

УДК 541.136+519.21

МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ШУМОВОГО СИГНАЛА ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

М. А. Абатуров

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

✉ E-mail: abatur@yandex.ru

Поступила в редакцию: 22.11.2019 / Принята: 29.11.2019 / Опубликовано: 23.12.2019

Работа относится к общей проблеме исследования шумов в электрохимии. Рассмотрен частный вопрос выделения слабого сигнала на фоне шумов аппаратуры. В качестве объекта использованы химические источники тока. Результаты измерений анализировались с помощью стандартной модели, включающей шумовое напряжение и шумовой ток аппаратуры. Критерием корректности модели было соблюдение квадратичного закона сложения составляющих компонент случайного шумового сигнала. Результаты анализа для двух независимых объектов, включаемых в различных комбинациях, показали, что предлагаемая модель полностью соответствует измеренным данным. Изложенный подход может быть полезен при практическом применении шумовых методов в электрохимии.

Ключевые слова: случайный сигнал, шум, измерения шумов, химические источники тока.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Methods of Preliminary Analysis of Noise Signal Measured on Electrochemical Systems

Mikhail A. Abatur, <http://orcid.org/0000-0002-6798-3756>, abatur@yandex.ru

*A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS
31 Leninsky Prosp., Moscow 119071, Russia*

Received: 22 November 2019 / Accepted: 29 November 2019 / Published: 23 December 2019

The study relates to the general problem of noise research in electrochemistry. The special issue of recognition of a weak signal against the background of equipment noise was considered. Chemical power sources were used as an object. The measurement results were analyzed using a standard model including the noise voltage and noise current of the equipment. The criterion of correctness of the model was compliance with the quadratic law of addition of components of a random noise signal. The results of the analysis for two independent objects included in different combinations showed that the proposed model fully corresponds to the measured data. The above approach can be useful in the practical application of noise methods in electrochemistry.

Keywords: random signal, noise, noise measurements, chemical current sources.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-4-204-211>

ВВЕДЕНИЕ

Исследование электрохимических систем с использованием шумовых методов в настоящее время приобретает особую актуальность. Это обусловлено новыми возможностями цифровой обработке случай-

ных сигналов, которые предоставляет современная измерительная и вычислительная техника. Использование шумовых методов принципиально отличается от применения традиционных методов, и развитие этого перспективного направления требует дополнительного решения ряда проблем. В частно-

сти, возникает необходимость в достаточно сложной предварительной обработке и анализе первичного измеряемого сигнала [1]. Обработка сигнала, в свою очередь, включает в себя решение целого ряда задач.

Это, прежде всего, задача компенсации постоянной составляющей напряжения и учет его временного дрейфа. Наличие постоянного напряжения является принципиальной особенностью электрохимических систем и обусловлено эффектом «скачка потенциала» на границе раздела фаз. Постоянное напряжение может достигать заметной величины в несколько вольт, что создает затруднения при измерениях малых сигналов.

Кроме того, флуктуационно-шумовые явления при отсутствии в системе активно протекающих процессов обычно характеризуются исключительно малой интенсивностью, и измеряемый сигнал неизбежно подвержен воздействию аппаратурных помех. Задача избавления от таких помех усложняется тем, что они так же, как и полезный сигнал, имеют шумовой характер. Операции по сложению и вычитанию шумовых сигналов принципиально отличаются от линейных операций с классическими сигналами, и результаты могут существенно отличаться. От этого в большой степени зависит достоверность исследований, и вопрос корректного учета шумовых помех имеет важное значение [2].

Целью данного исследования является разработка принципов предварительного анализа регистрируемого шумового сигнала электрохимических систем при измерениях, сопровождаемых собственными шумами измерительного усилителя. Задача, решаемая в настоящей работе, заключается в анализе конкретных результатов измерения шумов на реальной электрохимической системе на фоне аппаратурных шумов и выделения полезного сигнала из общего записанного сигнала. Результаты данного исследования могут быть полезными при разработке общих методов предварительного анализа экспериментальных данных по измерению шумов электрохимических систем.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1.1. Объект исследования и измерительная установка

В качестве электрохимического объекта исследования в данной работе использовались серийно выпускаемые элементы (ХИТ). Технология, соответствующая серийному производству, обычно четко отлажена, характеристики выпускаемых элементов строго нормированы. Воспроизведение результатов исследований на таких элементах не требует проведения специальных подготовительных лабораторных работ и не должно вызывать каких-либо проблем. В работе использовались литиевые элементы LS 14500, серийно выпускаемые фирмой SAFT (Франция). Литиевые элементы являются перспективным типом ХИТ широкого применения, и их исследование представляет самостоятельный интерес [3].

Исследуемые элементы были совершенно новыми, не активировались, находились на хранении при нормальных условиях в течение полугодового периода после их выпуска. Перед проведением исследований никакие меры по депассивации элементов не предпринимались. Измерения проводились в режиме «разомкнутой цепи», т. е. элементы не подвергались нагрузке, через них не проходил ток разряда и они находились в исходно стабильном равновесном состоянии.

Для того чтобы обеспечить возможность измерений предельно малых сигналов на фоне довольно значительной постоянной составляющей напряжения порядка 3.67 В, был применен метод компенсации напряжения элемента с помощью другого аналогичного элемента. Таким образом, в качестве объекта исследований использовались спаренные элементы со взаимно скомпенсированной постоянной составляющей напряжения. Разбаланс в скомпенсированных парах не превышал 7 мВ. При 24-битной оцифровке такой незначительный разбаланс позволяет регистрировать сигналы на достаточно низком уровне порядка нановольт

($7 \text{ мВ}/2^{24} \approx 0.42 \text{ нВ}$), что вполне приемлемо для регистрации таких предельно малых сигналов, как джонсоновские тепловые шумы.

Для измерения шумового сигнала использовалась авторская измерительная установка [4], собранная на базе малощумящего предварительного усилителя с применением микросхемы AD8599 (Analog Devices Inc.). Эта микросхема характеризуется исключительно низким уровнем собственных шумов порядка $1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ и обеспечивает измерение сигналов, сопоставимых со слабыми фундаментальными шумами. Измерительный блок вместе с исследуемыми элементами был тщательно экранирован и защищен от внешних наводок и помех.

Последующая оцифровка сигнала и ввод в компьютер осуществлялись с помощью системы сбора данных LTR24 фирмы «L-CARD» (Россия). Разрядность оцифровки составляла 24 бита. Частота выборок была равна 610 Гц с применением антиалиасинговой фильтрации, что позволяло анализировать сигнал в низкочастотном диапазоне примерно до 300 Гц. Этот диапазон характерен для типичных электрохимических систем.

Подробное описание используемой установки и метода измерений приведены в работе [5].

1.2. Режимы измерений и предварительная обработка

Измерения шумовых сигналов на исследуемых парах ХИТ выполнялись с помощью описанной выше установки с одновременной записью файлов в компьютер. Затем, после завершения серии измерений, записанные шумовые сигналы подвергались предварительной обработке с помощью вычислительных средств на ПК. При этом дополнительно осуществлялась компенсация остаточного разбаланса напряжений исследуемых пар с удалением его временного тренда. Далее выполнялась полосовая фильтрация сигнала с выделением частотного диапазона 110–210 Гц. Этот диапазон избавлен от низкочастотных фликкер-шумов и от возможных сетевых наводок 50 Гц. Благодаря

проведенной предобработке первичный измеренный сигнал в выделенном частотном диапазоне приобретал характер стационарного белого шума.

Стационарность полученного шумового сигнала позволяла осуществлять накопление данных на длительном интервале и производить статистическую оценку параметров с необходимой точностью. В данной работе цикл каждого измерения длился 30 мин (1800 с). При используемой частоте выборок (610 Гц) статистическая погрешность снижается до уровня, определяемого выражением $(1800 \text{ с} \times 610 \text{ Гц})^{1/2} \approx 0.00095$, т. е. точность достигала уровня порядка 0.1%. Такая достаточно высокая точность необходима для корректного проведения последующего анализа.

Одним из основных параметров шумового сигнала является стандартное среднеквадратическое отклонение. В настоящей работе эта величина использовалась в виде, приведенном к единичной частотной полосе. В данном случае для исходного сигнала в частотном диапазоне 110–210 Гц вычислялись значения стандартного отклонения и делились на ширину полосы $\sqrt{(210 - 110)} = \sqrt{100} = 10 \sqrt{\text{Гц}}$. Полученная величина измеряется в единицах $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ и соответствует величине спектральной плотности шумов. Эта приведённая величина стандартного отклонения была взята в качестве базисной, и всё последующее рассмотрение проводилось на основе её анализа.

При изучении сигналов, имеющих шумовую природу, возникают дополнительные возможности анализа, обусловленные специфическими особенностями случайных процессов. Одной из таких особенностей является квадратичный закон сложения, принципиально отличающийся от линейного закона. При сложении случайных сигналов величины их стандартного отклонения должны четко складываться именно по квадратичному закону. Соответствие экспериментальных данных этому закону служит критерием корректности измерений и адекватности их интерпретации.

В настоящей работе этот критерий квадратичного закона использовался в качестве основного приема анализа. В соответствии с этим была выполнена серия шумовых измерений с использованием двух объектов в виде описанных выше скомпенсированных пар элементов ХИТ. Использование двух пар позволяет применить критерий сложения сигналов и построить соответствующую модель. Записанные шумовые сигналы в соответствии с вышеизложенной методикой подвергались предобработке и делалась их статистическая оценка. Полученные в эксперименте значения стандартного отклонения шумов приведены в табл. 1 для различных режимов измерения: U_0 – для случая с закороченным входом усилителя без участия элементов ХИТ, U_1 и U_2 – для каждой пары ХИТ № 1 и ХИТ № 2 независимо; U_{1+2} – для двух пар одновременно (ХИТ № 1 и ХИТ № 2) при их подключении к измерительной цепи по последовательной схеме. Измерение с закороченным входом необходимо для оценки напряжения собственных шумов измерительной схемы, равных U_0 . Результаты остальных измерений носят более сложную природу и их необходимо рассмотреть более подробно.

Таблица 1 / Table 1

Результаты измерения шумов (величина стандартного отклонения, нВ/√Гц)

Noise measurement results (standard deviation, nV/√Hz)

Коротко замкнутый вход усилителя, U_0	ХИТ № 1, U_1	ХИТ № 2, U_2	ХИТ № 1 и ХИТ № 2, U_{1+2}
1.915	2.474	2.567	3.169

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов в данной работе проводился последовательно от простого к сложному. На каждом этапе обосновывалась необходимость перехода к более сложному уровню.

2.1. Предварительное рассмотрение

При первом рассмотрении полученных данных можно сказать, что интенсивности шумов на каждой из двух пар близки друг к другу и составляют величину порядка $U_1 \approx U_2 \approx 2.5$ нВ/√Гц. Одинаковость уровней шумов подтверждает то, что элементы, скорее всего, находятся в исправном состоянии в соответствии с регламентом их производства и можно быть уверенным в стабильности и воспроизводимости их характеристик. При этом уровень измеренных шумов достаточно мал и сопоставим с собственными шумами измерительной установки $U_0 \approx 1.9$ нВ/√Гц и с фундаментальными тепловыми шумами. Интенсивность шумов на двух парах одновременно существенно увеличивается, что подтверждает корректность данных в первом приближении и дает основание для более детального рассмотрения.

При дальнейшем рассмотрении величин U_1 , U_2 и U_{1+2} можно сразу отметить то, что простая арифметическая сумма интенсивностей шумов, измеренных на каждой из двух пар,

$$U_1 + U_2 \approx 5.0 \text{ нВ/}\sqrt{\text{Гц}}, \quad (1)$$

явно превышает почти в два раза результат измерений на двух парах $U_{1+2} \approx 3.2$ нВ/√Гц. Такой результат следовало ожидать, он служит подтверждением неприменимости в данном случае линейных законов сложения и указывает на необходимость использования другого адекватного характера сигналов подхода.

Для случайных сигналов применяются квадратичные правила сложения, которые в данном случае должны уменьшить результат суммирования. Действительно, результат такого суммирования

$$(U_1^2 + U_2^2)^{1/2} \approx 3.6 \text{ нВ/}\sqrt{\text{Гц}} \quad (2)$$

приближается к измеренному значению U_{1+2} , но расхождение остается все еще заметным и составляет величину около 12%. Это расхождение выходит далеко за пределы точности экспериментальных данных

(0.1%) и не может быть объяснено случайной погрешностью. Необходимо учесть дополнительные моменты для обоснования этого расхождения.

Фактором, который не был учтен в рассмотрении, являются внутренние шумы усилителя, привносимые в общий измеряемый сигнал. Шумы усилителя обычно описываются с помощью двух независимых источников – шумы напряжения и шумы тока [6]. В рассматриваемом случае основной вклад следует ожидать от шумов напряжения U_0 . Эти шумы суммируются с собственными шумами U_{B1} , U_{B2} и U_{B1+B2} исследуемых объектов – ХИТ № 1, ХИТ № 2 и (ХИТ № 1 и ХИТ № 2) соответственно. В результате регистрируется общий шум $U_1^2 = U_{B1}^2 + U_0^2$, $U_2^2 = U_{B2}^2 + U_0^2$ и $U_{1+2}^2 = U_{B1}^2 + U_{B2}^2 + U_0^2$. С учетом этих соотношений можно записать выражение, которое приводит к ожидаемому снижению результата суммирования:

$$[(U_1^2 - U_0^2) + (U_2^2 - U_0^2) + U_0^2]^{1/2} \approx 3.0 \text{ нВ} / \sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}. \quad (3)$$

Прежнее расхождение 12% при этом дополнительно падает до 6%, но, тем не менее, всё ещё выходит далеко за пределы погрешности эксперимента – 0.1%. Для объяснения этого расхождения имеющихся экспериментальных данных уже недостаточно и требуются дополнительные предположения.

2.2. Модель с токовым шумом усилителя

Одним из дополнительных факторов, влияющих на результаты измерений, является токовый шум измерительного усилителя. До настоящего момента при анализе учитывалось только напряжение шума усилителя. Но токовый шум входных цепей усилителя, характеризуемый величиной стандартного отклонения J_0 , также создает на сопротивлении исследуемых объектов R_1 , R_2 и $(R_1 + R_2)$ соответствующее падение шумового напряжения J_0R_1 , J_0R_2 и $J_0(R_1 + R_2)$. На низкоомных объектах этот эффект достаточно мал, но для таких прецизионных измерений, как в настоящей работе, этот эффект может быть заметен.

Для описания полной модели в соответствии с квадратичным законом сложения можно составить соответствующую систему алгебраических уравнений:

$$U_1^2 = U_0^2 + U_{B1}^2 + (J_0R_1)^2, \quad (4)$$

$$U_2^2 = U_0^2 + U_{B2}^2 + (J_0R_2)^2, \quad (5)$$

$$U_{1+2}^2 = U_0^2 + U_{B1+B2}^2 + [J_0(R_1 + R_2)]^2. \quad (6)$$

Далее необходимо сделать допущение о джонсоновской природе шумов исследуемых элементов ХИТ и применить известную формулу Найквиста, т. е. $U_{B1}^2 = 4kTR_1$ и $U_{B2}^2 = 4kTR_2$. Такое допущение для элементов ХИТ, находящихся в стабильно-равновесном состоянии, вполне обосновано и подтверждено рядом экспериментальных результатов [7]. Взаимная независимость этих случайных сигналов приводит к следующему соотношению: $U_{B1+B2}^2 = U_{B1}^2 + U_{B2}^2$. В результате система из трех уравнений (4)–(6) преобразуется к следующему виду с тремя неизвестными – R_1 , R_2 и J_0 :

$$U_1^2 = U_0^2 + 4kTR_1 + (J_0R_1)^2, \quad (7)$$

$$U_2^2 = U_0^2 + 4kTR_2 + (J_0R_2)^2, \quad (8)$$

$$U_{1+2}^2 = U_0^2 + 4kTR_1 + 4kTR_2 + [J_0(R_1 + R_2)]^2. \quad (9)$$

Уравнения этой системы нелинейные, но, как оказывается, система имеет точное решение в аналитическом виде:

$$R_1 = \frac{[(U_1 - U_0)(U_2 - U_0) + U_{\Delta}^2]}{4kT(U_2 - U_0 + U_{\Delta})}, \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{[(U_1 - U_0)(U_2 - U_0) + U_{\Delta}^2]}{4kT(U_1 - U_0 + U_{\Delta})}, \quad (11)$$

$$J_0 = \frac{(4kT)^2 U_{\Delta} (U_2 - U_0 + U_{\Delta})(U_1 - U_0 + U_{\Delta})}{[(U_1 - U_0)(U_2 - U_0) + U_{\Delta}^2]^2}. \quad (12)$$

где для упрощения формы записи введено обозначение $U_{\Delta} = 0.5(U_{1+2} - U_1 - U_2 + U_0)$.

2.3. Анализ численного решения

Полученная запись решения не обладает наглядностью и малоприспособна для проведения анализа, но сам факт наличия такого решения подтверждает принципиальную возможность анализа и выявления состава сложного шумового сигнала. Следует отметить, что в случае линейности сложения третье уравнение (9) в системе было бы простым следствием первых двух уравнений (7), (8), что привело бы к неопределённости. Решение данной задачи стало возможным только благодаря особому, квадратичному закону сложения анализируемых сигналов.

На основании полученного решения был проведен анализ численных результатов практического эксперимента. После подстановки в уравнения (10)–(12) измеренных численных значений шумового сигнала были вычислены значения сопротивлений ХИТ:

$$R_1 = 122.1 \text{ Ом}, \quad R_2 = 141.5 \text{ Ом}. \quad (13)$$

Значения приведены в округленном виде до четвертого знака в соответствии с погрешностью эксперимента. Полученные значения сопротивлений достигают сотни ом, что на порядок превышает значения, регламентируемые для элементов данного типа. Такое превышение можно объяснить неизбежным формированием пассивирующей пленки на литиевом электроде, не подвергавшемся активации.

Величина вычисленного токового шума

$$J_0 = 5.380 \text{ пкА}/\sqrt{\Gamma\text{ц}} \quad (14)$$

находится в согласии с регламентом микросхемы – 2.4–5.3 пкА/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$ [6] и не нуждается в комментариях.

Далее, на основании полученного решения была сделана численная оценка каждого из трех компонент измеряемого шума U_0 , J_0R_1 , J_0R_2 , $J_0(R_1 + R_2)$, U_{B1} , U_{B2} , U_{B1+B2} (табл. 2). Видно, что исследуемые электрохимические шумы весьма малы (порядка 1.5 нВ/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$) и сопоставимы с шумами измерительного усилителя (порядка 1.9 нВ/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$).

Вклад токового шума усилителя незначителен (порядка 0.7 нВ/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$), но, тем не менее, влияет на точность решения.

Таблица 2 / Table 2

Разложение сложного шумового сигнала на компоненты (величина стандартного отклонения, нВ/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$)
Decomposition of a complex noise signal into components (standard deviation, нВ/ $\sqrt{\text{Hz}}$)

Компоненты шумового сигнала	ХИТ № 1	ХИТ № 2	ХИТ № 1 и ХИТ № 2
Шумы напряжения усилителя	1.915	1.915	1.915
Шумы тока усилителя	0.6569	0.7613	1.418
Собственные шумы исследуемых ХИТ	1.422	1.531	2.089
Сумма компонент шумового сигнала	2.474	2.567	3.169

Если на основании полученных численных значений компонент шумового сигнала провести их квадратичное суммирование для каждого объекта измерений – ХИТ № 1, ХИТ № 2 и (ХИТ № 1 и ХИТ № 2), то результирующие суммы 2.474, 2.567 и 3.169 соответственно (см. табл. 2) совпадут с исходными экспериментальными данными (см. табл. 1).

Следует отметить также то, что квадратичность закона суммирования соблюдается и для шумов ХИТ при их соединении в общую цепочку. При этом необходимо учитывать только независимые компоненты, т. е. только собственные шумы ХИТ (см. табл. 2: $U_{B1} = 1.422$, $U_{B2} = 1.531$) без учёта привносимых шумов усилителя. В данном случае результат суммирования будет равен 2.090. Это значение отличается на единицу младшего разряда от вышеприведенного значения собственных шумов комбинации из двух ХИТ (см. табл. 2: $U_{B1+B2} = 2.089$). Такое малое расхождение можно было бы объяснить погрешностью измерений, но в данном случае используется точное аналитическое

решение задачи и такое объяснение здесь неприменимо.

Причина выявленного расхождения связана с тем, что в рассматриваемом примере используются, как отмечалось выше, округленные значения точного решения задачи. В таком случае может проявиться известный эффект накопления ошибки при операциях с округленными числами. Если в вышеприведенном расчёте порядок округления исходных значений слагаемых увеличить на один разряд ($U_{B1} = 1.4219$, $U_{B2} = 1.5307$), то результат суммы после соответствующего округления в точности совпадет с ожидаемым значением 2.089.

Итак, проведенный анализ измеренного шумового сигнала с использованием рассмотренной модели показал четкое соответствие квадратичному закону сложения. Это подтверждает корректность рассмотренной модели и ее согласие с экспериментальными данными.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в соответствии с планом института ИФХЭ РАН на 2019–2020 гг. Автор выражает признательность Б. М. Графову и А. Л. Ключеву за ценные рекомендации при постановке задачи и в ходе обсуждения результатов, а также Ю. В. Сиротинскому за финансовое обеспечение экспериментальных работ.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного рассмотрения на примере ХИТ установлено, что стационарные шумы электрохимических систем допускают проведение их анализа с достаточно высокой точностью до 0.1%.

Показано, что надежным критерием корректности анализа сложного шумового сигнала может служить соблюдение квадратичного закона сложения его составляющих компонент.

Выявлено, что использование двух независимых объектов для измерения в комплексе позволяет уверенно выделить исследуемые компоненты шума на фоне привносимых аппаратурных шумовых помех.

Проведенное частное рассмотрение может быть применено при разработке общих методов предварительного анализа шумовых измерений.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out in accordance with the plan of the Institute of IPCE RAS for 2019–2020. The author expresses gratitude to Boris M. Grafov and Aleksei L. Klyuev for valuable recommendations in the formulation of the problem and during the discussion of the results, as well as Yuriy V. Sirovinsky for financial support of experimental works.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Astafev E. Electrochemical noise measurement methodologies of chemical power sources // *Instrumentation Science & Technology*. 2019. Vol. 47. P. 233–247.
2. Martemianov S., Adiutantov N., Evdokimov Y. K., Madier L., Maillard F., Thomas A. New methodology of electrochemical noise analysis and applications for commercial Li-ion batteries // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2015. Vol. 19. P. 2803–2810.
3. Astafev E. A. Electrochemical noise measurement of a Li/SOCl₂ primary battery // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2018. Vol. 22. P. 3569–3577.
4. Абатуров М. А. Методика регистрации флуктуационно-шумовых сигналов напряжения химических источников тока // *Естественные и технические науки*. 2018. № 2. С. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.25633/ETN.2018.02.01>
5. Абатуров М. А., Сиротинский Ю. В. Методика предобработки сигнала при флуктуационно-шумовых исследованиях литиевых химических источников тока // *Электрохимическая энергетика*. 2018. Т. 18, № 1. С. 8–12. DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2018-1-8-12>
6. Paul Lee. Low Noise Amplifier Selection Guide for Optimal Noise Performance: Application Note. AN-940. Analog Devices, Inc. 12 p. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-940.pdf> (дата обращения: 10.11.2019).
7. Astafev E. A., Ukshe A. E., Dobrovolsky Y. A. Measurement of electrochemical noise of a Li/MnO₂ primary lithium battery // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2018. Vol. 22. P. 3597–3606.

REFERENCES

1. Astafev E. Electrochemical noise measurement methodologies of chemical power sources. *Instrumentation Science & Technology*, 2019, vol. 47, pp. 233–247.
2. Martemianov S., Adiutantov N., Evdokimov Y. K., Madier L., Maillard F., Thomas A. New methodology of electrochemical noise analysis and applications for commercial Li-ion batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2015, vol. 19, pp. 2803–2810.
3. Astafev E. A. Electrochemical noise measurement of a Li/SOCl₂ primary battery. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2018, vol. 22, pp. 3569–3577.
4. Abatur M. A. The registration method of the fluctuation-noise voltage signal of chemical current sources. *Natural and technical science*, 2018, no. 2, pp. 12–16 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.25633/ETN.2018.02.01>
5. Abatur M. A., Sirotinskiy Yu. V. The method for preprocessing a signal when the fluctuation-noise studies lithium chemical current sources. *Electrochemical Energetics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 8–12. (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2018-1-8-12>
6. Paul Lee. *Low Noise Amplifier Selection Guide for Optimal Noise Performance: Application Note. AN-940*. Analog Devices, Inc. 12 p. Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-940.pdf> (accessed 10 November 2019).
7. Astafev E. A., Ukshe A. E., Dobrovolsky Y. A. Measurement of electrochemical noise of a Li/MnO₂ primary lithium battery. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2018, vol. 22, pp. 3597–3606.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Абатуров Михаил Анатольевич – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории электрокатализа, Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, г. Москва. Служебный тел.: +7(495)955-47-44, e-mail: abatur@yandex.ru

Библиографическое описание статьи

Абатуров М. А. Методы предварительного анализа шумового сигнала при измерениях на электрохимических системах // *Электрохимическая энергетика*. 2019. Т. 19, № 4. С. 204–211. DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-4-204-211>

For citation

Abatur M. A. Methods of Preliminary Analysis of Noise Signal Measured on Electrochemical Systems. *Electrochemical Energetics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 204–211 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-4-204-211>