

потенциально высокой чувствительности измерений с помощью РСД необходимо обеспечить высокую стабильность его параметров с тем, чтобы изменения в интенсивности регистрируемого излучения в несколько долей процента были бы надежно зарегистрированы. Для этого применена комбинированная система стабилизации энергетической шкалы РСД. Система работает со световым репером в процессе измерения и проводит периодическую подстройку светового репера по радиоактивному источнику измерений. Реперные сигналы от радиоактивного источника формируются при регистрации рассеянного гамма-излучения от вспомогательной мишени (ВМ) из SnO<sub>2</sub> в перерывах между измерениями при удалении образца из зоны измерения (рис. 1). Такая организация системы позволяет обеспечить непрерывную стабилизацию коэффициента передачи РСД с квазиабсолютным репером с погрешностью не хуже 0,1%.

**Основные технические характеристики мессбауэровского анализатора касситерита:**

–диапазон измерения концентрации

SnO<sub>2</sub>, вес. % ..... 0,005–40;

– относительная погрешность измерений

в диапазонах:

0,005–0,01 вес. % ..... 30–20%;

0,01–0,05 вес. % ..... 20–5%;

0,05–0,1 вес. % ..... 5–3%;

0,1–10 вес. % ..... < 5%;

10–40 вес. % ..... <10%;  
 – время анализа ..... от 5 с до 3 мин;  
 – масса порошковой пробы ..... 0,03–0,05 кг;  
 – масса / габариты прибора ..... 8 кг / 38×22×15 см;  
 – питание прибора ..... 9÷13 В DC; 6 Вт.

Результаты опытной эксплуатации приборов в полевых условиях показали их высокую надежность, хорошую воспроизводимость результатов при рекордной для физических методов анализа фазового вещества минимально определяемой концентрации оксидного олова.

1. Mossbauer concentratometry as a new analytical method / A. Kholmetskii, O. Misevich, N. Abramchuk e.a. // Nucl. Instr. and Meth. – 1994. – В94. – Р. 493–498.
2. Сравнение производительности измерений детекторов гамма-излучения для элементного и фазового анализа вещества / А. Лобко, О. Мисевич, А. Холмецкий // Приборостроение: материалы 8-й междунар. науч.-техн. конф./ Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 113–114.
3. Детектирование интенсивных потоков мягкого рентгеновского излучения пластическими сцинтилляторами / А. Лобко, О. Мисевич, А. Федоров // XLII Межд. Тулиновская Конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов / под ред. М.И. Панасюка. – М.: Университетская книга, 2012. – С. 57.

УДК 681

**ПРОГРАММНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ЦИФРОВОГО ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДА**

**Колтунович Т.<sup>2</sup>, Костина Г.А.<sup>1</sup>, Пантелеев К.В.<sup>1</sup>, Самарина А.В.<sup>1</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Люблинский технический университет, Люблин, Польша

В данной работе рассмотрены алгоритмы обработки измерительных сигналов цифрового электрометрического зонда в реальном времени с использованием инструкций библиотеки цифрового сигнального процессора DSP (Digital Signal Processor) управляющего микроконтроллера.

Цифровой электрометрический зонд реализует косвенный метод измерения контактной разности потенциалов [1]. Он выполнен на базе управляющего 32-разрядного микроконтроллера семейства STM32F4 с ядром Cortex M4. Основными преимуществами микроконтроллеров данного семейства является набор инструкций DSP, а также модуль операций с плавающей точкой [2], что обеспечивает максимальную производительность и эффективность обработки измерительных сигналов. Косвенный метод измерения заключается в математическом анализе параметров компенсационной зависимости сигнала измерительного динамического конденсатора при фиксированных потенциалах компенсации.

В цифровом электрометрическом зонде полный измерительный цикл состоит из двух последовательных определений амплитуд сигналов при первом и втором фиксированных потенциалах компенсации и последующего вычисления значения контактной разности потенциалов. Вычисления выполняются путем линейной аппроксимации компенсационной зависимости. Для этого внутренний таймер управляющего микропроцессора осуществляет предварительное деление тактовой частоты до величины в 128 раз большей частоты колебаний эталонного образца. Импульсы таймера управляют считыванием записанной в памяти микроконтроллера таблицы синуса (128 точек) и одновременно записывают полученные отсчеты в буфер памяти микроконтроллера. В этом случае амплитуда измерительного сигнала определяется по четырем периодам колебания зонда, что соответствует 512 точкам.

Массив измерительных данных, для ускорения алгоритмов обработки сигнала, может быть

обработан с помощью модулей сигнального процессора DSP в режиме реального времени. Данная библиотека включает широкий набор функций, к числу которых относится пропорционально-интегрально-дифференциальный контроллер PID (Proportional Integral Derivative controller), функции преобразования Фурье, и широкий набор цифровых фильтров, например, 16-битные рекурсивные IIR (Infinite Impulse Response) и нерекурсивные FIR (Finite Impulse Response) фильтры.

Учитывая необходимость регистрации измерительных токов фемтоамперного диапазона и то, что измерительный динамический конденсатор является открытым, он подвержен влиянию различных дестабилизирующих факторов (наводок, паразитных емкостных связей, шумов и др.). Поэтому для выделения и/или подавления определенных частот могут быть задействованы интегрированные в библиотеку DSP инструкции цифровых фильтров FIR и/или IIR.

В цифровом FIR-фильтре DSP используется следующая модель [3]

$$y(n) = \sum_{k=0}^{n-1} h[k]x[n-k], \quad (1)$$

где  $h[k]$  – коэффициент фильтрации,  
 $x[n-k]$  – отсчет  $[n-k]$  входного сигнала;  
 $n$  – порядок фильтра.

В случае IIR-фильтра в формировании выходных отсчетов сигнала учитываются отсчеты измерительного сигнала и выходные отсчеты самого фильтра, т.е.

$$\begin{aligned} y[n] = & b_0x[n] + b_1x[n-1] + \dots \\ & \dots + b_px[n-Q] - a_1y[n-1] - \\ & - a_1y[n-2] - \dots - a_0y[n-Q], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $b_i$  – коэффициент входного сигнала;  
 $a_i$  – коэффициент обратной связи;  
 $P$  – порядок входного сигнала;  
 $Q$  – порядок обратной связи;  
 $x[n]$  – отсчеты входного сигнала;  
 $y[n]$  – выходные отсчеты фильтра.

Выражение (2) может быть записано в следующем виде

$$y(n) = \sum_{i=0}^P b_i[n-i] - a_k h[n-k]. \quad (3)$$

После цифровой фильтрации может быть выполнено быстрое преобразование Фурье (БПФ) и последующий расчет среднеквадратического значения или амплитудного значения спектральной линии сигнала для статистического вычисления амплитуды сигнала.

Быстрые алгоритмы БПФ в библиотеке DSP являются обратимыми, т.е. вычисления по графу

БПФ могут выполняться как слева направо, так и справа налево. В обоих случаях используются модель Butterfly [3]:

– для случая слева направо

$$y[k_1] = x[k_1] + (x[k_2])e^{-j\omega}, \quad (3)$$

$$y[k_2] = x[k_1] - (x[k_2])e^{-j\omega};$$

– для случая «справа-налево»

$$y[k_1] = x[k_1] + x[k_2], \quad (4)$$

$$y[k_2] = (x[k_1] - x[k_2])e^{-j\omega}.$$

Следует отметить, что модель Butterfly в DSP является типовой и используется практически для всех быстрых преобразований.

За счет программной оптимизации и использования функций библиотеки DSP цифровой электрометрический зонд достигает высокой производительности. Такие операции, как умножение с накоплением или аппаратного деления могут быть выполнены за 1–3 машинных такта, что значительно повышает производительность измерений. Например, в случае выполнения БПФ на 514 точек, время преобразования в 16-ти разрядном блоке составляет 362 мкс. Кроме того, производительность вычисления может быть дополнительно повышена путем синхронизации операций суммы и разности операндов. В случае 16-разрядных данных повышение производительности цифровой обработки данных может быть повышена путем применения инструкции SIMD MAC с последующим суммированием. Следует отметить, что операция умножения с накоплением MAC (Multiply-accumulate) является основной для большинства инструкций DSP (имеет следующий вид:  $Y = Y + A \times B$ , где  $Y$ ,  $A$ ,  $B$  – элементы действительных массивов с автоматическим расчетом адресов массивов). Группа команд MAC STM32F4 включает в себя 2 операции 32-битного MAC, 4 операции 16-битного MAC, 7 операций с 8-битными данными. Результаты операций MAC могут быть представлены как в 8-, 16-, 32-битных, так и в 64-битных числах в зависимости от поставленной измерительной задачи: умножение, умножение с накоплением, умножение с накоплением с 64-битным результатом.

1. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А. К. Тявловский, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.
2. STM32F3, STM32F4 and STM32L4 Series Cortex-M4: Programming manual: DocID022708 Rev 5. – 2016. – 260 p.
3. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов: 2-е изд. пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2016. – 656 с.