

И.В. Суровцев

## Метод адаптивного сглаживания электрохимических сигналов в хронопотенциометрии

Рассмотрен метод адаптивного сглаживания с использованием точки экстремумов исходного сигнала и его производной для определения точек перегиба на интегральном сигнале. По найденным точкам интегральный сигнал интерполируется и дифференцируется в полезный сигнал, при этом изменяются только зашумленные участки электрохимического сигнала.

Розглянуто метод адаптивного згладжування з використанням точки екстремумів вхідного сигналу та його похідної для визначення точок перегину на інтегральному сигналі. За знайденими точками інтегральний сигнал інтерполюється та диференціюється в корисний сигнал, при цьому змінюються тільки зашумлені ділянки електрохімічного сигналу.

**Введение.** В технических системах косвенных измерений, таких как определение концентрации токсичных элементов методами инверсионной хронопотенциометрии [1] или измерение нагрузок на оси при взвешивании автомобиля в движении на платформенных весах [2], когда полезный сигнал  $f(t)$  монотонно возрастает или убывает и представляет собой интегральную сумму временного процесса, цифровая обработка исходных сигналов обычно осуществляется следующим образом. Входной сигнал после высокочастотной фильтрации шума подвергается предварительному преобразованию: определяют обратный сигнал  $t(f)$ , затем его дифференцируют и сглаживают. Полученный сигнал интенсивности  $t'(f)$  представляют в виде линейной суммы моделей компонентов процесса. Результат косвенного измерения определяют по значениям параметров компонента, при этом качество моделирования контролируют путем сравнения обратного сигнала  $t(f)$  с модельным сигналом после обратного преобразования сигнала интенсивности (интегрирования).

Отметим, что в тех случаях, когда косвенное значение рассчитывается как интегральная характеристика (например, площадь компонента), то при выборе метода сглаживания обращают внимание на размывание границ компонентов и изменение формы сигнала интенсивности, которые могут существенно увеличить ошибку косвенного измерения. Кроме того, любое сглаживание сигнала интенсивности после его обратного преобразования (интегрирования) требует выполнения коррекции восстановленного сигнала, поскольку изменяется его форма.

Для решения этой непростой проблемы было бы целесообразно вначале определять параметры сглаживания на сигнале интенсивности  $t(f)$ , а затем сглаживать обратный сигнал  $t(f)$ , тогда прямое и обратное его преобразование будет выполняться однозначно, что даст возможность с минимальными ошибками определять косвенные значения измерений.

### Постановка задачи

На практике, сглаживание сигналов выполняют распространенными и широко известными методами:

- экспоненциального сглаживания, предложенного Р. Брауном [3];
- модификациями скользящего среднего (алгоритм адаптивного сглаживания [4]);
- с помощью аппроксимирующих сплайнов и метода наименьших квадратов [5].

Однако их использование приводит к искажению формы сигнала и к размыванию границ компонентов на сигнале интенсивности. Кроме того, в этих методах не учитываются внутренние свойства, заложенные в самом сигнале измерения.

Как показали исследования реальных объектов [6], наиболее значимые – участки сигнала  $y(x)$ , в которых первые или вторые производные равны нулю. Причем, по оценкам авторов, на точки экстремумов  $y'(x)=0$  или  $y''(x)=0$  приходится до 98 процентов всей информации в сигнале. Использование точек экстремумов позволило создать быстрый способ определения спектра аналогового сигнала и основанные на нем методы цифровой фильтрации [7]. Главным преимуществом применения такого подхода есть чрезвычайная простота программной реализа-

ции, высокая скорость и эффективность использования в спектральном анализе. Однако для сглаживания электрохимических сигналов предложенные методы цифровой фильтрации не всегда могут быть применены, поскольку точек экстремумов в сигнале может и не быть.

Ставится задача создать метод адаптивного сглаживания случайного процесса  $y(x) = s(x) + \xi(x)$  на фоне помехи  $\xi(x)$ . Сглаживается построенный интегральный сигнал  $z(x_i) = z(x_{i-1}) + y(x_i)$ , который затем дифференцируется в полезный сигнал  $s(x) = z(x_i) - z(x_{i-1})$ , где  $i = 1, \dots, N$ ;  $N$  – длина выборки. Величина помехи  $\xi(x) \rightarrow 0$  только для тех участков случайного процесса  $y(x)$ , для которых длина интервала между ее точками экстремумов  $\Delta x$  меньше заданного интервала фильтра  $\Delta x_0$ .

### Решение задачи

Суть предлагаемого метода адаптивного сглаживания состоит в следующем. Известно, что точки экстремумов помехи  $\xi(x)$  случайного сигнала  $y(x)$  соответствуют точкам перегиба интегрального сигнала  $z(x)$ . Поэтому, если на интегральном сигнале удалить точки внутри интервала  $\Delta x < \Delta x_0$  между точками перегиба, то после его интерполяции и восстановления в полезный сигнал  $s(x)$ , помеха  $\xi(x) \rightarrow 0$  на интервале  $\Delta x$  случайного процесса  $y(x)$ .

Процедура сглаживания сигнала состоит из двух этапов. На первом – анализируют точки экстремумов случайного сигнала и интервалы между ними, если они меньше граничного интервала фильтра, то сигнал сглаживают. На втором – случайный сигнал дифференцируют. В полученном сигнале анализируют точки экстремумов, соответствующие точкам перегиба уже случайного сигнала. Если интервалы между ними меньше граничного интервала фильтра, то полагают, что средняя точка интервала близка к *точке экстремума* случайного сигнала и повторяют процесс, аналогичный первому этапу.

### Описание алгоритма адаптивного сглаживания случайного сигнала

Общий алгоритм сглаживания сигнала включает следующие шаги:

*Этап 1.* Сглаживание по точкам экстремумов случайного сигнала

*Шаг 1.* Рассчитываем дискретный интегральный сигнал  $z(x)$  в виде текущей суммы при постоянном единичном шаге по координате  $x$

$$z(x_i) = z(x_{i-1}) + y(x_i); z(x_0) = 0; i = 1 \dots N. \quad (1)$$

*Шаг 2.* Находим точки экстремумов  $(x_j, y_j) = (x_i, y_i)$  в сигнале  $y(x)$ , соответствующие точкам перегиба в сигнале  $z(x)$  и отвечающие условию:

$$(y_i - y_{i-1}) \cdot (y_{i+1} - y_i) < 0; j = 1 \dots L, \quad (2)$$

где  $L$  – число точек экстремумов.

*Шаг 3.* Определяем интервал между соседними точками экстремумов, меньший заданного интервала фильтра

$$\Delta x_j = x_{j+1} - x_j < \Delta x_0. \quad (3)$$

*Шаг 4.* Если условие выполняется, то удаляем точки интегрального сигнала  $z(x)$ , соответствующие интервалу  $x_j < x < x_{j+1}$ .

*Шаг 5.* После анализа всех интервалов определяем амплитуды удаленных точек интегрального сигнала  $z(x)$  путем интерполяции.

*Шаг 6.* Сигнал  $z(x)$  дифференцируем в отфильтрованный полезный сигнал  $y(x)$ , в виде первой разницы

$$y(x_i) = z(x_i) - z(x_{i-1}). \quad (4)$$

*Шаг 7.* Сглаживание повторяют до тех пор, пока в исходном случайном сигнале  $y(x)$  имеются интервалы  $\Delta x_j$  между точками экстремумов, меньшие граничного интервала фильтра  $\Delta x_0$ . Если таких интервалов нет, то переходят ко второму этапу.

Интерполяция прореженного интегрального сигнала выполняется известным способом, например, с помощью интерполяционного полинома Лагранжа [8] или модифицированного алгоритма построения локальных кубических эрмитовых сплайнов по четырем точкам сигнала [5]. Модификация заключается в уточнении интерполяционных граничных диапазонов путем добавления дополнительно двух точек в начало и конец сигнала. Их амплитуды определяются экстраполяцией кубическим полиномом по четырем крайним точкам. При этом выполнение интерполяции на граничных участках значительно улучшается.

*Этап 2.* Сглаживание по точкам экстремумов производной случайного сигнала

Шаг 8. Рассчитываем дискретный сигнал производной  $p(x) = y'(x)$ , в виде первой разницы

$$p(x_i) = y(x_i) - y(x_{i-1}). \quad (5)$$

Шаг 9. Находим точки экстремумов  $(x_k, y_k) = (x_i, y_i)$  в сигнале  $p(x)$ , соответствующие точкам перегиба в сигнале  $y(x)$  и отвечающие условию:

$$(p_i - p_{i-1}) \cdot (p_{i+1} - p_i) < 0; k = 1 \dots M, \quad (6)$$

где  $M$  – число точек экстремумов.

Шаг 10. Определяем интервал между соседними точками экстремумов, который меньше заданного интервала фильтра

$$\Delta x_k = x_{k+1} - x_k < \Delta x_0. \quad (7)$$

Шаг 11. Принято, что средняя точка  $x_k$  интервала  $\Delta x_k$  сигнала производной  $p(x)$  близка к точке экстремума сигнала  $y(x)$ , а значит, соответствует точке перегиба интегрального сигнала  $z(x)$

$$x_k = (x_{k+1} + x_k) / 2. \quad (8)$$

Шаг 12. Повторяем шаги алгоритма 2–7 до тех пор, пока в сигнале  $p(x)$  имеются интервалы  $\Delta x_k$ , которые меньше граничного интервала фильтра  $\Delta x_0$ . Если таких интервалов нет, то сглаживание сигнала заканчивают.

Как видно из описанного алгоритма, принцип метода адаптивного сглаживания основывается на использовании внутренних характеристик сигнала, т.е. точек экстремумов и перегибов, и того факта, что сигнал сглаживания должен проходить через точки перегиба, непосредственно вытекающий из способа определения спектра аналогового сигнала [7]. Причем, прореживание и интерполяция промежуточных значений выполняется на интегральном сигнале, что позволяет существенно уменьшить ошибки сглаживания исходного сигнала.

Рассмотрим пример применения предложенного алгоритма сглаживания во время цифровой обработки электрохимического сигнала инверсии.

**Пример использования метода адаптивного сглаживания при измерении концентрации токсичных элементов методом хронопотенциометрии.** При определении концентрации химических элементов методами инверсионной хронопотенциометрии исходный электрохимический сигнал  $f(t)$ , поступающий от измерительного и вспомогательного электрода, пред-

ставляет собой интегральную сумму последовательного измерения во времени монотонно возрастающих потенциалов инверсии элементов после их предварительного накопления на измерительном электроде [1].

После выполнения преобразования исходных данных: цифровой фильтрации  $f(t)$ , определения обратного сигнала  $t(f)$  и его дифференцирования, полученный сигнал интенсивности  $t'(f)$  рассматривают как линейную сумму компонентов измерения, расположенных на кривой нижней огибающей (сигнал интенсивности фонового раствора). При этом площадь компонента представляет собой значение времени инверсии, используемого при определении концентрации элемента. Точность расчета концентрации связана с качеством моделирования и правильным выбором границ изменения каждого компонента сигнала интенсивности [9]. В случае тесной взаимосвязи используют итерационную процедуру синтеза моделей для разделения суммы пересекающихся компонентов.

Во время определения концентрации химического элемента по способу *добавки* последовательно выполняют измерение фонового раствора, раствора пробы объекта и раствора пробы с добавкой известной массы стандартного образца иона элемента. Зная время инверсии при измерении фона, пробы, добавки и величину внесенной массы рассчитывают значение концентрации элемента в объекте окружающей среды.

Рассмотрим конкретный электрохимический сигнал инверсии трех элементов: *Cd* (кадмий), *Pb* (свинец) и *Cu* (медь) с постоянным временем дискретизации  $\Delta t = 1$  мс. На рис. 1, а, б представлены исходный  $f(t)$  и обратный сигнал  $t(f)$  измерения инверсии трех химических элементов.

Обратный сигнал  $t(f)$  рассчитан с постоянным шагом по потенциалу  $\Delta \phi = 1$  мВ, а граничный интервал фильтра сглаживания составляет  $\Delta f_0 = 35$  мВ.

Рассмотрим применение описанного метода для осуществления адаптивного сглаживания сигнала интенсивности. В соответствии с алгоритмом, исходным случайным сигналом  $y(x)$  будет сигнал интенсивности  $t'(f)$ , а интегральным сигналом  $z(x)$  – обратный сигнал  $t(f)$ .

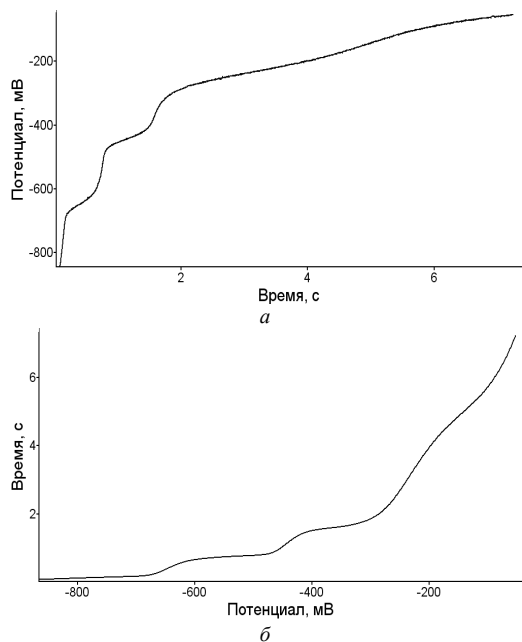


Рис. 1

При анализе исходного сигнала интенсивности  $t'(f)$  обнаружены интервалы  $\Delta f_j$  между соседними точками экстремумов, которые меньше заданного граничного интервала фильтра  $\Delta f_0$ , поэтому выполнение первого этапа сглаживания необходимо. Исходный и сглаженный сигнал после первого этапа метода адаптивного сглаживания представлен на рис. 2.

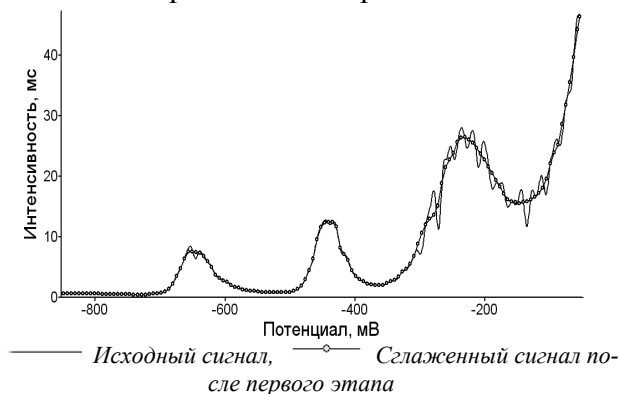


Рис. 2

При анализе первой производной сигнала интенсивности  $t'(f)$ , сглаженного после первого этапа, имеются интервалы  $\Delta f_k$  между соседними точками экстремумов, которые меньше заданного граничного интервала фильтра  $\Delta f_0$ . Таким образом, выполнение второго этапа сглаживания тоже необходимо. На рис. 3 представлены сигналы первой производной от интенсивности  $t'(f)$ : исходный сигнал (до выполне-

ния процедуры сглаживания), после первого и после второго этапа сглаживания.

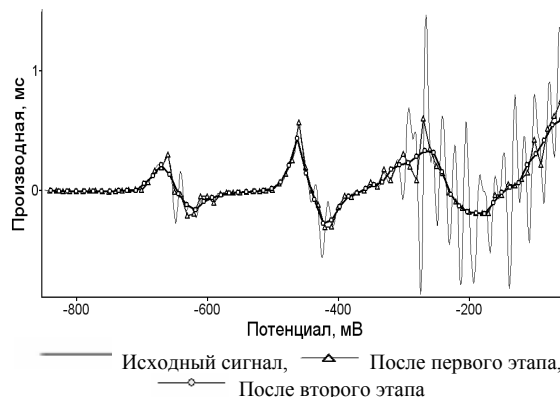


Рис. 3

Отметим, что в большинстве технических систем измерений ограничиваются первым этапом метода адаптивного сглаживания, анализируя только точки экстремумов случайного сигнала. Второй этап нужен, когда необходимо получить очень гладкий сигнал и когда его форма влияет на результаты моделирования, как в случае электрохимических сигналов.

В результате выполнения метода адаптивного сглаживания сигнал интенсивности  $t'(f)$  приобретает вид, необходимый для моделирования и определения параметров расчета концентрации [9].

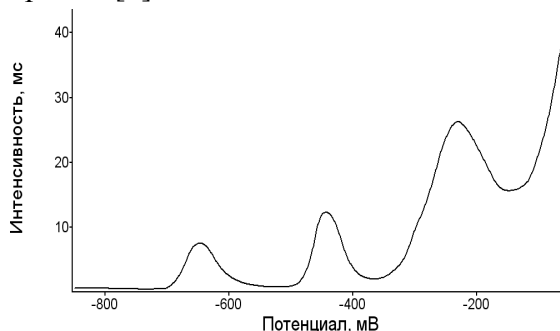


Рис. 4

Рассмотренный пример применения созданного алгоритма для обработки электрохимических сигналов инверсии продемонстрировал наглядность, качество и простоту предложенного метода сглаживания. Алгоритм метода адаптивного сглаживания включен в специализированный базовый пакет программ «ТС-ПО», обеспечивающий решение ряда задач цифровой обработки сигналов при создании технических систем измерения, а именно: фильтрации, сглажи-

вания, интерполяции, аппроксимации и моделирования [1].

**Заключение.** Использование экстремумов случайного процесса и сигнала производной при выборе точек перегиба только для зашумленной части интегрального сигнала, его сглаживание и преобразование в полезный сигнал позволяет выполнить адаптивное сглаживание. Это дает возможность решить проблему размывания границ компонентов и изменения формы сигнала интенсивности при сглаживании (рис. 4), что существенно уменьшает ошибку косвенного измерения концентрации элементов в хронопотенциометрии. Кроме того, корректное обратное преобразование полезного сигнала в интегральный сигнал позволяет контролировать качество моделирования всего сигнала интенсивности, а не только его отдельных компонент.

Метод адаптивного сглаживания электрохимических сигналов показал свою работоспособность, быстродействие, надежность и был многократно внедрен в программное обеспечение ряда систем измерений, действующих по настоящее время в различных областях техники. Его использование в выпускаемых приборах «Анализатор ИХП» и «М-ХА1000-5» служит для определения концентрации токсичных элементов в объектах окружающей среды [1], в системах динамического взвешивания автомобилей на Международных таможенных пунктах пропуска Украины [2], а также во многих других системах. Метод отличается чрезвычайной простотой в реализации и хорошим качеством сглаживания.

Круг решаемых задач не ограничивается приведенными техническими системами и может быть значительно расширен. Предложен-

ный метод адаптивного сглаживания по существу имеет универсальный характер и поэтому может быть использован для анализа самых разных сигналов физической или химической природы.

1. Пат. № 107412 Украина: МПК (2006) G01N 27/48. Пристрій для вимірювання концентрації токсичних елементів / І.В. Суровцев, С.К. Галімов, І.А. Мартинів та ін.; Опубл. 25.12.2014. – Бюл. № 24.
2. Пат. № 106013 Украина: МПК G01G 19/02. Система поосового зважування на платформних вагах / І.В. Суровцев, О.В. Бабак, О.Е. Татарінов та ін.; Опубл. 10.07.2014. – Бюл. № 13.
3. Brown R.G., Meyer R.F. The fundamental theorem of exponential smoothing // Oper. Res. – 1961. – 9, N 5. – P. 23–34.
4. Файнзильберг Л.С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика. – К.: Наук. думка, 2008. – 333 с.
5. Слайни в цифровій обробці даних і сигналів / І.В. Шелевицький, М.О. Шутко, В.М. Шутко та ін. – Кривий Ріг: Видав. Дім, 2008. – 232 с.
6. Цепков Г.В. Методы сжатия данных для быстрых корреляционно-спектральных преобразований // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Дала. – 2013. – № 15 (204). – С. 222–229.
7. А.С. № 845600. СССР. Способ определения спектра аналогового сигнала / В.И. Скурихин, И.Д. Пономарева, П.М. Сиверский и др. – 1981.
8. Павленко В.Г., Суровцев И.В. Многомерная интерполяционная формула Лагранжа и ее применение к аппроксимации диаграмм Папмеля // Тр. Новосибирского ин-та инженеров водн. трансп. – 1974. – 96. – С. 3–12.
9. Суровцев И.В., Татарінов А.Э., Галімов С.К. Моделирование дифференциальных хронопотенциограмм суммой нормальных распределений // УСиМ. – 2009. – № 5. – С. 40–45.

Поступила 09.04.2015

Тел. для справок: +38 044 526-4187 (Киев)

E-mail: dep175@irtc.org.ua, igorsur52@gmail.com

© И.В. Суровцев, 2015

UDC 004.02:004.67

I.V. Surovtsev

## The Method of Adaptive Smoothing of Electrochemical Signals in Chronopotentiometry

**Introduction.** In chronopotentiometry for the data processing systems it is important to apply the method of smoothing that does not distort the form of the intensity signal and does not increase the measurement error of the toxic elements concentration.

**Purpose.** The purpose of research is to create a method of smoothing individual sections of the signal for which the interval between the points of extrema or the kinks is less than the interval of filter.

**Methods.** The intervals between the inflection points which correspond to the points of the original signal extrema are found on the calculated integral signal. If the interval is less than a predetermined value, the internal points are removed; the integral signal is interpolated and is differentiated back into a useful smoothed signal.