

УДК 53.088.7, 681.2.088

МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ СИГНАЛА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ СКАНИРУЮЩЕМ КАЛОРИМЕТРЕ*

А.С. Нечаев, А.П. Жирнова, И.Н. Нечаева

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. *Приведен анализ использующихся в дифференциальных сканирующих калориметрах (ДСК) способов восстановления локальных во времени информационных сигналов и сделан выбор на вейвлет-функциях. На основании выбранного материнского вейвлета была предложена методика аппроксимации экспериментально полученных с помощью устройства ДСК сигналов. Была проведена апробация методики для однопикового и двухпикового сигналов. При наличии возможности изменять параметры аппроксимирующей функции в процессе математического описания сигнала была доказана возможность использования методики для работы с веществами, обладающими эндо- и экзотермическими свойствами в момент фазового перехода. Были даны оценки влияния результатов оцифровки сигналов на точность измеряемой дифференциальной температуры. В результате была оценена относительная погрешность аппроксимирующей функцией при использовании предложенной методики от числа проделанных итерационных вычислений.*

Ключевые слова: *дифференциальный сканирующий калориметр, аппроксимация, вейвлет-функция, погрешность, однопиковый сигнал, многопиковый сигнал.*

Введение

В задачах изучения физико-химических параметров веществ методом дифференциального термического анализа (ДТА) используются измерительные системы, фиксирующие полученные результаты после их автоматизированной обработки. В процессе автоматизированной обработки экспериментальных данных проводится их аппроксимация. Эта операция позволяет сглаживать погрешности эксперимента, вызванные небольшими случайными отклонениями измеряемой величины, описывать набор данных функциями, которые возможно использовать при повторении эксперимента в одних и тех же условиях, а также использовать довольно компактную математическую запись сигнала при значительном объеме исходных данных по сравнению с операцией интерполяции. Одним из распространенных измерительных приборов в ДТА является дифференциальный сканирующий калориметр (ДСК), предназначенный для определения температур фазовых переходов индивидуальных веществ и многокомпонентных смесей, а также для получения основных термодинамических и кинетических параметров исследуемых материалов.

* Работа проводилась при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-01103 а.

Нечаев Александр Сергеевич (к.т.н.), доцент кафедры «Радиотехнические устройства».

Жирнова Елена Павловна, магистрант.

Нечаева Ирина Николаевна, аспирант.

Уменьшение погрешностей измерения ставится ключевой задачей при проектировании и создании ДСК. При этом совершенствуется конструкция блоков устройства, используются новые материалы при изготовлении элементов, вводятся системы автоматического управления тепловыми потоками, способные поддерживать необходимый режим нагрева образцов в условиях внешних возмущений, и т. д. [1, 2]. Однако аппаратные решения повышения точности измерения часто либо не позволяют избавиться от возникающих погрешностей в необходимой мере, либо являются сложными и нерентабельными в своем практическом исполнении. Это приводит к необходимости применять аналитические методы повышения точности измерения, которые заключаются в использовании усовершенствованных математических моделей блоков информационно-измерительной системы и происходящих в них процессов [3].

Обработка сигналов в ДСК аналитическими методами является неотъемлемой частью проведения эксперимента, поскольку она позволяет исключить некоторые погрешности измерения, в частности инструментальную и динамическую, которые вносят весомый вклад в результаты опыта [4, 5].

Выбор базисной функции для анализа экспериментальных данных является важной задачей, решение которой сказывается на эффективности использования результатов в дальнейшей обработке восстановления информационного сигнала и точности полученных вследствие этого выводов. Так, например, в задачах восстановления исходного сигнала могут быть использованы обратные фильтры [6, 7], среди которых особо выделяют нерекурсивные, рекурсивные, фильтр Калмана и адаптивные фильтры, а также вытянутые сферические волновые функции [8] и нейросетевые модели [9]. Принцип большинства имеющихся методов основан на знании как функций, отражающих характеристики измерительных элементов при различных режимах работы системы, так и функций, аппроксимирующих выходной сигнал.

Постановка задачи

Целью работы является разработка методики аппроксимации сигнала в дифференциальном сканирующем калориметре, позволяющей использовать имеющуюся в нем программно-аппаратную базу.

Для достижения цели ставится задача анализа базисных функций, способных с приемлемой точностью аппроксимировать широкополосный сигнал, полученный в ходе проведения эксперимента на устройстве ДСК. По результатам проведенного исследования следует разработать методику использования выбранных базисов для аппроксимации полученного в ходе эксперимента сигнала. Причем при создании методики следует опираться на уже имеющиеся в современных устройствах ДСК программные и аппаратные возможности.

Под аппаратными возможностями понимается оцифровка сигнала, которая, во-первых, представляет исходный сигнал в виде ряда дискретных значений, а во-вторых, вносит дополнительную погрешность в ходе аналого-цифрового преобразования сигнала.

Возможности программной части информационно-измерительных систем рассматриваемого класса весьма широки, поскольку большинство из них сопряжены с работой ЭВМ. Однако быстроедействие процесса аппроксимации сигнала не должно вести к существенной задержке получения результатов всего эксперимента, а следовательно, от предлагаемой методики требуется относительно небольшое число итерационных вычислений.

Методы решения

Особенностью сигналов, полученных в ходе исследования тепловых характеристик веществ с помощью ДСК, является их локальность во времени. Это приводит к появлению существенной расчетной погрешности при использовании популярных в измерительной технике спектральных методов обработки исходных данных.

В настоящее время широкое распространение получил вейвлет-анализ нестационарных сигналов, который позволяет представить конечный во времени сигнал с помощью базисных функций, существующих постоянно, но не равных нулю на ограниченном временном промежутке [10–12].

В ходе работы были проанализированы различные виды материнских вейвлетов, которые позволяют провести анализ полученных в ходе эксперимента сигналов, среди них DOG-вейвлет, WAVE-вейвлет, вейвлет Морле, «мексиканская шляпа» и др. Каждый из них является плавной функцией с нулевым моментом и быстро убывающей с ростом частоты [13–15], что важно при анализе экспериментально полученных данных.

Для дальнейших исследований был выбран вейвлет гауссовского типа, имеющий математическую запись

$$\psi = A \cdot \exp\left(\frac{-(t-b)^2}{2a^2}\right), \quad (1)$$

где функция $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ называется вейвлетом;

A – параметр, характеризующий максимальное значение вейвлета;
 a , b – параметры масштаба и сдвига соответственно.

Данный материнский вейвлет подходит для описания сигналов рассматриваемых типов аналитических приборов, что подтверждается в исследованиях [16], а также имеет один набор параметров масштаба и сдвига, в отличие, например, от DOG-вейвлета или вейвлета типа «мексиканская шляпа».

Сигнал на выходе аналитического прибора представляет собой конечную сумму вейвлет-функций [17, 18]:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \exp\left(\frac{-(t-b_i)^2}{2a_i^2}\right), \quad (2)$$

где i – порядковый номер базовой функции, $i = 1, 2, \dots, N$.

Такой принцип суперпозиции вейвлетов позволяет применить последовательный подход к нахождению аппроксимирующей функции.

Для определения функции первого вейвлета выражения (2) необходимо найти значения его параметров. Временной параметр сдвига пика b_i и его максимальное значение A_i довольно просто определяются из массива данных, полученных в ходе проведения эксперимента на устройстве ДСК, имеющем блок оцифровки сигналов. На рис. 1 параметры b_i и A_i определяют абсциссу и ординату точки экстремума пика относительно базовой линии соответственно. Погрешность полученных значений элементов массива определяется разрядностью аналого-цифрового преобразователя и в большинстве случаев является несущественной, поскольку скорость происходящих в ДСК тепловых процессов значи-

тельно ниже быстродействия преобразователя [19–21]. Например, в отечественном дифференциальном сканирующем калориметре ДСК-500 используется прецизионный 24-разрядный аналогово-цифровой преобразователь – максимальное значение интегральной нелинейности 0,0015 %, а число эффективных разрядов при выбранной частоте преобразования равно 19, что позволяет получать исходные данные с довольно высокой точностью. Таким образом, уравнение (2) можно представить в дискретном виде:

$$S[j] = \sum_{j=0}^M \sum_{i=1}^N A_i \cdot \exp\left(\frac{-(t[j] - b_i)^2}{2a_i^2}\right), \quad (3)$$

где j – номер элемента массива данных, $j = 1, 2, \dots, M$.

Расчет масштабного коэффициента a_i осуществляется с помощью ввода вспомогательных коэффициентов по формуле

$$a_i = \sqrt{\frac{-(d - b_i)^2}{2 \cdot \ln\left(\left|\frac{c - const}{A_i}\right|\right)}}. \quad (4)$$

Здесь c и d – соответственно значения дифференциальной температуры и временной координаты массива данных в точке, максимально близкой к расчетному значению g , которое определяется как $g = A_i \exp(-0,5) + const$, где $const$ – калибровочное значение дифференциальной температуры.

Подставив значение уравнения (4) в (3) при $i=1$, получим выражение для первого вейвлета.

Следующим шагом вычисляется разность имеющегося набора массива данных, характеризующего экспериментально снятую дифференциальную температуру $\Delta T[j]$, и полученного массива (3):

$$q[j] = \Delta T[j] - S[j]. \quad (5)$$

Если максимальное абсолютное значение $q[j]$ больше заданного порога, определяемого максимально допустимой погрешностью, то за основу следующего цикла вместо ряда (3) принимается (5) и по описанному алгоритму вычисляется $S[j]$ при $i = 2$ и т. д. Окончание вычислений наступает при выполнении условия $q[j] \leq \varepsilon$, где ε – заданная погрешность, а за аппроксимирующую функцию принимают сумму всех полученных вейвлетов $S[j]$.

В работе использование разработанной методики описания выходного сигнала калориметра с помощью вейвлет-функций было осуществлено для простого однокомпонентного вещества индия (см. рис. 1). На оси ординат отражены дискретные значения дифференциальной температуры в безразмерном виде с учетом калибровки измерительного устройства. Следует отметить, что исследование температур фазовых превращений веществ осуществляется на ДСК преимущественно под воздействием линейно изменяющегося температурного поля, скорость изменения которого задается блоком управления. От скорости нагрева зависят время проведения эксперимента, значение зафиксированной температуры фазового перехода и т. п. Задание оптимальной скорости нагрева опирается на

знание индивидуальных особенностей исследуемых веществ (молекулярной структуры, теплопроводности, массы и габаритов образца, эффективной площади контакта вещества с нагретой поверхностью и т. д.), что зачастую заранее неизвестно. Линейность изменения температуры нагрева позволяет применять довольно простые способы корректировки базовой линии для определенного эталонного образца, фиксировать кривую теплопоглощения в процессе нагрева измерительного блока и находить кинетические характеристики при динамическом режиме работы системы.

Постоянство скорости нагрева дает возможность использовать в качестве аргумента аппроксимирующей функции как время, так и температуру нагрева измерительной ячейки.

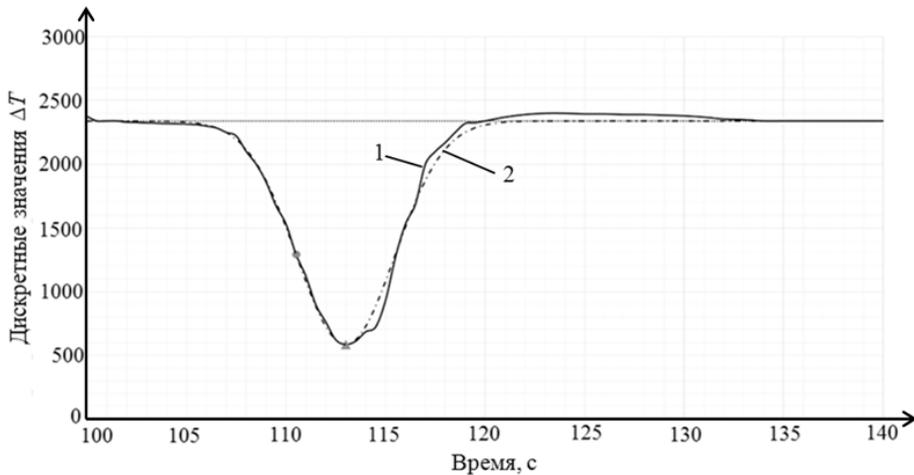


Рис. 1. Термограмма индия (1) и первая вейвлет-функция (2)

На рис. 1 сплошной линией изображена экспериментально снятая термограмма индия, на которой выделены две точки: вершина пика ($b_1 = 113 \text{ с}$, $A_1 = -1755$) и точка, максимально близкая к рассчитанному значению g , с координатами $d_1 = 110,5 \text{ с}$, $c_1 = -1293$. С помощью уравнений (3) и (4) была рассчитана первая вейвлет-функция, отображенная на рисунке пунктирной линией. Разность экспериментально снятого сигнала и рассчитанного вейвлета приведена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что получившаяся зависимость является локальным многоимпульсным сигналом, а значит, к нему можно применить тот же подход, получая новые значения функций $S[j]$ при $i = 2, 3$, и т. д., шаг за шагом уменьшая погрешность.

Довольно часто экспериментатору необходимо знать не только абсолютные значения погрешности, но и нормированные. С этой целью используется понятие относительной погрешности, которую в интерпретации поставленной задачи можно представить следующим отношением:

$$z[j] = \left| \frac{\Delta T[j] - S[j]}{\Delta T[j]} \right| \cdot 100\%. \quad (6)$$

Вышеуказанные погрешности рассчитываются для ряда значений T , по-

этому они тоже записываются как ряд значений. В этом случае расчет аппроксимирующих вейвлет-функций завершается при уменьшении максимального значения $z[j]$ ниже заданной погрешности.

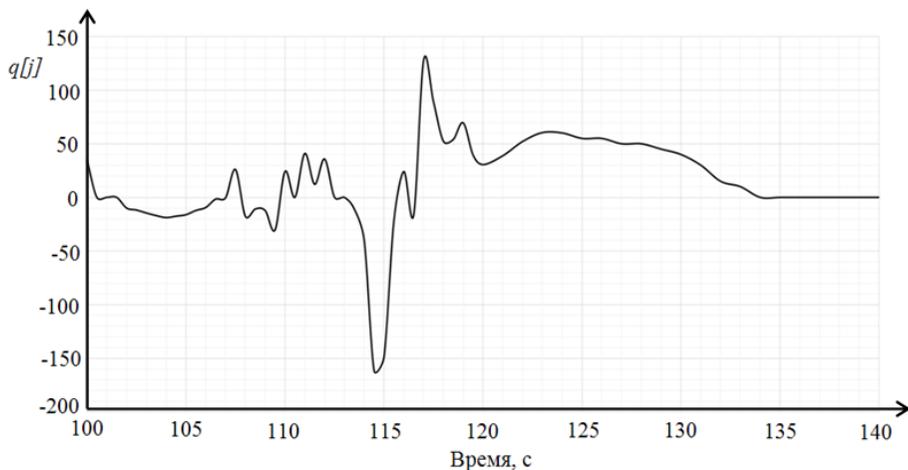


Рис. 2. Разность между исходными данными и рассчитанной вейвлет-функцией

Для индия был произведен расчет ряда вейвлет-функций по предложенной методике и оценена относительная погрешность аппроксимации исходного сигнала. Результаты представлены на рис. 3.

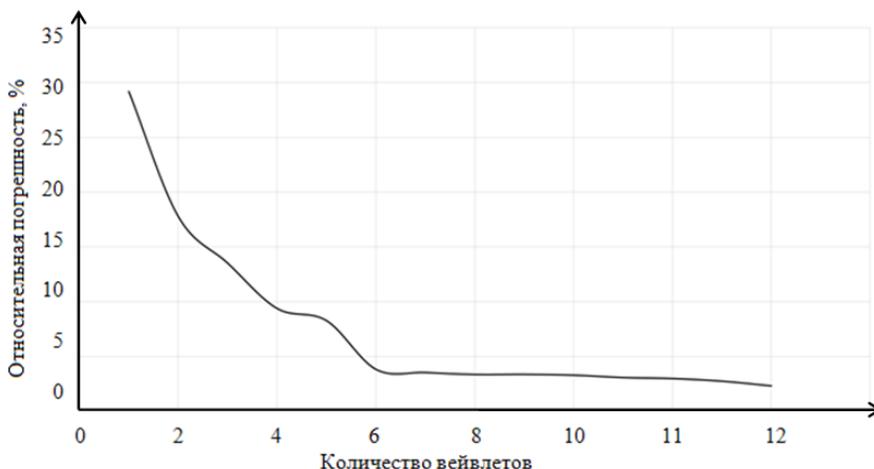


Рис. 3. Зависимость максимальной относительной погрешности от числа аппроксимирующих сигнал вейвлет-функций

Как видно из рис. 3, относительная погрешность довольно быстро уменьшается до шестого цикла расчетов вейвлет-функций с 30 до 3,5 %. Сумма двенадцати вейвлет-функций дает погрешность 2,3 %, что говорит о дальнейшем уменьшении погрешности при увеличении слагаемых выражения (3), однако после шестого скорость уменьшения погрешности значительно ниже.

По предложенной выше методике была произведена аппроксимация двухпикового сигнала, отражающего фазовое превращение тринитроэтилового эфира

тринитромасляной кислоты при воздействии линейно нарастающей температуры (рис. 4).

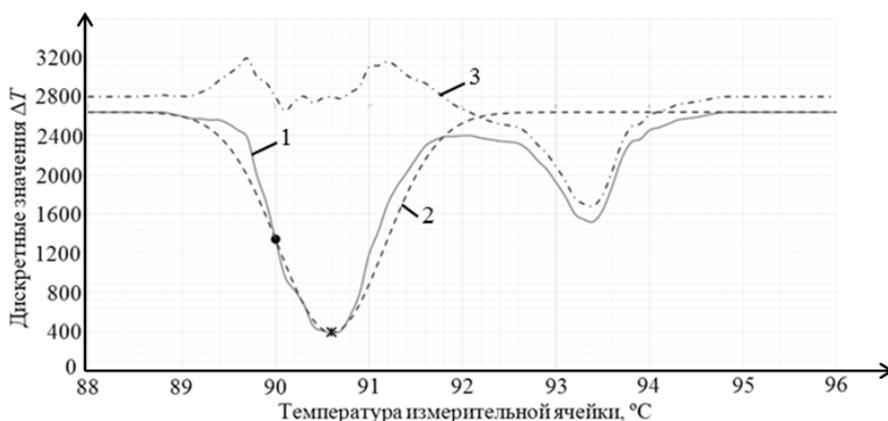


Рис. 4. Аппроксимация двухпикового сигнала:

1 – экспериментально снятая термограмма разложения тринитроэтилового эфира тринитромасляной кислоты; 2 – первая аппроксимирующая вейвлет-функция; 3 – разность между исходными данными и рассчитанной вейвлет-функцией

По формуле (6) произведена оценка относительной погрешности $z[j]$ при первом цикле аппроксимации, которая составила 90 %. При уменьшении полученной разности аналогично приведенному примеру при однопиковом сигнале была определена зависимость изменения $z[j]$ от количества аппроксимирующих сигнал вейвлет-функций (рис. 5).

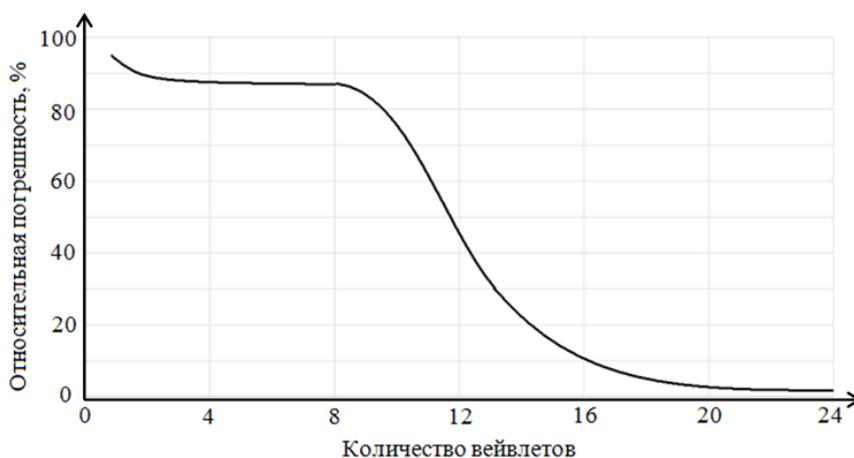


Рис. 5. График зависимости относительной погрешности аппроксимации от количества вейвлет-функций

Как видно из рис. 5, относительная погрешность при определенном количестве итераций (от 2 до 8) не изменяет своего значения. Это объясняется последовательным подходом нахождения аппроксимирующей функции, который связан с уменьшением ближайшего пика к начальному значению разностной функции до заданной погрешности. Так, в ходе апробации метода за допустимую от-

носительную погрешность принималось значение 3 % и в течение 8 итераций производилось разложение первого пика двухпикового сигнала, приведенного на рис. 4. Описанием первого пика 8 вейвлет-функциями была достигнута допустимая погрешность и началась аппроксимация второго пика. Такой метод описания более прост с точки зрения его алгоритмизации, но в то же время не влияет на качество конечной модели, поскольку описание сигнала представляет собой сумму вейвлетов, а значит, порядок нахождения базисных функций неважен.

Выводы

Разработанная методика, как было показано выше, позволяет работать как с однопиковыми, так и многопиковыми сигналами. Причем учитывая возможность параметра A в выражении (1) принимать как положительные, так и отрицательные значения, можно сделать вывод о том, что методика позволяет описывать пиковые сигналы как с положительными скачками, так и с отрицательными. С точки зрения физико-химического анализа веществ это возможно, когда в процессе эксперимента происходят экзо- и эндотермические реакции, что расширяет возможность применения предложенного метода аппроксимации сигналов в устройствах ДСК.

Данный принцип может лечь в основу алгоритма восстановления информационного сигнала аналитическими методами, используемыми в вычислениях аппроксимирующую функцию экспериментально полученных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мощенский Ю.В., Дмитриева Е.А., Нечаев А.С.* Задатчик программного нагрева для исследования термического поведения энергонасыщенных материалов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2016. – Ч. 5. – С. 19–22.
2. *Нечаев А.С., Хуснутдинова Р.Р., Нечаева И.Н., Дмитриева Е.А., Митрошин В.Н.* Модель корректирующего звена для уменьшения динамической погрешности измерительной ячейки дифференциального сканирующего калориметра // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 3 (51). – С. 73–77.
3. *Нечаев А.С., Мощенский Ю.В., Хуснутдинова Р.Р., Дмитриева Е.А.* Модель измерительного блока ДСК для синтеза системы управления тепловым потоком // Датчики и системы. – 2016. – № 6. – С. 38–43.
4. *Choin'ski D., Wodolazski A., Stachan'czyk D., Niedz'wiedz M.* Analysis of the thermal properties of a heat flow chip calorimeter using CFD // Applied Thermal Engineering. Vol. 96. 2016. P. 508–518.
5. *Koci V., Madera Y., Jerman M., Cerny R.* Computational analysis of heat transport and storage processes in large-volume isothermal heat flow calorimeter // Applied Thermal Engineering. Vol. 121. 2017. P. 547–553.
6. *Засов В.А., Тарабардин М.А., Никоноров Е.Н.* Алгоритмы и устройства для идентификации входных сигналов в задачах контроля и диагностики динамических объектов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2009. – № 2. – С. 115–123.
7. *Tsai J., Ebrahimzadeh F., Hsu W., Tann J.W., Guo Sh., Shieh L., Canelon J.I., Wang L.* Modeling and tracker for unknown nonlinear stochastic delay systems with positive input constraints // Applied Mathematical Modelling. Vol. 40. 2016. P. 10447–10479.
8. *Zou C., Kou K.I.* Robust signal recovery using the prolate spherical wave functions and maximum correntropy criterion // Mechanical Systems and Signal Processing. Vol. 104. 2018. P. 279–289.
9. *Волосников А.С.* Нейросетевая динамическая измерительная система с дополнительной фильтрацией последовательно восстанавливаемого входного сигнала датчика // Известия Челябинского научного центра УРО РАН. – 2005. – № 4. – С. 139–144.
10. *Воробьев В.И., Грибунин В.Г.* Теория и практика вейвлет-преобразования. – СПб: ВУС, 1999. – 204 с.
11. *Zhang B., Wang D., Ye Y.* Wavelet transform-based frequency tuning ILC // IEEE Transactions on systems, man and Cybernetics. Part B, 35(1), 2005. P. 107–114.
12. *Wang Y., Kwon S., Rgan A., Rohlev T.* System identification of the linac RF system using a wavelet

- method and its applications in the SNS LLRF control system // Proceedings of the Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001. P. 1613–1615.
13. *Shahbaztabar D., Alirezadee Sh., Ahmadi M., Heydari R.* A MC-CDMA system based on orthogonal filter banks of wavelet transforms and partial combining // *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*. Vol. 94. 2018. P. 128–138.
 14. *Chui C.K., Villiers J., Zhuang X.* Multirate systems with shortest spline-wavelet filters // *Appl. Comput. Harmon. Anal.* Vol. 41. 2016. P. 266–296.
 15. *Lu Sh., Yu H., Dong H., Wang X., Sun Y.* Single-step prediction method of burning zone temperature based on real-time wavelet filtering and KELM // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Vol. 70. 2018. P. 142–148.
 16. *Сайфуллин Р.Т., Наумов А.А.* Вейвлет-анализ в обработке сигналов аналитических приборов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2016. – Т. 18, № 1(2). – С. 412–415.
 17. *Русинов Л.А.* Автоматизация аналитических систем определения состава и качества веществ. – Л.: Химия, 1984. – 160 с.
 18. *Манойлов В.В., Новиков Л.В.* Получение и обработка информации аналитических приборов. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 176 с.
 19. *Zhu X., Wang X., Xu Z., Li B.* Analysis on the selection of optimal ADC parameters in indirect measurement // *Infrared Physics & Technology*. Vol. 71. 2015. P. 501–505.
 20. *Wijayasundara G.W.C., Lee H., Park S. Cho H., Kim M.* Linearity evaluation of high-speed sampling ADC board // *Measurement*. Vol. 106. 2017. P. 31–34.
 21. *Cheng X., Zeng X., Feng Q.* Analysis and improvement of ramp gain error in single-ramp single-slope ADCs for CMOS image sensors // *Microelectronics Journal*. Vol. 58. 2016. P. 23–31.

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2018 г.

METHOD OF SIGNAL APPROXIMATION IN DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETER

A.S. Nechaev, A.P. Zhirnova, I.N. Nechaeva

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper analyzes the methods of reconstructing time-local information signals used in differential scanning calorimeters (DSC) and makes a choice on wavelet functions. Based on the selected maternal wavelet, a technique was proposed for approximating the signals obtained experimentally with a DSC device. Approbation of the technique for single-peak and two-peak signals was carried out. Having the possibility to change the parameters of the approximating function in the course of the mathematical description of the signal, the possibility of using the technique for working with substances possessing endo- and exothermic properties at the time of the phase transition was proved. Evaluations of the effect of digitizing the signals on the accuracy of the measured differential temperature were given. As a result, the relative error was estimated by the approximating function when using the proposed technique from the number of iterative calculations performed.*

Keywords: *differential scanning calorimeter, approximation, wavelet-function, error, single-peak signal, multi-peak signal.*

*Alexander S. Nechaev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Alena P. Zhirnova, Graduate Student.
Irina N. Nechaeva, Postgraduate Student.*

REFERENCES

1. *Moshchenskiy Yu.V., Dmitrieva E.A., Nechaev A.S.* Programmable heating programmer for studying the thermal behavior of energy-saturated materials // *Industrial Automated Control Systems and Controllers*. Vol. 5. 2016. p. 19–22. (In Russian).
2. *Nechaev A.S., Khusnutdinova R.R., Nechaeva I.N., Dmitrieva E.A., Mitroshin V.N.* Model of the correcting link for reducing the dynamic error of the measuring cell of the differential scanning calorimeter // *Bulletin of the Samara State Technical University. A series of "Technical Sciences"*. № 3 (51). 2016. P. 73–77. (In Russian).
3. *Nechaev A.S., Moshchenskiy Yu.V., Khusnutdinova R.R., Dmitrieva E.A.* Model of the DSC measuring unit for the synthesis of a heat flow control system // *Sensors and systems*. № 6. 2016. P. 38–43. (In Russian).
4. *Choin'ski D., Wodolazski A., Stachan'czyk D., Niedz'wiedz M.* Analysis of the thermal properties of a heat flow chip calorimeter using CFD // *Applied Thermal Engineering*. Vol. 96. 2016. P. 508–518.
5. *Koci V., Madera Y., Jerman M., Cerny R.* Computational analysis of heat transport and storage processes in large-volume isothermal heat flow calorimeter // *Applied Thermal Engineering*. Vol. 121. 2017. P. 547–553.
6. *Zasov V.A., Tarabardin M.A., Nikonov E.N.* Algorithms and devices for identifying input signals in problems of control and diagnostics of dynamic objects // *Vestnik SGAU. Samara*. 2009. № 2. P. 115–123. (In Russian).
7. *Tsai J., Ebrahimzadeh F., Hsu W., Tann J.W., Guo Sh., Shieh L., Canelon J.I., Wang L.* Modeling and tracker for unknown nonlinear stochastic delay systems with positive input constraints // *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 40. 2016. P. 10447–10479.
8. *Zou C., Kou K.I.* Robust signal recovery using the prolate spherical wave functions and maximum correntropy criterion // *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 104. 2018. P. 279–289.
9. *Volosnikov A.S.* Neural network dynamic measuring system with additional filtering of the successively restored sensor input signal // *Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. № 4. 2005. P. 139–144. (In Russian).
10. *Vorobyov V.I., Gribunin V.G.* Theory and practice of wavelet transform. SPb: VUS, 1999. 204 p. (In Russian).
11. *Zhang B., Wang D., Ye Y.* Wavelet transform-based frequency tuning ILC // *IEEE Transactions on systems, man and Cybernetics. Part B*, 35(1), 2005. P. 107–114.
12. *Wang Y., Kwon S., Rgan A., Rohlev T.* System identification of the linac RF system using a wavelet method and its applications in the SNS LLRF control system // *Proceedings of the Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001*. P. 1613–1615.
13. *Shahbazzabar D., Alirezaee Sh., Ahmadi M., Heydari R.* A MC-CDMA system based on orthogonal filter banks of wavelet transforms and partial combining // *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*. Vol. 94. 2018. P. 128–138.
14. *Chui C.K., Villiers J., Zhuang X.* Multirate systems with shortest spline-wavelet filters // *Appl. Comput. Harmon. Anal.* Vol. 41. 2016. P. 266–296.
15. *Lu Sh., Yu H., Dong H., Wang X., Sun Y.* Single-step prediction method of burning zone temperature based on real-time wavelet filtering and KELM // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Vol. 70. 2018. P. 142–148.
16. *Sayfulin R.T., Naumov A.A.* Wavelet analysis in signal processing of analytical devices // *Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. T. 18, № 1(2). 2016. P. 412–415. (In Russian).
17. *Rusinov L.A.* Automation of analytical systems for determining the composition and quality of substances. L.: Chemistry, 1984. 160 p. (In Russian).
18. *Manoylov V.V., Novikov L.V.* Reception and processing of information of analytical instruments. SPB: University of ITMO, 2014. – 176 p. (In Russian).
19. *Zhu X., Wang X., Xu Z., Li B.* Analysis on the selection of optimal ADC parameters in indirect measurement // *Infrared Physics & Technology*. Vol. 71. 2015. P. 501–505.
20. *Wijayasundara G.W.C., Lee H., Park S., Cho H., Kim M.* Linearity evaluation of high-speed sampling ADC board // *Measurement*. Vol. 106. 2017. P. 31–34.
21. *Cheng X., Zeng X., Feng Q.* Analysis and improvement of ramp gain error in single-ramp single-slope ADCs for CMOS image sensors // *Microelectronics Journal*. Vol. 58. 2016. P. 23–31.