

УДК 541.135.5

ДИАГНОСТИКА ПЕРВИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА МЕТОДОМ ШУМОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

Е. М. Петренко¹, В. П. Луковцев^{1✉}, М. С. Петренко²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН»
119071, Россия, Москва, Ленинский просп., 31, корп. 4

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет МЭИ»
111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., 14

✉ E-mail: el-02@mail.ru

Поступила в редакцию 19.03.2018 г.

В работе рассмотрен способ обработки параметров шумовых характеристик химических источников тока (ХИТ) с использованием вейвлет-анализа с целью получения достоверной информации о текущем состоянии источника тока. Обобщение и анализ результатов измерений электрохимических шумов ХИТ для оценки текущего состояния первичных химических источников тока показали возможность применение вейвлет-анализа.

Ключевые слова: первичные элементы, шумовая спектроскопия, степень разряженности, вейвлет-анализ.

DIAGNOSIS OF PRIMARY CHEMICAL POWER SOURCES BY NOISE SPECTROSCOPY WITH WAVELET ANALYSIS

Elena M. Petrenko¹, ORCID: 0000-0002-0676-7304, el-02@mail.ru
Vyacheslav P. Lukovtsev^{1✉}, ORCID: 0000-0001-8097-7230, el-02@mail.ru
Mikhail S. Petrenko², ORCID: 0000-0002-8713-4970, el-02@mail.ru

¹A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS
31, Leninsky Prosp., Moscow, 199071, Russia

²National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russia

Received 19 March 2018

The paper considers a method for processing the parameters of noise characteristics of chemical current sources using wavelet analysis in order to obtain reliable information about the current state of the current source. Generalization and analysis of the results of measurements of electrochemical noise of chemical current sources for the assessment of the current state of primary chemical current sources have shown the possibility of using wavelet analysis.

Key words: primary chemical sources of electric current, noise spectroscopy, depth of the source discharge, wavelet analysis.

DOI: 10.18500/1608-4039-2018-18-2-77-83

ВВЕДЕНИЕ

Для решения проблемы прогнозирования поведения химических источников тока (ХИТ) в настоящее время используется импедансная и шумовая спектроскопия ХИТ [1–6].

Шумовая диагностика позволяет определять степень разряженности источников тока в достаточно широком диапазоне (0–70%), который является наиболее интересным с точки зрения реальной эксплуатации. В связи с этим представляется целесообразным применить шумовую спектроско-

пию в качестве физически независимого метода исследования.

Диагностические методы, основанные на регистрации шумов, не требуют внешнего воздействия, т. е. могут использоваться для неразрушающего контроля, не влияющего на нормальное функционирование исследуемых объектов.

Однако диагностика первичных ХИТ методом шумовой спектроскопии с использованием Фурье-преобразования отображает лишь общие сведения об исследуемом сигнале в целом и не даёт представления о локальных свойствах сигнала при быстрых временных изменениях его спектрального состава. По своей сути преобразование Фурье даёт представление о том, какие частоты в спектре сигнала присутствуют, но не может ответить на вопрос, каково время существования спектральных составляющих сигнала. Для временной локализации спектральных компонентов необходимо сформировать частотно-временное представление сигнала. Эту задачу может решить так называемое оконное преобразование Фурье [7].

В случае применения оконного преобразования Фурье вводится движущаяся вдоль независимой переменной (пространство или время) оконная функция, имеющая компактный носитель. Ширина окна выбирается в несколько раз меньше длительности сигнала. Временной интервал сигнала разделяется на подынтервалы (дискретные или непрерывные в зависимости от заданного алгоритма скольжения оконной функции). Преобразование Фурье выполняется последовательно для каждого подынтервала в отдельности. Тем самым осуществляется переход к частотно-временному (или частотно-координатному) представлению сигналов, при этом в пределах каждого подынтервала сигнал предполагается стационарным.

Результатом оконного преобразования Фурье является семейство спектров, которым отображается изменение спектра сигнала по интервалам сдвига окна преоб-

разования. Это позволяет выделять на координатной оси и анализировать особенности нестационарных сигналов. Размер носителя оконной функции (ширина окна) обычно устанавливается соизмеримым с предполагаемыми длительностями особенностей сигнала. В результате оконное преобразование Фурье сопоставляет функцию двух переменных – частоты и положения окна (временное или координатное) исходному сигналу. При этом для получения результатов, позволяющих характеризовать свойства исследуемого сигнала, необходимо в оконном преобразовании Фурье заложить априори размер стационарности сигнала, что, по сути, очень затруднительно сделать при исследовании шумовых характеристик. Поэтому для анализа особенностей таких сигналов более эффективно использование вейвлет-анализа.

Вейвлеты и основанные на них интегральные вейвлет-преобразования были предложены в начале 90-х годов прошлого века [8] хотя первый простейший тип вейвлета по существу был описан Хааром ещё в 1909 году.

В предлагаемой статье рассмотрен способ обработки параметров шумовых характеристик ХИТ с использованием вейвлет-анализа [9] с целью получения достоверной информации о текущем состоянии источника тока.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования использовали литий-тионилхлоридные химические источники тока производства фирм «Saft» (Франция) – LS-33600 (далее – серия *S*) и «Tadiran» (Израиль) – SL-2780 (далее – серия *T*).

Для уменьшения влияния внешних электромагнитных излучений, температуры окружающей среды и механических микровибраций на шумовые характеристики ХИТ применяли экранирование, термостабилизацию, а измерительное устройство устанавливали на упругую демпфирующую пластину.

Обработку полученных результатов проводили с использованием дискретного вейвлет-преобразования, которое может быть определено как многоуровневое «дерево» низкочастотных и высокочастотных фильтров (рис. 1).

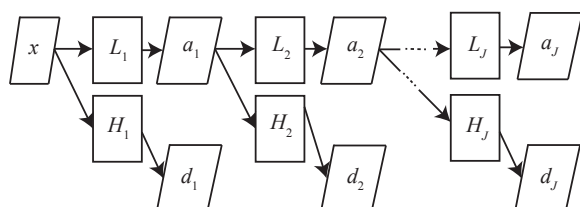


Рис. 1. «Дерево» фильтров

Fig. 1. "Tree" of filters

Полностью разложить исходный сигнал – вектор x размером $2N$, где N – целое число, возможно на $J = N - 1$ уровне.

Низкочастотный фильтр $\{L_n\}$ ($n = 1, 2, \dots, J$) уменьшает количество информации входного сигнала. Результатом низкочастотной фильтрации является вектор аппроксимирующих коэффициентов a_n , содержащий низкочастотную информацию. Высокочастотный фильтр $\{H_n\}$ предоставляет недостающую информацию. Результатом высокочастотной фильтрации является вектор детализирующих коэффициентов d_n , содержащий высокочастотную информацию. Фильтры уменьшают размер входного вектора в два раза.

Входным сигналом для первого уровня разложения является вектор x , для последующих n разложений входным сигналом является вектор аппроксимирующих коэффициентов a_{n-1} предыдущего ($n - 1$) уровня.

Результатом полного разложения исходного сигнала является вектор детализирующих коэффициентов d_n и последний аппроксимирующий коэффициент a_J , значение которого не что иное, как среднее значение \bar{x} .

Вейвлет Хаара реализуется банком фильтров в виде двух матриц: $H = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$, $L = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$.

По сути, детализирующие коэффициенты d_n каждого уровня разложения есть не что иное, как векторы, содержащие соответствующие полосы частот. Если частота

сэмплирования сигнала x равна f , то первая полоса d_1 содержит информацию о частотах $f - f/2$, вторая $f/2 - f/4$ и т. д.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подсчитав энергию каждой полосы d_n (уравнение (1)) и построив зависимость этой энергии от уровня разложения n , получаем график распределения энергии сигнала (рис. 2), причём первый уровень содержит самую высокочастотную информацию, а последний – самую низкочастотную:

$$Ed_n = \sum_{k=1}^{2^{n-1}} d_{n,k}^2. \quad (1)$$

Более детальное представление о сигналах, находящихся в определённых частотных полосах, позволяет провести вейвлет-анализ. Современный вейвлет-анализ по сути своей представляет последовательное пошаговое рекуррентное применение

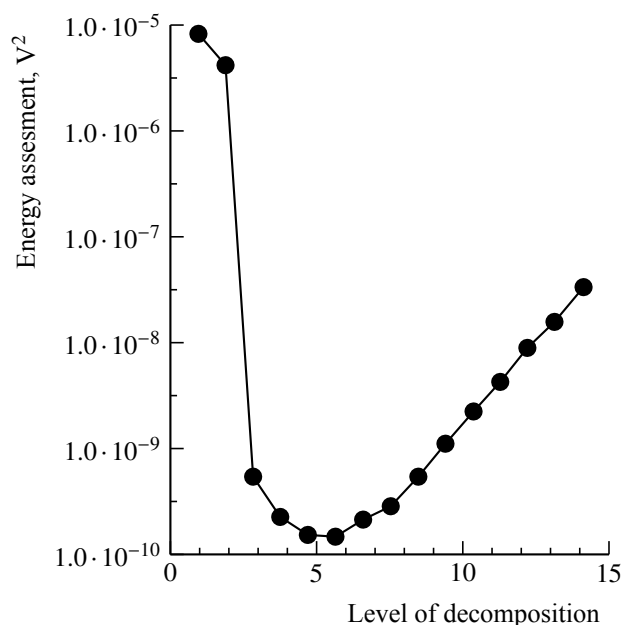


Рис. 2. График распределения энергии сигнала

Fig. 2. A graph of the distribution of the energy estimate of the signal

пары фильтров (низкочастотный + высокочастотный) к результатам низкочастот-

ной фильтрации предыдущего шага (уровня). При этом результаты высокочастотной фильтрации и есть искомая частотная субполоса. Подсчитав энергию каждой субполосы, можно её отложить на графике, построив таким образом график распределения энергии по полосам частот (рис. 3, 4). Сумма энергий всех субполос (уровней разложения) равна энергии исходного сигнала (согласно соотношению Парсевалья).

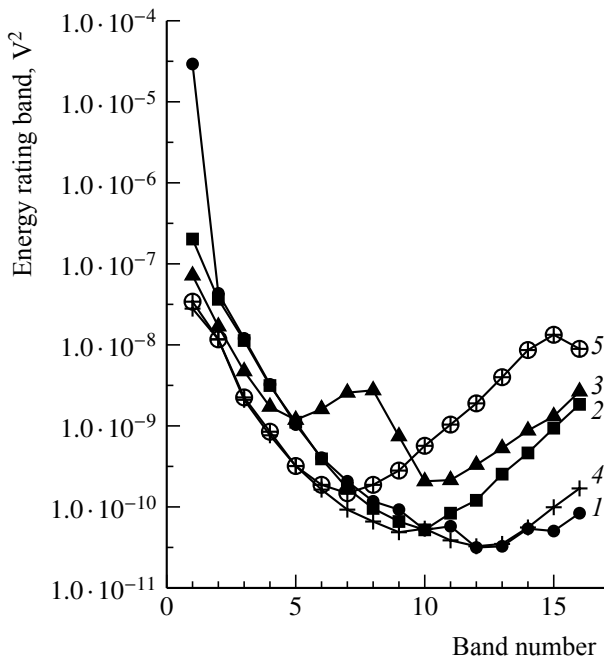


Рис. 3. Усреднённые вейвлет-спектры шума для разных степеней разряженности (серия *S*), %: 1 – 0; 2 – 25; 3 – 50; 4 – 75; 5 – 100

Fig. 3. Averaged wavelet noise spectra for different degrees of discharge (series *S*), %: 1 – 0; 2 – 25; 3 – 50; 4 – 75; 5 – 100

Представленные на этих рисунках графики позволяют сделать вывод о том, что с помощью вейвлет-анализа можно найти зависимости между степенью разряженности элемента и энергией шумового сигнала.

Рассмотрение графиков распределения энергии показало, что информативная частотная полоса попадает в первые четыре субполосы: 200–100, 100–50, 50–25 и 25–12.5 Гц. На рис. 5, 6 представлены зависимости логарифма значений энергии первых четырёх полос (уровней разложения) от степени разряженности ХИТ.

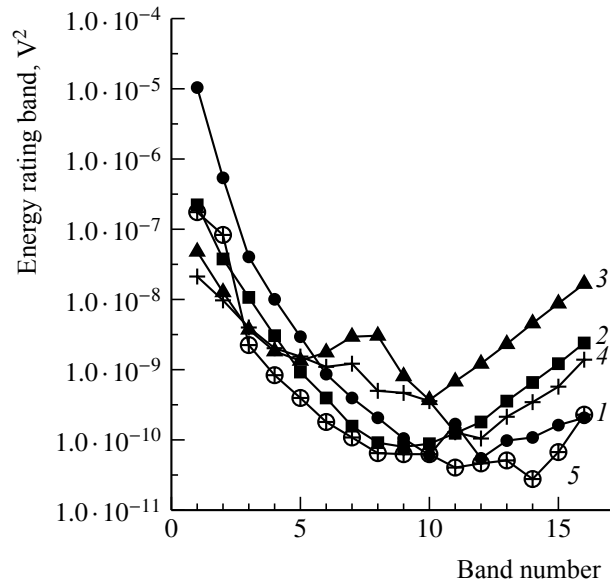


Рис. 4. Усреднённые вейвлет-спектры шума для разных степеней разряженности (серия *T*), %: 1 – 0; 2 – 25; 3 – 50; 4 – 75; 5 – 100

Fig. 4. Averaged wavelet noise spectra for different degrees of discharge (series *T*), %: 1 – 0; 2 – 25; 3 – 50; 4 – 75; 5 – 100

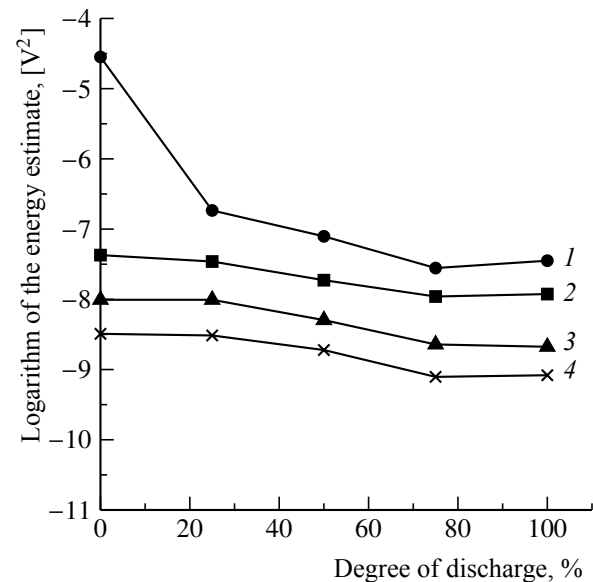


Рис. 5. Зависимость логарифмов значений энергии первых четырёх полос (уровней разложения) от степени разряженности элементов серии *S* для субполос, Гц: 1 – 100–200; 2 – 100–50; 3 – 50–25; 4 – 25–12.4

Fig. 5. Dependence of the logarithms of the values of the energy estimate of the first four bands (decomposition levels) on the degree of discharge of the elements of the *S* series for subbands, Hz: 1 – 100–200; 2 – 100–50; 3 – 50–25; 4 – 25–12.4

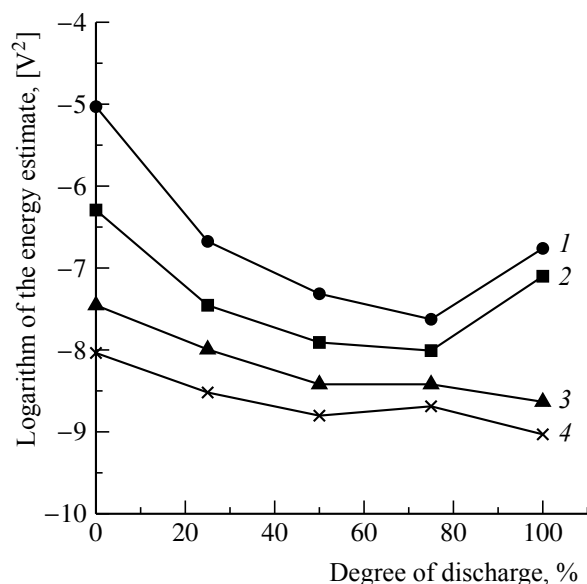


Рис. 6. Зависимость логарифмов значений энергии первых четырёх полос (уровней разложения) от степени разряженности элементов серии T , Гц: 1 – 100–200; 2 – 100–50; 3 – 50–25; 4 – 25–12.4

Fig. 6. Dependence of the logarithms of the values of the energy estimate of the first four bands (decomposition levels) on the degree of discharge of the elements of the T series, Hz: 1 – 100–200; 2 – 100–50; 3 – 50–25; 4 – 25–12.4

Чтобы получить одну кривую и одновременно усилить значение информативного признака, можно перемножить между собой логарифмы значений энергии первых четырёх субполос для каждой степени разряда соответственно. Полученная зависимость для серий S и T представлена на рис. 7.

Как видно из рис. 7, зависимость информативного параметра от степени разряженности элемента является монотонной при степенях разряженности ХИТ от 0 до 75%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщение и анализ результатов измерений электрохимических шумов ХИТ для оценки текущего состояния первичных ХИТ

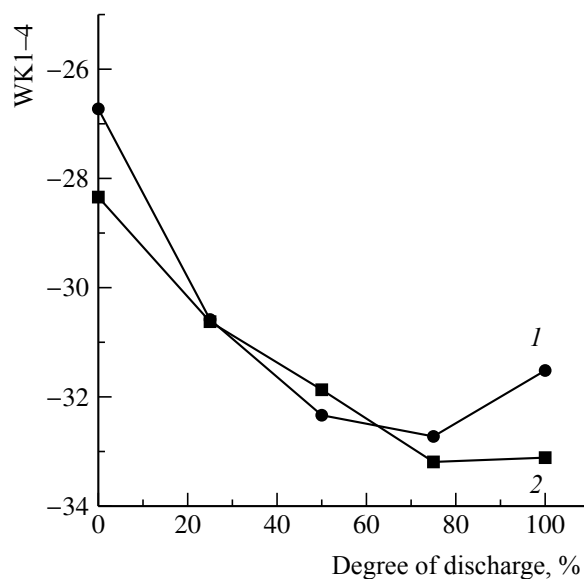


Рис. 7. Зависимости информативного параметра (WK1–4) от степени разряженности ХИТ (серии S – 1, серия T – 2)

Fig. 7. Dependences of the informative parameter (WK1–4) on the degree of discharge of elements (series T – 1, series S – 2)

показали, что наряду с преобразованием Фурье возможно применение вейвлет-анализа. Однако, несмотря на то что вейвлеты позволяют расширить инструментальную базу информационных технологий обработки данных, мы не предлагаем полную замену одного из средств обработки и анализа информации на другую.

Выбор конкретного вида и типа обработки во многом зависит от анализируемых сигналов и типа исследуемого источника тока. При практическом использовании выбор метода обработки и анализа информации всегда остаётся за исследователем.

Полученные зависимости могут лечь в основу разработки комплексной методики диагностирования ХИТ, основанной на импедансной спектроскопии и шумовой диагностике.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-29-09375).

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 16-29-09375).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петренко Е. М., Дрибинский А. В., Луковцев В. П., Ключев А. Л. Оценка состояния литиевых химических источников тока методом импедансной спектроскопии // Электрохим. энергетика. 2010. Т. 10, № 3. С. 128–132.
2. Дрибинский А. В., Луковцев В. П., Петренко Е. М. Электрохимический импеданс литий-тионилхлоридных источников тока в высокочастотной области спектра // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. Т. 82, № 11. С. 17–18.
3. Rotenberg Z. A., Dribinskii A. V., Lukovtsev V. P., Khozyainova N. S. Electrochemical Impedance of Microelectrodes // Russ. J. Electrochem. 2000. Vol. 36, № 8. P. 879–882.
4. Способ определения остаточной ёмкости первичного источника тока: пат. 2295139 С2, Российская Федерация, МПК G 01 R31/36 / Дрибин-

- ский А. В., Луковцев В. П., Максимов Е. М., Ротенберг З. А.; заявл. 21.04.2005; опубл. 10.03.2007.
5. Lukovtsev V. P., Rotenberg Z. A., Dribinskii A. V., Maksimov E. M., Uriev V. N. Estimating Depth of Discharge of Lithium-Thionyl Chloride Batteries from Their Impedance Characteristics // Russ. J. Electrochem. 2005. Vol. 41, № 10. P. 1097–1101.
6. Grafov B. M., Klyuyev A. L., Davydov A. D., Lukovtsev V. P. Chebyshev's noise spectroscopy for testing electrochemical systems // Bulgarian Chemical Communications. 2017. Vol. 49, № SIC. P. 102–105.
7. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2006. 751 с.
8. Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование // Успехи физ. наук. 2001. Т. 171, № 5. С. 465–501.
9. Новиков Л. В. Основы вейвлет-анализа сигналов: учеб. пособие. СПб.: Модус+, 1999, 153 с.

REFERENCES

1. Petrenko E. M., Dribinskii A. V., Lukovtsev V. P., Klyuev A. L. Ocenka sostojanija litievych himicheskikh istochnikov toka metodom impedansnoj spektroskopii [Estimation of the State of Lithium Electrochemical Cells by the Impedance Spectroscopy Method]. *Elrktrohimicheskaya Energetika [Electrochemical energetics]*, 2010, vol. 10, no. 3, pp. 128–132 (in Russian).
2. Dribinskii A. V., Lukovtsev V. P., Petrenko E. M. Elektrokhimicheskii impedans litii-tionilkhloridnykh istochnikov toka v vysokochastotnoi oblasti spectra [Electrochemical impedance of lithium-thionyl chloride current sources in the high-frequency range]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk [Actual Problems of the Humanities and Natural Sciences]*, 2015, vol. 82, no. 11, pp. 17–18 (in Russian).
3. Rotenberg Z. A., Dribinskii A. V., Lukovtsev V. P., Khozyainova N. S. Electrochemical Impedance of Microelectrodes. *Russ. J. Electrochem.*, 2000, vol. 36, no. 8, pp. 879–882.
4. *Sposob opredelenija ostatochnoj emkosti pervichnogo istochnika toka [Method for Determining the Residual Capacity of Primary Current Sources]*. Pat.

- RF no. 2295139 C2 MPK [IPC] G 01 R31/36. Dribinskii A. V., Lukovtsev V. P., Maksimov E. M., Rotenberg Z. A. Dated April 21, 2005 (in Russian).
5. Lukovtsev V. P., Rotenberg Z. A., Dribinskii A. V., Maksimov E. M., Uriev V. N. Estimating Depth of Discharge of Lithium-Thionyl Chloride Batteries from Their Impedance Characteristics. *Russ. J. Electrochem.*, 2005, vol. 41, no. 10, pp. 1097–1101.
6. Grafov B. M., Klyuyev A. L., Davydov A. D., Lukovtsev V. P. Chebyshev's noise spectroscopy for testing electrochemical systems. *Bulgarian Chemical Communications*. 2017, vol. 49, no. SIC, pp. 102–105.
7. Sergienko A. B. *Cifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]*. 2nd ed. Saint Petersburg, Piter Publ., 2006. 751 p. (in Russian).
8. Nechitailo V. A., Ivanov O. V., Dremmin I. M. Wavelets and their uses. *Phys. Usp.*, 2001, vol. 44, no. 5, pp. 447–478.
9. Novikov L. V. *Osnovi veivlet-analiza signalov: uchebnoe posobie [Basics of wavelet analysis of signals]*. Saint Petersburg, Modus+ Publ., 1992. 152 p. (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Петренко Елена Михайловна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН», Москва. Служебный телефон: (495) 955-47-18, e-mail: el-02@mail.ru

Луковцев Вячеслав Павлович – кандидат технических наук, зав. лабораторией «Электроанализ и электрохимические сорбционные процессы», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН», Москва. Служебный телефон: (495) 955-47-18, e-mail: el-02@mail.ru

Петренко Михаил Сергеевич – студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет МЭИ», Москва. Служебный телефон: (495) 955-47-18, e-mail: el-02@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Петренко Е. М., Луковцев В. П., Петренко М. С. Диагностика первичных химических источников тока методом шумовой спектроскопии с использованием вейвлет-анализа // Электрохимическая энергетика. 2018. Т. 18, № 2. С. 77–83. DOI: 10.18500/1608-4039-2018-18-2-77-83

For citation

Lukovtsev V. P., Petrenko E. M., Petrenko M. S. Diagnosis of Primary Chemical Power Sources by Noise Spectroscopy with Wavelet Analysis. *Electrochemical Energetics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 77–83. DOI: 10.18500/1608-4039-2018-18-2-77-83