

УДК 541.136+621.351

## МЕТОДИКА ПРЕДОБРАБОТКИ СИГНАЛА ПРИ ФЛУКТУАЦИОННО-ШУМОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЛИТИЕВЫХ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

М. А. Абатуров<sup>✉</sup>, Ю. В. Сиротинский

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

<sup>✉</sup> E-mail: abatur@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.02.2018 г.

Предложена методика предобработки флуктуационно-шумовых данных при исследовании химических источников тока. Объектом исследования служил литий-диоксидно-марганцевый элемент в процессе разряда. Исходные измерения проведены на скомпенсированной по постоянному напряжению цепочке. Подавляющая трендовая составляющая разряда частично дезавуирована линейной аппроксимацией. Остаточные эффекты тренда снижены в результате аппроксимации степенными полиномами высокого порядка. Показано, что сплайновый фитинг более эффективен. Продемонстрирована возможность методики по выявлению тестового сигнала малой амплитуды порядка 5 нВ. Сделан вывод об эффективности описанной методики и возможности её применения в флуктуационно-шумовых исследованиях.

*Ключевые слова:* флуктуация, шумы, литиевые химические источники тока, аппроксимация.

## THE METHOD FOR PREPROCESSING A SIGNAL WHEN THE FLUCTUATION-NOISE STUDIES LITHIUM CHEMICAL CURRENT SOURCES

Mikhail A. Abaturov<sup>✉</sup>, ORCID: 0000-0002-6798-3756, abatur@yandex.ru  
Yuriy V. Sirotskiy, ORCID: 0000-0002-8917-3180, yusiro@mail.ru

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

Received 08.02.2018

Methodologies preprocessing the fluctuation-noise data in the study of chemical sources of current have been proposed. The object of the study was lithium dioxide-manganese element in the discharge process. Initial measurements were performed on compensated DC voltage chain. The overwhelming trend component of discharge was partially disavowed by linear approximation. The residual effects of the trend was reduced through polynomial approximation of the high power. It was shown that the spline fitting more efficient. Advantages of the methods for identifying a test signal of small amplitude about of 5 nV was demonstrated. The efficiency of the described methods and advantages of its application to the fluctuation-noise studies have been proven.

*Key words:* fluctuation, noise, lithium chemical current sources, approximation.

DOI: 10.18500/1608-4039-2018-18-1-8-12

### ВВЕДЕНИЕ

Флуктуационно-шумовые явления привлекают внимание исследователей в различных областях [1], но до сих пор их изучение не получило должного развития. Это обусловлено сложностью измерения и обработки случайных сигналов. При исследовании химических источников тока (ХИТ) это

дополнительно усугубляется тем, что измерение малых сигналов приходится выполнять на фоне относительно большой постоянной составляющей, которая, в свою очередь, подвержена нестабильности и тренду [2]. Для решения этой задачи необходимо применять специальные способы измерений, а результаты измерений необхо-

димо подвергнуть процедуре предварительной обработки, избавить записанный сигнал от неинформативных составляющих [3].

В настоящей статье рассмотрен общий подход к решению этой задачи, изложена методика предварительной поэтапной обработки исходных данных. Рассмотрение выполнено на примере реальных данных измерений, полученных в процессе разряда литиевого ХИТ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерение флуктуационно-шумового сигнала было проведено в соответствии с функциональной схемой установки, изображённой на рис. 1. Ранее мы уже применяли аналогичное решение [4]. Исследуемый элемент ХИТ ( $E_n$ ) литий-диоксидно-марганцевого типа CR2032 (фирма «ЕЕМВ», США) находился в процессе разряда постоянным током ( $I$ ) под стандартной нагрузкой ( $R = 2.4$  кОм). Для компенсации постоянной составляющей использовался дополнительный элемент ( $E_0$ ), идентичный исследуемому, находящийся в стабильном режиме без нагрузки. Результирующий сигнал ( $u_n$ ), избавленный таким образом от постоянной составляющей, с выхода сбалансированной

цепочки поступал на вход предварительного усилителя ( $OP$ ) и далее после антиалиасингового фильтра ( $AAF$ ) и оцифровки ( $A/N$ ), вводился в компьютер ( $PC$ ).

Типичная разрядная характеристика исследуемого элемента показана на рис. 2 (кривая 1). Кривая начинается с уровня порядка 3.3 В и заканчивается через 500 ч при полном разряде на уровне порядка 2 В. При проведении флуктуационно-шумовых измерений с помощью подбора компенсирующего элемента удалось достичь компенсации на уровне милливольт, и это позволило нам более детально записать фрагмент разрядной характеристики (рис. 2, кривая 2). На графике чётко виден тренд почти линейно падающей зависимости в диапазоне 10 мВ, но проявление искомым флуктуаций и шумов на этом графике полностью подавлено трендом.

На графике (рис. 2, кривая 3) показан результат последующего удаления тренда. Обработка данных проводилась стандартными средствами программного пакета *OriginLab* с помощью процедуры линейного фитинга. Диапазон графика удалось сузить на два порядка и довести до уровня десятых долей милливольт. После этой процедуры на кривой проявились слабые эффекты, связанные с нестабильностью и с нелинейнос-

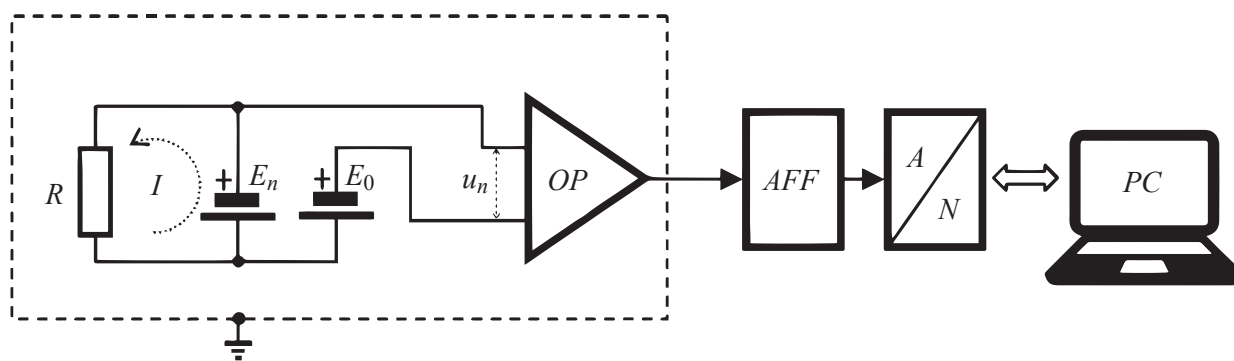


Рис. 1. Функциональная схема установки для флуктуационно-шумовых измерений:  $E_n$  и  $E_0$  – исследуемый и компенсирующий элементы ХИТ;  $u_n$  – регистрируемый флуктуационно-шумовой сигнал;  $R$  и  $I$  – нагрузочное сопротивление и ток разряда;  $OP$ ,  $AAF$ ,  $A/N$  и  $PC$  – усилитель, фильтр, аналого-цифровой преобразователь и компьютер в измерительном тракте

Fig. 1 The installation for fluctuation-noise measuring.  $E_n$  и  $E_0$  – battery under investigation and battery for compensation;  $u_n$  - detected fluctuation-noise signal;  $R$  and  $I$  – the load resistance and the current discharge;  $OP$ ,  $AAF$ ,  $A/N$  and  $PC$  – amplifier, filter, analog-to-digital converter and computer in the measuring path

тью тренда. Однако для обнаружения флуктуаций и шумов это усиление оказалось ещё недостаточным.

Дальнейший фитинг с помощью степенных полиномов позволил обнаружить на кривой искомые флуктуации и шумы (рис. 2, кривая 4). При этом диапазон сигнала удалось дополнительно сузить ещё на один порядок и довести его до 10 мкВ.

Наблюдаемая амплитуда шумов находится в пределах 0.5 мкВ, но на кривой сильно проявляются остаточные явления тренда, несмотря на то что нами был применён максимально приемлемый полином 5-й степени. Применение более высоких степеней чревато привнесением методических погрешностей и подавлением информационной составляющей [2]. Кроме того, такая аппроксимация начинает терять свойство вычислительной устойчивости.

Для более эффективной компенсации тренда нами был применён метод сплайновой аппроксимации, широко используемый в различных областях [5]. После этой обработки сигнал приобрёл характерный вид стационарного широкополосного шума с амплитудой порядка 0.5 мкВ (см. рис. 2, кривая 5).

В результате описанной выше поэтапно проведённой предобработки мы получили искомый флуктуационно-шумовой сигнал в завершённом виде, пригодном для более подробного последующего анализа.

Для проверки эффективности описанной методики были проведены контрольные измерения. На исследуемый ХИТ в процессе его разряда был наложен тестовый гармонический сигнал малого уровня – 5 нВ. На исходной кривой (см. рис. 2, кривая 1) в силу своей малости он не может быть обнаружен. Но после проведения всех этапов предобработки удалось из общего шумового сигнала выявить с помощью узкополосной фильтрации чёткую синусоиду амплитудой 5 нВ (см. рис. 2, кривая 6), что убедительно подтвердило действенность метода.

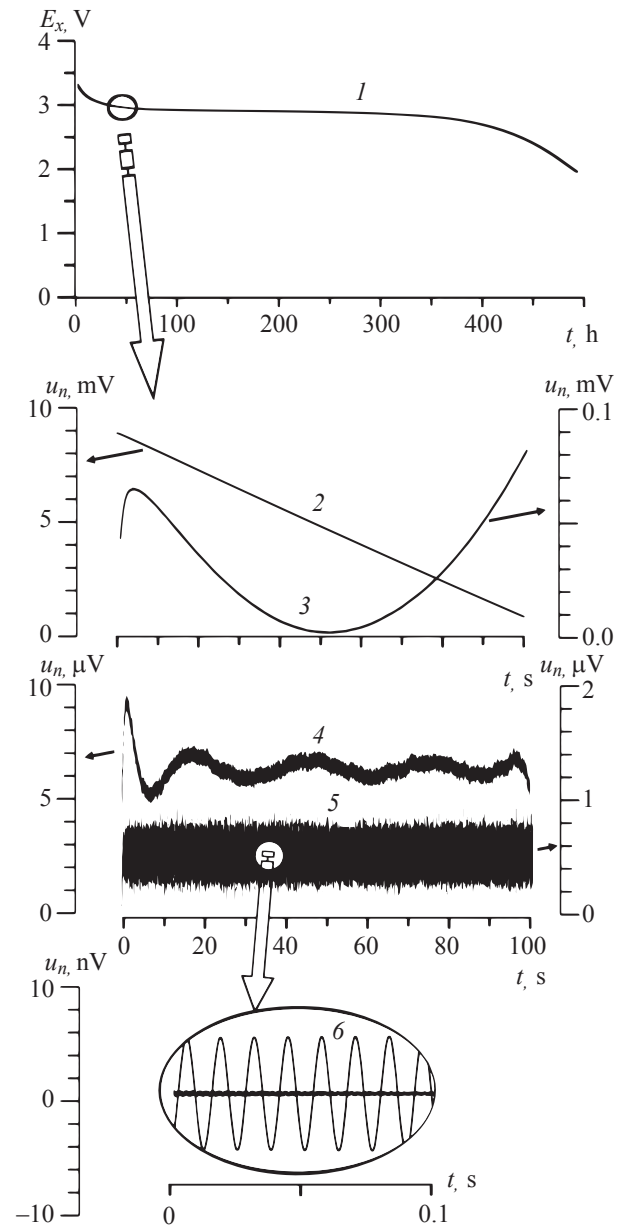


Рис. 2. Флуктуационно-шумовой сигнал на различных этапах предобработки: 1 – общая разрядная кривая  $E(t)$  и её фрагмент (выделен кружком); 2, 3, 4 и 5 – флуктуационно-шумовой сигнал  $u(t)$  соответственно в исходном виде, после линейного фитинга, после полиномиального и сплайнового фитинга; 6 – тестовый сигнал малой амплитуды после его фильтрации

Fig. 2. Fluctuation-noise signal at different stages of preprocessing: 1 – overviewing characteristic of the discharge current  $E(t)$  and its fragment (marked with a circle); 2, 3, 4 and 5 – fluctuation-noise signal  $u(t)$  respectively – raw, after line fitting, after polynomial and spline fitting; 6 – low amplitude test signal after selection

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате поэтапно проведенной предобработки флуктуационно-шумового сигнала, измеренного на фоне постоянной составляющей разряжаемого ХИТ, удалось существенно снизить трендовые составляющие. При этом разрешение в анализируемом сигнале благодаря исключению неин-

формационных компонент было повышено на шесть порядков – с уровня единиц вольт до уровня микровольт. Разработанная методика может быть использована для последующих флуктуационно-шумовых исследований ХИТ различными способами: будь то традиционная спектроскопия Фурье или же развиваемая сейчас спектроскопия Чебышева.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке и в соответствии с планом ИФХЭ РАН на 2018 год (номер государственной регистрации № 01.2.00901138, «Кинетические процессы в электрохимии включая наносистемы»).

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported and in accordance by the IPCE RAS plan for 2018 (number of state registration 01.2.00901138, “Kinetic processes in electrochemistry including nanosystems”).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимашев С. Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах. М.: Физматлит, 2007. 248 с.
2. Сюа Д.-Х., Бехнамиан Я. Способы устранения помех со стороны постоянного тока при измерениях электрохимических шумов (обзор) // Электрохимия. 2015. Т. 51. С. 675–683.
3. Астафьев Е. А., Укше А. Е., Добровольский Ю. А. Аппаратура для измерения электрохимических шумов химических источников тока // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 5. С. 1–2. DOI: 10.7868/S0032816217050032.

4. Абатуров М. А., Каневский Л. С. Безмикроспроцессорный измерительный комплекс для изучения шумовых характеристик химических источников тока // Электрохим. энергетика. 2008. Т. 8, № 4. С. 222–226.
5. Попантопуло В. Н., Печников А. Л., Новицкий С. П. Использование полиномиальных сплайнов Лагранжа для повышения точности измерения амплитудно- и фазочастотных характеристик электропроводных объектов по сигналам воздействия и отклика // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2004. № 1. С. 75–82.

## REFERENCES

1. Timashev S. F. *Flicker-shumovaia spektroskopii: informatsiia v khaoticheskikh signalakh* [Flicker-noise spectroscopy: information in chaotic signals]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 248 p. (in Russian).
2. Xia D. H., Behnamian Y. Ways to eliminate interference from dc measurements of electrochemical noise (review). *Russ. J. Electrochem.*, 2015, vol. 51, pp. 593–601.
3. Astaf'ev E. A., Ukshe A. E., Dobrovolskii Yu. A. Apparatura dlia izmereniia elektrokhimicheskikh шумов khimicheskikh istochnikov toka (Apparatus for measuring electrochemical noise and chemical current sources). (*Pribory i tekhnika eksperimenta* (Instruments and experimental techniques), 2017, no. 5, pp. 1–2. DOI: 10.7868/S0032816217050032 (in Russian).
4. Abaturov M. A., Kanevskii L. S. Bezmikroprocessornyi izmeritel'nyi kompleks dlia izucheniia шумовых характеристик khimicheskikh istochnikov toka

- [Without a microprocessor-based measuring complex for studying the noise characteristics of chemical power sources]. *Elektrokhimicheskaya Energetika* [Electrochemical energetics], 2008, vol. 8, no. 4, pp. 222–226 (in Russian).
5. Popantonopulo V. N., Pechnikov A. L., Novitskii S. P. Ispol'zovanie polinomial'nykh splainov Lagranzha dlia povysheniia tochnosti izmereniia amplitudno- i fazochastotnykh kharakteristik elektroprovodnykh ob'ektov po signalam vozdeistviia i otklika [The use of polynomial splines of Lagrange to improve the accuracy of measurement of amplitude – and phase-frequency characteristics of a conductive object according to the signals of impact and response]. *Nauchnyi Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University], 2004, no. 1, pp. 75–82 (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Абатуров Михаил Анатольевич** – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва. Служебный телефон: +7(495)955-47-44, e-mail: abatur@yandex.ru

**Сиротинский Юрий Владимирович** – кандидат технических наук, заведующий сектором, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва. Служебный телефон: +7(495)954-55-85, e-mail: yusiro@mail.ru