электрохимическим импедансом понимают комплексное сопротивление системы протекающему через нее переменному току. При анализе электрохимических систем используется частотная зависимость импеданса $Z(j\omega)$, оцениваемая как отношение комплексных амплитуд напряжения $U(j\omega)$ и тока $I(j\omega)$:

$$Z(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{I(j\omega)}, \quad (1)$$

где ω – циклическая частота.

Традиционно измерение частотных характеристик электрохимического импеданса реализуется путем последовательного измерения отклика на один или несколько синусоидальных воздействующих сигналов. Это вызывает целый ряд технических ограничений, связанных с формированием мощного высокоточного синусоидального сигнала для продолжительных измерительных процедур, требующих постоянства рабочего режима анализируемого электрохимического источника энергии. Эти ограничения можно преодолеть при использовании широкополосных зондирующих сигналов, которые могут собой представлять, например, последовательность прямоугольных импульсов. При этом к такому зондирующему сигналу предъявляются следующие требования:

1) спектр сигнала должен быть согласован с интересующим частотным диапазоном;

2) уровень спектральной плотности мощности должен быть достаточно большим, чтобы гарантировать корректное соотношение сигнал/шум, и достаточно малым, чтобы не выводить систему из линейного режима работы;

3) сигнал должен обеспечивать возможность его простой генерации.

В качестве сигнала, удовлетворяющего указанным требованиям, будем рассматривать последовательность прямоугольных импульсов. Спектральная плотность мощности прямоугольного импульса описывается выражением

$$S(\omega) = A \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega T/2}, \quad (2)$$

где τ – длительность импульса; T – период прямоугольного импульса; $A = E\tau$; E – амплитуда импульса.

Спектр мощности имеет нули на частотах, кратных $f_0 = 2\pi / \tau$.

Для определения частотной зависимости импеданса применимы алгоритмы непрерывного вейвлет-преобразования (НВП), преимущество которых над оконным преобразованием Фурье является возможность настройки разрешения частотно-временного окна при анализе сигнала [22]. Данное свойство особенно важно для реализации системы диагностики ТПТЭ в процессе функционирования, поскольку позволяет обеспечить лучшее согласование между используемыми зондирующими сигналами и требуемым частотным разрешением импедансной характеристики.

При проведении вейвлет-преобразования используют базовые функции, называемые материнскими вейвлетами $\psi(t)$:

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (3)$$

где a – масштабный коэффициент, отвечающий за ширину вейвлета, являющийся аналогом частоты f ; b – параметр сдвига, определяющий положение вейвлета на оси t .

Путем сдвига и масштабирования материнского вейвлета осуществляется возможность анализа сигнала на различных частотах во всем временном диапазоне.

НВП происходит путем свертки анализируемого сигнала $f(t)$ с двухпараметрической вейвлетной функцией $\psi_{a,b}(t)$:

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt, \quad (4)$$

где $\psi_{a,b}^*(t)$ – комплексно-сопряженная величина.

При использовании вейвлет-анализа важен выбор материнского вейвлета. Основным критерием выбора является его частотно-временное разрешение [22 – 26].

Для оценки импеданса предлагается применять двухпараметрический вейвлет Морзе [27 – 29], который относится к аналитическим вейвлетам, обеспечивающим оценку мгновенной фазы и амплитуды сигнала. Семейство вейвлетов Морзе в частотной области определяется выражением

$$\psi_{\beta,\gamma}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{\beta,\gamma}(t) e^{-i\omega t} dt = H(\omega) a_{\beta,\gamma} \omega^\beta e^{-\omega^\gamma}, \quad (5)$$

где $a_{\beta,\gamma} \equiv 2(\epsilon\gamma / \beta)^{\beta/\gamma}$ – постоянный нормирующий коэффициент; $H(\omega)$ – единичная функция Хевисайда, заданная в частотной области; $\psi_{\beta,\gamma}(t)$ – вейвлет-функция во временной области; β и γ – параметры, задающие форму вейвлета и определяющие его свойства.

При этом $p = \sqrt{\beta\gamma}$ называют пропускной способностью вейвлета (длительностью) [27, 29]. Представления вейвлета Морзе во временной и частотной областях при различных значениях p приведены на рис. 1.

На рис. 1, а приведены реальная (real), мнимая (imag) и модуль (abs) функции двухпараметрического вейвлета Морзе во временной области. Из рис. 1 видно, что при увеличении пропускной способности вейвлета увеличивается число колебаний реальной и мнимой частей вейвлет-функции, при этом происходит сужение в частотной области, тем самым обеспечивая лучшее разрешение при выделении локальных особенностей сигнала. Также стоит отметить, что при $\gamma = 3$ вейвлет симметричен в частотной области. Кроме того, в частотной области представление вейвлета Морзе достигает максимального значения на центральной частоте

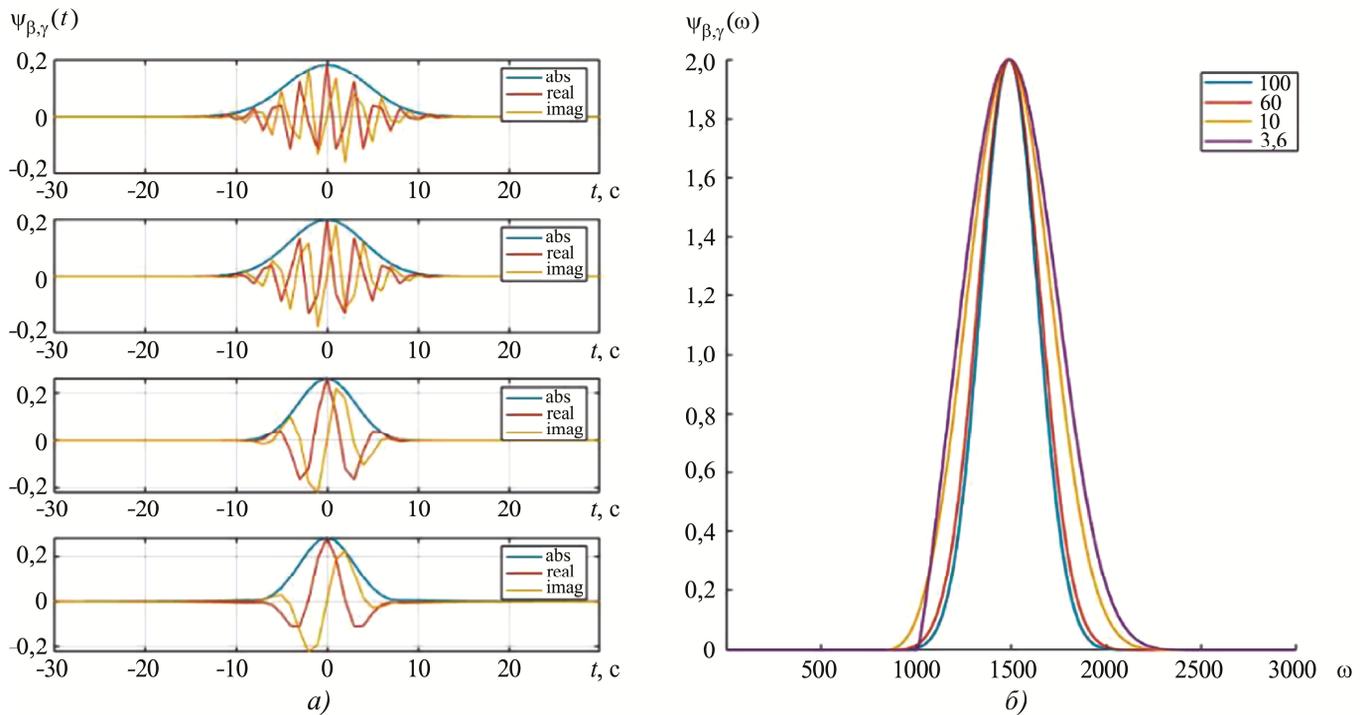


Рис. 1. Двухпараметрический вейвлет Морзе: во временной области (а) при $p = 100, p = 60, p = 10, p = 3,6$ (сверху вниз) и в частотной области (б)

$\omega_0 = (\beta / \gamma)^{1/\gamma}$. Это частота, на которой производная $\Psi_{\beta,\gamma}(\omega)$ становится равной нулю [25].

Предлагается для определения значений импеданса использовать НВП сигналов напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$. В этом случае будут получены комплексные значения вейвлет-коэффициентов:

$$W_i(t, f) = \Re\{W_i(t, f)\} + j\Im\{W_i(t, f)\};$$

$$W_u(t, f) = \Re\{W_u(t, f)\} + j\Im\{W_u(t, f)\}.$$

(6)

Импеданс представляет собой отношение вейвлет-коэффициентов:

$$Z(t, f) = \frac{W_u(t, f)}{W_i(t, f)}.$$

(7)

Использование НВП для определения импеданса позволяет отслеживать изменение фазы и амплитуды импеданса с течением времени, что обеспечивает детализированный анализ. При этом использование преобразования Фурье дает представление об усредненных значениях амплитуды и фазы для каждой из частот анализируемого диапазона.

На основании изложенного разработана методика оценки электрохимического импеданса на основе вейвлет-преобразования. Предлагаемая методика включает в себя следующие этапы:

1) синхронное измерение сигналов тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ с частотой дискретизации F_d и длительностью T_c ;

2) задание максимального и минимального значений анализируемого диапазона частот;

3) вычисление вейвлет-коэффициентов $W_u(t, f)$ и $W_i(t, f)$ методами непрерывного вейвлет-преобразования с использованием вейвлета Морзе с параметрами $\beta = 1$ и $\gamma = 3$;

4) усреднение квадратов модуля комплексных значений вейвлет-коэффициентов:

$$S_u = \overline{W_u(t, f)W_u'(t, f)};$$

$$S_i = \overline{W_i(t, f)W_i'(t, f)},$$

(8)

где S_u – среднее значение квадрата модуля вейвлет-коэффициентов сигнала $u(t)$; S_i – среднее значение квадрата модуля вейвлет-коэффициентов сигнала $i(t)$; $W_u'(t, f)$, $W_i'(t, f)$ – комплексно-сопряженные значения вейвлет-коэффициентов;

5) вычисление частотной характеристики модуля импеданса:

$$|Z(f)| = Z_a(f) = \sqrt{\frac{S_u(f)}{S_i(f)}},$$

(9)

где $Z_a(f)$ – амплитуда импеданса;

6) вычисление частотной характеристики косинуса фазы импеданса:

$$\rho = \frac{\overline{W_u(t, f)W_i(t, f)}}{\sqrt{S_u(f)}\sqrt{S_i(f)}};$$

(10)

7) оценка импеданса электрохимической системы:

$$Z(f) = \frac{\rho' \sqrt{S_u(f)}}{\sqrt{S_i(f)}}, \quad (11)$$

где ρ' – операция комплексного сопряжения.

Предложенная методика позволяет проводить оценку импеданса на основе различных широкополосных сигналов. При этом не накладываются жесткие требования по синхронизации между зондирующим сигналом и измерением.

Верификация методики оценки электрохимического импеданса

Для проверки методики измерения электрохимического импеданса, предложенной в предыдущем разделе, рассмотрим модельный пример, реализованный в программной среде Python 3.10. В качестве исходных условий для моделирования были выбраны модели RC-цепей первого и второго порядка (рис. 2), на входные терминалы которых подавали прямоугольный импульсный сигнал электрического тока $i(t)$, мА, и измеряли наблюдающийся при этом релаксационный сигнал напряжения $u(t)$, мВ (рис. 3).

Результаты оценки импеданса модели первого порядка (см. рис. 2, а) с параметрами $R_1 = 0,1$ Ом, $R_2 = 0,3$ Ом, $C = 0,38$ Ф представлены на рис. 4. Анализ показывает достаточно высокую точность

предложенного метода оценки импеданса с использованием вейвлет-преобразования. Для более детального анализа точностных характеристик этого метода рассмотрим оценку импеданса (рис. 5) более сложной модели второго порядка (см. рис. 2, б).

Графики оценки импеданса модели второго порядка с параметрами $R_1 = 0,1$ Ом, $R_2 = 0,3$ Ом, $R_3 = 0,2$ Ом, $C_1 = 0,47$ Ф, $C_2 = 0,094$ Ф для тестового сигнала длительностью 2 с (см. рис. 3), оцифрованного с частотой 10 кГц, представлены на рис. 5. Полученные результаты показывают в целом достаточно точную оценку импеданса при заметных отличиях в низкочастотной области. Для более детального анализа точности оценки частотной характеристики импеданса рассмотрим его амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристики (рис. 6).

Анализ частотных зависимостей, представленных на рис. 6, показывает, что погрешность измерения АЧХ и ФЧХ для измерительных сигналов длительностью 2 с равны 1,1 и 3,9 % соответственно. Такой точности измерений достаточно во многих практически значимых случаях для решения задач технического контроля, диагностики и управления рабочими режимами. Более детальный анализ показывает, что основная погрешность сосредоточена в низкочастотном диапазоне. Такое поведение объясняется недостатком информации о низкочастотных составляющих из-за малого времени измерения. Это подтверждается тем, что после увеличе-

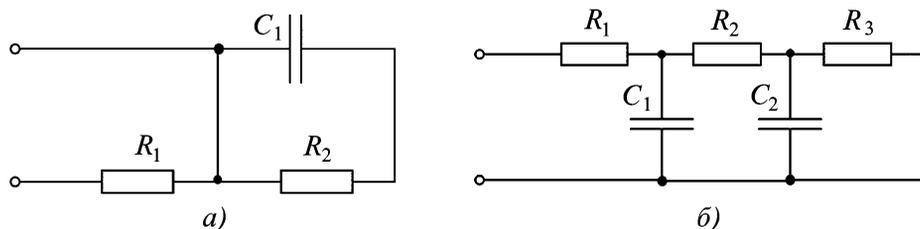


Рис. 2. Анализируемые модели RC-цепей первого (а) и второго (б) порядка

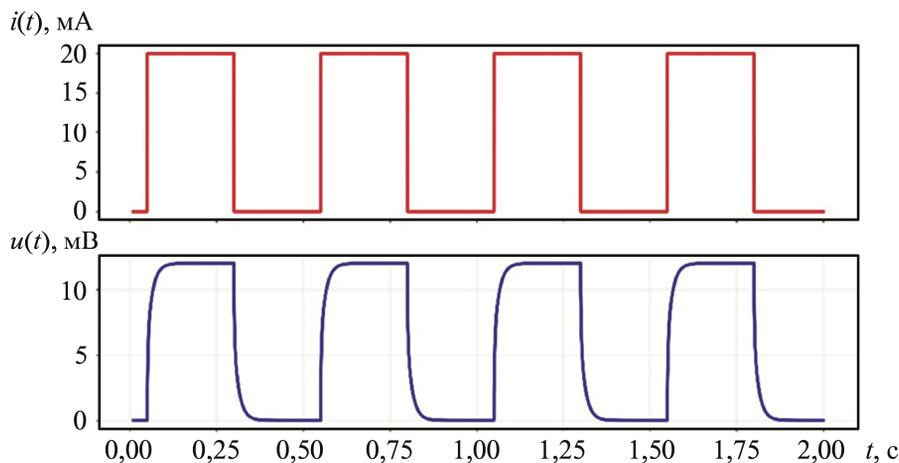


Рис. 3. Примеры зондирующего сигнала и отклика модельной системы

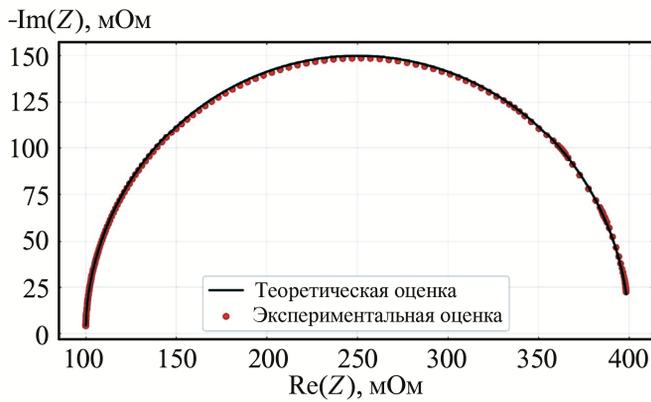


Рис. 4. Годограф импеданса модели первого порядка

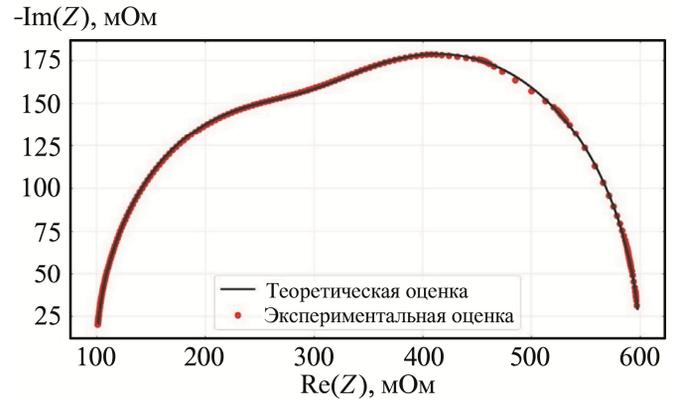


Рис. 5. Годограф импеданса модели второго порядка

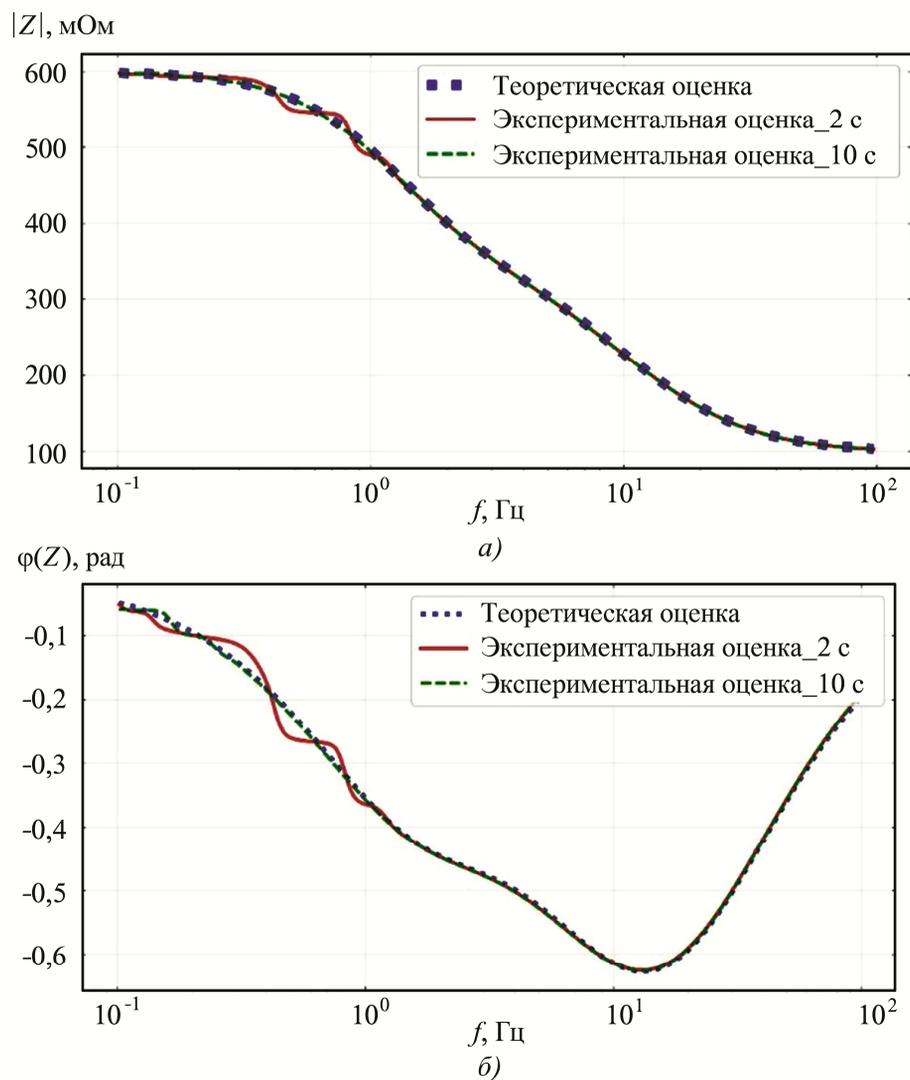


Рис. 6. Оценка амплитудно-частотной (а) и фазочастотной (б) характеристик импеданса модели второго порядка при различной продолжительности измерительных сигналов

ния времени измерения до 10 с, погрешности оценки АЧХ и ФЧХ (см. рис. 6) соответственно снизились до 0,2 и 0,8 %. Зависимость погрешностей ε_Z АЧХ и ФЧХ импеданса в зависимости от Δt представлены на рис. 7.

Представленную зависимость погрешностей от времени измерений можно использовать для выбора оптимального соотношения между длительностью измерений и требуемыми точностными характеристиками оценки импеданса.

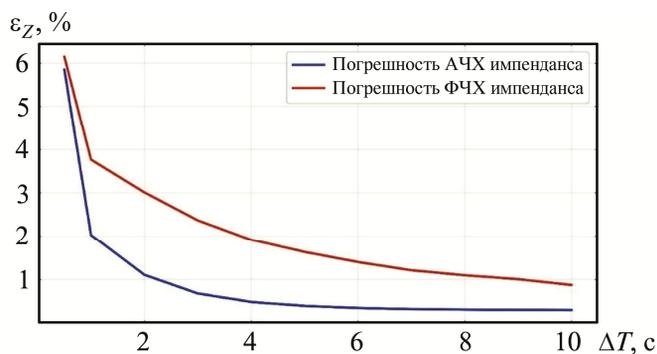


Рис. 7. Зависимость погрешностей оценки амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик импеданса модели второго порядка

Рассмотрим вопрос влияния шумов измерительной аппаратуры на результаты оценки частотных характеристик импеданса. Для этого измерительным сигналам тока и напряжения (см. рис. 2) добавляли аддитивные белые гауссовские шумовые составляющие со среднеквадратическим отклоне-

нием, равным 0,05 мА и 0,1 мВ соответственно. После применения алгоритма оценки импеданса на основе вейвлет-преобразования (рис. 8) можно увидеть сильные искажения АЧХ на частотах выше 20 Гц и возросшую погрешность измерения ФЧХ до величины 1,3 %. Увеличение погрешности АЧХ на частотах выше 20 Гц объясняется тем, что на этих частотах спектральная плотность шумов становится выше информативного измерительного сигнала (рис. 9).

Анализ данных результатов позволяет утверждать, что получаемые на основе предложенного метода оценки частотных характеристик импеданса имеют высокую точность при достаточно низком уровне шумов измерительной аппаратуры. При этом необходимый уровень шумов может быть получен на основе стандартных измерительных каскадов. Сильное увеличение погрешности на частотах выше 20 Гц в основном связано с повышенным уровнем шумов, использованных при моделирова-

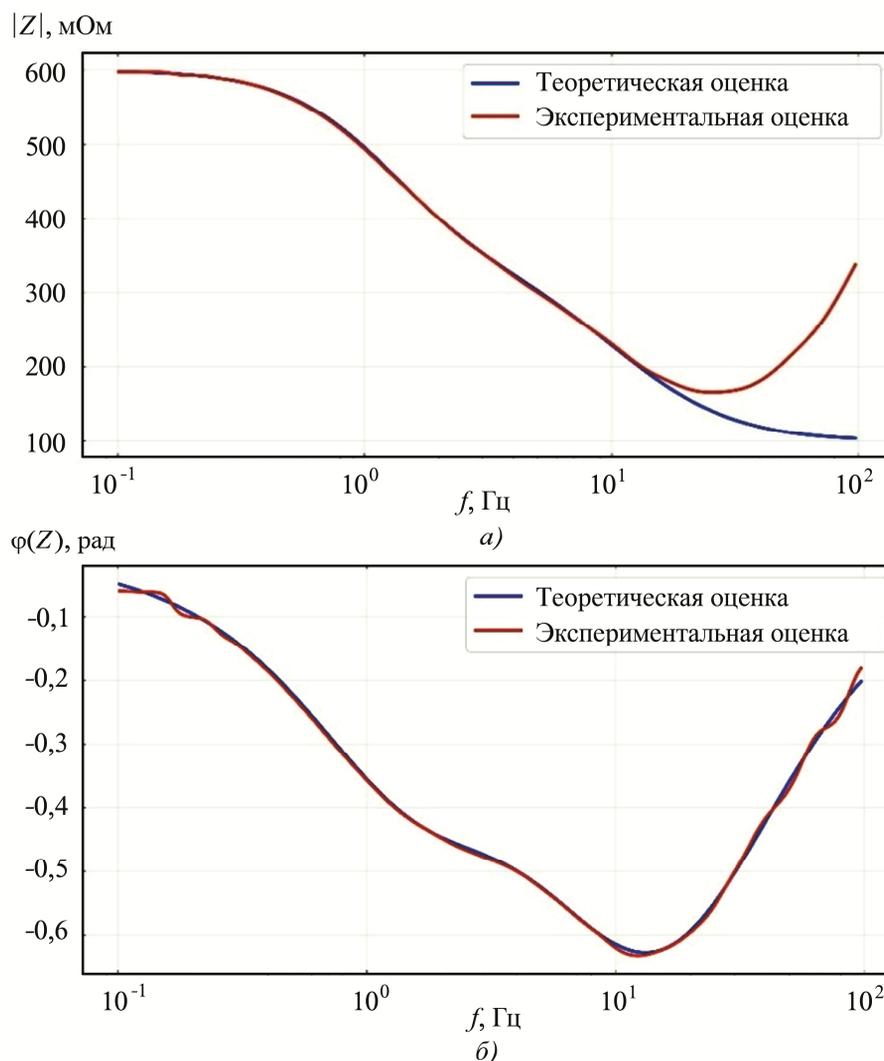


Рис. 8. Оценка амплитудно-частотной (а) и фазочастотной (б) характеристик импеданса модели второго порядка в присутствии шумов

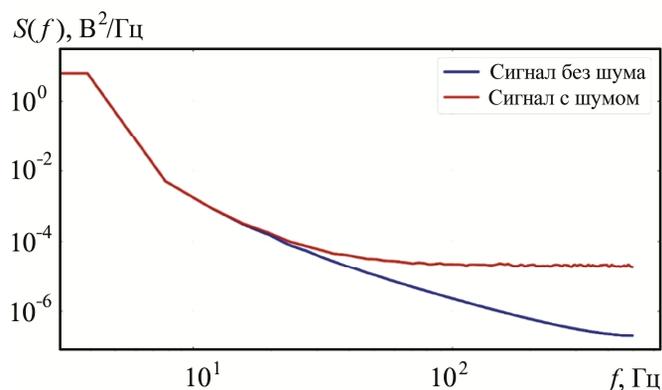


Рис. 9. Спектральная плотность мощности измерительного сигнала напряжения с шумом и без него

нии. Для борьбы с этим явлением нужно повысить отношение сигнал/шум, например путем использования дополнительных более высокочастотных зондирующих сигналов или малощумящей измерительной аппаратуры. Авторами данной статьи получены предварительные результаты, позволяющие существенно повысить точность измерения импеданса при использовании процедур устранения шумов на основе пороговой обработки вейвлет-коэффициентов. Соответствующие результаты будут изложены в отдельной статье.

Выводы

Рассмотрен подход для измерения электрохимического импеданса с использованием непрерывного вейвлет-преобразования. Показано, что для решения этой задачи в качестве материнского подходит двухпараметрический вейвлет Морзе. Использование данного вейвлета позволяет упростить требования к точности формирования зондирующего сигнала, что существенно упрощает техническую реализацию подобных систем для таких мощных электрохимических источников энергии, как топливные элементы и литиевые аккумуляторы. При проведении модельных экспериментов была показана высокая точность оценки импедансных характеристик при применении вейвлета Морзе с параметрами ($\gamma = 3$ и $\beta = 1$) в частотном диапазоне 0,1...100 Гц с погрешностями, не превышающими 1 % в интересующем диапазоне частот при использовании зондирующего сигнала в виде двух прямоугольных импульсов. При этом было установлено, что основную составляющую погрешности, сосредоточенную в низкочастотном диапазоне, можно уменьшить, используя более продолжительные (низкочастотные) сигналы.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что описанная методика позволяет разработать средства измерения импеданса, использующие естественные или вынужден-

ные возмущения электрического режима работы топливного элемента в априорно неизвестные моменты времени. Применение таких средств измерения электрохимического импеданса расширит функциональные и эксплуатационные характеристики методов и приборов импедансного контроля технического состояния твердополимерных топливных элементов и оперативного управления режимами их работы.

Библиографический список

1. 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. V. 32, No. 17. P. 4365 – 4380.
2. Nasser-Eddine A., Huard B., Gabano J.-D., et al. Fast Time Domain Identification of Electrochemical Systems at Low Frequencies using Fractional Modeling // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2020. V. 862. P. 113957.
3. Jianfeng Lv., Kuang J., Zhongliang Yu., et al. Diagnosis of PEM Fuel Cell System Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy and Deep Learning Method // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2023. V. 71, No. 1. P. 657 – 666.
4. Oldenburger M., Bedürftig B., Gruhle A., et al. Investigation of the Low Frequency Warburg Impedance of Li-ion Cells by Frequency Domain Measurements // Journal of Energy Storage. 2019. V. 21. P. 272280.
5. Spielbauer M., Berg P., Ringat M., et al. Experimental Study of the Impedance Behavior of 18650 Lithium-ion Battery Cells under Deforming Mechanical Abuse // Journal of Energy Storage. 2019. V. 26. P. 101039.
6. Shi Y., He W., Xie B., et al. PEMFC Fault Diagnosis Based on an Equivalent Circuit and OS-ELM Framework // IEEE Transactions on Industry Applications. 2023. V. 60, No. 1. P. 1277 – 1287.
7. Денисов Е. С. Малосигнальная электрическая модель твердополимерного водородного топливного элемента // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 3(49). С. 152 – 158.
8. Астафьев Е. А. Сравнение метода и аппаратуры электрохимического импеданса с методом измерения и анализа электрохимических шумов // Электрохимия. 2018 Т. 54, № 12. С. 1044 – 1054.
9. Денисов Е. С., Никишина Г. В., Коньков К. В. Оценка влияния собственных шумов измерительной аппаратуры при измерении импеданса водородных топливных элементов на основе широкополосных зондирующих сигналов // Южно-Сибирский научный вестник. 2024. № 2(54). С. 33 – 39.
10. Денисов Е. С. Система измерения электрохимического импеданса водородных топливных элементов на основе широкополосных зондирующих сигналов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2022. Т. 78, № 1. С. 92 – 98.
11. Wang H., Gaillard A., Hissel D. A Review of DC/DC Converter-Based Electrochemical Impedance Spectroscopy for Fuel Cell Electric Vehicles // Renewable Energy. 2019. V. 141. P. 124 – 138.

12. Wang H., Gaillard A., Hissel D. Online Electrochemical Impedance Spectroscopy Detection Integrated with Step-up Converter for Fuel Cell Electric Vehicle // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. V. 44, No. 2. P. 1110 – 1121.
13. Klotz D., Schönleber M., Schmidt J. P., Ivers-Tiffée E. New Approach for the Calculation of Impedance Spectra out of Time Domain Data // Electrochimica Acta. 2011. V. 56, No. 24. P. 8763 – 8769.
14. Alavi S. M., Birki C. R., Hawey D. A. Time-domain Fitting of Battery Electrochemical Impedance Models // Journal of Power Sources. 2015. V. 288. P. 345 – 352.
15. Ruan H., Sun B., Jiang J., et al. A Modified-Electrochemical Impedance Spectroscopy-Based Multi-Time-scale Fractional-Order Model for Lithium-ion Batteries // Electrochimica Acta. 2021. V. 394. P. 139066.
16. Денисов Е. С., Никишина Г. В., Енилиев Р. Р., Никишин Т. П. Особенности реализации метода контроля технического состояния литиевых источников тока на основе анализа релаксационных процессов, вызванных изменением нагрузки // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 7(301). С. 36 – 43.
17. Nusev G., Juričić Đ., Gaberšček M., et al. Fast Impedance Measurement of Li-ion Battery using Discrete Random Binary Excitation and Wavelet Transform // IEEE Access. 2021. V. 9. P. 46152 – 46165.
18. Steiner N. Y., Hissel D., Moçotéguy Ph., Candusso D. Non Intrusive Diagnosis of Polymer Electrolyte Fuel Cells by Wavelet Packet Transform // International Journal of Hydrogen Energy. 2011. V. 36, No. 1. P. 740 – 746.
19. Шиндор О. В., Денисов Е. С., Евдокимов Ю. К. Исследование диагностических возможностей вейвлет-преобразования для анализа электрических флуктуаций водородного топливного элемента // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2013. № 4. С. 120 – 124.
20. Шиндор О. В., Денисов Е. С., Евдокимов Ю. К. Прогнозирование режимов работы водородного топливного элемента на основе вейвлет-анализа // Нелинейный мир. 2011. Т. 9, № 12. С. 813 – 817.
21. Ma T., Lin W., Yang Y., et al. Water Content Diagnosis for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Based on Wavelet Transformation // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. V. 45, No. 39. P. 20339 – 20350.
22. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145 – 1170.
23. Flandrin P. Time-Frequency/Time-Scale Analysis // Wavelet Analysis and its Applications. V. 10. San Diego: Academic Press, 1999. 386 p.
24. Iatsenko D., McClintock P. V. E., Stefanovska A. Nonlinear Mode Decomposition: A Noise-Robust, Adaptive decomposition Method // Physical Review E. 2015. V. 92. P. 032916 – 032941.
25. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. Philadelphia: SIAM, 1992. 350 p.
26. Коньков К. В. Исследование возможности оценки спектральных характеристик сигналов посредством вейвлет-преобразования // XXVI Туполевские чтения: сб. докл. Казань, 9–10 ноября 2023 г. Казань: ИП Сагиев А. Р., 2023. С. 3556 – 3560.
27. Martinez-Ríos E. A., Bustamante-Bello R., Navarro-Tuch S., Perez-Meana H. Applications of the Generalized Morse Wavelets: A Review // IEEE Access. 2023. V. 11. P. 667 – 688.
28. Lilly J. M., Olhede S. C. Generalized Morse Wavelets as a Superfamily of Analytic Wavelets // IEEE Transactions on Signal Processing. 2012. V. 60. P. 60366041.
29. Lilly J. M., Olhede S. C. On the Analytic Wavelet Transform // IEEE Transactions on Information Theory. 2010. V. 56, No. 8. P. 41354156.

References

1. 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. V. 32, No. 17. P. 4365 – 4380.
2. Nasser-Eddine A., Huard B., Gabano J.-D., et al. Fast Time Domain Identification of Electrochemical Systems at Low Frequencies using Fractional Modeling // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2020. V. 862. P. 113957.
3. Jianfeng Lv., Kuang J., Zhongliang Yu., et al. Diagnosis of PEM Fuel Cell System Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy and Deep Learning Method // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2023. V. 71, No. 1. P. 657 – 666.
4. Oldenburger M., Bedürftig B., Gruhle A., et al. Investigation of the Low Frequency Warburg Impedance of Li-ion Cells by Frequency Domain Measurements // Journal of Energy Storage. 2019. V. 21. P. 272280.
5. Spielbauer M., Berg P., Ringat M., et al. Experimental Study of the Impedance Behavior of 18650 Lithium-ion Battery Cells under Deforming Mechanical Abuse // Journal of Energy Storage. 2019. V. 26. P. 101039.
6. Shi Y., He W., Xie B., et al. PEMFC Fault Diagnosis Based on an Equivalent Circuit and OS-ELM Framework // IEEE Transactions on Industry Applications. 2023. V. 60, No. 1. P. 1277 – 1287.
7. Денисов Е. С. Малосигнальная электрическая модель твердололимерного водородного топливного элемента // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 3(49). С. 152 – 158.
8. Астафьев Е. А. Сравнение метода и аппаратуры электрохимического импеданса с методом измерения и анализа электрохимических шумов // Электрохимия. 2018 Т. 54, № 12. С. 1044 – 1054.
9. Денисов Е. С., Никишина Г. В., Коньков К. В. Оценка влияния собственных шумов измерительной аппаратуры при измерении импеданса водородных топливных элементов на основе широкополосных зондирующих сигналов // Южно-Сибирский научный вестник. 2024. № 2(54). С. 33 – 39.
10. Денисов Е. С. Система измерения электрохимического импеданса водородных топливных элементов на основе широкополосных зондирующих сигналов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2022. Т. 78, № 1. С. 92 – 98.
11. Wang H., Gaillard A., Hissel D. A Review of DC/DC Converter-Based Electrochemical Impedance Spectroscopy for Fuel Cell Electric Vehicles // Renewable Energy. 2019. V. 141. P. 124 – 138.

12. **Wang H., Gaillard A., Hissel D.** Online Electrochemical Impedance Spectroscopy Detection Integrated with Step-up Converter for Fuel Cell Electric Vehicle // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. V. 44, No. 2. P. 1110 – 1121.
13. **Klotz D., Schönleber M., Schmidt J. P., Ivers-Tiffée E.** New Approach for the Calculation of Impedance Spectra out of Time Domain Data // *Electrochimica Acta*. 2011. V. 56, No. 24. P. 8763 – 8769.
14. **Alavi S. M., Birki C. R., Hawey D. A.** Time-domain Fitting of Battery Electrochemical Impedance Models // *Journal of Power Sources*. 2015. V. 288. P. 345 – 352.
15. **Ruan H., Sun B., Jiang J., et al.** A Modified-Electrochemical Impedance Spectroscopy-Based Multi-Time-scale Fractional-Order Model for Lithium-ion Batteries // *Electrochimica Acta*. 2021. V. 394. P. 139066.
16. **Денисов Е. С., Никишина Г. В., Енилиев Р. Р., Никишин Т. П.** Особенности реализации метода контроля технического состояния литиевых источников тока на основе анализа релаксационных процессов, вызванных изменением нагрузки // *Контроль. Диагностика*. 2023. Т. 26, № 7(301). С. 36 – 43.
17. **Nusev G., Juričić Đ., Gaberšček M., et al.** Fast Impedance Measurement of Li-ion Battery using Discrete Random Binary Excitation and Wavelet Transform // *IEEE Access*. 2021. V. 9. P. 46152 – 46165.
18. **Steiner N. Y., Hissel D., Moçotéguy Ph., Candusso D.** Non Intrusive Diagnosis of Polymer Electrolyte Fuel Cells by Wavelet Packet Transform // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. V. 36, No. 1. P. 740 – 746.
19. **Шиндор О. В., Денисов Е. С., Евдокимов Ю. К.** Исследование диагностических возможностей вейвлет-преобразования для анализа электрических флуктуаций водородного топливного элемента // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева*. 2013. № 4. С. 120 – 124.
20. **Шиндор О. В., Денисов Е. С., Евдокимов Ю. К.** Прогнозирование режимов работы водородного топливного элемента на основе вейвлет-анализа // *Нелинейный мир*. 2011. Т. 9, № 12. С. 813 – 817.
21. **Ma T., Lin W., Yang Y., et al.** Water Content Diagnosis for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Based on Wavelet Transformation // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. V. 45, No. 39. P. 20339 – 20350.
22. **Астафьева Н. М.** Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук*. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145 – 1170.
23. **Flandrin P.** Time-Frequency/Time-Scale Analysis // *Wavelet Analysis and its Applications*. V. 10. San Diego: Academic Press, 1999. 386 p.
24. **Iatsenko D., McClintock P. V. E., Stefanovska A.** Nonlinear Mode Decomposition: A Noise-Robust, Adaptive decomposition Method // *Physical Review E*. 2015. V. 92. P. 032916 – 032941.
25. **Daubechies I.** Ten Lectures on Wavelets. Philadelphia: SIAM, 1992. 350 p.
26. **Коньков К. В.** Исследование возможности оценки спектральных характеристик сигналов посредством вейвлет-преобразования // XXVI Туполевские чтения: сб. докл. Казань, 9–10 ноября 2023 г. Казань: ИП Сагиев А. Р., 2023. С. 3556 – 3560.
27. **Martinez-Ríos E. A., Bustamante-Bello R., Navarro-Tuch S., Perez-Meana H.** Applications of the Generalized Morse Wavelets: A Review // *IEEE Access*. 2023. V. 11. P. 667 – 688.
28. **Lilly J. M., Olhede S. C.** Generalized Morse Wavelets as a Superfamily of Analytic Wavelets // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2012. V. 60. P. 60366041.
29. **Lilly J. M., Olhede S. C.** On the Analytic Wavelet Transform // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2010. V. 56, No. 8. P. 41354156.

Для цитирования статьи:

Денисов Е. С., Евдокимов Ю. К., Шиндор О. В., Коньков К. В. Оценка импеданса водородных топливных элементов с применением вейвлет-анализа // *Контроль. Диагностика*. 2025. Т. 28, № 4. С. 13 – 22. DOI: 10.14489/td.2025.04.pp.013-022

Denisov E. S., Evdokimov Yu. K., Shindor O. V., Konkov K. V. (2025). Hydrogen Fuel Cell Impedance Estimation Based on Wavelet Transform. *Kontrol'. Diagnostika, Vol. 28, (04)*, pp. 13 – 22. [in Russian language]. DOI: 10.14489/td.2025.04.pp.013-022